



HAL
open science

Localisation et caractérisation ultrasonores et acoustiques en environnements complexes

Sandrine T. Rakotonarivo

► **To cite this version:**

Sandrine T. Rakotonarivo. Localisation et caractérisation ultrasonores et acoustiques en environnements complexes. Acoustique [physics.class-ph]. ED 353 Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique, 2023. tel-04162073

HAL Id: tel-04162073

<https://theses.hal.science/tel-04162073v1>

Submitted on 14 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

.....

THÈSE D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Soutenue à Aix-Marseille Université le 15 mars 2023

Sandrine Tahina RAKOTONARIVO

Localisation et caractérisation ultrasonores et acoustiques en environnements complexes

Discipline

SCIENCES POUR L'INGENIEUR : MECANIQUE, PHY-
SIQUE, MICRO ET NANOELECTRONIQUE

Spécialité

Acoustique

École doctorale

ED 353

Laboratoire/Partenaires de recherche

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique UMR
7031
Laboratoire Mistral

Composition du jury

Claire PRADA DR CNRS, Institut Langevin Paris	Rapporteure
Karim SABRA PR, Georgia Tech Inst. Atlanta (USA)	Rapporteur
Emmanuel MOULIN PR, IEMN Valenciennes	Rapporteur
Philippe ROUX DR, ISTERRE Grenoble	Président du jury
Jérôme ANTONI PR, LVA Lyon	Examineur
Earl WILLIAM DR, NRL Washington DC	Examineur
Vincent GARNIER PR, AMU LMA Marseille	Examineur
Pierre-Olivier MATTEI CR HDR, CNRS LMA Marseille	Invité

Résumé

Localisation et caractérisation ultrasonores et acoustiques en environnements complexes

Les travaux de recherches présentés dans ce manuscrit portent sur le développement de méthodes ultrasonores et acoustiques à des fins de localisation de sources (1er axe) et de la caractérisation de structures complexes et d'objets en environnements complexes (2ème axe). Ces recherches ont été menées principalement pour des applications en contrôle non destructif et en acoustique sous-marine. Le développement de méthodes de localisation et caractérisation repose sur la résolution d'un problème de Rapport Signal sur Bruit (RSB) qui peut être maximisé par l'utilisation de dispositifs de mesure peu bruités et comportant le plus possible de capteurs de mesures, ou par des mesures dans un environnement simple, c'est-à-dire isotrope, homogène, infini et peu atténuant. Or dans les différentes applications inspectées dans ces travaux, le RSB est mis à mal car la structure inspectée ou le milieu ausculté sont généralement finis et atténuants, et selon le cas, peuvent être anisotropes (par exemple, soudure multi-passe), réverbérants (guide d'onde marin) et diffus (éprouvette de béton). Dans ce cas, la signature de la source à localiser ou de l'objet à caractériser se trouve masquée par la baisse d'amplitude engendrée par l'atténuation, les possibles déviations de faisceau liées à l'anisotropie ou les interactions multiples de l'onde avec le milieu (réflexion multiples ou réverbération avec les bords du milieu, diffraction et diffusion par des diffuseurs). Par ailleurs, les problèmes inverses de localisation et caractérisation se trouvent affectés par l'accès à une information limitée du milieu du fait de la limitation des prises de mesures pour des raisons de mise en oeuvre expérimentale.

Différentes stratégies reposant sur une approche perturbative ont été adoptées pour localiser une source ou caractériser une structure complexe dans de tels environnements. En présence de connaissances *a priori* suffisantes pour élaborer un modèle numérique du milieu inspecté, une démarche paramétrique basée sur la méthode de l'énergie topologique puis le filtrage adapté est adoptée. Dans le cas contraire (faible niveau d'information *a priori*), la stratégie adoptée est axée sur l'alimentation du problème direct à partir de la mesure en mettant en oeuvre des approches de formation de voies, de filtrage adapté, de corrélation de champ, d'interférométrie ou basée sur les noyaux de sensibilité.

Dans le cadre de mon deuxième volet de recherche sur la caractérisation en milieu diffus, je me suis intéressée notamment à deux problématiques. La première concerne la caractérisation d'un milieu lui-même diffus pour des applications en génie civil pour le suivi et l'évaluation de l'endommagement à un stade le plus précoce possible de structures en béton à partir de l'analyse des moments d'ordre 1 et 2 du champs ultrasonore. Tandis que la deuxième problématique inspectée est celle de la

caractérisation d'un objet élastique rayonnant immergé dans un champ diffus. Dans ce cadre, l'approche repose sur l'analyse de la cohérence entre capteurs combinée à des méthodes d'holographie acoustique.

Abstract

Ultrasonic and acoustic localization and characterization in complex environments

The research work presented in this manuscript concerns the development of ultrasonic and acoustic methods for source localization (1st axis) and the characterization of complex structures and objects in complex environments (2nd axis). These researches have been carried out mainly for non-destructive testing and underwater acoustics applications. The development of methods of localization and characterization is based on the resolution of a problem of Signal to Noise Ratio (SNR) which can be maximized by the use of low noise measurement devices with as many sensors as possible, or by measurements in a simple environment, that is to say, isotropic, homogeneous, infinite and low attenuation. However, in the various applications inspected in this work, the SNR is compromised because the inspected structure or the inspected environment are generally finite and attenuating, and depending on the case, may be anisotropic (e.g., multi-pass welding), reverberant (marine waveguide) and diffuse (concrete specimen). In this case, the signature of the source to be located or the object to be characterized is masked by the drop in amplitude caused by attenuation, possible beam deviations related to anisotropy or multiple interactions of the wave with the medium (multiple reflections or reverberation with the edges of the medium, diffraction and scattering by diffusers). In addition, the inverse problems of localization and characterization are affected by the access to limited information of the medium due to the limitation of measurements for reasons of experimental implementation.

Different strategies based on a perturbative approach have been adopted to localize a source or characterize a complex structure in such environments. In the presence of sufficient *a priori* knowledge to develop a numerical model of the inspected environment, a parametric approach based on the topological energy method and then the matched filtering are examined. In the opposite case of low level of *a priori* information, a data based strategy is adopted for feeding the forward problem with measurements and approaches of beamforming, matched filtering, field correlation, interferometry and sensitivity kernels are implemented.

In the framework of my second research project on characterization in diffuse media, I examined two problematics. The first one concerns the characterization of a diffuse medium for civil engineering applications for the monitoring and evaluation of damage at the earliest possible stage of concrete structures from the analysis of the first and second order moments of the ultrasonic field. While the second problematic concerns the characterization of a radiating elastic object immersed in a diffuse field. In this context, the approach is based on the analysis of the coherence between sensors combined with acoustic holography methods.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iv
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xii
Introduction générale	1
1 Localisation acoustique de sources en milieu complexe par approche perturbative	4
1.1 Introduction	5
1.2 Localisation en milieu anisotrope et réfléchissant avec modélisation du milieu	7
1.2.1 Énergie topologique appliquée à la localisation de défaut en milieu borné	7
1.2.2 Énergie topologique et Matched Field Processing en milieu borné	14
1.2.3 Application à la localisation de défaut dans une soudure	17
1.2.4 Synthèse	18
1.3 Localisation en milieu fluide diffus ou réverbérant sans connaissance a priori	20
1.3.1 Approche perturbative en milieu fluide	22
1.3.2 Localisation en milieu multiplement diffusant par méthode conventionnelle de focalisation (modèle simplifié du milieu)	24
1.3.3 Localisation en milieu réverbérant à partir des noyaux de sensibilité expérimentaux	27
1.3.4 Localisation passive de défaut par corrélation de champ à partir d'un modèle expérimental	32
1.3.5 Synthèse	35
1.4 Approche perturbative pour la localisation de source active en mouvement	36
1.5 Conclusions	40
2 Caractérisation en milieu complexe	43
2.1 Introduction	44
2.2 Caractérisation en milieu élastique multiplement diffusant : béton	45
2.2.1 Exploration de la diffusion multiple dans le béton	46

2.2.1.1	Caractérisation à partir de la diffusivité	49
2.2.1.2	Analyse du pic de réverbération cohérente	51
2.2.2	Diffusion et contact imparfait aux interfaces	52
2.2.2.1	Impact de l'ITZ sur les paramètres cohérents : atténua- tion et vitesse de phase	54
2.2.2.2	Impact de l'ITZ sur les paramètres incohérents : diffusivité	56
2.2.3	Synthèse	58
2.3	Caractérisation passive d'un objet élastique en milieu diffus	60
2.3.1	Réponse <i>in vacuo</i> (matrices d'impédance mécanique ou d'admit- tance mécanique) d'une cible par corrélation de bruit	62
2.3.2	Méthode d'holographie acoustique pour la détermination des matrices d'impédance/admittance mécaniques	66
2.3.3	Synthèse	70
2.4	Caractérisation en milieu anisotrope, atténuant et stratifié	70
2.4.1	Caractérisation sédiments marins	71
2.4.2	Caractérisation de matériaux composites	73
2.5	Conclusions	74
3	Synthèse et Perspectives	79
3.1	Synthèse	79
3.2	Perspectives	81
3.2.1	Caractérisation et Suivi de sources secondaires en mouvement	81
3.2.2	Localisation et caractérisation en milieu diffus	82
	Bibliographie	88
	Annexes	109
A.	Curriculum Vitae	109
B.	Liste des publications et communications scientifiques	117
C.	Sélection d'articles post-thèse	125

Liste des figures

1.1	Diagramme décrivant les différentes étapes pratiques d'application de la méthode de l'énergie topologique (ET) conventionnelle (flèches en noir), de l'ET modifiée (ajout d'étapes supplémentaires décrites en bleu) et de l'ET focalisée (ajout d'une autre étape supplémentaire dans le cadre en orange).	11
1.2	Résultats expérimentaux (2MHz) de la méthode de l'énergie topologique conventionnelle pour localiser un trou de diamètre 1mm et positionné en $X=10\text{mm}$ et $Y=5\text{mm}$ dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) par intégration sur toute la durée du signal, soit 3 trajets aller-retour de l'onde (b) par intégration sur un seul trajet aller-retour de l'onde. La ligne rouge représente l'antenne multi-éléments au contact du bloc d'acier et le défaut est représenté par un cercle blanc.	13
1.3	Résultats expérimentaux (2MHz) de localisation d'un trou de diamètre 1 mm et positionné en $X=10\text{mm}$ et $Y=5\text{mm}$ dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) à partir de la méthode de l'énergie topologique modifiée de diffraction (b) à partir de la méthode de matched field processing (MFP). La ligne rouge représente l'antenne multi-éléments au contact du bloc d'acier et le défaut est représenté par un cercle blanc.	13
1.4	(a) Résultats expérimentaux (2MHz) de localisation d'une entaille de 10 mm de hauteur dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) à partir de la méthode de l'énergie topologique modifiée de diffraction (b) à partir de la méthode de matched field processing (MFP). La ligne rouge représente l'antenne multi-éléments (64 éléments) au contact du bloc d'acier et le défaut est représenté par un trait verticale blanc (figure a) et noir (figure b).	14
1.5	Coupe macrographique de la soudure D717C et orientation des grains.	17
1.6	(a) Distribution de l'insonification ultrasonore simulée dans la soudure D717C sans défaut. (b) Résultat numérique de l'ET modifiée. (c) Résultat expérimental de l'ET modifiée. (d) Résultat expérimental du MFP. Le trait rouge représente la barette de 64 éléments utilisée (2MHz) et le trait noir sur les figures (b) à (d) représente l'entaille débouchante de 0.1 mm d'épaisseur et 15 mm de hauteur.	19

1.7	(a) Distribution de l'insonification ultrasonore simulée dans la soudure D717C sans défaut. (b) Résultat numérique de l'ET modifiée. (c) Résultat numérique du MFP avec les sources internes numériques. (d) Résultat numérique de l'ET modifiée avec les sources internes numériques Le trait rouge représente la barette de 64 éléments utilisée (2MHz), le trait blanc sur les figures (a), (b) et (c) représente l'entaille débouchante de 0.1 mm d'épaisseur et 15 mm de hauteur et le trait pointillé rouge sur les figures (c) et (d) représente la position des sources virtuelles internes.	20
1.8	Illustration géométrique de deux positions de diffuseur pour une paire source-récepteur. Le diffuseur et le récepteur sont positionnés par rapport à la source. Les disques noir et gris représentent les deux positions du diffuseur. L'indice (1) réfère à la position initiale du diffuseur et l'indice (2) à sa position après un petit déplacement δr . La perturbation du champ de pression est calculée à la position moyenne \mathbf{r}_m entre les deux positions du diffuseur.	25
1.9	(a) Photo et (b) Schéma de la forêt de tiges dans laquelle une tige est déplacée afin de créer ue perturbation dans le milieu (P_m).	26
1.10	Application de la méthode d'imagerie de type Delay-And-Sum (a) par sommation cohérente (formulation classique)(b) par sommation incohérente entre capteurs pour localiser une perturbation induite par un déplacement de tige à 50 kHz dans un milieu avec une densité de diffuseurs de 408/m ²	28
1.11	(a) Photo de la cuve réverbérante et (b) Schéma du dispositif expérimental (vu d'en haut)	29
1.12	Signature de la perturbation par différenciation (a) à partir de la décomposition en valeur singulière du signal perturbé (b) par soustraction du signal perturbé par la moyenne du signal perturbé; Comparaison des traces temporelles de la signature du défaut pour (c) l'interaction directe de l'onde avec la cible et (d) les interactions multiples de l'onde avec la cible (coda); (e) Comparaison d'un exemple de noyaux de sensibilité normalisés mesurés et théoriques.	30
1.13	Localisation de 3 cibles (en terme de probabilité relative) à partir des noyaux de sensibilité expérimentaux correspondant (a) aux trajets directs entre source-cible-récepteur et (b) aux trajets multiples entre source-cible-récepteur (interactions multiples perturbation/cuve)	31
1.14	Schéma de la configuration de mesure : 100 capteurs de pression sont disposés autour d'un tube d'aluminium présentant un défaut ponctuel (variation d'impédance) en $\pi/6$. Le tube est sollicité par une champ diffus qui est modélisé ici comme une superposition incohérente d'ondes planes de directions, amplitudes et phases définies aléatoirement.	34
1.15	Comparaison des processeurs de Matched Field Processing (Bartlett, Minimum variance et Minimum variance régularisé avec un gain de bruit blanc de -2 dB) pour localiser un défaut ponctuel localisé en $\pi/6$	35
1.16	(a) Schéma de l'expérience : source harmonique à 49 Hz se déplaçant à vitesse constante dans un guide d'onde sous-marin. Le signal rayonné par la source est mesuré de façon continue par les éléments d'une antenne verticale (VLA) (b) Carte et trajectoire de la source tractée.	39

1.17	(a) Résultat de l'intercorrélation des champs pour différents intervalles de temps (b) Transformée de Fourier de $TF[I_c(\Delta\tau)]$ dans le plan (τ, v) pour différents temps d'acquisition τ et en fonction de la vitesse instantanée de la source par rapport à la position du récepteur. (c) Comparaison entre la distance source/récepteur estimée et mesurée par les données GPS.	40
2.1	Les différents régimes de diffusion	47
2.2	Configuration des milieux simulés (a) sans bords réfléchissants (perfect matched layer) et dimensions 15 cm x 30 cm (b) avec bords libres et dimensions 15 cm x 15 cm	48
2.3	Evolution du rapport moyen des intensités temporelles de cisaillement et de compression apparentes, noté « S/P apparent », à 500kHz pour différents taux de densités de diffuseurs	49
2.4	Le signal mesuré en R pour une source en S provient de la contribution de 2 types d'interaction multiples : la diffusion par les agrégats et la réverbération par les bords.	52
2.5	(a) Les ronds dessinés en gris et en rouge correspondent aux points symétriques par rapport à la source S (point bleu) où une surintensité est mesurée (b) CRE en fonction du taux de diffuseurs pour deux positions de récepteurs, c'est-à-dire variation de l'intensité du pic de réverbération cohérente normalisé par l'intensité incohérente (mesurée en dehors des zones de surintensité)	52
2.6	Modélisation de l'ITZ par l'approche masse-ressort.	53
2.7	Atténuations des ondes P obtenues à partir de simulations numériques pour différents niveaux de contact à 500 kHz - échelle logarithmique sur les axes x et y ; étoiles rouges = valeurs expérimentales d'atténuation (11 Np/m [PA05] , 17 Np/m [Cke08] , 22 Np/m [Cha17] données dans le tableau 2 de la référence [RRPG19])	56
2.8	(a) Vitesse de phase effective estimée à partir des simulations numériques conduites à 500 kHz pour différents niveaux de contact (b) courbe pleine bleue : vitesse de phase effective mesurée pour plusieurs niveaux d'endommagement thermique et normalisée par la vitesse effective de l'éprouvette non endommagée [Cha03] ; courbe pointillée noire : vitesse de phase effective simulée pour différents niveaux de contact normalisée par la vitesse effective simulée pour un $CL= 1250 \text{ m}^{-1}$ (niveau de contact supposé pour un milieu non endommagé)	57
2.9	Disques bleus : diffusivité estimées à partir des mesures ultrasonores sur les 4 éprouvettes de béton sollicités thermiquement (20°C : spécimen « non endommagé » 120°C, 250°C et 400°C : specimens endommagés) ; Étoiles rouges : diffusivité estimées à partir des signaux ultrasonores simulés pour différents niveaux de contact (CL) à l'interface agrégat/matrice cimentaire.	58
2.10	Étoiles rouges : Relation entre le niveau de contact à l'interfaces agrégat/matrice et le niveau d'endommagement thermique ; Carrés verts : Relation entre l'épaisseur de l'ITZ et le niveau d'endommagement pour un module d'Young d'ITZ égal à 10% du module de la matrice cimentaire.	59

2.11	Décomposition du problème de diffraction en fonction des 3 matrices : $\mathbf{Z}_i, \mathbf{Z}_a, \mathbf{Z}_s$, respectivement matrice d'impédance interne, matrice d'impédance de rayonnement et matrice d'impédance mécanique.	63
2.12	Impédance mécanique (Pa s/m) sur 100 points à la surface d'une coque cylindrique atténuante avec un amortissement $\eta_1 = 0.05$ (a) Résultat numérique avec pseudo-inversion de $\langle \mathbf{v}\mathbf{p}^H \rangle$ effectuée avec les 18 plus grandes valeurs propres; (b) Solution analytique utilisant 9 modes.	64
2.13	(a) Photo du dispositif expérimental (b) Amplitude de la matrice d'admittance (c) Phase de la matrice d'admittance	65
2.14	(a) Schéma du dispositif de mesure double couche (b) Positionnement des surfaces de sources équivalentes pour le calcul des champs incident et diffracté.	66
2.15	(a) Auto-admittance au point représenté en rouge sur la partie (b) de cette figure (b) Schéma des 749 points de discrétisation à la surface du cylindre hémisphérique	68
2.16	Réponse bistatique du cylindre à bords hémisphériques dans l'eau pour des récepteurs positionnés à 1m du centre du cylindre et pour une incidence de 60° (a) Résultats simulés (b) Résultats après application de la méthode d'holographie et de corrélation avec un seuil de 25 dB pour l'inversion de Cpp/Cvp.	69
2.17	Plan de situation de la zone de mesures avec le sondeur de sédiment lors de la campagne d'essais TVTB en Juin 2007 par l'IFREMER et de carottage avec le carottier Calypso du <i>Pourquoi Pas ?</i> lors de la mission ESCAROT en mars 2006 [WLA06].	72
2.18	(a) Comparaison du sismogramme mesuré par le sondeur de sédiment (SBP) Echoes 3500 avec le sismogramme reconstruit à partir du jeu de paramètres estimés (b) Comparaison des impédances estimées à partir de la méthode d'inversion développée et des impédances mesurées sur la carotte KESC3-06 [WLA06].	72
2.19	Schéma du dispositif de mesure en mode pulse-écho des ondes de cisaillement. Le transducteur émet dans l'échantillon composite une onde de cisaillement polarisée selon la direction θ définie par le trait rouge sur le transducteur (angle de polarisation θ par rapport à l'axe 1). L'onde réfléchi par la face arrière est mesurée par le même transducteur au même angle de polarisation θ . Les modules de cisaillement hors plan G_{13} et G_{23} sont respectivement mesurés pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$	74
2.20	Schéma des éprouvettes composites tissées (a) saine et (b) endommagée avec l'emplacement respectif du point de mesure. Le repère est tel que les modules de cisaillement G_{13} et G_{23} sont les modules dans la direction 1 (Weft direction) et direction 2 (Warp direction), respectivement.	75
2.21	(a) Variation du coefficient d'atténuation entre les directions 1 et 2 tels que schématisé sur la figure 2.19 pour les plaques composites stratifiées saine et endommagée en fonction de la position de mesure ultrasonore (b) Ratio des modules de cisaillement hors plan $R_g = G_{13}/G_{23}$ et G_{23} pour les plaques composites saines et endommagée en fonction de la position de mesure ultrasonore	76

3.1	Photo du capteur double couche composé de 2 microphones acoustiques meme dénommés « left microphone » et « right microphone »	84
3.2	Supports de capteurs permettant la construction (a) d'une antenne de 24 capteurs bi-couche autour d'un cylindre (b) d'une antenne linéaire de 20 capteurs bi-couche (c) d'une antenne de 92 capteurs positionnés sur des arceaux en rotation autour de l'objet	85

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques du bloc d'acier inoxydable 316L	12
2.1	Caractéristiques physiques des matériaux du béton-modèle	48
2.2	Diffusivités moyennes (sur 10 valeurs) estimées en transmission directe et en rétrodiffusion pour le milieu multiplement diffusant sans bords réfléchissants (20% et 40% de diffuseurs) avec un mortier considéré fluide. L'écart-type est de $4 \text{ m}^2/\text{s}$	51

Introduction générale

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches présente une synthèse de mes activités de recherche suite à ma thèse de doctorat, soutenue en 2009. Avant de rentrer dans le vif du sujet de mes travaux de recherche, voici un bref retour sur mon parcours.

Entre 2005 et 2008, j'ai effectué une thèse CIFRE sur la caractérisation des sédiments marins en collaboration avec le laboratoire STIC basé à Brest de l'ENSTA Bretagne (anciennement laboratoire E³I², EA 3876) et l'entreprise IXBlue sur le site de La Ciotat. Puis, convaincue de vouloir poursuivre dans la voie académique, j'ai intégré pendant une année les fonctions d'ATER au sein de l'IUT GMP d'Aix-En-Provence de l'Université d'Aix-Marseille et au laboratoire LCND d'Aix-En-Provence qui était à l'époque équipe d'accueil EA 3153. Cette expérience m'a permis d'élargir mes compétences scientifiques et techniques aux applications en contrôle non destructif pour le génie civil, et de me rendre compte que les problématiques scientifiques et techniques entre les applications en contrôle non destructifs et en acoustique sous-marine étaient identiques. Puis, à l'automne 2009, j'ai saisi l'opportunité d'effectuer une expérience de chercheuse en tant que post-doctorante aux États-Unis au Marine Physical Laboratory (MPL) du Scripps Institution of Oceanography, UCSD San Diego. Durant les 4 années passées au MPL, j'ai ainsi pu renforcer mon expertise scientifique et technique dans le développement de méthodes de caractérisation pour des applications en acoustique sous-marine mais aussi en vibro-acoustique, et de développer de nouvelles compétences dans le développement de méthodes de localisation en milieu aérien et marin. Cette expérience au MPL a été très enrichissante aussi bien sur le plan professionnel que personnel. C'est à cette période que j'ai commencé à prendre quelques responsabilités (suivi des dispositifs expérimentaux du laboratoire d'essai), à superviser des étudiants de master dans le cadre de leur projet de fin d'étude et à initier la recherche de subventions. Ayant toujours eu un goût prononcé pour l'enseignement, ce post-doctorat a aussi été l'occasion d'enseigner des cours en anglais. L'année 2013 a marqué mon retour en France avec mon recrutement en tant que maîtresse de conférences (MCF) section 60 à l'Université d'Aix-Marseille et au laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) de Marseille dans l'équipe « Ondes et Imagerie ». Cela fait maintenant 8 ans que j'exerce les fonctions de MCF à l'université d'Aix-Marseille et au LMA. Cette période a été entrecoupée par un séjour de 1 an aux États-Unis au MPL du Scripps Institution of Oceanography (UCSD San Diego) en tant que chercheuse invitée dans le cadre d'un congé pour recherches ou conversions thématiques (CRCT) de 6 mois et une délégation de 6 mois.

Tout au long de mon parcours, mes activités de recherche se sont articulées principalement autour de la problématique suivante : développer des méthodes acous-

tiques et ultrasonores robustes pour la localisation et la caractérisation de structures complexes et d'objets en environnement complexe. Ces travaux de recherche ont fait l'objet de collaborations scientifiques aussi bien académiques qu'industrielles sur les plans national et international. Mon approche, à forte composante expérimentale, est basée :

1. sur la compréhension des phénomènes physiques en jeu (diffusion, atténuation, réverbération, anisotropie, etc. . . .) et de leur interaction avec la configuration de mesure par l'utilisation de modèles analytiques et numériques, et par la mise en place d'expériences en milieu contrôlé en laboratoire,
2. sur l'utilisation de techniques de traitement du signal et traitement d'antenne en accord avec la modélisation des phénomènes physiques en jeu déterminée à l'étape précédente (filtrage adapté, méthodes adjointes, retournement temporel, analyse temps-fréquence, etc. . . .) ,
3. sur la validation expérimentale des méthodes de détection, localisation et/ou caractérisation proposées sur des données acquises en laboratoire et sur le terrain.

Le premier axe de recherche, présenté dans le chapitre 1, réside dans le développement de méthodes de localisation de sources localisées en environnement complexe principalement pour des applications en contrôle non destructif et acoustique sous-marine. Le développement de méthodes de localisation est tout d'abord un problème de Rapport Signal sur Bruit (RSB) qui peut être maximisé par l'utilisation de dispositifs de mesure peu bruités et comportant le plus possible de capteurs de mesures, ou par des mesures dans un environnement simple, c'est-à-dire isotrope, homogène, infini et peu atténuant. Or dans les différentes applications inspectées dans ces travaux, le RSB est mis à mal car la structure inspectée ou le milieu ausculté sont généralement finis et atténuants, et selon le cas, peuvent être anisotropes (par exemple, soudure multi-passe), réverbérants (guide d'onde marin abordé) et diffus (éprouvette de béton). Dans ce cas, la signature de la source à localiser se trouve masquée par la baisse d'amplitude engendrée par l'atténuation, les possibles déviations de faisceau liées à l'anisotropie ou les interactions multiples de l'onde avec le milieu (réflexion multiples ou réverbération avec les bords du milieu, diffraction et diffusion par des diffuseurs). Par ailleurs, le problème inverse de localisation se trouve affecté par l'accès à une information limitée du milieu du fait des contraintes de mise en oeuvre expérimentale.

Le chapitre 1 présente les différentes stratégies adoptées pour localiser une source dans de tels milieux. Toutes les méthodes proposées reposent sur une approche perturbative. En présence de connaissances *a priori* suffisantes pour élaborer un modèle numérique du milieu inspecté, une démarche paramétrique basée sur la méthode de l'énergie topologique puis le filtrage adapté est adoptée. Dans le cas contraire (faible niveau d'information *a priori*), la stratégie adoptée est axée sur l'alimentation du problème direct à partir de la mesure en mettant en oeuvre des approches de formation de voies, de filtrage adapté, de corrélation de champ, d'interférométrie ou basée sur les noyaux de sensibilité.

Le deuxième axe de recherche abordé dans le chapitre 2 concerne la caractérisation de structures complexes ou d'un objet élastique en environnement complexe. Les difficultés énoncées plus haut sur les difficultés engendrées par la présence d'anisotropie, atténuation, réverbération et, diffusion et diffraction multiples sur le RSB s'appliquent également ici. La majorité de mes activités sur ce deuxième volet portent principalement

sur la caractérisation en milieu diffus. Ainsi ces travaux sont davantage développés dans le manuscrit. Je me suis intéressée à deux types de problématiques :

- l'une liée à la caractérisation d'un milieu lui-même diffus pour des applications en génie civil pour le suivi et l'évaluation de l'endommagement à un stade le plus précoce possible de structures en béton. La démarche est basée sur l'examen de moments d'ordre 1 (moyenne) et d'ordre 2 (intensité) du signal pour différents régimes de diffusion. Les évolutions de l'atténuation, la vitesse de phase et le paramètre de diffusivité sont entre autre étudiées en fonction du pouvoir diffusant du milieu et à partir d'une description numérique du béton par des diffuseurs discrets et comprenant aussi un modèle d'interface entre les granulats et la matrice cimentaire.
- L'autre problématique est liée à la caractérisation d'un objet élastique immergé dans un champ diffus par holographie acoustique pour des applications en acoustique-sous marine avec des ouvertures vers le contrôle de structures. La démarche consiste à estimer la réponse intrinsèque de la cible élastique, c'est-à-dire sa matrice d'impédance ou d'admittance mécanique de surface à partir de mesures sur une antenne holographique, évitant ainsi le recours à des simulations numériques qui nécessitent de connaître les propriétés interne de l'objet inspecté. Toutefois, plusieurs challenges scientifiques et expérimentaux demeurent tels que l'élaboration d'un dispositif de mesure sans contact adéquat, l'estimation des champs en surface à partir de mesures sans contact ou de données ayant un faible rapport signal sur bruit. Ces différents points ont été examinés dans le cadre de mes travaux de recherche.

Ensuite, la fin du chapitre 2 présente les méthodes paramétriques proposées pour caractériser des structures stratifiées, anisotropes, atténuantes soit dans le cadre de l'identification de sédiments marins et le contrôle de plaques composites. La présentation de ces travaux demeure succincte car ils ne représentent qu'une petite part de mes activités de recherche.

Enfin, un bilan synthétique et mes perspectives de recherche sont dressés dans le chapitre 3. L'Annexe A fournit un curriculum vitae précisant le détail de mes activités pédagogiques et collectives, puis une liste complète de publications est donnée en Annexe B ainsi qu'une sélection d'articles de mes publications post-thèse en Annexe C.

Chapitre 1

Localisation acoustique de sources en milieu complexe par approche perturbative

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Localisation en milieu anisotrope et réfléchissant avec modélisation du milieu	7
1.2.1	Énergie topologique appliquée à la localisation de défaut en milieu borné	7
1.2.2	Énergie topologique et Matched Field Processing en milieu borné	14
1.2.3	Application à la localisation de défaut dans une soudure	17
1.2.4	Synthèse	18
1.3	Localisation en milieu fluide diffus ou réverbérant sans connaissance a priori	20
1.3.1	Approche perturbative en milieu fluide	22
1.3.2	Localisation en milieu multiplement diffusant par méthode conventionnelle de focalisation (modèle simplifié du milieu)	24
1.3.3	Localisation en milieu réverbérant à partir des noyaux de sensibilité expérimentaux	27
1.3.4	Localisation passive de défaut par corrélation de champ à partir d'un modèle expérimental	32
1.3.5	Synthèse	35
1.4	Approche perturbative pour la localisation de source active en mouvement	36
1.5	Conclusions	40

1.1 Introduction

La localisation de sources par moyens acoustiques ou ultrasonores est une problématique commune à plusieurs disciplines touchant des applications variées telles que l'imagerie médicale pour la localisation de tumeur, l'imagerie sismique dans la localisation de foyers sismiques, l'imagerie acoustique sous-marine pour localiser des sous-marins ou dans le cadre d'applications industrielles dans les secteurs de l'automobile, l'aéronautique, le génie civil ou le nucléaire pour le contrôle non-destructif et le suivi de l'état de santé des structures.

Ces travaux de recherche s'intéressent tout particulièrement au développement de méthodes de localisation acoustique et ultrasonore dans le contexte de l'acoustique sous-marine et celui du contrôle et suivi non destructif de structures. Ce travail vise à localiser deux types de sources :

- les **sources qualifiées d'actives** ; ces sources génèrent et rayonnent elles-même le champ sonore ou ultrasonore. Ces dernières peuvent être des haut-parleurs, des projecteurs ultrasonores, des sonars, des humains qui parlent, des impacts par un marteau, etc...
- Et les **sources qualifiées de secondaires** qui ne génèrent pas directement un champ acoustique ou ultrasonore mais vont introduire une diffraction acoustique/ultrasonore en sus du champ qui serait produit si ces sources secondaires étaient absentes. Ce type de sources correspond par exemple au cas d'un défaut local dans une structure tel qu'un trou ou d'une variation locale de ses propriétés. En effet, un défaut local ne génère pas directement un champ sonore comme un projecteur ultrasonore mais va engendrer un champ diffracté par rapport au cas sans défaut. En ce sens, le défaut agit comme une source que l'on cherche à localiser et caractériser. La majeure partie de ces travaux traitent de la localisation de ce type de source secondaire.

De manière générale, les performances (robustesse et résolution) des méthodes de localisation sont principalement impactées par le rapport signal sur bruit (RSB) de la(les) source(s) (active(s) ou secondaire(s)) que l'on souhaite détecter et localiser. Or, ce rapport signal sur bruit devient plus faible dans le cas de milieux complexes tels que des environnements atténuants, réverbérants, multiplement diffus et/ou anisotropes. Dans ces cas, le rayonnement d'une source active ou la diffraction d'une source secondaire peuvent être masqués par les interactions multiples dans le milieu.

Classiquement, l'emploi de plusieurs récepteurs couplés aux méthodes de traitement d'antennes permet d'opérer un filtrage spatial en réhaussant le RSB de la source à localiser. Dans le cas de milieux homogènes ou inhomogènes à faible contraste d'impédance où l'approximation de Born demeure valide, les méthodes conventionnelles de formation de voies (beamforming), focalisation en tout point ou méthode de Delay-and-Sum [JD92 ; Jr15] permettent de localiser efficacement une source présentant un faible RSB. Dans des milieux plus complexes, tels que ceux abordés dans ces travaux (réverbérants, multiplement diffus ou anisotropes), et dans lesquels l'approximation de Born ou d'interaction simple n'est pas nécessairement respectée, ces approches trouvent leurs limites en terme de performance qui s'en trouve d'autant plus affectée par la méconnaissance des propriétés du milieu.

Les travaux présentés dans ce premier chapitre rentrent dans ce cadre et proposent des méthodes alternatives de localisation et suivi de sources en milieux

réverbérants, diffusants ou anisotropes par approche perturbative et en appliquant des méthodes d'inversion exploitant au mieux les informations *a priori* sur les propriétés du milieu de propagation.

La stratégie employée est très similaire, que ce soit pour la localisation et le suivi de sources actives ou secondaires. Dans le cas de sources secondaires, mes travaux de recherche se focalisent sur la localisation de variations locales des paramètres du milieu, tandis que le problème de localisation de source active considérée ici est celui d'une source en mouvement dans un environnement réverbérant. L'approche perturbative est ainsi appliquée par analyse de 2 états successifs du milieu correspondant soit à une variation des propriétés du milieu soit à une variation de position de source active. L'extraction de cette variation peut être vue comme un filtrage préalable des données mesurées aux récepteurs afin d'isoler autant que possible la signature de la source. Cette étape peut être réalisée de manière immédiate par simple opération de soustraction [RWKR11b] ou encore par corrélation [Sni06 ; LPRM10 ; RK12b], par décomposition en valeur singulière [TZL15], double différence [WE05] ou de façon itérative [OFB09]. Alternativement, en milieu diffusant, la méthode de décomposition de l'opérateur de retournement temporel (méthode DORT) permet de sélectionner la signature du diffuseur le plus important [PMSF05] tandis que la théorie des matrices aléatoires [AD07] est appliquée pour extraire la signature des diffuseurs simples. En l'absence de modèle paramétrique déterministe, une approche statistique par apprentissage statistique [AMH17] peut être employée pour extraire cette variation. Quelle que soit la méthode employée pour extraire la signature de la variation, celle-ci repose sur la connaissance ou la mesure d'un état ou de paramètres de référence à partir duquel est extraite la signature de la source. Le choix de cette référence est loin d'être anodine. Elle peut être déterminée analytiquement, numériquement ou expérimentalement en fonction des informations *a priori* et des configurations de mesures expérimentales.

Ce premier chapitre 1 présente les travaux de recherche engagés pour la localisation de sources selon l'approche perturbative. En fonction des informations *a priori* du milieu sondé et des conditions expérimentales, j'ai employé différentes stratégies. La partie 1.2 présente les travaux développés dans le cas où la connaissance des paramètres du milieu permet d'inverser les données à partir d'une modélisation numérique du milieu. La section 1.3 expose des méthodes de localisation de sources alternatives à celles présentées en section 1.2 en l'absence de modélisation fine du milieu pour différentes applications en acoustique physique et acoustique sous-marine. Ensuite, la méthodologie pour localiser une source active en mouvement est discutée séparément dans la section 1.4 car l'approche de perturbation employée est sensiblement différente. Enfin, ce chapitre se termine dans la partie 1.5 par une discussion et synthèse sur les méthodes développées.

1.2 Localisation en milieu anisotrope et réfléchissant avec modélisation du milieu

Publication associées [A8], [A10]

[CI8], [CI9], [CI10], [CI13],[CI14]

Collaborations LMA : S. Mensah, J-F. Chaix, E. Lubeigt, K. Metwally

G. Corneloup, C. Gueudré, M-A. Ploix

CEA Cadarache : F. Baqué, G. Gobillot

EDF, Chatou : B. Chassignole

Projets/contrats associés [C2]

Cette section présente les méthodes développées en présence d'informations sur les paramètres du milieu et pour une application en contrôle non destructif : la localisation de défaut dans les soudures. Pour ces travaux, les défauts analysés sont des trous ou des entailles afin de progresser dans la localisation de la partie ouverte d'une fissure et donc l'analyse uniquement de la contribution linéaire d'une fissure sur le champ ultrasonore. L'analyse des effets non linéaires d'une fissure [PQG+13] sortent du cadre de ces travaux. Nous disposons de coupes macrographiques des soudures et d'informations sur les paramètres mécaniques qui ont rendu possible la modélisation numérique du champ propagé dans la soudure et l'emploi de la méthode de l'énergie topologique [Dom06] puis du Matched Field Processing [BKM93] et l'extraction de la variation par différenciation entre deux états successifs du milieu.

Toutefois, comme il s'agit d'un milieu à fort contraste d'impédance (bords libres au niveau des frontières), l'approximation de Born par le terme d'ordre 1 n'est pas vérifiée pour des variations de paramètres proches du bord et des défauts de type entaille. Or, la méthode de l'énergie topologique [Dom06] repose sur cette approximation de Born. Ainsi, dans le cadre de mes activités de recherche et de la thèse d'Emma Lubeigt que j'ai co-encadrée (collaboration CEA-LMA, 2014 - 2017) en collaboration avec les collègues du LMA (S. Mensah, J.-F. Chaix) et du CEA (F. Baqué et G. Gobillot), une version modifiée de la méthode de l'énergie topologique a été proposée. Cette dernière est présentée dans la section 1.2.1. Ensuite, toujours dans le cadre de la thèse d'Emma Lubeigt, nous avons testé le pendant fréquentiel de l'énergie topologique, le Matched Field Processing, pour la détection de défaut en milieu borné (partie 1.2.2). Puis, les deux approches ont été appliquées à la localisation de défaut dans une soudure multipasse (section 1.2.3). Les approches développées dans ce cadre sont discutées dans la conclusion 1.2.4.

1.2.1 Énergie topologique appliquée à la localisation de défaut en milieu borné

La méthode de l'énergie topologique est une déclinaison de l'optimisation topologique [EKS94 ; BS03 ; GGM03] basée sur les méthodes itératives de migration par retournement temporel ou méthodes adjointes appliquées en tomographie. L'optimisation topologique consiste à optimiser la forme d'une structure vis-à-vis de critères mécaniques tels que le poids ou la résistance. En milieu élastique et dans le cas d'une minimisation de poids, ceci se traduit par la minimisation d'une fonction de coût entre les déplacements observés, $\mathbf{u}_{obs}(\mathbf{r}_r, t)$, et simulés, $\mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)$, aux récepteurs en \mathbf{r}_r pour une forme donnée

Γ ,

$$J(\Gamma(\mathbf{r})) = \int_0^T \sum_{r=1}^{N_r} \frac{1}{2} \|\mathbf{u}_{obs}(\mathbf{r}_r, \Gamma_{obs}, t) - \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, \Gamma(\mathbf{r}), t)\|^2 dt, \quad (1.1)$$

où Γ_{obs} désigne la forme (les frontières) de l'objet à optimiser avant introduction d'un trou B (qui correspond à un retrait de matière et permet ainsi de représenter un défaut de type entaille) tandis que Γ correspond à la forme de l'objet après variation de cette dernière par introduction d'un trou B). Pour résoudre ce type de problème, une approche itérative de perturbation est adoptée permettant ainsi d'utiliser une forme perturbée linéarisée de la fonction de coût (1.1). Ainsi, d'une itération à une autre, des petites variations (=petite extension locale) de forme sont considérées. Dans le contexte de la localisation de défauts locaux tels que trous ou fissures, une seule itération sur la fonction de coût est examinée,

$$J[(\Gamma(\mathbf{r}) + \delta\Gamma(\mathbf{r}))] = J[\Gamma(\mathbf{r})] + f(\epsilon)g(\Gamma(\mathbf{r})) + \mathcal{O}(f(\epsilon)), \quad (1.2)$$

où $f(\epsilon)$ réfère à l'échelle ou amplitude de variation induite par l'introduction d'un trou de rayon ϵ tandis que $g(\Gamma(\mathbf{r}))$ est le gradient topologique [Bon06 ; TTG13 ; BBC13] analogue à la dérivée de Fréchet vis-à-vis d'une variation infinitésimale de forme et qui s'exprime selon

$$g(\Gamma(\mathbf{r})) = \frac{\partial J(\Gamma(\mathbf{r}))}{\partial \Gamma}. \quad (1.3)$$

L'idée générale est de déterminer à quelle position du milieu \mathbf{r} la fonction $J[(\Gamma(\mathbf{r}) + \delta\Gamma(\mathbf{r}))]$ varie par rapport à $J[\Gamma(\mathbf{r})]$ afin d'indiquer la présence d'un trou infinitésimal et donc d'un défaut. L'absence de variation $\delta J[\Gamma(\mathbf{r})] = J[(\Gamma(\mathbf{r}) + \delta\Gamma(\mathbf{r}))] - J[\Gamma(\mathbf{r})]$ en \mathbf{r} signifie ainsi l'absence de défaut. Ceci correspond à la définition (1.3) du gradient topologique $g(\Gamma(\mathbf{r}))$. On s'intéresse ainsi à ce terme pour déterminer en chaque position \mathbf{r} la présence ou l'absence d'une variation infinitésimale de forme, témoin d'un éventuel défaut. La dérivation de la fonction de coût (1.1) en fonction d'une variation infinitésimale de forme donne

$$g(\Gamma(\mathbf{r})) = \int_0^T \sum_{r=1}^{N_r} \Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t) \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, \Gamma(\mathbf{r}), t)}{\partial \Gamma} dt, \quad (1.4)$$

où $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)$ est la variation $\mathbf{u}_{obs}(\mathbf{r}_r, \Gamma_{obs}, t) - \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, \Gamma, t)$ mesurée aux récepteurs entre 2 états du milieu, Γ_{obs} et Γ ; et le facteur $\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, \Gamma(\mathbf{r}), t)}{\partial \Gamma}$ est appelé noyau de sensibilité topologique (car défini pour une variation de forme) et permet de relier une variation de forme du milieu à la variation induite sur le déplacement mesuré aux récepteurs dans le cas linéaire. Les noyaux de sensibilité peuvent être définis pour des paramètres autres que la variation de forme tels que la célérité, la densité ou les paramètres de Lamé [TTL05]. Comme nous le verrons plus loin (paragraphe 1.3.3), ils peuvent aussi être utilisés à des fins de localisation.

Pour déterminer une expression du gradient topologique, une hypothèse importante est faite : *on suppose que la variation de forme, dénotée $\delta\Gamma$, et la variation produite sur le champ de déplacement mesuré aux récepteurs $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)$ sont reliés par un opérateur linéaire.* De façon schématique et non rigoureuse, ceci reviendrait à dire que $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t) = \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)}{\partial \Gamma(\mathbf{r})} \delta\Gamma(\mathbf{r})$. Cette hypothèse signifie que *toute interaction multiple entre la perturbation et le milieu est négligée.* Ceci est équivalent à la prise en compte

uniquement du terme d'ordre 1 dans l'expression du champ selon l'expansion de Born ([Tar88] et équations (1.33) et (1.36) pour le cas fluide).

Moyennant quelques développements mathématiques, le gradient topologique revêt différentes expressions selon les conditions aux limites au niveau du trou [GGM03; Dom06] et s'exprime comme suit dans le cas d'une inclusion de type Neumann en milieu élastique homogène infini [TTG13],

$$g(\Gamma(\mathbf{r})) = \int_0^T \{ \sigma[\mathbf{v}](\mathbf{r}, T-t) \cdot (\mathcal{A} : \sigma[\mathbf{u}](\mathbf{r}, t)) + \rho \dot{\mathbf{v}}(\mathbf{r}, T-t) \cdot \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{r}, t) \} dt, \quad (1.5)$$

où \mathcal{A} désigne le tenseur de polarisation dépendant de la géométrie de l'inclusion [TTG13] et σ correspond au tenseur de contrainte. Suivant le même formalisme, [BDBD13] dérive le gradient topologique en milieu élastique anisotrope. On note que l'expression (1.5) fait intervenir le produit de convolution entre des termes liés au champ direct $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ et le champ adjoint $\mathbf{v}(\mathbf{r}, T-t)$. En milieu élastique anisotrope, le champ adjoint est solution du problème adjoint qui équivaut à rétropropager le résidu mesuré aux capteurs dans le milieu,

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma[\mathbf{v}](\mathbf{r}, t) - \rho \ddot{\mathbf{v}}(\mathbf{r}, t) &= 0 \quad \mathbf{r} \in \Gamma, V \\ \mathbf{n} \cdot \sigma[\mathbf{v}](\mathbf{r}, t) &= W(t) \Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}, T-t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_r) \quad \mathbf{r} \in S_r \\ &+ \text{conditions aux limites de Dirichlet sur } S/S_r. \end{aligned} \quad (1.6)$$

L'expression (1.5) donne l'expression exacte de la dérivée de Fréchet lorsqu'un trou infinitésimal est introduit (gradient topologique). L'introduction d'un défaut peut aussi être vu comme une variation locale de paramètres. Dans ce cas, sous les mêmes hypothèses d'interaction unique entre la perturbation et le milieu, les dérivées de Fréchet déterminées par méthodes adjointes pour une variation de paramètre m en milieu élastique anisotrope s'écrivent sous la forme générale [Fic09; Lub17],

$$g(m(\mathbf{r})) = \int_0^T \Omega_m \mathbf{v}(\mathbf{r}, T-t) \cdot \Omega_m \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) dt, \quad (1.7)$$

où Ω_m est un opérateur différentiel associé au paramètre m considéré dont les expressions respectives associées par exemple à la densité ou l'impédance caractéristique du milieu (en l'absence de variation de densité et $Z = \rho c$) sont [Mor87],

$$\Omega_\rho = \frac{\partial}{\partial t}, \quad (1.8)$$

$$\Omega_Z = \nabla \cdot, \quad (1.9)$$

où l'opérateur $\nabla \cdot$ désigne l'opérateur divergence. Sous l'hypothèse d'isotropie, les composantes du tenseur d'élasticité s'écrivent

$$c_{ijkl} = \lambda_l \delta_{ij} \delta_{kl} + (\mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad (1.10)$$

et on peut ainsi exprimer l'opérateur différentiel en fonction du premier et second

coefficient de Lamé [Mor87],

$$\Omega_{\lambda_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad (1.11)$$

$$\Omega_{\mu} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\delta_{jk} \frac{\partial}{\partial x_i} + \delta_{ji} \frac{\partial}{\partial x_k} \right). \quad (1.12)$$

On note des analogies entre les termes du gradient topologique (1.5) et les gradients associés à la densité, l'impédance et aux paramètres de Lamé ((1.7) - 10). La différence majeure venant du contraste d'impédance infini considéré dans le gradient topologique et qui n'est bien sûr pas pris en compte dans la formulation du gradient pour une petite variation de c_{ijkl} . Dans l'absolu, l'expression (1.7) est celle qui se rapproche le plus de la variation engendrée par un défaut de type trou ou fissure. Toutefois, dans le contexte pratique de la localisation de défaut, une formulation simplifiée et heuristique de (1.5) est employée pour définir l'énergie topologique [DG10]

$$ET(\mathbf{r}) = \int_0^T |\Omega_m \mathbf{v}(\mathbf{r}, T - t)| |\Omega_m \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)| dt. \quad (1.13)$$

L'emploi des valeurs absolues dans l'expression (1.13) permet de gagner en robustesse face au bruit de structure et aux variations de phases mais la résolution est dégradée par rapport à une sommation cohérente sur le temps d'intégration. Par ailleurs, le trou est approximé comme un contraste d'impédance de telle sorte que $\Omega_m = \nabla \cdot$. Cette approximation est également justifiée par le fait que ces travaux considèrent les ondes de compression. Comme il s'agit d'une approximation, il n'est donc pas possible de déterminer quantitativement l'ampleur de la perturbation. Toutefois, la formule (1.13) renseigne sur l'extension spatial d'un défaut. Des études précédentes [Lub17] montrent que les ondes de compression (et donc l'étude du gradient du champ de déplacement) présentent une bonne sensibilité vis-à-vis des variations du milieu. Comme illustré sur la figure 1.1, la mise en oeuvre pratique de la méthode de l'énergie topologique conventionnelle (dénotée ET conventionnelle) pour localiser un défaut local consiste à comparer 2 états du milieu avec 1 mesure ou 1 simulation de référence $\mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)$ du signal ultrasonore mesuré aux récepteurs en \mathbf{r}_r avant occurrence de la perturbation et 1 mesure dans le milieu perturbé $\mathbf{u}_{obs}(\mathbf{r}_r, t)$. Le résidu $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{r}_r, t)$ au niveau des récepteurs est ensuite calculé par différenciation, puis rétropropagé numériquement dans le milieu de référence pour déterminer le champ adjoint $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ en tout point \mathbf{r} de la structure inspectée. De même, le champ direct $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ est calculé en tout point \mathbf{r} du milieu de référence (non perturbé) et le résultat de l'ET conventionnel est déterminé selon l'expression (1.13). Le résultat de l'ET est ensuite normalisé et affiché selon

$$B_{ET}(\mathbf{r}) = 10 \log_{10} [ET(\mathbf{r}) / \max(ET(\mathbf{r}))] \quad (1.14)$$

afin d'obtenir une image en dB analogue à une surface d'ambiguïté et renseignant sur la probabilité d'occurrence d'une perturbation (cf. image obtenue avec l'ET conventionnelle sur le diagramme de la figure 1.1).

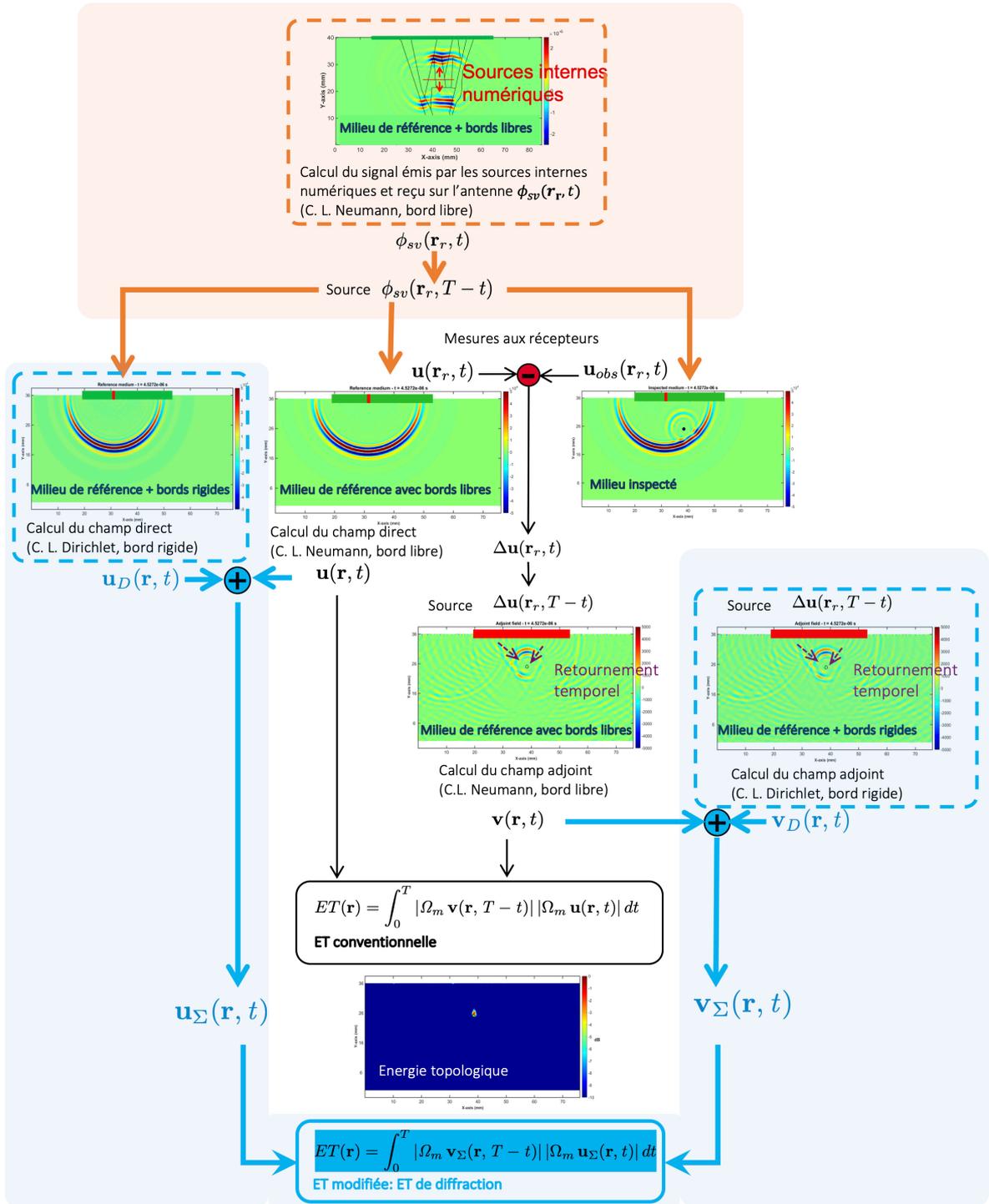


Figure 1.1 – Diagramme décrivant les différentes étapes pratiques d'application de la méthode de l'énergie topologique (ET) conventionnelle (flèches en noir), de l'ET modifiée (ajout d'étapes supplémentaires décrites en bleu) et de l'ET focalisée (ajout d'une autre étape supplémentaire dans le cadre en orange).

L'énergie topologique conventionnelle, dans des variantes sensiblement différentes, a été appliquée pour le contrôle de plaques à partir des ondes guidées [RDCD14; RVC+14], pour l'imagerie de fantômes biologiques [Sah12]. De plus, une version pour permettre un calcul rapide a également été développée [RSGJ12]. Dans ces travaux, il est

Dimensions	$38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$
Densité	7942 kg/m^3
Célérité des ondes L	5719 m/s
Célérité des ondes S	3137 m/s

Tableau 1.1 – Caractéristiques du bloc d’acier inoxydable 316L

montré que les échos multiples dégradent l’image de l’énergie topologique. Or, pour des défauts proches des bords, l’approximation d’interaction simple entre la perturbation et le milieu n’est plus valable. Ce point est illustré sur la figure 1.2 où l’ET conventionnelle est appliquée pour localiser un défaut de type trou traversant (diamètre 1mm) positionné à 5 mm et 10 mm des bords d’un bloc d’acier isotrope homogène (propriétés du bloc données dans le tableau 1.1). Cette situation est sujette aux réflexions multiples entre les bords du bloc et le trou. La barrette utilisée est une antenne linéaire constituée de 64 éléments et le signal d’émission pour la mesure initiale des signaux ultrasonores aux récepteurs est une impulsion électrique de fréquence centrale 2MHz avec une bande passante à -3dB variant de 1.45 MHz à 2.7 MHz. La figure 1.2a montre que les performances de l’approche de l’énergie topologique conventionnelle sont grandement dégradées et la méthode ne parvient pas à localiser un défaut de type trou proche du bord lorsque la formule (1.13) est appliquée sur toute la durée d’acquisition du signal (soit 3 aller-retours). Afin de limiter les dégradations apportées par les interactions multiples entre défaut et bords, une première solution simple et intuitive consiste à calculer l’ET conventionnelle sur une fenêtre d’intégration T réduite (équ. (1.13)) qui doit contenir au minimum 1 aller-retour (pour être assuré d’inspecter toute la profondeur de la pièce). Dans ce cas, on note que le résultat de l’ET conventionnelle (figure 1.2b) est amélioré d’un point de vue rapport signal sur bruit mais le maximum d’énergie n’est toujours pas positionné à l’emplacement du trou (localisation du défaut non achevée).

Dans [LMR+17b], nous proposons une approche modifiée de l’énergie topologique afin de surpasser cette limitation. La première modification apportée dans ces travaux (cf. figure 1.1 où les étapes supplémentaires sont représentées en bleu) consiste à déterminer numériquement 2 champs supplémentaires : le champ direct $\mathbf{u}_D(\mathbf{r}_r, t)$ et le champ adjoint $\mathbf{v}_D(\mathbf{r}_r, t)$ avec des conditions aux frontières sur la surface inférieure de types Dirichlet (bords rigides à l’inverse du cas réel avec conditions aux frontières de type Neumann/bords libres). La sommation des deux champs directs (resp. adjoints) avec les conditions aux frontières de Dirichlet et Neumann permet ensuite de calculer respectivement 2 nouveaux champs, direct $\mathbf{u}_\Sigma(\mathbf{r}, t)$ et adjoint $\mathbf{v}_\Sigma(\mathbf{r}, t)$, qui vont permettre de déterminer l’énergie topologique selon la même formule (1.13). Par rapport à l’application de l’ET conventionnelle avec un fenêtrage réduit dans la durée d’intégration (variable T de l’équation (1.13) plus petite), cette approche a l’avantage de considérer des frontières de formes quelconques pour supprimer les artefacts liés à l’ombre du trou ayant interagit selon un nombre pair avec les frontières. Cette remarque est illustrée sur les figures 1.2b et 1.3a où l’on note que les performances de localisation du trou sont nettement améliorées en terme de RSB pour l’ET modifiée sur toute la durée du signal acquis (figure 1.3a) par rapport à l’ET conventionnelle avec une fenêtre d’intégration réduite (figure 1.2b). Dans ce cas, l’ET modifiée dont la procédure est décrite sur figure 1.1 parvient à localiser le défaut.

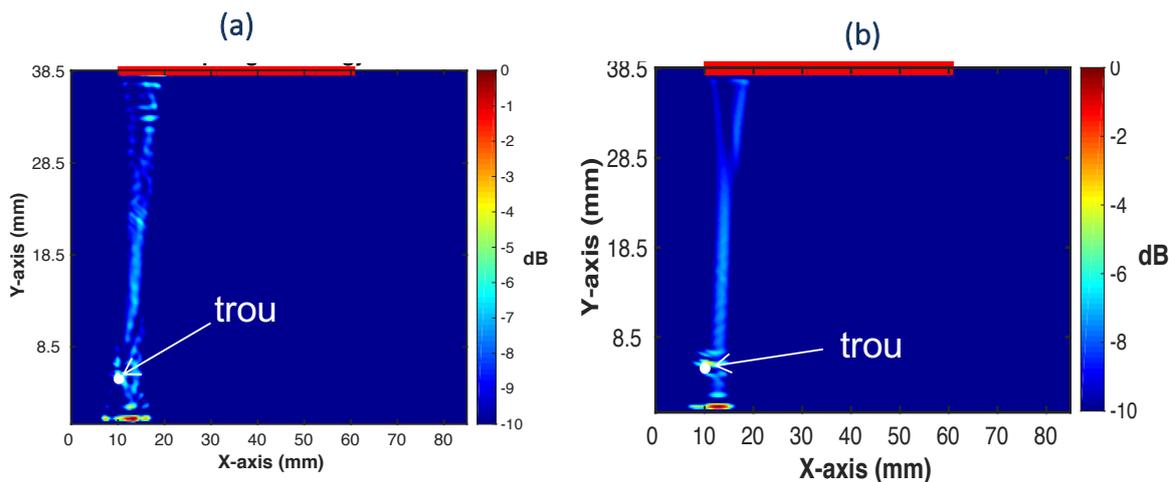


Figure 1.2 – Résultats expérimentaux (2MHz) de la méthode de l'énergie topologique conventionnelle pour localiser un trou de diamètre 1mm et positionné en $X=10\text{mm}$ et $Y=5\text{mm}$ dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) par intégration sur toute la durée du signal, soit 3 trajets aller-retour de l'onde (b) par intégration sur un seul trajet aller-retour de l'onde. La ligne rouge représente l'antenne multi-éléments au contact du bloc d'acier et le défaut est représenté par un cercle blanc.

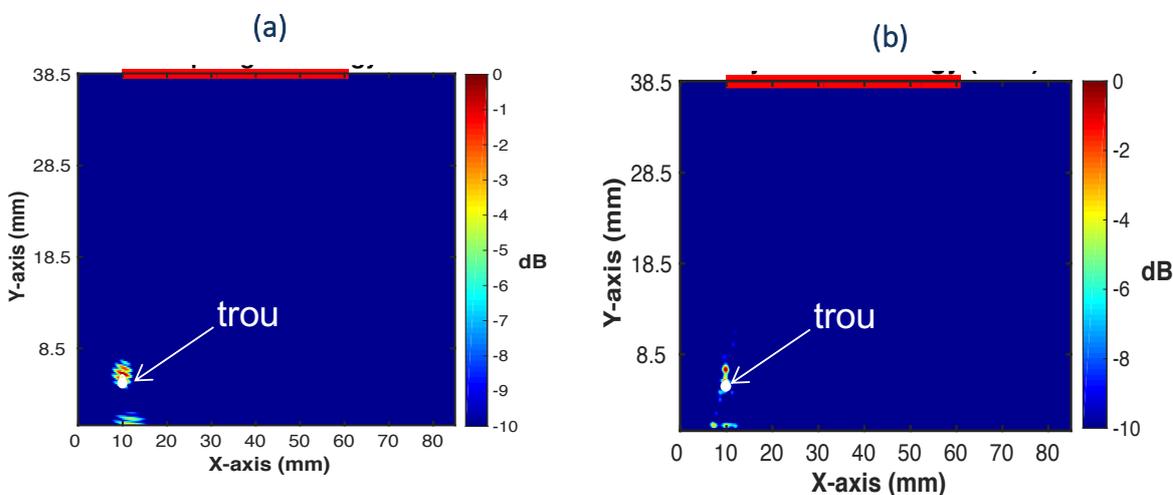


Figure 1.3 – Résultats expérimentaux (2MHz) de localisation d'un trou de diamètre 1 mm et positionné en $X=10\text{mm}$ et $Y=5\text{mm}$ dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) à partir de la méthode de l'énergie topologique modifiée de diffraction (b) à partir de la méthode de matched field processing (MFP). La ligne rouge représente l'antenne multi-éléments au contact du bloc d'acier et le défaut est représenté par un cercle blanc.

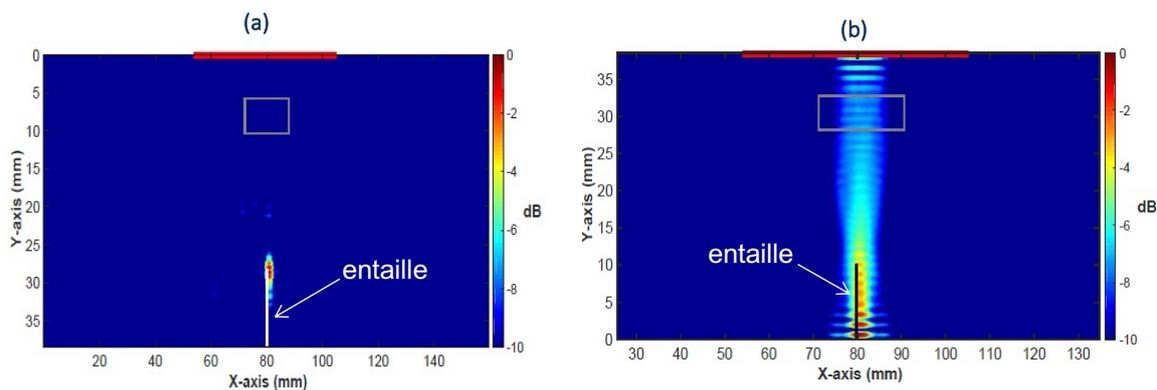


Figure 1.4 – (a) Résultats expérimentaux (2MHz) de localisation d’une entaille de 10 mm de hauteur dans un bloc isotrope homogène (dimensions $38.5 \times 159.5 \times 79.6 \text{ mm}^3$) en acier 316L (a) à partir de la méthode de l’énergie topologique modifiée de diffraction (b) à partir de la méthode de matched field processing (MFP). La ligne rouge représente l’antenne multi-éléments (64 éléments) au contact du bloc d’acier et le défaut est représenté par un trait verticale blanc (figure a) et noir (figure b).

1.2.2 Énergie topologique et Matched Field Processing en milieu borné

Alternativement à la méthode de l’énergie topologique, l’approche de Matched Field Processing est également une approche pertinente vis-à-vis de notre problématique de localisation de défaut dans les soudures (milieu réverbérant et anisotrope) et plus largement les milieux complexes. En effet, la technique de Matched Field Processing [BKM93] vise aussi à localiser une(des) source(s) en environnement complexe ; et elle est aussi fondée sur la connaissance *a priori* du milieu et sur le principe de retourment temporel. Nous montrons ci-dessous que Matched Field Processing et Énergie Topologique sont toutes deux liées et que la principale différence réside dans le filtrage temporel uniquement opéré par l’ET tandis que les deux techniques opèrent de façon identique le filtrage spatial par rétropropagation des signaux depuis les récepteurs. Le Matched Field Processing est une généralisation aux milieux complexes des méthodes de formation de voies conventionnelles (beamforming) appliquées en milieu homogène infini. Cette méthode d’imagerie passive a été largement développée pour localiser des sources actives de bruit en acoustique sous-marine [Cla87 ; BKS88 ; Wes92 ; BKM93 ; HPSM04 ; DK07], en géophysique [CRC+12] en vibro-acoustique [TK97] et trouve plus récemment des applications pour la localisation de sources secondaires (=défauts) en contrôle non destructif [HM14a ; TZL15 ; QM12]. Par ailleurs, pour des raisons pratiques, la méthode du Matched Field Processing dont nous rappelons brièvement les fondements principaux, est le plus souvent formalisée dans le plan fréquentiel.

Dans sa formulation fréquentielle classique selon le processeur de Bartlett, le Matched Field Processing (ou conjugaison de phase), consiste à corrélérer les données mesurées en N récepteurs en \mathbf{r}_r avec un modèle de fonction de Green entre ces récepteurs pour plusieurs positions de points source dans le milieu afin de déterminer la position de la(les) source(s) recherchée(s) :

$$MF_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = \left| \sum_{r=1}^N D(\mathbf{r}_r, \omega)^* W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r) \right|^2, \quad (1.15)$$

où $MF_{bart}(\mathbf{r})$ désigne la probabilité d'occurrence d'une perturbation à la position \mathbf{r} et l'exposant $*$ désigne l'opération de conjugaison. Sous l'hypothèse que les signaux de données et les réplicas sont normalisés, cette probabilité d'occurrence est égale à une valeur maximale de 1 lorsque données et réplica sont identiques. La variable $D(\mathbf{r}_r, \omega)$ correspond aux données mesurées aux récepteurs (=observations) en fonction de la pulsation ω : dans notre cas, il s'agit du résidu $\Delta U(\mathbf{r}_r, \omega)$ exprimé dans le plan fréquentiel

$$\Delta U(\mathbf{r}_r, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta u(\mathbf{r}_r, t) e^{-i\omega t} dt. \quad (1.16)$$

Tandis que $W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r)$, encore appelé réplica, est le modèle de propagation de l'onde élastique entre les récepteurs et chaque point du milieu. Ce réplica peut être déterminé soit analytiquement, numériquement ou expérimentalement. Dans l'hypothèse où nous étudions les ondes de compression en milieu élastique, le résidu $\Delta U(\mathbf{r}_r, \omega)$ désigne la composante du déplacement normale à la surface de mesure de la structure sondée. Et, le réplica $W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r)$ réfère à la divergence de la fonction de Green $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r)$ (exprimée en déplacement) entre une éventuelle source secondaire en \mathbf{r} et les récepteurs en \mathbf{r}_r dans le milieu non perturbé :

$$W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r) = \nabla \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r). \quad (1.17)$$

En substituant les expressions de réplica, équ. (1.17), et du résidu, équ. (1.16), dans la formule du processeur de Bartlett, équ. (1.15), il vient

$$MF_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = \left| \sum_{r=1}^N \Delta U^*(\mathbf{r}_r, \omega) \nabla \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r) \right|^2. \quad (1.18)$$

Revenons maintenant au champ adjoint défini dans la section précédente (équations (1.5) et (1.6)) afin de montrer le lien direct avec le resultat du Matched Field Processing. Le champ adjoint correspond à la rétro-propagation du résidu mesuré aux récepteurs. Ainsi, sous l'hypothèse de défaut ponctuel et de milieu élastique linéaire, le champ adjoint (exprimé en déplacement selon la composante en compression) s'écrit en tout point \mathbf{r} du milieu comme la convolution de la divergence de la fonction de Green du milieu $\nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_r)$ par le signal source du champ adjoint, i. e. le résidu retourné temporellement $\Delta u(\mathbf{r}_r, T - t)$,

$$\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \sum_{r=1}^N \int_0^T \nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_r, t_r) \Delta u(\mathbf{r}_r, T - t_r) dt_r. \quad (1.19)$$

NB : Le vecteur \mathbf{r}_r désigne bien la position du récepteur mesurant le résidu $\Delta u(\mathbf{r}_r, t)$. Le terme $\mathbf{g}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_r, t_r)$ désigne la fonction de Green en temporel entre un récepteur en \mathbf{r} recevant l'onde à l'instant t et une source ponctuelle localisée à la position du récepteur en \mathbf{r}_r et émettant un signal à l'instant t_r . « L'inversion » des termes source et récepteur sur cette fonction de Green permet d'appliquer l'opération de rétropropagation dans la formulation (1.19).

En considérant un intervalle temporel de mesure infinie et en supposant le milieu stationnaire, cette expression devient

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) &= \sum_{r=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} \nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{r}, t - t_r | \mathbf{r}_r, 0) \Delta u(\mathbf{r}_r, -t_r) dt_r \\ &= \sum_{r=1}^N \nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_r) \otimes \Delta u(\mathbf{r}_r, -t)\end{aligned}\quad (1.20)$$

Dans le plan fréquentiel, la formule précédente devient,

$$\nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{r=1}^N \nabla \cdot \mathbf{G}(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_r) \Delta U^*(\mathbf{r}_r, \omega), \quad (1.21)$$

et, par comparaison avec l'expression (1.18), on note que le processeur de Bartlett défini plus haut via la formule (1.15) n'est autre que l'intensité du champ adjoint déterminé à une fréquence donnée,

$$MF_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = |\nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{r}, \omega)|^2. \quad (1.22)$$

En vertu du théorème de Parseval, le processeur de Bartlett moyenné sur toute la bande fréquentielle $[\omega_1; \omega_2]$ du champ adjoint correspond à l'énergie du champ adjoint sur toute la durée d'acquisition T ,

$$\overline{MF}_{bart}(\mathbf{r}) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |\nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{r}, \omega)|^2 d\omega = \int_0^T |\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)|^2 dt. \quad (1.23)$$

A la différence du processeur de Bartlett, l'énergie topologique, dont l'expression est rappelée ci-dessous pour le déplacement des ondes de compression,

$$ET(\mathbf{r}) = \int_0^T |\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, T - t)| |\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)| dt, \quad (1.24)$$

effectue un filtrage spatio-temporel supplémentaire qui correspond au déphasage induit entre la source d'émission et chaque point du milieu inspecté et qui se manifeste par le croisement du champ adjoint avec le champ direct. En présence d'interactions multiples entre le défaut et les bords de la pièce inspectée, c'est ce terme, i.e. $\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$, qui est à l'origine des bruits parasites et faible RSB observés sur les surfaces d'ambiguïté (figure 1.2) et qui sont en partie supprimées via l'approche de l'ET modifiée (figure 1.3a). Alternativement, ces interactions multiples entre le défaut et les frontières de la pièce peuvent être vues comme une redondance d'information sur le défaut que l'on peut exploiter en omettant l'étape de filtrage spatio-temporel par le champ direct $\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$. Il s'agit de l'approche suivie par la méthode de MFP formulée équation (1.23). Sur les figures 1.3b et 1.4b, le résultat du MFP est affichée en dB selon

$$B_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = 10 \log_{10} \left[\overline{MF}_{bart}(\mathbf{r}) / \max(\overline{MF}_{bart}(\mathbf{r})) \right]. \quad (1.25)$$

On observe que le trou est localisé avec une résolution équivalente à celle de l'ET modifiée, fig. 1.3a, tandis que le MFP et l'ET modifiée fournissent des résultats complémentaires dans le cas d'une entaille, figures 1.4a et 1.4b. L'ET modifiée fait ressortir la tête de l'entaille du fait de la diffraction par son extrémité tandis que le MFP révèle le corps de l'entaille qui est sujet à des réflexions tout le long de son corps.

Dans ce cas, le MFP permet de fournir une information sur le dimensionnement d'une entaille et de la discriminer d'un trou.

1.2.3 Application à la localisation de défaut dans une soudure

A la suite de ce travail de localisation en milieu isotrope borné, les méthodes de MFP et ET modifiée ont été éprouvées sur des soudures multi-passes en acier austénitique pour localiser un défaut artificiel de type entaille (afin de se rapprocher de la fissure) [LMC+15; LMR+17a; Lub17]. Dans ce cas, le milieu inspecté est atténuant, anisotrope, borné avec des bords de géométrie irrégulière. Deux soudures multi-passes mises à disposition par EDF ont été inspectées, la soudure D717B et D717C dont nous disposons des coupes macrographiques et paramètres mécaniques. Par souci de concision, seuls les résultats expérimentaux et numériques pour la soudure D717C sont présentés ci-dessous. Les résultats pour la soudure D717B sont présentés et discutés dans la thèse d'Emma Lubeigt [Lub17]. La coupe macrographique de la soudure D717C est représentée sur la figure 1.5 : la soudure est découpée en 10 domaines homogènes (isotrope transverse), chacun caractérisé par une orientation moyenne de grain mesurée par analyse d'image sur la macrographie. Chaque zone présente les mêmes constantes d'élasticité qui ont été mesurées expérimentalement [CVD+00] :

$c_{11} = 243$ GPa, $c_{33} = 212$ GPa, $c_{44} = 122$ GPa, $c_{12} = 84$ GPa et $c_{13} = 137$ GPa.

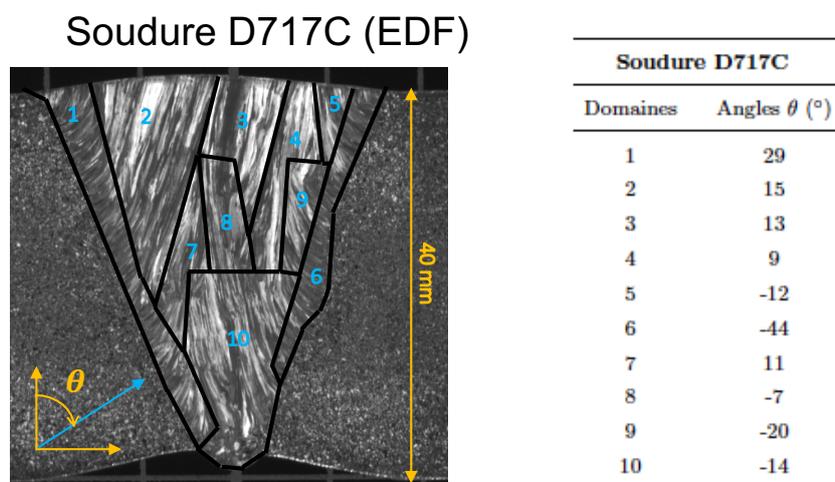


Figure 1.5 – Coupe macrographique de la soudure D717C et orientation des grains.

La distribution hétérogène de l'énergie ultrasonore illustrée sur la figure 1.6a atteste de la structure fortement anisotrope de la soudure D717C et de la nécessité de prendre en compte un modèle de propagation ultrasonore du milieu pour parvenir à localiser un éventuel défaut. Les méthodes de l'ET modifiée et de MFP sont appliquées pour tenter de localiser expérimentalement un défaut artificiel présent dans cette soudure à l'aide de la même barette linéaire utilisée plus haut (64 éléments, fréquence centrale 2MHz) : une entaille débouchante de 0.1 mm d'épaisseur et 15 mm de hauteur, comme illustrée sur les figures 1.6a et 1.6b. Tout d'abord, la comparaison des résultats de l'ET modifiée issus de signaux synthétiques et expérimentaux, figures 1.6b et 1.6d resp., sont

consistents et valident ainsi l'approche expérimentale. L'ET modifiée, figures 1.6b et 1.6d, ne parvient pas à localiser l'entaille et semble détecter le pied de l'entaille tandis que le MFP, figure 1.6b, semble détecter davantage la tête de l'entaille qui serait sujette à davantage d'interactions multiples avec les bords de la soudure et ses domaines. Ces résultats expérimentaux, bien qu'encourageants sur l'aspect détection, ne permettent pas d'inférer sur la localisation du défaut. Toutefois, notons que les dimensions de l'entaille (épaisseur $\approx \lambda/10$) et son emplacement dans une zone de faible dépôt d'énergie du fait de l'anisotropie constituent un cas fortement défavorable à sa détection et localisation. Afin de surmonter la difficulté liée au faible dépôt d'énergie, nous avons proposé dans le cadre des travaux de post-doctorat de Khaled Metwally faisant suite à la thèse d'Emma Lubeigt une amélioration de l'ET modifiée [MLR+18a] et le MFP. La méthode consiste à ajouter des sources internes numériques afin de définir les amplitudes et phases des sources sur chaque élément de la barette à l'émission qui permettent d'augmenter le RSB dans une zone spécifique de la structure inspectée. Cette amélioration est schématisée par l'ajout d'une étape supplémentaire en orange sur la figure 1.1. Cette approche a été testée sur des signaux numériques pour une entaille débouchante de 0.1 mm d'épaisseur et 15 mm de hauteur localisée à une position sensiblement différente (cf. figure 1.7). On note que dans ce cas, le résultat du MFP, figure 1.7c, et de l'ET modifiée, figure 1.7d, parviennent à de meilleurs résultats en révélant le corps de l'entaille pour le MFP et en localisant la tête de l'entaille pour l'ET modifiée. On note toutefois une faible résolution pour le MFP et un faible contraste dans la détection du sommet de l'entaille pour l'ET modifiée. Ainsi, la démonstration expérimentale est toujours en cours, le bruit étant plus important sur les données expérimentales.

1.2.4 Synthèse

Ce premier volet a présenté les différentes étapes et méthodes développées afin de localiser un défaut local dans un milieu anisotrope borné atténuant tel qu'une soudure multi-passes et pour laquelle nous disposons d'informations *a priori* nécessaires pour construire un modèle numérique du milieu. Les approches proposées reposent sur l'analyse de la variation de signal aux récepteurs induite par une variation des propriétés du milieu à l'aide du formalisme des méthodes adjointes, plus particulièrement l'énergie topologique (ET) puis de la méthode de filtrage adapté (Matched Field Processing). Ce type de démarche requiert un modèle de propagation de l'onde dans le milieu et se base sur l'hypothèse de Born ou d'interaction simple de l'onde entre le défaut et le milieu. Une première contribution de ce travail a été de rendre la méthode de l'ET plus robuste vis à vis de l'hypothèse de Born et l'hypothèse d'interaction simple. Une démarche a été notamment proposée pour éliminer une partie des contributions multiples entre défaut et milieu : cette méthode d'ET modifiée a été testée avec succès pour imager des défauts d'extension spatiale ponctuelle (trou) et non ponctuelle (entaille) présentant un fort contraste d'impédance et positionnés proche des bords d'une éprouvette bornée en acier, favorisant ainsi les réflexions multiples. Alternativement, la méthode de MFP qui prend avantage d'une partie des réflexions multiples de l'onde dans le milieu de référence a été appliquée : cette technique permet de réhausser le RSB en exploitant la redondance des contributions du défaut. Enfin, les soudures multi-passes sont des milieux anisotropes dans lesquelles certaines zones vont accueillir davantage d'énergie ultrasonores tandis que d'autres sont des zones de très faible dépôt d'énergie. Or, dans ces zones de faibles dépôt d'énergie, le RSB est trop faible et la localisation d'un défaut situé dans ces

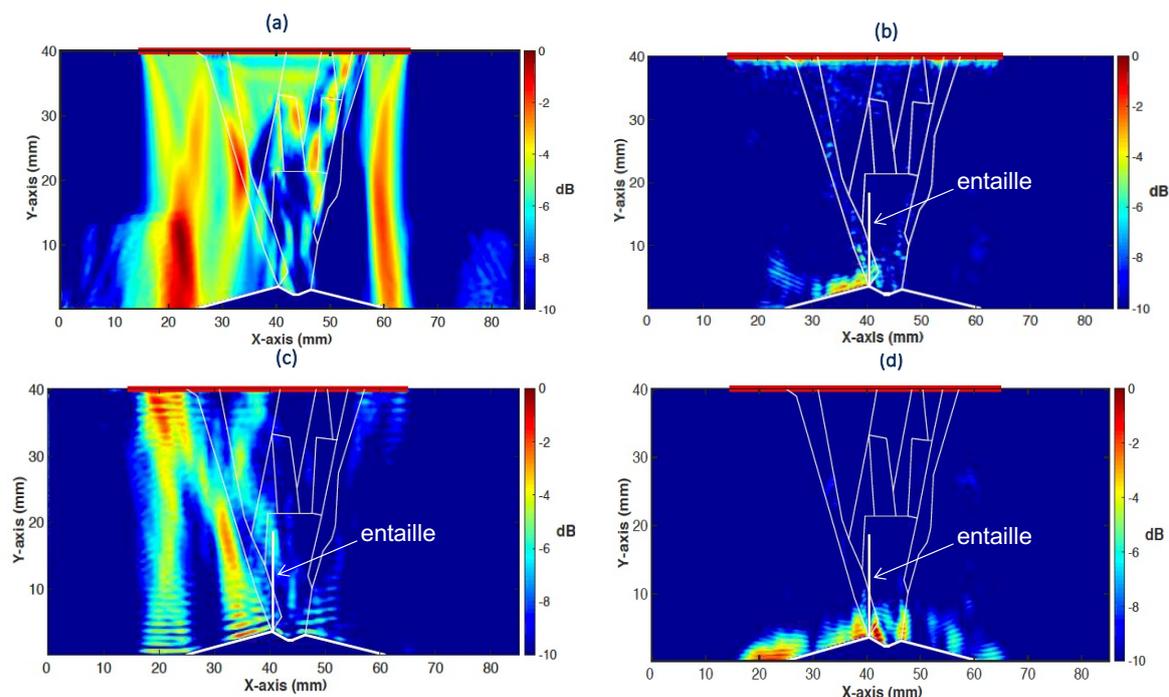


Figure 1.6 – (a) Distribution de l’insonification ultrasonore simulée dans la soudure D717C sans défaut. (b) Résultat numérique de l’ET modifiée. (c) Résultat expérimental de l’ET modifiée. (d) Résultat expérimental du MFP. Le trait rouge représente la barette de 64 éléments utilisée (2MHz) et le trait noir sur les figures (b) à (d) représente l’entaille débouchante de 0.1 mm d’épaisseur et 15 mm de hauteur.

zones devient difficile voir impossible. Afin de surmonter ces difficultés causées par la présence d’anisotropie, la méthode de l’ET modifiée sélective est proposée : l’approche consiste à définir judicieusement le signal d’émission afin d’augmenter le RSB dans la zone souhaitée du milieu inspecté.

Les informations fournies par les méthodes de l’ET et de MFP sont complémentaires : le MFP est moins résolu que l’ET mais plus robuste pour prendre en compte une partie des interactions multiples tandis que l’ET est plus résolue mais moins performante en présence d’interactions multiples.

Certains challenges inhérents à ces approches paramétriques de localisation demeurent cependant ouverts. Il est nécessaire de disposer d’un modèle du milieu de référence relativement fidèle au milieu sondé et cela peut demander des efforts calculatoires notables pour des milieux complexes. Par ailleurs, l’extraction de la signature du défaut par différenciation nécessite un RSB supérieur au bruit de mesure et est très sensible aux variations de phases : l’application expérimentale de l’approche nécessite ainsi une rigueur dans les mesures et notamment des traitements préalables pour compenser par exemple les variations de l’environnement non prises en compte dans le modèle, telles que les variations de température.

A présent, la section suivante (§1.3) présente les approches perturbatives développées pour localiser une perturbation ou un défaut dans un milieu diffus ou réverbérant lorsque les paramètres de ce dernier sont peu ou pas connus.

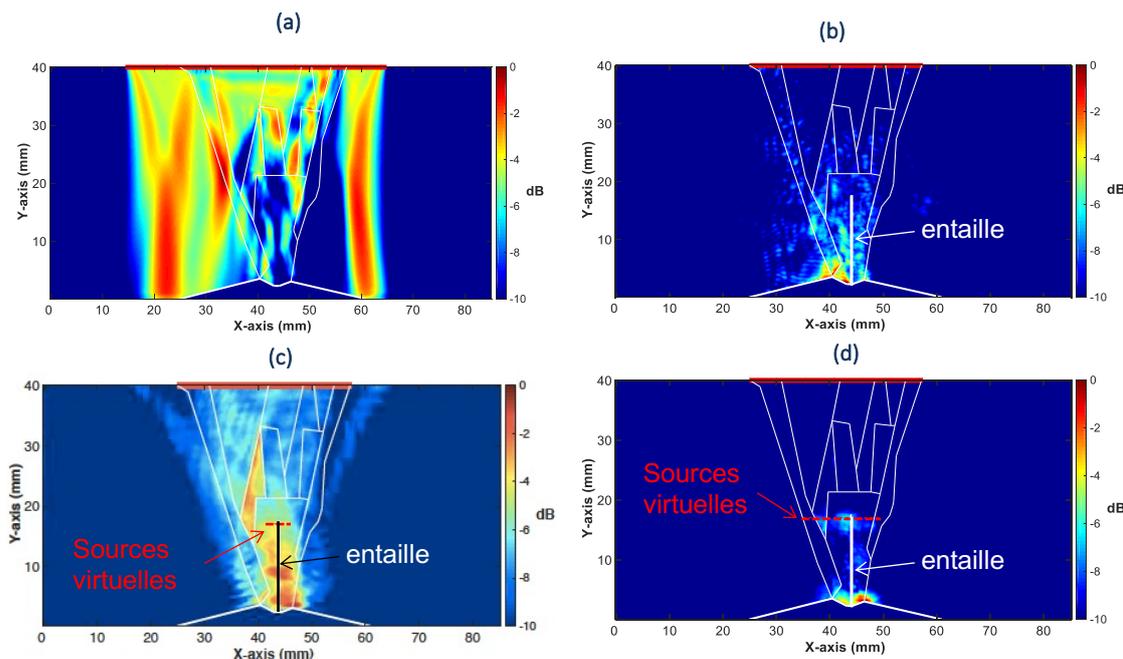


Figure 1.7 – (a) Distribution de l’insonification ultrasonore simulée dans la soudure D717C sans défaut. (b) Résultat numérique de l’ET modifiée. (c) Résultat numérique du MFP avec les sources internes numériques. (d) Résultat numérique de l’ET modifiée avec les sources internes numériques. Le trait rouge représente la barette de 64 éléments utilisée (2MHz), le trait blanc sur les figures (a), (b) et (c) représente l’entaille débouchante de 0.1 mm d’épaisseur et 15 mm de hauteur et le trait pointillé rouge sur les figures (c) et (d) représente la position des sources virtuelles internes.

1.3 Localisation en milieu fluide diffus ou réverbérant sans connaissance a priori

Publication associées [A2], [A6], [A13]
[CI2],[CI5], [CI19]

Collaborations LMA : S. Mensah, J-F. Chaix, C. Payan, V. Garnier, E. Lubeigt,
K. Metwally, J. Eiras
MPL/SIO, San Diego, USA : W. Kuperman, S. Walker, S. Yildiz,
C. Marandet

ISTERRE, Grenoble : P. Roux

CEA Cadarache : J-F. Baqué, G. Gobillot, M. Cavaro

Projets/contrats associés [C3], [C4], [C5], [C6]

La localisation acoustique ou ultrasonore en milieu diffus ou réverbérant est une problématique commune à de nombreuses applications telles que le suivi de bulles en milieu bulleux [LDC+19], le suivi d’anomalies dans le sang [FSC13], la localisation de cibles en guide d’onde marin [BKM93 ; DW07] ou de piétons en forêts [ZRLT08] ou encore le suivi de défaut dans le béton [LPRM10 ; PQG+13]. Tous ces milieux sont des milieux diffusants pour lesquels il est très courant ne pas connaître la position exacte de chacun des diffuseurs et leurs propriétés (bulles, agrégats dans le béton, arbres dans une forêt). Dans ce cas, la connaissance du milieu est trop partielle pour permettre

d'ériger un modèle paramétrique fidèle du milieu sondé. Dans ce contexte, quelques stratégies alternatives ont été testées afin de localiser une source en milieu fluide diffus et réverbérant. Comme dans le chapitre 1.2 précédent, les méthodes développées se basent sur des approches perturbatives dont le formalisme en milieu fluide est rappelé dans la section 1.3.1.

Une première approche testée dans mes travaux de recherche consiste à utiliser un modèle simplifié du milieu tout en appliquant des méthodes de formation de voie conventionnelle. Ce point est illustré dans la partie 1.3.2 par les travaux que j'ai entrepris dans le cadre de mon post-doctorat aux États-Unis au Marine Physical Laboratory (Scripps Institution of Oceanography, San Diego) avec W. Kuperman (Professeur) et W. Walker (Chercheur) entre 2009 et 2013 en collaboration avec le laboratoire ISTERRE de Grenoble (Ph. Roux, Dir. CNRS) sur la localisation d'une perturbation en milieu multiplement diffusant dont les paramètres sont très partiellement connus. La méthode repose sur l'hypothèse de Born et le problème analysé se situe aux limites de cette approximation. Toutefois, j'ai montré avec mes collaborateurs que la localisation est toujours possible [RWKR11b] mais avec un rapport pic sur bruit inférieur à une localisation dans un milieu homogène. Le rapport pic sur bruit réfère ici au rapport d'amplitude entre le niveau du pic de localisation et le niveau de bruit de fond des surfaces d'ambiguïté obtenues. En effet, dans un tel milieu diffusant, les interactions multiples de l'onde prédominent et ont tendance à masquer les trajets directs.

Alternativement, la deuxième stratégie testée à des fins de localisation dans un milieu complexe non connu consiste à réinjecter les mesures expérimentales dans le modèle de milieu.

1. Cette approche a été tout d'abord appliquée sur la base de l'analyse des noyaux de sensibilité, très largement utilisés dans la communauté acoustique et sismique à des fins de tomographie ou localisation. Généralement, les noyaux de sensibilité considérés sont déterminés numériquement ou analytiquement et sont alloués aux trajets directs. Ce qui est équivalent à considérer un milieu homogène comme dans le cas du beamforming ou delay-and-sum comme montré dans la section 1.3.3. L'approche de localisation basée sur les noyaux de sensibilité est présentée dans la section 1.3.3 dans le cas d'une perturbation dans une cavité réverbérante. L'approche développée a été le fruit d'un travail collaboratif avec des collègues post-doctorant (C. Marandet), doctorant (S. Yldiz) et chercheurs du Marine Physical Laboratory (W. Kuperman) et du laboratoire ISTERRE (Ph. Roux). La particularité de ces travaux concerne l'utilisation de noyaux de sensibilité expérimentaux [YRR+14a]. Ainsi, l'approche proposée ne nécessite pas de connaissance a priori sur le milieu de propagation. De plus, on montre que la localisation est améliorée par l'exploitation des interactions multiples (réverbération) selon la procédure développée.
2. Ensuite dans un deuxième temps, toute la forme d'onde est prise en compte via le Matched Field Processing et l'utilisation des données expérimentales dans le modèle de milieu. Cette approche, introduite dans la partie 1.3.4, a été développée dans le cadre de mes activités de recherche en tant que MCF à l'Université d'Aix-Marseille et des travaux de post-doctorat d'Emma Lubeigt que j'ai supervisée avec S. Mensah (LMA) et J.-F. Chaix (LMA), et en partenariat avec le CEA Cadarache (F. Baqué et G. Gobillot) et le Marine Physical Laboratory (W. Kuperman et J. Tippmann). Cette méthode s'applique à la localisation passive de défaut sur un cylindre élastique creux immergé dans un fluide. La composante passive rajoute

ici un degré supplémentaire de complexité en rajoutant l'étape supplémentaire de reconstruction de la fonction de Green pour tous les couples de récepteurs. Les versions adaptatives de Matched Field Processing ont été testées afin d'améliorer la résolution de la localisation mise à mal par le biais inhérent entre les observations et le modèle expérimental utilisé [LRM+19].

L'approche perturbative à la base des différentes stratégies explorées dans ce chapitre est tout d'abord introduite ci-dessous.

1.3.1 Approche perturbative en milieu fluide

Nous considérons un milieu fluide de volume Ω présentant des distributions de vitesse et de densité, respectivement dénotées $c(\mathbf{r})$ et $\rho(\mathbf{r})$ pour un point \mathbf{r} du milieu. En présence de variations de densité $\Delta\rho(\mathbf{r})$ et de célérité $\Delta c(\mathbf{r})$, une variation du champ de pression $\Delta p(\mathbf{r}_r, t)$ est induite et le champ mesuré aux récepteurs en \mathbf{r}_r , $p_2(\mathbf{r}_r, t)$, s'exprime comme la contribution du champ avant occurrence de la perturbation $p_1(\mathbf{r}_r, t)$ et de la variation de pression $\Delta p(\mathbf{r}_r, t)$

$$p_2(\mathbf{r}_r, t) = p_1(\mathbf{r}_r, t) + \Delta p(\mathbf{r}_r, t). \quad (1.26)$$

Par perturbation de l'équation inhomogène de Helmholtz, la variation de pression dans le plan fréquentiel

$$\Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta p(\mathbf{r}_r, t) e^{-i\omega t} d\omega,$$

entre deux états du milieu,

$$\Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) = P_2(\mathbf{r}_r, \omega) - P_1(\mathbf{r}_r, \omega), \quad (1.27)$$

s'exprime, en vertu du théorème de Green dans le volume Ω , selon [Che60; PW90]

$$\Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) = \int_{\Omega} \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) d\Omega(\mathbf{r}_s), \quad (1.28)$$

pour une sollicitation acoustique en \mathbf{r}_s non unitaire d'amplitude $S(\mathbf{r}_s, \omega)$. Ci-dessus, $P_2(\mathbf{r}_r, \omega)$ et $P_1(\mathbf{r}_r, \omega)$ sont les transformées de Fourier de $p_2(\mathbf{r}_r, t)$ et $p_1(\mathbf{r}_r, t)$ qui représentent respectivement les champs mesurés à la pulsation ω après et avant occurrence de la variation de paramètre. La variation de la fonction de Green $\Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ est définie par $G_2(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) = G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ qui est solution de l'équation d'Helmholtz inhomogène

$$\left[\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c(\mathbf{r})^2} - \frac{\nabla\rho(\mathbf{r})}{\rho(\mathbf{r})} \cdot \nabla \right] (G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) - \Delta V(\mathbf{r}) (G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)), \quad (1.29)$$

$\Delta V(\mathbf{r})$ est le potentiel de variation perturbé qui prend en compte les variations de célérité et de densité [Che60; PW90],

$$\Delta V(\mathbf{r}) = -\frac{2\omega^2 \Delta c(\mathbf{r})}{c^3(\mathbf{r})} + \left(\nabla \rho(\mathbf{r}) \frac{\Delta \rho(\mathbf{r})}{\rho^2(\mathbf{r})} + \frac{\nabla(\Delta \rho(\mathbf{r}))}{\rho(\mathbf{r})} - \nabla \rho(\mathbf{r}) \frac{\nabla(\Delta \rho(\mathbf{r}))}{\rho^2(\mathbf{r})} \right) \cdot \nabla. \quad (1.30)$$

En appliquant le théorème de Green dans le volume Ω , la fonction de Green vérifiant (1.29) s'exprime selon

$$G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) = G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \Delta V(\mathbf{r}') [G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega)] d\Omega(\mathbf{r}') \quad (1.31)$$

Ainsi, la fonction de Green perturbée s'exprime en fonction du potentiel de variation, de la fonction de Green $G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ du milieu fluide avant occurrence de la variation de paramètre, et de la fonction de Green $G_2(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) = G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ après perturbation du milieu. Ainsi la relation (1.31) est récursive

$$\Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) = \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \Delta V(\mathbf{r}') [G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega) + \Delta G(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega)] d\Omega(\mathbf{r}') \quad (1.32)$$

et la variation de la fonction de Green s'écrit selon le développement de Born

$$\begin{aligned} \Delta G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) &= \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \Delta V(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega) d\Omega(\mathbf{r}') \\ &+ \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \Delta V(\mathbf{r}') \left[\int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}''; \omega) \Delta V(\mathbf{r}'') G_1(\mathbf{r}'', \mathbf{r}_s; \omega) d\Omega(\mathbf{r}'') \right] d\Omega(\mathbf{r}') + \dots, \end{aligned} \quad (1.33)$$

En considérant une variation locale de célérité et de densité en \mathbf{r}_d et en injectant l'expression (1.33) dans (1.28), la variation du champ de pression devient

$$\begin{aligned} \Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) &= \int_{\Omega} \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_d) \Delta V(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) d\Omega(\mathbf{r}') \\ &+ \Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) d\Omega(\mathbf{r}_s), \end{aligned} \quad (1.34)$$

où le terme d'ordre supérieur $\Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ décrit les interactions multiples entre perturbation et diffuseurs du milieu sondé pour une source d'excitation en \mathbf{r}_s et a pour expression

$$\begin{aligned} \Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) &= \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_d) \Delta V(\mathbf{r}') \\ &\left[\int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}''; \omega) \delta(\mathbf{r}'' - \mathbf{r}_d) \Delta V(\mathbf{r}'') G_1(\mathbf{r}'', \mathbf{r}_s; \omega) d\Omega(\mathbf{r}'') \right] d\Omega(\mathbf{r}') + \dots \end{aligned} \quad (1.35)$$

tandis que le premier terme d'ordre 1 de l'expression (1.34),

$$\int_{\Omega} \int_{\Omega} G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_d) \Delta V(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) d\Omega(\mathbf{r}') d\Omega(\mathbf{r}_s) \quad (1.36)$$

correspond à l'interaction simple entre la perturbation et l'onde.

En l'absence de perturbation locale en \mathbf{r}_d , la variation du champ de pression (1.34) est nulle. L'objectif de localisation est donc de déterminer à quelle position \mathbf{r}' , le

terme de perturbation $\delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_d)\Delta V(\mathbf{r}')$ est soit non nul (présence d'une perturbation), soit nul ou proche de zero (absence de variation locale). Notons que sous l'approximation de Born (terme $\Delta N_m(\mathbf{r})$ négligé), l'expression (1.36) dans sa déclinaison fréquentielle ou temporelle est à la base de nombreux algorithmes d'imagerie acoustique développés dans le cadre de la tomographie de diffraction [Dev82 ; Dev84 ; PSTU16], tomographie à partir des temps de trajet ou de la tomographie acoustique par approche adjointe [Tar84 ; PW90 ; Nor04 ; HPC+04 ; SCK11] moyennant des approximations sur l'expression du champ dans le milieu avant occurrence de la perturbation (champ en milieu infini, conditions de Sommerfeld) et sur le potentiel de variation perturbé (variation uniquement lié à la célérité).

Or, dans les milieux réverbérants ou multiplement diffus, les informations *a priori* sur les propriétés du milieu à inspecter ne permettent pas toujours de déterminer l'expression du champ avant perturbation alors que l'approximation d'un milieu inhomogène par un milieu homogène n'est plus valide. De plus, les variations de paramètres ne sont pas uniquement liées à des variations de célérité qui simplifient grandement le formalisme et, l'approximation de Born (terme $\Delta N_m(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s; \omega)$ négligé) n'est pas nécessairement valide.

Mes activités de recherche ont donc consisté à développer des méthodes alternatives pour pallier en partie ces difficultés. Celles-ci sont présentées dans les sections qui suivent pour différents cas d'étude.

1.3.2 Localisation en milieu multiplement diffusant par méthode conventionnelle de focalisation (modèle simplifié du milieu)

Cette étude trouve son application dans la détection et localisation d'intrus dans des milieux désordonnés diffractant tels qu'une forêt. Scientifiquement, cette application se traduit par la problématique de localisation acoustique d'une perturbation dans un milieu multiplement diffusant en l'absence d'informations *a priori* sur la position de chacun des diffuseurs et de leurs propriétés. En effet, d'un point de vue pratique, ces paramètres ne sont généralement pas accessibles. En l'absence d'informations sur les propriétés du milieu à inspecter, l'emploi de méthodes paramétriques [HRD21] telles que celles décrites dans la partie 1.2 n'est plus possible.

Pour ce faire, nous avons appliqué une approche alternative qui consiste à extraire la signature de la perturbation en calculant le résidu aux récepteurs avant et après occurrence de la perturbation, puis de rétro-propager ce résidu par une méthode de formation de voies « incohérente » (sommation des intensités) pour localiser une variation locale de paramètres (célérité et densité) engendrée par l'insertion/suppression d'une tige cylindrique dans une forêt de tiges cylindriques.

La démarche suivie se base sur l'expression (1.34) et dans le cas de diffuseurs discrets cylindriques [Fol45 ; Twe52], la variation de pression causée par l'introduction, le mouvement ou la suppression d'un diffuseur en \mathbf{r}_d s'écrit [RWKR11a],

$$\Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) = S(\mathbf{r}_s, \omega) f_{ms}(\mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s) A(\omega) \frac{e^{ik(d_s + d_r)}}{\pi k \sqrt{d_s d_r}} + \Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega), \quad (1.37)$$

où $S(\mathbf{r}_s, \omega)$ est la réponse de la source, $f_{ms}(\mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s)$ est le coefficient de diffraction de la perturbation liée soit à l'introduction, le mouvement ou la suppression d'un diffuseur

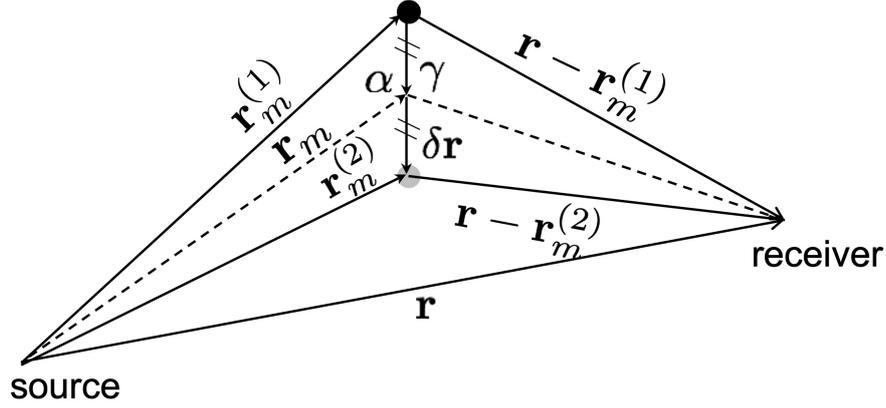


Figure 1.8 – Illustration géométrique de deux positions de diffuseur pour une paire source-récepteur. Le diffuseur et le récepteur sont positionnés par rapport à la source. Les disques noir et gris représentent les deux positions du diffuseur. L'indice (1) réfère à la position initiale du diffuseur et l'indice (2) à sa position après un petit déplacement δr . La perturbation du champ de pression est calculée à la position moyenne \mathbf{r}_m entre les deux positions du diffuseur.

en \mathbf{r}_d et $A(\omega)$ est le facteur d'amplitude. Les distances d_s et d_r sont respectivement les distances de la source à la position de la perturbation et du récepteur à la perturbation. Et ΔN_m décrit les interactions multiples avec la perturbation. Le facteur d'amplitude est tel que $A(\omega) = 2$ ou $A(\omega) = -2$ quand un diffuseur est introduit ou retiré, et $A(\omega) = 4 \sin(k\delta r(\cos \alpha + \cos \gamma))$ lorsque ce dernier est déplacé, où δr , α et γ sont définis comme indiqué sur le schéma 1.8.

NB : Par souci de brièveté, la notation pour $f_{ms}(\omega, \theta_m, \mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s)$ a été raccourcie par $f_{ms}(\mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s)$. Le coefficient de diffusion $f_{ms}(\omega, \theta_m, \mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s)$ dépend de la fréquence ω , de la direction de diffraction θ_m et de la courbure de l'onde incidente depuis le point source en \mathbf{r}_s sur le diffuseur à la position \mathbf{r}_d .

Dans le plan temporel, la variation de champ après transformée de Fourier inverse (TF^{-1}), $\Delta p(\mathbf{r}_r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) e^{i\omega t} d\omega$, s'écrit

$$\Delta p(\mathbf{r}_r, t) = e(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t) * \delta(t - \tau_{sr}) + \Delta n_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t), \quad (1.38)$$

où $e(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t) = TF^{-1}[S(\mathbf{r}_s, \omega) f_{ms}(\mathbf{r}_d | \mathbf{r}_s) A(\omega) \frac{1}{\pi k \sqrt{d_s d_r}}]$ est analogue à un terme source au niveau de la perturbation, τ_{sr} est le temps de trajet de l'onde entre la source, la perturbation et le récepteur défini par $\tau_{sr} = (d_s + d_r)/c$ et $\Delta n_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t)$ est la transformée de Fourier inverse du terme d'interactions multiples de l'onde. Le premier terme de la somme dans (1.38) correspond à l'interaction simple entre l'onde et la perturbation, c'est pourquoi la vitesse de l'onde c est celle du milieu environnant (air) en l'absence de diffuseurs. De plus, le temps de trajet de l'onde et la position de la perturbation sont reliés linéairement via la fonction dirac, et il est alors possible de rétropropager le signal à la position de la perturbation par formation de voie ou méthode de Delay-And-Sum. Une méthode de type focalisation en tout point incohérente et fenêtrée a été employée pour localiser cette dernière dans un milieu en présence de diffusions multiples où le terme d'interactions multiples $\Delta n_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t)$ n'est pas négligeable :

$$\delta\varepsilon_E(\mathbf{r}') = \frac{1}{N_s} \frac{1}{N_r} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{r=1}^{N_r} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta p(\mathbf{r}_r, t)^2 \cdot w(t - \tau'_{sr}) dt, \quad (1.39)$$

où N_s et N_r réfèrent au nombre de sources et récepteurs, $w(t - \tau'_{sr})$ est une fenêtre de largeur $\delta\tau$ centrée sur τ'_{sr} qui est le temps de trajet $\tau'_{sr} = (d'_s + d'_r)/c$ où d'_s et d'_r sont respectivement les distances de la source et du récepteur vers la position de pointage \mathbf{r}' . Le fenêtrage permet de limiter en partie les contributions multiples nuisibles au process; tandis que la sommation sur les différents couples de sources/récepteurs est effectuée de façon incohérente (sommation des intensités et non pas des amplitudes/phases) car le terme source de la perturbation, $e(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; t)$, dépend de la fonction de forme $f_{ms}(\mathbf{r}_d|\mathbf{r}_s)$ dont la phase varie selon la position des sources et récepteurs et ce terme de fonction de forme est considéré comme non connu.

Cette approche a été testée pour localiser une perturbation dans un milieu multiplement diffusant pour des longueurs d'onde petites devant la taille des diffuseurs ($ka > 1$, k nombre d'onde et a taille moyenne du diffuseur) et des libres parcours de transport l^* plus petits que la taille D du milieu sondé ($l^* < D$). Dans un milieu multiplement diffusant, l'onde subit des interactions multiples avec les diffuseurs. Le libre parcours moyen de transport l^* désigne la distance à partir de laquelle l'onde perd la mémoire de sa direction initiale de propagation. La figure 1.9 illustre le milieu dans lequel la méthode a été testée. Il s'agit d'une forêt de tiges d'acier de rayon $r = 4,75$ mm disposées selon une distribution aléatoire uniforme et occupant une surface circulaire de diamètre 340 mm. Le milieu est entouré de 15 hauts-parleurs et microphones travaillant entre 30 kHz et 80 kHz, et émettant des pulses gaussiens. La méthode a été testée avec succès pour localiser plusieurs types de perturbation (insertion, retrait, déplacement d'une tige) dans des milieux avec plusieurs densités de diffuseurs de $336/\text{m}^2$ à $564/\text{m}^2$. Ces densités correspondent à des libres parcours de transport variant de 240 mm à 145 mm sur la bande de fréquences 30-80 kHz. Ainsi, l'onde parcourt au minimum entre 3 - 4,7 libre parcours moyens de transport entre la source et le récepteur, témoignant de la présence de diffusion multiple.

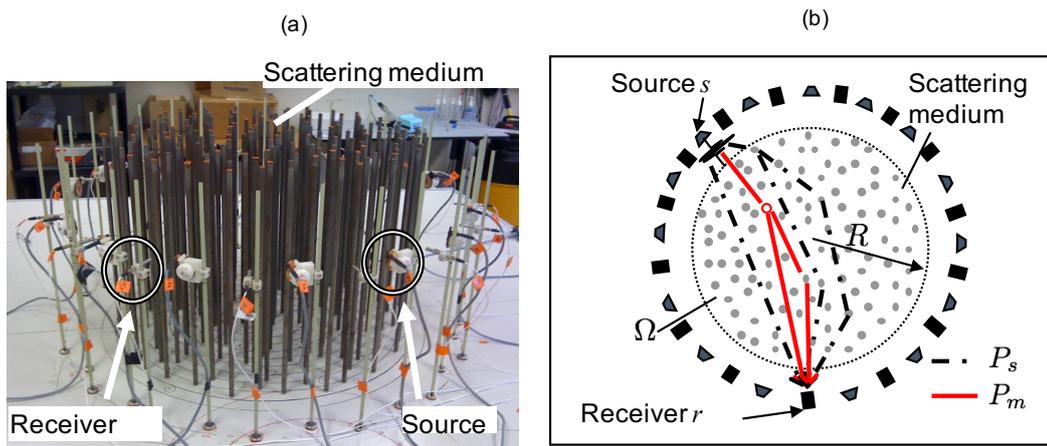


Figure 1.9 – (a) Photo et (b) Schéma de la forêt de tiges dans laquelle une tige est déplacée afin de créer une perturbation dans le milieu (P_m).

La figure 1.10b illustre le résultat de l'algorithme proposé (équation (1.39)) pour localiser une perturbation induite par un déplacement de tiges à 50 kHz. Le

champ acoustique est mesuré au préalable pour deux états successifs du milieu (position différente d'une tige) et la variation de champ est obtenue par différenciation. On note que la méthode parvient à localiser la perturbation avec un rapport pic sur bruit (PSB) de l'ordre de 3 dB. Ce PSB est généralement plus élevé si une sommation cohérente est appliquée entre les couples de capteurs. Mais cela nécessiterait de connaître le comportement anisotrope de la perturbation (via la fonction de forme $f_{ms}(\mathbf{r}_d|\mathbf{r}_s)$) afin de ne pas dégrader le processus de localisation cohérent. En l'absence de prise en compte de la fonction de forme, l'application d'une méthode de focalisation en tout point classique ne permet pas de localiser la perturbation comme affiché sur la figure 1.10a. Comme discuté dans [RWKR11a], les performances de l'approche proposée dépendent du libre parcours moyen de transport, c-a-d des propriétés et de la densité de diffuseurs du milieu, et de la fréquence, ainsi que du signal source. Lorsque le libre parcours moyen de transport diminue (augmentation de la fréquence et/ou de la densité de diffuseurs), le PSB diminue et la méthode trouve ses limites lorsque la composante de diffusion simple n'existe plus et que l'on se rapproche du régime diffus. Dans ce cas de figure, les méthodes interférométriques [LPRM10; PLRM15] seront plus appropriées pour localiser une perturbation. Pour synthétiser, l'approche proposée s'ajoute de façon complémentaire pour localiser une perturbation dans le régime de diffusion transitoire (décrit par les équations de transfert radiatif) dans lequel les approches reposant sur l'approximation de Born (milieu faiblement hétérogène) ou sur l'hypothèse de milieu diffus ne sont pas performantes.

Notons également que le problème étudié est similaire à celui examiné par les méthodes de sensibilité topologique à la différence près des conditions aux frontières de la perturbation qui sont de type Dirichlet et non pas Neumann comme dans le paragraphe 1.2.1.

Alternativement, une approche de localisation basée sur l'analyse des noyaux de sensibilité est présentée dans la section suivante. Malgré la différence d'environnement (un milieu aquatique réverbérant), les phénomènes physiques et régimes de diffusion sont semblables.

1.3.3 Localisation en milieu réverbérant à partir des noyaux de sensibilité expérimentaux

La méthode de localisation présentée dans ce paragraphe se base sur l'analyse de noyaux de sensibilités expérimentaux mesurés sur un nombre réduit de positions et de couples de capteurs. Cette technique ne requiert pas de modèle de propagation fin du milieu réverbérant et peut donc être employée dans des contextes où les propriétés du milieu sont méconnues, comme dans le paragraphe 1.3.2 précédent. Elle est appliquée ici pour localiser une perturbation locale dans un environnement réverbérant 3D (en relation avec les applications en acoustique sous-marine). Cette dernière repose également sur les fondements théoriques de l'approche perturbative (§1.3.1) et l'analyse des noyaux de sensibilité qui relie la variation locale du paramètre considéré à la variation engendrée sur le signal mesuré aux récepteurs [TTL05]. Dans la communauté géophysique et sous-marine, les noyaux de sensibilité sont utilisés à des fins de tomographie [TTL05] par temps de trajet [SCD09; Ric00], pour des variations locales de densité [MRNM11] et de célérité [SCK11] ou pour la diffraction de surface en guide d'onde marin [SMR+12]. Les noyaux de sensibilité se distinguent des dérivées de Fréchet (§1.2.1) qui relie une variation infinitésimale de paramètres à la variation engendrée sur la fonction de

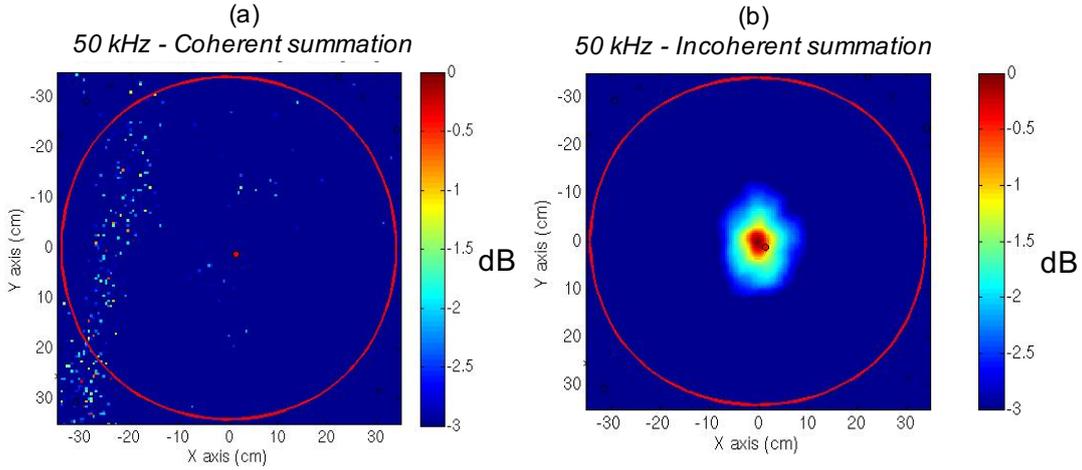


Figure 1.10 – Application de la méthode d'imagerie de type Delay-And-Sum (a) par sommation cohérente (formulation classique) (b) par sommation incohérente entre capteurs pour localiser une perturbation induite par un déplacement de tige à 50 kHz dans un milieu avec une densité de diffuseurs de $408/\text{m}^2$.

coût (définie au sens des moindres carrés). Toutefois, noyau de sensibilité et dérivée de Fréchet sont reliés linéairement (cf. Eq. 1.4) par le terme de variation du champ considéré (pression ou déplacement). Dans ces travaux, l'objectif consiste à localiser une ou plusieurs perturbation(s) locale(s) induite(s) par l'introduction d'une cible (balle de ping pong) dans une piscine réverbérante (figure 1.11). La balle de ping pong avait pour vocation de reproduire la diffraction par un(des) poisson(s) possédant une vessie natatoire. En effet, lorsque ces poissons sont insonifiés acoustiquement, la majeure partie de l'énergie acoustique renvoyée aux capteurs correspond à la diffraction par leur vessie natatoire qui est analogue à une poche d'air au niveau de leur branchie [Cla91].

En suivant un formalisme identique à la section 1.3.1, la variation du champ de pression causée par l'introduction d'une cible (variation de densité et de célérité) s'écrit

$$\Delta P(\mathbf{r}_r, \omega) = \int_{\Omega} \int_{\Omega} K_Z(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) d\Omega(\mathbf{r}') + \Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) d\Omega(\mathbf{r}_s), \quad (1.40)$$

où $\Delta N_m(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ décrit les interactions multiples de l'onde avec la cible tandis que le noyau de sensibilité K_Z s'exprime [MRNM11] selon

$$K_Z(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) = -4\pi f_{\infty}(\varphi_s + \varphi_r; \omega) G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}'; \omega) G_1(\mathbf{r}', \mathbf{r}_s; \omega), \quad (1.41)$$

et f_{∞} est la fonction de forme de diffraction de la cible, elle dépend de ses propriétés, des angles de diffraction φ_s et φ_r (définis sur la figure 1.12) et de la fréquence ω . Le terme $G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$ réfère à la fonction de Green du milieu fluide réverbérant avant l'introduction de la cible (variation de densité et de célérité).

Après application de la transformée de Fourier inverse, la variation d'amplitude relative de la pression pour le terme d'ordre 1 (terme ΔN_m négligé) et pour un couple

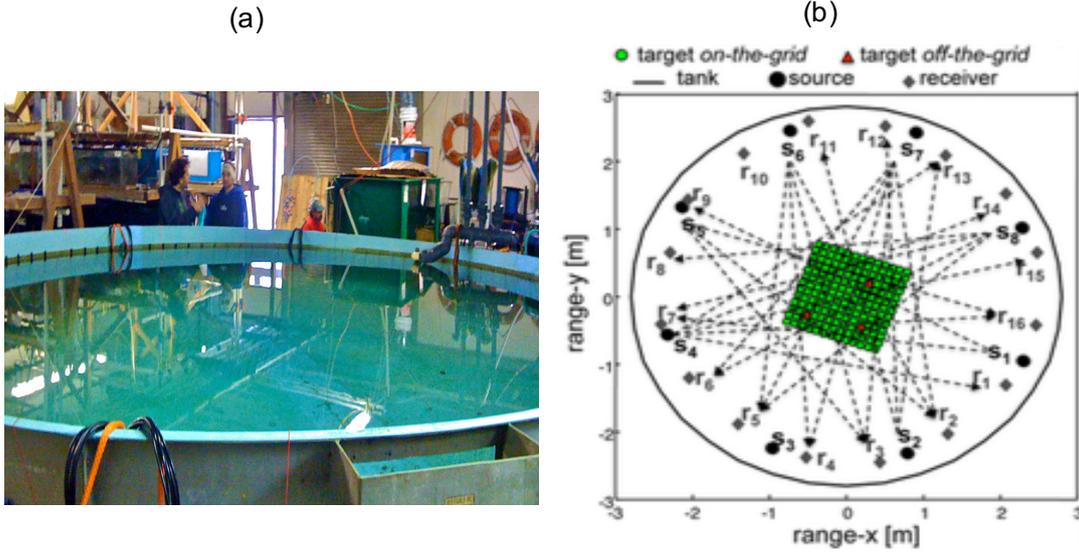


Figure 1.11 – (a) Photo de la cuve réverbérante et (b) Schéma du dispositif expérimental (vu d'en haut)

d'émetteur/récepteur s'écrit

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p(\mathbf{r}_r, t)}{p_1(\mathbf{r}_r, t)} &= \frac{\Delta A}{A_1}(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s, t), \\ &= -4\pi \frac{\int \int_{\Omega} K_Z(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) e^{i\omega t} d\Omega(\mathbf{r}') d\omega}{\int G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega) S(\mathbf{r}_s, \omega) e^{i\omega t} d\omega}. \end{aligned} \quad (1.42)$$

L'équation 1.42 décrit l'effet d'une perturbation en \mathbf{r}' sur le champ de pression mesuré entre une source en \mathbf{r}_s et un récepteur en \mathbf{r}_r . Pour une perturbation locale en \mathbf{r}' , la variation relative d'amplitude est égale au noyau de sensibilité normalisé par le champ de pression à l'état de référence. La figure 1.12e montre un très bon accord entre noyaux de sensibilités théoriques calculés selon (1.42) et expérimentaux déterminés à partir de la variation relative de pression. Les noyaux de sensibilité affichés sur la figure 1.12e correspondent aux variations du champ sur le trajet direct pour un couple source/récepteur donné. Dans ce cas, la fonction de Green du milieu de référence, $G_1(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s; \omega)$, est la fonction de Green homogène en milieu infini.

La méthode de localisation développée [YRR+14a] consiste à inverser les variations de pression causées par une perturbation locale en \mathbf{r}' à partir d'un modèle de noyaux de sensibilités « expérimental » mesurés au préalable pour plusieurs positions \mathbf{r}' de perturbations

$$\frac{\Delta p(\mathbf{r}_r, t)}{p_1(\mathbf{r}_r, t)} = \frac{\Delta A}{A_1}(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s, t) x(\mathbf{r}'), \quad (1.43)$$

où $x(\mathbf{r}')$ fournit une indication quantitative de la présence d'une cible à la position \mathbf{r}' . Sous forme discrétisée matricielle, ce problème linéaire s'écrit

$$\Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{A} \mathbf{x}, \quad (1.44)$$

où $\Delta \mathbf{p}$ est un vecteur ($[N_r \times N_s] \times 1$) dont les éléments correspondent au résidu normalisé $\Delta p(\mathbf{r}_r, t)/p_1(\mathbf{r}_r, t)$ mesuré aux N_r récepteurs pour les N_s sources, $\Delta \mathbf{A}$ est une matrice ($[N_r \times N_s] \times N$) dont les éléments $\frac{\Delta A}{A_1}(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s, t)$ correspondent aux noyaux de sensibilité normalisés mesurés au préalable sur N points du milieu et pour les ($N_r \times N_s$) couples d'émetteurs/récepteurs. Les éléments du vecteur \mathbf{x} de dimension ($N \times 1$) indique la probabilité $x(\mathbf{r}')$ de la présence d'une variation pour chaque point N du milieu et est maximale à la position de la perturbation, c-a-d lorsque $\mathbf{r}' = \mathbf{r}_d$. La position de la cible est estimée à partir du système linéaire (1.44) par pseudo inversion de la matrice $\Delta \mathbf{A}$ qui constitue le « modèle direct » pour l'inversion.

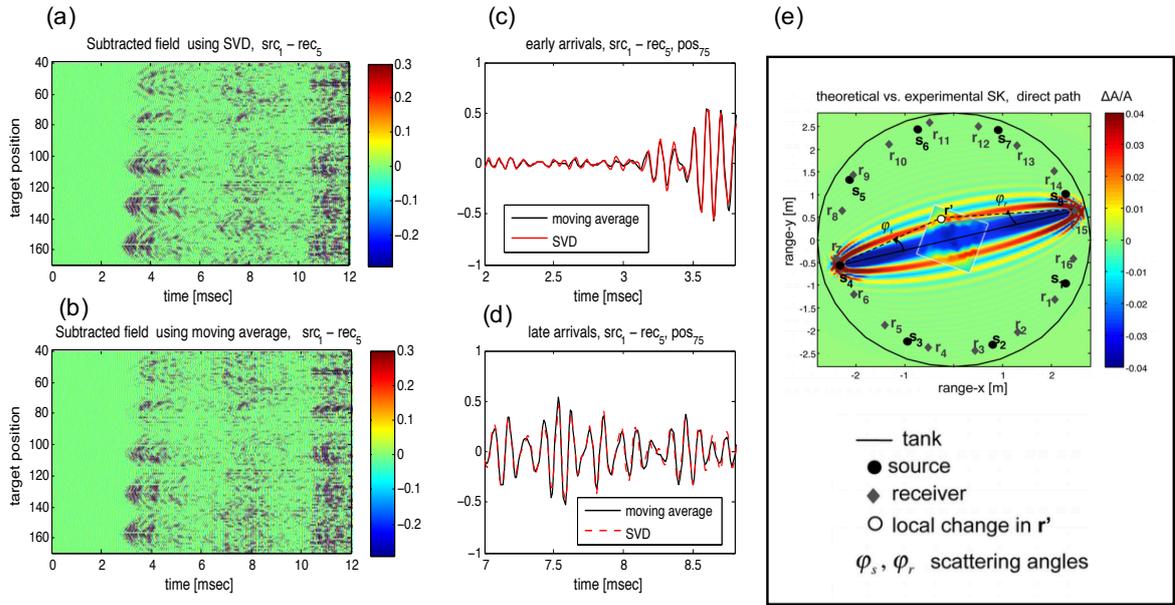


Figure 1.12 – Signature de la perturbation par différenciation (a) à partir de la décomposition en valeur singulière du signal perturbé (b) par soustraction du signal perturbé par la moyenne du signal perturbé; Comparaison des traces temporelles de la signature du défaut pour (c) l'interaction directe de l'onde avec la cible et (d) les interactions multiples de l'onde avec la cible (coda); (e) Comparaison d'un exemple de noyaux de sensibilité normalisés mesurés et théoriques.

L'approche a été testée pour localiser plusieurs balles de ping pong dans une piscine réverbérante circulaire (figure 1.11) à partir d'un réseau de 15 récepteurs et 15 sources disposés sur le pourtour de la cuve et travaillant dans la bande fréquentielle [6-14] kHz. Les noyaux de sensibilité sont mesurés au préalable pour une perturbation engendrée par une unique balle de ping pong sur un maillage de 169 (13 x 13) positions pour tous les couples de récepteurs/émetteurs (figure 1.11b). Le calcul des variations de pression relatives $\Delta p(\mathbf{r}_r, t)/p_1(\mathbf{r}_r, t)$ et des noyaux de sensibilité normalisés $\frac{\Delta A}{A_1}(\mathbf{r}', \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s, t)$ nécessitent la connaissance du signal de référence non perturbé. Pour ce faire, 2 alternatives ont été implémentées pour déterminer le signal de référence à partir des différentes mesures effectuées en milieu perturbé. Ceci permet de disposer d'un signal de référence lorsqu'il n'est pas directement accessible par la mesure ou la théorie (scénario qui se produit souvent). Le signal de référence est ainsi déterminé par moyenne glissante sur plusieurs

positions de cibles. Dans la première alternative, le résidu est obtenu par différenciation avec cette référence (figure 1.12a). La seconde approche consiste à reconstruire le résidu à partir de la décomposition en valeur singulière des signaux perturbés en omettant la plus forte valeur singulière de la décomposition (figure 1.12b). Comme illustré sur les figures 1.12a, 1.12b, 1.12c et 1.12d, les deux alternatives pour extraire la signature de la perturbation fournissent un résidu équivalent aussi bien pour les interactions directes que les interactions multiples de l'onde avec la cible (figures 1.12a et 1.12b).

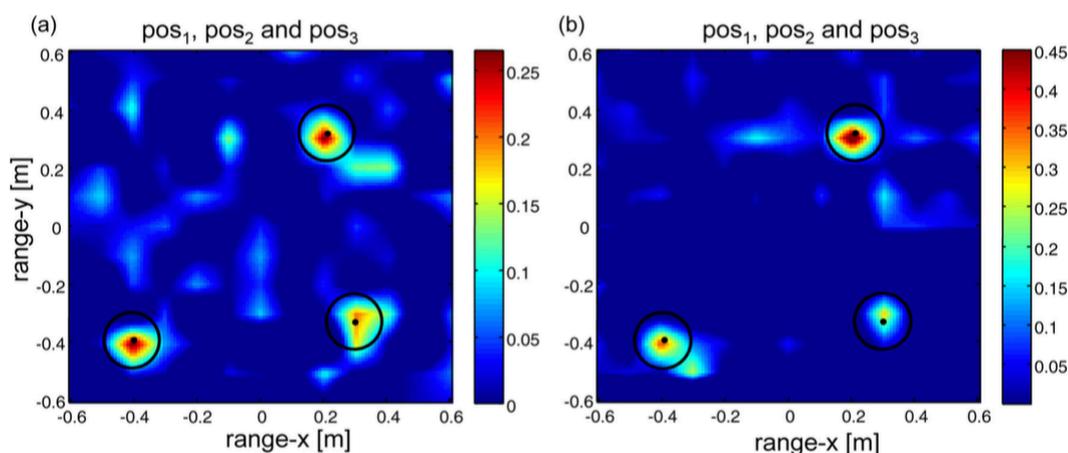


Figure 1.13 – Localisation de 3 cibles (en terme de probabilité relative) à partir des noyaux de sensibilité expérimentaux correspondant (a) aux trajets directs entre source-cible-récepteur et (b) aux trajets multiples entre source-cible-récepteur (interactions multiples perturbation/cuve)

L'algorithme de localisation est testé pour trois cibles à des positions différentes des points du maillage utilisés pour construire les noyaux de sensibilité du modèle (matrice $\Delta\mathbf{A}$). Lorsque l'inversion du problème direct est effectuée en ne considérant que le trajet direct pour construire les éléments de $\Delta\mathbf{p}$ et $\Delta\mathbf{A}$, la méthode localise chacune des cibles avec une probabilité (relative) de l'ordre de 0.2 (figure 1.13a). Cette probabilité s'améliore et monte autour de 0.35 lorsque les variations sur la coda des signaux est prise en compte (figure 1.13b). En effet, la redondance d'information dans la coda permet d'améliorer le rapport pic sur bruit. La technique de localisation présentée dans cette section présente l'avantage de s'affranchir d'un modèle analytique du milieu grâce à la mesure de noyaux de sensibilité en guise de modèle direct. Ainsi, les performances de cette méthode dépendent principalement de la configuration de mesures, notamment le nombre de capteurs, et du maillage pour la construction des noyaux de sensibilité (résolution).

Dans la section qui suit, les travaux décrits poursuivent une démarche analogue à ci-dessus en exploitant un modèle « expérimental » du milieu pour localiser une perturbation dans une structure. La différence réside dans la nature même du modèle qui repose sur la forme d'onde du signal (phase et amplitude du signal) et non pas sur un noyau de sensibilité.

1.3.4 Localisation passive de défaut par corrélation de champ à partir d'un modèle expérimental

L'approche développée dans cette partie [LRM+19] trouve ses applications pour le suivi passif de l'intégrité des structures (plus communément dénommé SHM pour Structural Health Monitoring). Le but est d'exploiter le bruit ambiant du milieu environnant pour localiser passivement l'apparition éventuelle d'un défaut d'une structure immergée dans un fluide. L'approche préconisée se décompose selon 2 étapes : (1) la reconstruction d'une information cohérente à partir du bruit mesuré au niveau des récepteurs par méthode de corrélation de bruit [RSK+05 ; SRK05 ; CRP+15] et (2) la détection et localisation d'un éventuel défaut local (= variation de densité et/ou célérité) par approche perturbative et par méthode de corrélation des formes d'ondes expérimentales (Matched Field Processing). La spécificité de ce travail réside dans l'utilisation d'un réplica (c'est-à-dire le modèle direct) expérimental dans l'implémentation du Matched Field Processing et de la mise en oeuvre d'un process adaptatif régularisé de Matched Field Processing sur le signal résiduel. L'utilisation d'un réplica « expérimental » permet de disposer d'un « modèle » plus robuste qu'un modèle numérique dans le cas d'un environnement complexe dont les propriétés sont méconnues et de prendre avantage des interactions multiples entre la structure sondée et le milieu environnant [HM14a ; Har15]. En contrepartie, les performances de ce type d'approche dépendent fortement du nombre de capteurs disponibles et de leur dispositions [HM14b].

La méthodologie développée dans le cadre de mes activités de recherche a été testée sur le cas académique d'une coque cylindrique immergée dans un fluide et plongée dans un champ de bruit diffus (figure 1.14). Ce cas se rapprocherait des problématiques d'inspection des structures tubulaires présentes dans la cuve des réacteurs nucléaires. Dans cet environnement bruyant, les sources de bruit sonores et vibratoires engendrées par exemple par les pompes et turbines seraient mises à profit pour localiser passivement une variation sur la structure inspectée. Cette méthode vient s'ajouter en complément des approches passives telles que l'émission acoustique [GZL+09 ; KSGV16 ; NYHM17].

Soit une structure élastique immergée dans un fluide, entourée de N_r récepteurs mesurant le champ de pression acoustique en champ proche et sollicitée par un champ acoustique diffus. Dans un champ diffus ou champ spatialement et temporellement décorrélé, il a été montré que la fonction de Green entre 2 points de mesure \mathbf{r}_i et \mathbf{r}_j peut être estimée à partir de la corrélation des champs entre ces 2 récepteurs [LW01 ; SWB+07]. Dans le plan fréquentiel, la corrélation des champs de pression moyennée sur plusieurs réalisations spatiales donne la partie imaginaire de la fonction de Green

$$\langle P(\mathbf{r}_i, \omega) P^*(\mathbf{r}_j, \omega) \rangle = -8\pi |P|^2 \Im[G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)], \quad (1.45)$$

où $\Im[G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)]$ désigne la partie imaginaire de la fonction de Green $G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$, P est l'amplitude moyenne spatiale du champ de pression et le symbole $\langle \cdot \rangle$ réfère à l'opération de moyenne spatiale. Dans la lignée des précédents travaux, cette étude repose aussi sur une approche perturbative. Les champs de pressions sont mesurés pour plusieurs réalisations spatiales de champ incident pour 2 états du milieu et la fonction de Green (partie imaginaire) est estimée selon (1.45) pour chaque état du milieu, $\Im[G_1(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)]$ et $\Im[G_2(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)]$. En présence d'une perturbation locale de paramètres (densité et célérité), rappelons que la variation de la fonction de Green s'exprime en fonction de la fonction de Green $G_1(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ avant occurrence de la perturbation locale qui agit comme une source secondaire (cf. section 1.3.1, équations (1.33) - (1.36)). Ainsi, pour localiser la

variation de paramètres, l'approche consiste à rétropropager le résidu de la fonction de Green ($\Delta G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$) vers la perturbation locale en \mathbf{r}_d . Cette rétropropagation du champ est réalisée par la méthode de Matched Field Processing (corrélation de champs) déjà introduite à la section 1.2.2 pour le processeur de Bartlett :

$$MF_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = \left| \sum_{r=1}^N D^*(\mathbf{r}_i, \omega) W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_i) \right|^2, \quad (1.46)$$

qui s'écrit de façon équivalente sous forme matricielle,

$$MF_{bart}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{w}^+(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{K}(\omega) \mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega), \quad (1.47)$$

où les éléments du vecteur colonne $\mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega)$ de dimension $(1 \times N_r)$ correspondent au modèle $W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_i)$ (encore appelé réplica dans le manuscrit) tandis que la matrice de covariance est telle que $\mathbf{K}(\omega) = \mathbf{d}(\omega) \mathbf{d}^+(\omega)$ où le vecteur colonne $\mathbf{d}(\omega)$ de dimension $(1 \times N_r)$ contient les observations $D(\mathbf{r}_i, \omega)$. La variable $D(\mathbf{r}_i, \omega)$ correspond aux données observées, soit à la variation de la fonction de Green reconstruite : $\Im[\Delta G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)]$. Tandis que le modèle, $W(\mathbf{r}, \omega | \mathbf{r}_i)$ auquel l'observation est comparée correspond à la fonction de Green reconstruite avant occurrence de la perturbation : $\Im[G_1(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)]$. Dans cette formulation, les positions de pointage correspondent aux positions des capteurs et sont telles que $\mathbf{r} = \mathbf{r}_j$. En présence d'un défaut local, c'est-à-dire une variation locale de paramètres, la sortie du processeur de Bartlett est maximale lorsque la position de pointage est à la position de la perturbation en \mathbf{r}_d , soit pour toute fonction de Green du réplica définie entre un point de mesure et la position du défaut. Toutefois, du fait du niveau des lobes secondaires élevé, le rapport pic sur bruit du processeur de Bartlett n'est pas optimal. Le processeur adaptatif à minimum variance [Cap69] permet d'optimiser ce rapport pic sur bruit et d'obtenir une meilleure résolution que le processeur de Bartlett

$$MF_{MV}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{w}_{MV}^+(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{K}(\omega) \mathbf{w}_{MV}(\mathbf{r}, \omega), \quad (1.48)$$

où le réplica $\mathbf{w}_{MV}(\mathbf{r}, \omega)$ est défini comme suit

$$\mathbf{w}_{MV}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\mathbf{K}(\omega)^{-1} \mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega)}{\mathbf{w}^+(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{K}(\omega)^{-1} \mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega)}. \quad (1.49)$$

Ce processeur s'avère très sensible à tout écart entre réplica et données, et perd en robustesse lorsque le modèle est biaisé [Mak79]. Or, le modèle utilisé dans ces travaux est dans tous les cas biaisé car le réplica est la fonction de Green du milieu non perturbé entre 2 point de mesures en champ proche tandis que dans la réalité, il faudrait la fonction de Green entre la position de la perturbation et un point de mesure. Afin de rendre le process plus robuste vis-à-vis de ces écarts, le processeur est contraint par bruit blanc (Processeur WNGC)[CZO87; JKP+11] :

$$MF_{WN}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{w}_{WN}^+(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{K}(\omega) \mathbf{w}_{WN}(\mathbf{r}, \omega), \quad (1.50)$$

et

$$\mathbf{w}_{MV}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{(\mathbf{K}(\omega) + \alpha(\omega) \mathbf{I})^{-1} \mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega)}{\mathbf{w}^+(\mathbf{r}, \omega) (\mathbf{K}(\omega) + \alpha(\omega) \mathbf{I})^{-1} \mathbf{w}(\mathbf{r}, \omega)}, \quad (1.51)$$

où $\alpha(\omega)$ est le niveau de bruit blanc ajouté qui permet d'être plus robuste vis-à-vis du biais sur le réplica [JKP+11] et d'assurer que la matrice $(\mathbf{K}(\omega) + \alpha(\omega)\mathbf{I})$ est inversible.

Les trois processeurs ont été testés entre 7 kHz et 10 kHz sur un exemple numérique dont la configuration est illustrée sur la figure 1.14. La structure inspectée est un cylindre en aluminium immergé et rempli d'eau ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $c_0 = 1500 \text{ m/s}$), de rayon extérieur $a = 22,5 \text{ cm}$ et d'épaisseur 1 cm , de densité $\rho_1 = 2700 \text{ kg/m}^3$, coefficient de Poisson $\mu_1 = 0,33$ et module de Young $E_1 = 70 \text{ GPa}$. Une perturbation locale de densité $\rho_1 = 7850 \text{ kg/m}^3$, coefficient de Poisson $\mu_2 = 0,33$ et module de Young $E_2 = 200 \text{ GPa}$, est introduite en $\pi/6$ avec une extension spatiale de $0,7^\circ$. Une centaine de capteurs sont disposés dans le champ proche du tube cylindrique à 6 mm de sa surface.

Les résultats des surfaces d'ambiguïté des 3 processeurs sont comparés sur la figure 1.15. Le processeur de Bartlett parvient à localiser angulairement la perturbation avec un rapport pic sur bruit de 5 dB tandis que l'algorithme de minimum variance ne parvient pas à le localiser du fait de l'écart entre réplica et position réelle de la perturbation. L'ajout du terme de régularisation par bruit blanc dans le processeur à variance minimale (WNGC processor sur la figure 1.15) améliore grandement la localisation par rapport aux deux autres processeurs avec une meilleure résolution et un meilleur rapport pic sur bruit. Notons toutefois que ce rapport de 25 dB est lié aussi à la présence d'un biais artificiel qui dépend de la valeur du terme de bruit $\alpha(\omega)$ ([SKH+03] et voir la section « matériel supplémentaire » dans [LRM+19]).

Dans la configuration étudiée, qui présente un écart entre modèle « expérimental » et données, le processeur à variance minimale régularisé est le plus approprié. Les performances de la méthode sont dépendantes de la grille de capteurs et de leur position par rapport à la structure. Un positionnement des capteurs plus distant par rapport à la structure ainsi que la diminution de leur nombre entraînent une élévation des lobes secondaires. La suite de ces travaux s'intéresse ainsi à la démonstration expérimentale de la méthode qui est en cours, et porte notamment sur la localisation de défauts pour des structures dans des chambres relativement réverbérantes.

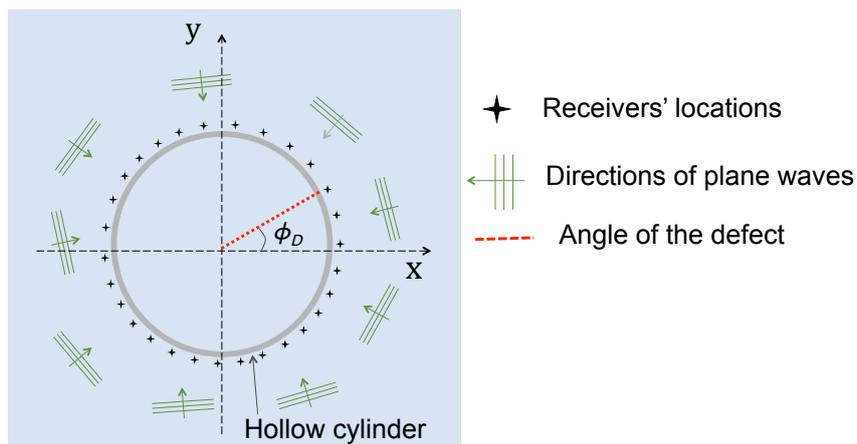


Figure 1.14 – Schéma de la configuration de mesure : 100 capteurs de pression sont disposés autour d'un tube d'aluminium présentant un défaut ponctuel (variation d'impédance) en $\pi/6$. Le tube est sollicité par une champ diffus qui est modélisé ici comme une superposition incohérente d'ondes planes de directions, amplitudes et phases définies aléatoirement.

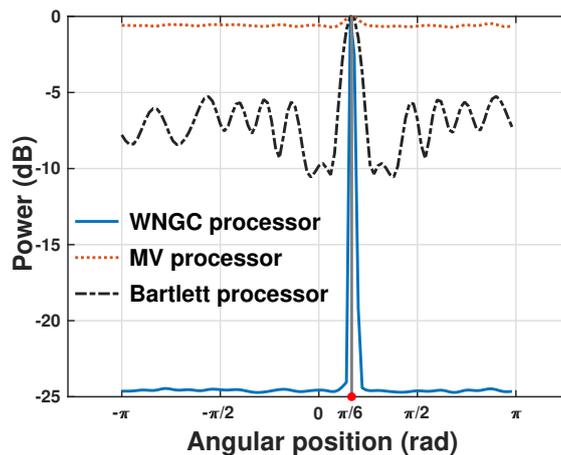


Figure 1.15 – Comparaison des processeurs de Matched Field Processing (Bartlett, Minimum variance et Minimum variance régularisé avec un gain de bruit blanc de -2 dB) pour localiser un défaut ponctuel localisé en $\pi/6$.

1.3.5 Synthèse

Dans cette section 1.3, quelques alternatives pour localiser une ou plusieurs perturbations locales dans un milieu diffus ou réverbérant ont été présentées dans le cas où l’environnement est méconnu. Les méthodes développées reposent sur une approche perturbative dans laquelle deux états du milieu inspecté sont mesurés afin d’extraire par différenciation les événements de diffraction engendrés par la variation locale de paramètres (célérité/densité). Ensuite, trois alternatives exploitant cette signature de diffraction ont été implémentées pour localiser la perturbation et surmonter les difficultés engendrées par la méconnaissance du milieu. Pour ce faire, il est donc important que le niveau du champ diffracté par la perturbation soit supérieur au niveau du bruit (le terme bruit réfère à toute contribution sur le signal autre que la diffraction par la perturbation). Or, comme la section efficace de diffraction d’un diffuseur augmente avec la fréquence, cette limitation est accentuée en basses fréquences lorsque les longueurs d’ondes sont largement supérieures à la taille de la perturbation.

La première méthode de localisation présentée dans la section 1.3.2 consiste à employer un modèle simplifié du milieu en appliquant sur le résidu une méthode de formation de voies de type Delay-And-Sum incohérente qui ne nécessite que la connaissance de la vitesse du milieu environnant. Même si cette méthode exploite l’interaction simple de l’onde avec la perturbation, elle offre un bon compromis entre robustesse, rapport pic sur bruit d’environ 3 dB et simplicité d’implémentation dans un régime de diffusion multiple (où le libre parcours moyen de transport est inférieur à la distance de propagation de l’onde dans la zone à imager). Comme discuté dans [RWKR11b], elle trouve ses limites lorsque l’interaction simple avec la perturbation devient négligeable par rapport aux interactions multiples, comme c’est le cas en régime diffus (où le libre parcours moyen de transport est largement supérieur à la distance de propagation de l’onde).

Alternativement, plutôt que d’utiliser une méthode de localisation basée sur un modèle simplifié du milieu, l’autre approche suivie dans mes travaux se base sur un modèle direct expérimental du milieu pour localiser une ou plusieurs cibles en milieu réverbérant (§1.3.3) et dans le cadre de la localisation passive de défaut sur une structure

complexe (§1.3.4). Ceci permet de disposer d'un modèle direct englobant la complexité du milieu même si les paramètres sont méconnus. Cette démarche laisse la possibilité de prendre en compte une partie des interactions multiples de l'onde avec la perturbation et d'améliorer ainsi les performances de localisation [YRR+14b]. La méthode basée sur l'analyse des noyaux de sensibilité (§1.3.3) pour localiser un diffracteur dans une cuve réverbérante en est une illustration : plusieurs perturbations sont localisées avec un meilleur rapport pic sur bruit lorsque les noyaux de sensibilités sur plusieurs trajets multiples de l'onde sont pris en compte par rapport aux noyaux de sensibilité sur le trajet direct. Les travaux sur la localisation passive de défaut local en milieu diffus présentés dans la section 1.3.4 emploient une approche sensiblement différente en corrélant directement le signal mesuré dans le milieu de référence avec le résidu (Matched Field Processing sur le résidu qui équivaut à calculer le champ adjoint). Comme ces deux dernières approches reposent sur l'élaboration d'un modèle direct à partir de données expérimentales, leurs performances dépendent fortement de la disposition spatiale des capteurs et de leur nombre. Afin d'améliorer les performances de ces méthodes de localisation, il reste à étudier davantage l'optimisation de la configuration de mesure en terme de performances par rapport à une configuration de mesure donnée [FT10; HWTD14; DRLL15]. Or, la tendance est de plutôt favoriser des répartitions non uniforme des capteurs qui permettent d'atteindre de meilleures résolutions qu'avec des capteurs répartis uniformément pour un nombre d'éléments identiques à des antennes uniformes ([XBS15], [Dah16] et toutes les références qui y sont mentionnées). La localisation passive de défaut ou de variation des propriétés du milieu (§1.3.4) vise à exploiter les sources d'opportunité dans un contexte de contrôle non destructif ou de suivi de structure. Toutefois, les approches passives reposent sur l'hypothèse de distribution statistique isotrope et uniforme du champ acoustique. Expérimentalement, ces conditions sont souvent difficilement vérifiées. Ainsi, l'implémentation expérimentale fait l'objet de mes travaux actuels où 2 stratégies peuvent être employées : soit recréer artificiellement un environnement diffus, soit proposer des méthodes passives alternatives robustes dans des conditions de champ diffus non parfaites ([GCRC11; DRCM19]).

Enfin, un autre point important sur les méthodes de localisation développées dans ce chapitre, concerne l'approche perturbative qui nécessite une mesure ou un modèle de référence qui ne sont pas nécessairement disponibles en condition de contrôle *in situ*. Ainsi, la tendance serait d'explorer également des approches ne nécessitant pas de référence ou une information minimale (comme avec l'approche de décomposition en valeur singulière et de suppression de la première valeur propre dans [YRR+14a]).

A présent, les travaux entrepris pour localiser une source active en guide d'onde marin sont présentés.

1.4 Approche perturbative pour la localisation de source active en mouvement

Publication associées [A4]

[CI4]

Collaborations MPL/SIO, San Diego, USA : W. Kuperman

Le problème de localisation traité dans ce paragraphe est celui d'une source en mouvement en environnement réverbérant dans le contexte marin. L'application

traitée est celle d'une source se déplaçant dans un guide d'onde marin par petits fonds (profondeurs ≤ 100 m). La source peut être par exemple un bateau, un mammifère marin ou un sous-marin. L'approche perturbative est appliquée non pas pour 2 états successifs du milieu (les paramètres du milieu ne varient pas ou peu), mais pour 2 positions successives de la source en mouvement. De même que dans la section 1.3 précédente, les paramètres du milieu ne sont que partiellement connus et le positionnement de la source recherchée ne sont pas connus aussi bien en profondeur que distance. On suppose toutefois que le milieu varie lentement si bien que le milieu est considéré invariant entre 2 positions successives de la source. De plus, son mouvement se fait à vitesse constante. La méthode de localisation développée dans cette étude exploite les phénomènes de réverbération de l'onde émise par la source avec les frontières du guide d'onde marin. La vitesse instantanée de déplacement de la source par rapport à l'antenne réceptrice est estimée par interférométrie puis cette information est réutilisée pour la localiser. Cette démarche vient compléter les approches basées sur l'invariant de guide d'onde [Chu82 ; TK08 ; CS10 ; Coc11 ; RZ11] qui permettent de localiser des sources en guide d'onde marin par petit fonds. Comme l'invariant de guide d'onde est proche de l'unité [DK99] pour un large panel d'environnements petits fonds, ces méthodes de localisation ont l'avantage d'être robustes et peu sensibles aux variations du milieu. La technique alternative discutée dans ce paragraphe [RK12b], se veut également robuste vis-à-vis des propriétés du milieu environnant et à partir de mesures sur un unique récepteur. Elle s'apparente aux techniques de Coda Wave Interferometry [Sni06] et considère des variations relatives de temps trajet comme dans la méthode de double différence [WE05] employée en sismique pour localiser des foyers sismiques. La méthode consiste à comparer les champs de pression, $P(r, \omega)$ et $P(r + \Delta r, \omega)$, mesurés à un récepteur fixe pour 2 positions successives de la source en mouvement, puis analyser les franges d'interférence exhibées par l'intensité de la variation de pression. Selon le formalisme des modes normaux, la variation de pression entre 2 positions de sources s'exprime selon

$$\begin{aligned} \Delta P(R, \Delta r, \omega) &= P(r + \Delta r, \omega) - P(r, \omega) \\ &= \sum_m A_m(\omega) e^{ik_{rm}R} \sin(k_{rm} \frac{\Delta r}{2}) \end{aligned} \quad (1.52)$$

où r désigne la distance relative entre la source et le récepteur fixe, Δr est la distance entre 2 positions successives de sources tandis que R est la distance moyenne entre ces deux positions. De plus,

$$A_m = \frac{\Psi_m(z_s) \Psi_m(z)}{\sqrt{k_{rm}R}}, \quad (1.53)$$

où z_s et z réfèrent respectivement aux positions verticales de la source et du récepteur dans la colonne d'eau, et k_{rm} est le nombre d'onde radial du mode Ψ_m . La quantité $I_\Delta(R, \Delta r, \omega) = |\Delta P(R, \Delta r, \omega)|^2$ analogue à une intensité est dominée par le terme suivant (pour le détail des calculs le lecteur pourra se référer à [RK12b])

$$I_\Delta(R, \Delta r, \omega) \propto \cos(\bar{k}_r \Delta r) \sum_{m,n} A_m A_n \cos(k_{mn}R), \quad (1.54)$$

où le terme \bar{k}_r est le nombre d'onde moyen sur les différentes modes tel que $\bar{k}_r = \omega / \bar{v}_p$ avec \bar{v}_p la vitesse de phase moyenne sur les modes à la pulsation ω . Or, pour des

acquisitions à chaque temps τ , la vitesse instantanée de la source $v_s(\tau)$ est telle que

$$\Delta r(\tau) = v_s(\tau)\Delta\tau(\tau) \quad (1.55)$$

où $\Delta\tau(\tau)$ est l'intervalle de temps entre deux positions successives $\Delta r(\tau)$ de source au temps d'acquisition τ . Ainsi, en analysant les franges d'interférence liées au terme $\cos(\overline{k_r}\Delta r)$, il est possible de remonter à la vitesse instantanée de déplacement de la source en mesurant l'espacement entre 2 zéros de la fonction cosinus. Selon la bande fréquentielle du signal, la période entre 2 zéros s'exprime soit en fonction de la fréquence dans le plan $(\Delta\tau, \tau)$ pour un signal bande étroite, équation 1.56, soit en fonction de l'intervalle de temps dans le plan (f, τ) pour un signal large bande, équation 1.57 :

$$d_t = \frac{\overline{v_p}}{v_s(\tau)\Delta\tau(\tau)}, \quad (1.56)$$

$$d_f = \frac{2\pi\overline{v_p}}{v_s(\tau)\omega}. \quad (1.57)$$

De plus, après développement du calcul de $I_\Delta(R, \Delta r, \omega)$, on trouve que

$$I_\Delta(R, \Delta r, \omega) = I_{R-\frac{\Delta r}{2}}(R, \Delta r, \omega) + I_{R+\frac{\Delta r}{2}}(R, \Delta r, \omega) - P(r+\Delta r, \omega)P^*(r, \omega) - P^*(r+\Delta r, \omega)P(r, \omega), \quad (1.58)$$

où les termes $I_{R-\frac{\Delta r}{2}}(R, \Delta r, \omega)$ et $I_{R+\frac{\Delta r}{2}}(R, \Delta r, \omega)$ correspondent respectivement aux intensités des champs de pression $P(R - \frac{\Delta r}{2}, \omega)$ et $P(R + \frac{\Delta r}{2}, \omega)$. Ainsi, l'étude de la partie réelle de la corrélation contient aussi les mêmes caractéristiques d'interférences que le champ différentiel (équ. 1.54) :

$$I_c(R, \Delta r, \omega) = \Re [P(r + \Delta r, \omega)P^*(r, \omega)] \quad (1.59)$$

$$\propto \cos(\overline{k_r}\Delta r) \sum_{m,n} A_m A_n \cos(k_{mn}R). \quad (1.60)$$

Ainsi, aussi bien l'étude de la différence que l'analyse de la corrélation des champs de pression permettent d'estimer la vitesse instantanée de la source par rapport à la position du récepteur.

La méthode a été testée sur des données issues de l'expérience « SWellEX-96 » conduite en 1996 dans les eaux littorales juste à l'extérieur du port de San Diego (Californie, Etats-Unis) [BSBR96 ; BASH00]. Les données traitées concernent une source tractée à 54 m de profondeur et se déplaçant à une vitesse constante de 2,55 m/s dans un guide d'onde de 217 m de profondeur comme indiqué sur les figures 1.16a et 1.16b. Les signaux émis par la source sont monofréquentiels pour plusieurs fréquences et rapports signal sur bruit. Ces derniers sont réceptionnés par une antenne verticale positionnée sur le fond pendant 75 minutes.

La corrélation du champ de pression mesuré sur l'un des éléments de l'antenne verticale à 49 Hz est affiché sur la figure 1.17a en fonction du temps d'acquisition τ et de l'intervalle de temps $\Delta\tau$ entre les corrélations. On note la présence d'interférences liées au cosinus. De plus, le décalage fréquentiel lié à l'effet Doppler est de l'ordre de 0,2 Hz : il est donc négligeable devant les franges d'interférences observées sur la figure 1.17a. En appliquant une transformée de Fourier sur le résultat de la corrélation et la formule (1.56) pour chaque temps d'acquisition, il est possible d'estimer la vitesse

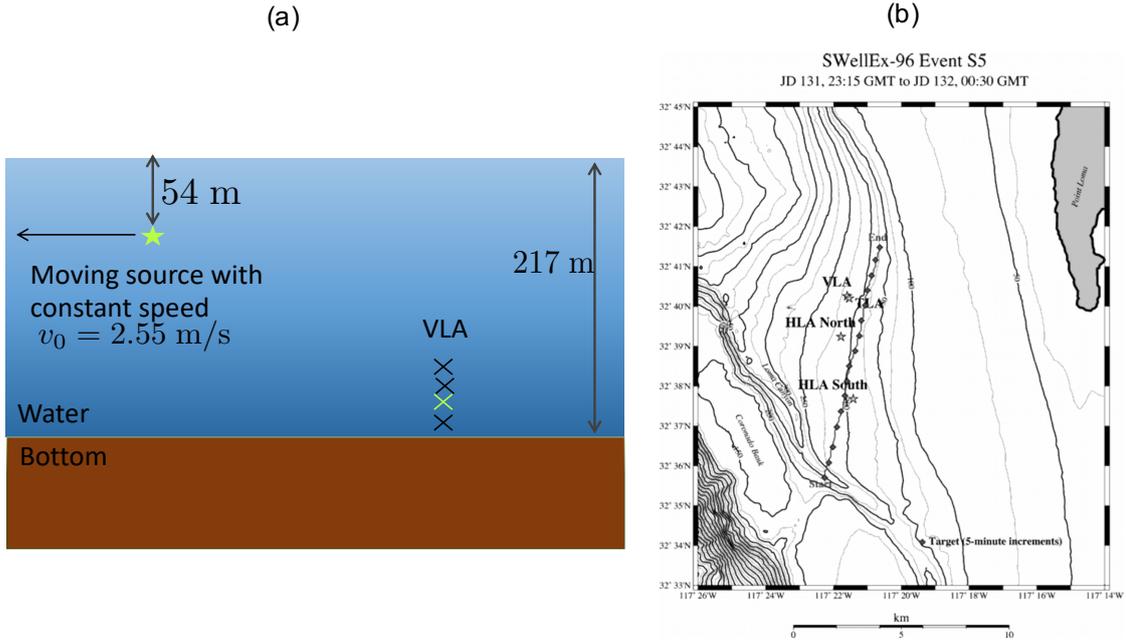


Figure 1.16 – (a) Schéma de l’expérience : source harmonique à 49 Hz se déplaçant à vitesse constante dans un guide d’onde sous-marin. Le signal rayonné par la source est mesuré de façon continue par les éléments d’une antenne verticale (VLA) (b) Carte et trajectoire de la source tractée.

instantanée de la source $v_s(\tau)$ par rapport au récepteur (figure 1.17b). Pour ce faire, la vitesse de phase est approchée par la célérité dans l’eau qui engendre un biais de 0,06 m/s sur l’estimation de la vitesse instantanée [RK12b]. Ensuite, sous l’hypothèse d’une vitesse de déplacement linéaire de la source, sa position par rapport au récepteur s’écrit

$$r(\tau) = \sqrt{r_0^2 + (\tau - t_0)^2 v_0^2}, \quad (1.61)$$

où r_0 et t_0 sont la distance et le temps d’approche de la source le plus proche du récepteur. Afin de déterminer la position de la source $r(\tau)$, le modèle de vitesse instantanée $v_s(\tau) = \frac{\delta r}{\delta \tau}(\tau) = \frac{1}{\Delta \tau} |r(\tau) - r(\tau - \Delta \tau)|$ avec l’équation (1.61) est utilisé pour inverser la vitesse instantanée mesurée (figure 1.17b) par méthode des moindres carrés.

La figure 1.17c montre un bon accord (10% d’erreur max) entre la position estimée et celle fournie par le GPS. Comme discuté dans [RK12b], les performances de l’approche dépendent de l’approximation sur la valeur de la vitesse de phase moyenne, du rapport signal sur bruit et de la largeur de bande pour les signaux large bande ou de l’intervalle de temps $\Delta \tau$ entre les fenêtres de corrélation/différenciation pour les signaux bande étroite. De plus, notons que les signaux doivent être cohérents entre les différentes fenêtres de corrélation/différenciation, ce qui est le cas jusqu’à une durée de 200 s dans les données présentée. Enfin, lorsque la position d’approche de la source la plus proche du récepteur n’est pas visible sur les données (absence d’un point d’inflexion comme sur la figure 1.17b pour le temps d’acquisition $\tau = 60$ min), une procédure combinant cette approche et l’invariant de guide d’onde est donnée dans [RK12b].

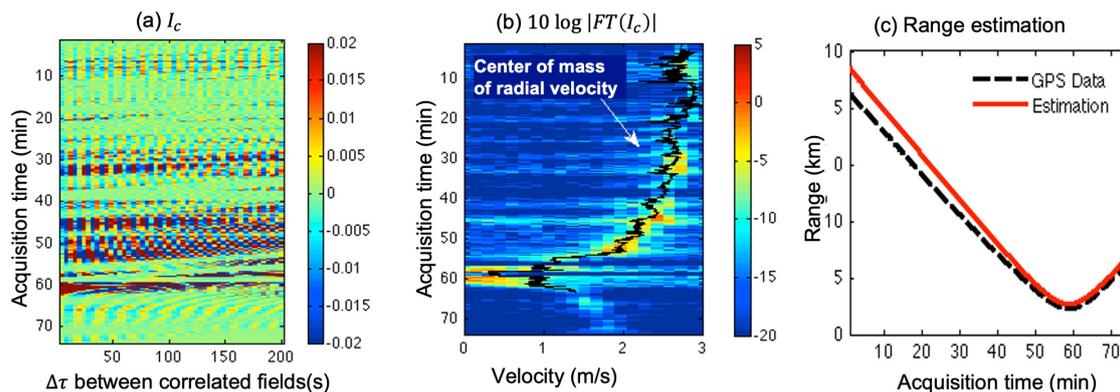


Figure 1.17 – (a) Résultat de l’intercorrélation des champs pour différents intervalles de temps (b) Transformée de Fourier de $TF[I_c(\Delta\tau)]$ dans le plan (τ, v) pour différents temps d’acquisition τ et en fonction de la vitesse instantanée de la source par rapport à la position du récepteur. (c) Comparaison entre la distance source/récepteur estimée et mesurée par les données GPS.

1.5 Conclusions

Pour synthétiser, ce premier chapitre a permis d’exposer un pan de mes travaux de recherche sur le développement de méthodes de localisation de sources locales actives et secondaires dans des environnements réverbérants, diffusants ou anisotropes par approche perturbative et en appliquant des techniques d’inversion exploitant au mieux les informations *a priori* sur les propriétés du milieu. Les applications visées rentrent dans le cadre du contrôle non destructif et le suivi de l’état de santé des structures et du suivi de cible en acoustique sous-marine.

Selon la disponibilité des connaissances *a priori* sur l’environnement ausculté, différentes stratégies sont employées :

- **En présence d’informations *a priori* suffisantes sur les propriétés du milieu** pour établir un modèle de propagation numérique relativement fidèle, une approche paramétrique est employée. Ainsi, la méthode de l’énergie topologique a été déclinée selon plusieurs variantes pour localiser un défaut dans une pièce en acier de dimension finie puis une soudure multi-passe. Les différentes déclinaisons proposées de la méthode de l’énergie topologique ont pour but de s’affranchir en partie des effets de masquage causés par la présence de réflexions multiples liées aux frontières du milieu (ET modifiée, §1.2.1) et par les déviations des faisceaux ultrasonores causées par l’anisotropie (ET modifiée sélective, §1.2.1). Alternativement, la méthode de Matched Field Processing (filtrage adapté) a aussi été appliquée dans l’idée d’exploiter la redondance d’information causée par les interactions multiples de l’onde ultrasonore entre les récepteurs et le défaut (§1.2.2). Les images fournies par le Matched Field Processing sont complémentaires à celles fournies par l’énergie topologique : pour exemple, l’ET affiche uniquement la tête d’une entaille tandis que le MFP localise tout le corps de l’entaille. Cela est lié au fait que le MFP qui est l’équivalent du champ adjoint, diffère de l’ET par un opérateur de filtrage temporel. Pour cette raison, le MFP est plus robuste mais moins résolu que l’ET.
- **En l’absence d’informations *a priori* suffisantes sur les propriétés du**

milieu, la stratégie consiste tout d’abord à extraire la signature de la source recherchée par différenciation ou corrélation entre 2 états successifs du milieu, ou encore par suppression de certaines valeurs propres du signal après décomposition en valeur singulière. Ensuite, une approche a été d’appliquer une méthode de formation de voie conventionnelle incohérente (analogue au Delay-and-Sum incohérent) basée sur un modèle homogène infini du milieu pour localiser une perturbation dans un environnement multiplement diffusant (§1.3.2). Ce type de traitement trouve ses limites dans le cas d’un milieu diffus (au sens statistique) ou fortement réverbérant. Dans ce cas, une autre voie pour localiser une perturbation dans un tel environnement consiste à déterminer le modèle de milieu non pas à partir de données simulées mais de mesures expérimentales. Cette démarche a été implémentée pour localiser une perturbation dans une cuve réverbérante à partir de l’analyse de noyaux de sensibilité (§1.3.3) puis dans un environnement diffus par matched field processing (§1.3.4) et pour localiser une source en mouvement dans un guide d’onde marin par interférométrie (§1.4). Dans ces approches, la mesure vient « alimenter » le modèle, ainsi un effort particulier doit être porté sur la mise en oeuvre des mesures car les performances en dépendent. Ce type d’approches tend à favoriser les dispositifs expérimentaux avec de larges prises de mesure pour extraire le maximum d’informations : cela passe par soit par une large couverture spatiale, c’est-à-dire de larges réseaux de capteurs, soit une large couverture temporelle/fréquentielle, c’est-à-dire des mesures sur des longues durées (problématique de large volume de données) et des larges bandes fréquentielles. Une problématique est donc de trouver le meilleur compromis entre performance et configuration de mesure optimale (nombre et positionnement de capteurs, durée d’acquisition, bande fréquentielle).

Mes recherches actuelles et futures sont dans le prolongement des travaux présentés dans ce premier chapitre et basés sur une analyse perturbative. Elles concernent plus spécifiquement l’extension des approches paramétriques telles que l’énergie topologique et le matched field processing sur le résidu ou l’extension d’approches interférométriques à la problématique de suivi d’écoulement et d’imagerie ultra-rapide de bulles d’air dans un fluide liquide (Thèse CEA/LMA de Jules Fermé, 2020 - 2023).

Une seconde problématique examinée est celle de la localisation passive de défaut dans un environnement complexe. Celle-ci se décline pour des applications CND/SHM en génie civil pour la localisation de fissures dans une structure en béton ainsi que dans l’industrie nucléaire pour le suivi de structure à partir de sources d’opportunité (Thèse CEA/LMA de Théo Langlet, 2021 - 2024). Une des difficultés majeures concerne la distribution des sources et la distribution spatiale du champ qui ne sont pas nécessairement uniformes. Les travaux s’attachent ainsi à proposer des alternatives pour demeurer robuste même en l’absence de champs statistiquement uniformes.

L’analyse perturbative sur laquelle ces travaux reposent consiste à extraire une variation par rapport à un état de référence. Or, cette étape est loin d’être triviale d’un point de vue expérimentale. L’opération de différenciation entre 2 états du milieu se trouve limitée en présence de variabilité de l’environnement (par exemple, variation de température journalière) et une mesure ou simulation des signaux pour un état de référence n’est pas nécessairement disponible ou peut présenter de faibles RSB ou une mauvaise adéquation avec l’environnement réel. Les travaux futurs visent à avancer sur cette voie en explorant différentes représentations des signaux suivant des bases les

plus appropriées au problème considéré ou en explorant les approches non linéaires qui permettent de modifier l'état du matériau et recréer ainsi artificiellement un état de référence du matériau.

Enfin, les méthodes développées ont pour vocations à être appliquées expérimentalement, voir industriellement pour une partie d'entre elles. Ainsi, la démonstration expérimentale de ces approches est un maillon important pour les travaux passés, actuels et futurs. De plus, les travaux récents visent à utiliser des méthodes passives et autant que possible la mesure pour l'injecter dans le problème direct. Ainsi l'accent est mis sur l'utilisation de larges réseaux de capteurs (>50 capteurs) et l'acquisition de larges volumes de signaux pour disposer d'un maximum de réalisations spatiales et temporelles. Les travaux futurs examineront ainsi les approches pour fournir le meilleur compromis entre performance et configuration de mesure optimale. Cette problématique étant exclusivement expérimentale, le but sera de l'explorer à partir du dispositif d'holographie développé conjointement au Marine Physical Laboratory, UCSD, San Diego (États-Unis) et au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, AMU, Marseille. Ce dispositif fait également l'objet des développements discutés dans le chapitre 2 (§2.3.2) sur la caractérisation d'objets élastiques par holographie acoustique. Ce dispositif permettra d'accéder à toute la complexité de la mesure expérimentale tout en étant en mesure de contrôler la mesure en environnement de laboratoire afin de conduire des validations expérimentales.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit aborde maintenant les méthodes de caractérisation de structures complexes en environnement complexe.

Chapitre 2

Caractérisation en milieu complexe

Sommaire

2.1	Introduction	44
2.2	Caractérisation en milieu élastique multiplement diffusant : béton	45
2.2.1	Exploration de la diffusion multiple dans le béton	46
2.2.1.1	Caractérisation à partir de la diffusivité	49
2.2.1.2	Analyse du pic de réverbération cohérente	51
2.2.2	Diffusion et contact imparfait aux interfaces	52
2.2.2.1	Impact de l'ITZ sur les paramètres cohérents : atténua- tion et vitesse de phase	54
2.2.2.2	Impact de l'ITZ sur les paramètres incohérents : diffusivité	56
2.2.3	Synthèse	58
2.3	Caractérisation passive d'un objet élastique en milieu diffus	60
2.3.1	Réponse <i>in vacuo</i> (matrices d'impédance mécanique ou d'admit- tance mécanique) d'une cible par corrélation de bruit	62
2.3.2	Méthode d'holographie acoustique pour la détermination des matrices d'impédance/admittance mécaniques	66
2.3.3	Synthèse	70
2.4	Caractérisation en milieu anisotrope, atténuant et stratifié	70
2.4.1	Caractérisation sédiments marins	71
2.4.2	Caractérisation de matériaux composites	73
2.5	Conclusions	74

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre présente mes travaux de recherche engagés sur la caractérisation acoustique et ultrasonore de structures en environnement complexe ou d'une structure elle-même complexe. Les méthodes développées visent à proposer des approches robustes et performantes de caractérisation en présence de diffusion, atténuation, anisotropie et stratification.

Mes travaux sur ce deuxième axe de recherche portent principalement sur la caractérisation en milieu diffus, c'est pourquoi les résultats de ces recherches seront davantage exposés dans ce deuxième chapitre. Les méthodes développées pour caractériser des milieux atténuants et stratifiés seront présentées succinctement en fin de chapitre car il s'agit que d'une petite part de mes recherches.

Dans le cadre de la caractérisation acoustique et ultrasonore en milieux diffusants, je me suis intéressée à deux types de problématiques, l'une liée à la caractérisation d'un milieu lui-même diffus pour des applications en génie civil tandis que l'autre est liée à la caractérisation d'un objet élastique immergé dans un champ diffus par holographie acoustique pour des applications en acoustique-sous marine avec des ouvertures vers le contrôle de structures.

La première problématique concerne la caractérisation ultrasonore du béton qui est un matériau élastique bi-phasique constitué d'une matrice cimentaire et d'agrégats de différentes tailles aléatoirement positionés dans la matrice. Pour des raisons de mise en oeuvre et de sensibilité à l'état du matériau, les ondes ultrasonores constituent un des moyens privilégiés pour ausculter le béton [BG17]. Selon le choix de la fréquence d'auscultation des ondes, la caractérisation du milieu peut être achevée selon différentes résolutions et portées. Ces travaux se sont principalement intéressés à la caractérisation du béton pour des fréquences supérieures à la centaine de kHz, régime dans lequel on sera davantage résolu mais en contre-parti les ondes subissent davantage les effets de diffusion par les agrégats du béton. Or, en régime de diffusion, l'onde perd la mémoire de sa direction d'émission initiale. Les méthodes développées s'attachent donc à examiner cette perte de cohérence pour caractériser le milieu en analysant soit le moment d'ordre 1 (c'est-à-dire la moyenne) soit en analysant les moments d'ordre 2 (intensité) en l'absence totale de cohérence. Ces différents points sont discutés dans la section 2.2.

La seconde problématique examinée concerne la caractérisation acoustique d'une cible ou d'un objet élastique en milieu diffus par méthode holographique. Dans un tel milieu, les signaux mesurés contiennent la signature de l'objet à caractériser noyé dans les signaux liés au champ diffus qui peut se décomposer comme une superposition d'ondes planes incohérentes. Dans ces conditions (que l'on peut retrouver pour une cavité réverbérante ou constituée de diffuseurs discrets), il y a absence de cohérence entre les signaux mesurés au même titre que dans le cas de l'auscultation ultrasonore du béton. Ainsi, l'étude de la moyenne ne permet pas d'obtenir d'information car elle est nulle. Par analogie avec l'étude des moments d'ordre 2, une approche consiste à reconstruire de la cohérence entre les capteurs par corrélation des signaux entre les différentes paires de capteurs. La corrélation de bruit permet ainsi de reconstruire virtuellement la fonction de Green entre 2 récepteurs sans la nécessité d'avoir un capteur source. Ensuite, à partir de ces signaux, il est possible d'appliquer une approche holographique pour caractériser l'objet élastique. Ainsi, le deuxième volet de ce chapitre (§2.3) aborde les méthodes développées dans le cadre de cette étude.

Enfin, la section 2.4 présente des stratégies alternatives de caractérisation qui ont été développées pour surmonter les difficultés liées à la présence d'anisotropie, d'atténuation et/ou de stratification dans le milieu ou la structure sondée. Ces développements rentrent dans le cadre du contrôle de matériaux composites et de l'identification des sédiments marins.

2.2 Caractérisation en milieu élastique multiplement diffusant : béton

<i>Publication associées</i>	[A12], [A14], [A15], [A17], [A18] [CI16], [CI17], [CI20], [CI21], [CI22], [CI23], [CI24], [CI25], [CI28],[CI29]
<i>Collaborations</i>	LMA, Marseille : V. Garnier, C. Payan, J-F. Chaix, J. Eiras, B. Lombard, M. Ramaniraka, J. Lin EDF, Chatou : J.-M. Hénault I2M, Bordeaux : R. Razafindratsima ANDRA, Paris : S. Lesoille
<i>Projets/contrats associés</i>	[P3], [P4], [C1]

Cette section présente les méthodes de caractérisation ultrasonore développées dans le contexte de l'évaluation non destructive du béton en vue de détecter, localiser et potentiellement caractériser un endommagement précoce du matériau.

Le béton est un milieu bi-phasique visco-élastique constitué d'une matrice cimentaire et d'agréats. Dans un tel environnement, l'onde ultrasonore est sujette aux phénomènes de visco-élasticité, diffraction, atténuation qui peuvent être plus ou moins prépondérants selon la fréquence de l'onde. Dans l'industrie, la caractérisation ultrasonore du béton repose classiquement sur l'estimation des modules de cisaillement, modules de compression ou encore facteurs de qualité (atténuation) par des mesures en transmission ou en mode pulse écho [BG17]. L'estimation de ces paramètres et de leur évolution en fonction de l'état du matériau permettent d'inférer sur l'état de la structure.

Généralement, la rigidité diminue avec l'état d'endommagement du béton dont les sources peuvent être multiples comme discuté dans le chapitre 1 de [Ram19]. A un stade précoce, l'endommagement peut se manifester par le développement de microfissures au niveau des interfaces qui vont ensuite se généraliser dans la structure jusqu'à former des (macro-)fissures. Ces microfissures impactent sur la propagation de l'onde ultrasonore en agissant comme des diffuseurs supplémentaires. Ainsi, la section 2.2.1 présente les travaux entrepris pour caractériser le béton à partir de l'analyse de la diffusion.

Les zones propices au développement de microfissures se situent aux interfaces, là où les concentrations de contraintes sont maximales. Ces zones correspondent aux interfaces matrice cimentaire/agréats qui sont des zones de transition interfaciale que nous nommerons ITZ par la suite. La partie 2.2.2 propose d'inclure une représentation de cette zone avec des contacts imparfaits afin d'étudier l'impact généralisé de ces interfaces sur la diffusion ultrasonore ; tout ceci en vu d'une caractérisation quantitative de l'endommagement.

Les résultats présentés dans les sections 2.2.1 et 2.2.2 sont le fruit des travaux de master de J. Lin que j'ai supervisés (collaboration LMA et EDF) et plus particulièrement

des travaux de thèse de Manda Ramaniraka (Thèse LMA, 2016 - 2019) que j'ai co-encadrés avec V. Garnier (Professeur AMU/LMA) et des collaborations avec les collègues enseignants-chercheurs (J.-F. Chaix et C. Payan), chercheurs (B. Lombard) et post-doctorant (J. Eiras) du LMA.

2.2.1 Exploration de la diffusion multiple dans le béton

Alternativement aux méthodes d'auscultation « moyennes fréquences » (c'est-à-dire entre quelques centaines de Hertz et quelques kHz) qui permettent une inspection globale de la structure en béton [LDM+06; PUL+14; EPRG18b], ces travaux visent à ausculter plus finement le milieu à des fréquences de travail plus élevées, c-a-d des fréquences avoisinant plusieurs centaines de kilohertz jusqu'au mégahertz, et d'examiner la possibilité d'estimer de nouvelles signatures caractéristiques du matériau. A ces fréquences, les effets de diffractions et diffusions multiples de l'onde par les agrégats (figure 2.1a) deviennent prépondérants : les produits ka sont généralement compris entre 1-10 (a rayon de l'agrégat, k nombre d'onde) et les densités de diffuseurs sont supérieures à 30%. Et l'onde est plus sensible à la présence cumulée de micro-fissures. Cette configuration favorise potentiellement la caractérisation de l'endommagement à un stade plus précoce car, bien que le signal soit davantage atténué, il est davantage sensible à la micro-structure du béton.

Dans ce régime de fréquences (quelques centaines de kHz - quelques MHz), le signal mesuré fait apparaître 2 portions distinctes (figure 2.1b) : (1) une portion en début de signal que l'on nommera partie cohérente et qui correspond au trajet direct de l'onde entre l'émetteur et le récepteur, (2) et une deuxième portion reliée aux temps d'arrivée plus tardifs de l'onde que l'on qualifie de partie incohérente ou coda et qui correspond aux interactions multiples de l'onde avec le milieu, que l'on nomme onde ballistique. Il existent plusieurs classes d'approches qui analysent et exploitent la diffusion de l'onde ultrasonore par les hétérogénéités du béton pour en extraire une signature et le caractériser. Certaines méthodes de caractérisation se basent sur l'hypothèse de diffusion simple pour estimer un facteur de qualité ou quantifier la taille des grains [SB86; CGC03]. D'autres approches considèrent la diffusion multiple de l'onde et examinent la partie cohérente du signal sous l'hypothèse de diffusion non corrélée (independance scattering) pour en extraire des valeurs de vitesses de phases/groupes et d'atténuation [Mam05; CLLP12; YCA+19a].

Plusieurs travaux analysant la partie incohérente ou coda du signal reposent quant à eux sur l'hypothèse de régime de diffusion et mettent en jeu soit une analyse statistique (étude du moment d'ordre 2 via équation de diffusion) ou une analyse de type corrélation (coda wave interferometry). En se basant sur l'équation de diffusion 1D ou 2D en milieu infini, plusieurs travaux montrent notamment la sensibilité des paramètres de dissipation, de diffusivité estimés et de la position temporelle du maximum d'énergie par rapport à l'état du matériau [PJQ+07a; DKQ+10; AWT01; RKT04; Qui12].

Alternativement, les méthodes d'interférométrie (coda wave interferometry) suivant des approches linéaires et non linéaires [LPRM10; PGM10; SKSJ11; PL13; PLRM15] montrent également une bonne sensibilité pour caractériser une structure en béton en étudiant le décalage temporel entre 2 signaux provenant de 2 états différents du milieu.

L'analyse de la coda du signal est très intéressante car cette partie du signal contient une redondance d'information sur la micro-structure du fait des interactions

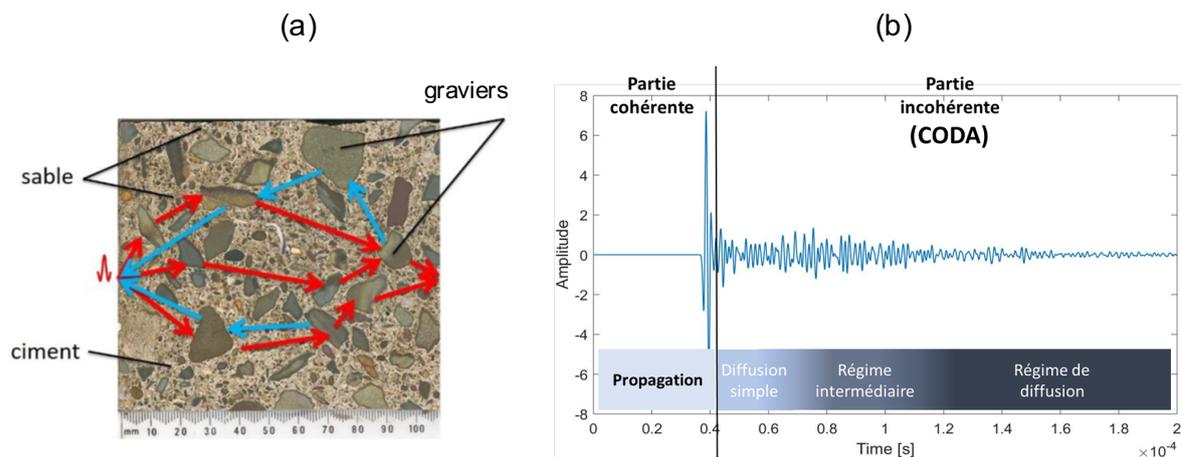


Figure 2.1 – Les différents régimes de diffusion

multiples de l'onde avec le milieu [FS91]. Tirer parti de cette redondance d'information n'est toutefois pas aisée car les méthodes actuelles d'interférométrie nécessitent deux mesures à deux états différents du milieu avec une connaissance précise de la position du capteur. Quant aux approches reposant sur l'hypothèse de régime de diffusion, ces dernières estiment des paramètres de diffusion basés sur l'équation de diffusion 1D ou 2D en milieu infini dont les hypothèses ne sont pas systématiquement vérifiées dans les structures inspectées qui sont des milieux bornés 3D. De plus, la thèse de Ramaniraka [Ram19] montre que le régime de diffusion n'est pas toujours complètement atteint. Toutes ces considérations impliquent donc une caractérisation uniquement qualitative à partir de la diffusivité. Afin d'achever une identification quantitative à partir de ce paramètre il est nécessaire de vérifier l'adéquation de ces hypothèses entre le modèle direct et le milieu inspecté.

Les travaux présentés dans ce manuscrit visent ainsi à revisiter ces différentes hypothèses en vue d'une estimation quantitative de la diffusivité (en relation avec l'état du matériau) et d'éventuellement déterminer de nouveaux observables caractéristiques du matériau et de son état à partir de l'étude de l'intensité moyenne.

Pour ce faire, notre méthodologie repose sur une analyse numérique de la diffusion dans le béton en veillant à se rapprocher autant que possible d'une configuration réelle de mesure sur le béton. Bien que simplificatrice, cette approche préliminaire permet de contrôler chacun des paramètres suivant : la densité de diffuseurs et leurs propriétés, la taille de l'échantillon, la position et le nombre de sources/récepteurs ainsi que les conditions aux frontières. Cette démarche permet de mieux comprendre les mécanismes de la diffusion multiple, de confronter les divers développements analytiques présents dans la littérature, d'estimer des paramètres caractéristiques du milieu et d'aider à la mise en place d'un premier banc d'essai avant les validations expérimentales.

Des simulations ont été conduites à 500 kHz pour différents taux de diffuseurs de diamètre 12mm (10%, 20%, 30%, 40%) à l'aide du logiciel de différences finies Prospéro développé au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA Marseille, AMU CNRS) par Bruno Lombard [Lom10]. Afin de garder la possibilité de faire des comparaisons consistantes, les propriétés du béton-modèle données dans le tableau 1.1 sont identiques à celles prises dans diverses études [SK04 ; Che08 ; Yu18]. Le taux maximal de diffuseurs de 40% est réaliste pour représenter un béton car c'est en pratique le pourcentage

Matériau	c_p [m/s]	c_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	Viscoélasticité
Mortier	3950	2250	2050	Non
Granulats	4300	2475	2610	Non

Tableau 2.1 – Caractéristiques physiques des matériaux du béton-modèle

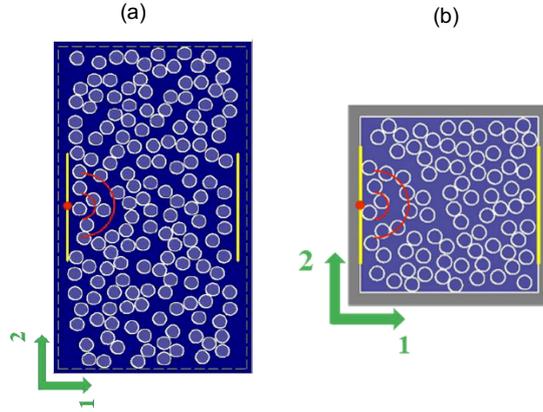


Figure 2.2 – Configuration des milieux simulés (a) sans bords réfléchissants (perfect matched layer) et dimensions 15 cm x 30 cm (b) avec bords libres et dimensions 15 cm x 15 cm

des granulats dont les tailles sont suffisamment grandes pour perturber l'onde (régime stochastique) dans un béton réel ($d > 3\text{mm}$) [Yu18]. Dans ce béton-modèle, nous avons un contraste d'impédance de 1.38, le granulat étant plus rigide que le mortier.

Deux types de configurations ont été simulées : un milieu multiplement diffusant sans bord réfléchissant (PML) et un milieu avec bords libres (conditions de Dirichlet), respectivement représentés sur les figures 2.2a et 2.2b. Ceci permet d'examiner les effets des conditions aux limites sur l'intensité moyenne (moment d'ordre 2 calculé sur 40 réalisations spatiales du milieu) et son équipartition, et de déterminer des approches alternatives pour caractériser le béton en régime diffusif. Pour ce faire, l'intensité moyenne $\langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle$ sur N réalisations est tout d'abord calculée comme suit :

$$\langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle = \left\langle \frac{1}{T} \int_T [y_i(\vec{x}, t + \tau, f) - \langle y_i(\vec{x}, t + \Delta t, f) \rangle_N]^2 d\tau \right\rangle, \quad (2.1)$$

où \vec{x} réfère à la position du point de mesure i sur l'échantillon de béton, f et t désignent la fréquence et le temps, T la période sur laquelle les signaux mesurés y_i sont intégrés pour déterminer l'intensité moyenne sur N réalisations. Cette intensité moyenne est analogue à une densité d'énergie.

Ces travaux sont focalisés sur l'analyse de la diffusivité et la détermination d'éventuels paramètres caractéristiques du milieu inspecté à partir de la coda qui traduit le régime de diffusion. Il est donc nécessaire de vérifier au préalable quelle partie du signal mesuré correspond à ce régime pour pouvoir y appliquer les méthodes d'estimation de paramètres propres au régime diffusif. Or, lorsque le régime est purement diffusif, l'équipartition de l'énergie des ondes ultrasonores [Wea82; SCM+00; HTS+01] est observée, c-a-d une répartition homogène dans l'espace des différentes polarisations (longitudinales et cisaillement) qui entraîne un rapport constant du ratio énergie ondes de cisaillement et énergie ondes longitudinales. D'un point de vue pratique, ce ratio est

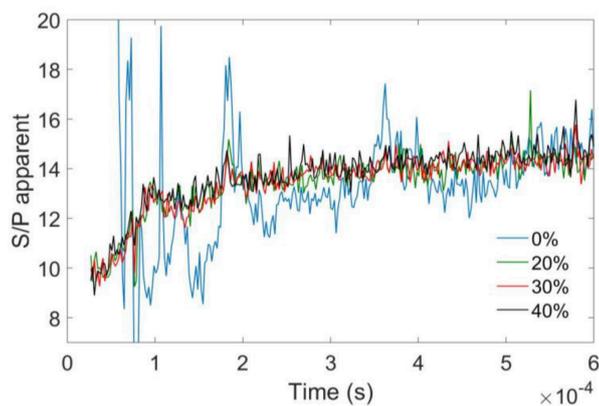


Figure 2.3 – Evolution du rapport moyen des intensités temporelles de cisaillement et de compression apparentes, noté « S/P apparent », à 500kHz pour différents taux de densités de diffuseurs

examiné à partir de l'étude des intensités de cisaillement et de compression apparentes [SCM+00; Ram19] qui est affiché sur la figure 2.3 pour les signaux simulés dans la configuration à bords libres. La figure 2.3 montre que ce ratio tend à se stabiliser plus rapidement et avec moins de variance lorsque la densité de diffuseurs augmente. De plus, à partir de 0.20 ms environ le plateau tend à se stabiliser pour les échantillons simulés avec 20%, 30% et 40% de diffuseurs tandis qu'ils se stabilise un peu plus tard vers 0.40 ms (avec une variance plus importante) pour l'échantillon sans diffuseurs (0%). Ces observations montrent que :

1. le régime de diffusion serait atteint après 0.20 ms environ pour les configurations à 20%, 30% et 40% : l'estimation de signatures caractéristiques du matériau en régime de diffusion ne sera donc possible qu'à partir de l'analyse des signaux mesurés au delà de ce temps. Dans ce travail, la robustesse de l'estimation du coefficient de diffusivité est notamment examinée vis-a-vis de ces conditions de régimes (§2.2.1.1).
2. dans le cas de l'échantillon sans diffuseur (0%), le rapport des intensités apparentes converge également vers un plateau : du fait des conditions aux limites (bords libres sur toutes les frontières de l'échantillon), les ondes sont multiples réfléchies par les bords de l'échantillon qui est analogue à une cavité. Ainsi à partir d'un certain temps (environ 0.40 ms), un régime de diffusion lié à ce phénomène de réverbération s'établit également. Pour caractériser le matériau à partir de la diffusion, il est donc nécessaire de pouvoir distinguer la diffusion liée au matériau (densité de diffuseurs) et celle liée à la réverbération (géométrie de l'échantillon). Une approche alternative basée sur l'analyse de la rétro-réverbération a été initiée et est discutée plus bas (§2.2.1.2).

2.2.1.1 Caractérisation à partir de la diffusivité

La diffusivité permet de détecter un potentiel endommagement du béton [Tur98; AWT01; RKT04; Pjq+07a; DKQ+10], son estimation repose sur l'hypothèse que le signal mesuré par les récepteurs est dans le régime de diffusion. Le coefficient de diffusivité, noté D , est conjointement estimé avec le coefficient de dissipation, σ , par optimisation de l'équation de diffusion qui décrit l'évolution de la densité spectrale

d'énergie $\langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle$,

$$\frac{\partial \langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle}{\partial t} - D\Delta \langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle + \sigma \langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle = I_0(\vec{x}, t, f), \quad (2.2)$$

où $I_0(\vec{x}, t, f) = I_0\delta(t)\delta(\vec{x} - \vec{x}_0)$ est le terme source pour une source positionnée en \vec{x}_0 . Deroo et al. [DKQ+10] comparent les diffusivités estimées à partir de la solution 3D de (2.2) pour un milieu borné et un milieu infini : les auteurs montrent que les tendances observées en fonction de l'endommagement du matériau (micro-fissures) sont qualitativement identiques, voir plus robustes pour la solution en milieu infini. C'est pourquoi, la solution en milieu infini a été reprise dans plusieurs études [Pjq+07a ; Qui12] visant à caractériser l'état de structure en béton bien que l'échantillon étudié soit de géométrie finie. Ainsi, en condition *in situ*, il est préférable d'estimer un coefficient de diffusivité à partir d'une solution simplifiée de (2.2) en milieu infini pour des raisons de robustesse. Les coefficients estimés renferment ainsi les deux informations liées au matériau et à la géométrie, et demeurent toutefois sensibles à des variations du milieu. Ces travaux ont donc visé à établir un lien entre l'estimation de ce paramètre D basé sur un modèle simplifié de la diffusion (simulation 2D donc solution 2D en milieu infini)

$$\langle I_i(\vec{x}, t, f) \rangle = \frac{I_0}{4D\pi t} \exp\left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{x}_0\|^2}{4Dt}\right) \exp(-\sigma t), \quad (2.3)$$

et l'état d'endommagement du matériau en vue d'une caractérisation quantitative qui est discuté dans le paragraphe 2.2.2. Au préalable, Ramaniraka RAMANIRAKA [Ram19] a comparé les valeurs de diffusivité estimées selon la configuration de mesure : transmission directe (configuration plus proche des hypothèses théoriques) et en rétrodiffusion (configuration plus proche des conditions d'auscultation d'une structure en béton *in situ* car seul l'accès à une unique face de la structure inspectée est nécessaire). Dans cette deuxième configuration en rétrodiffusion, la physique est différente : le profil spatial de l'intensité moyenne fait apparaître une surintensité au point d'émission valant le double de l'intensité moyenne liée aux jeux d'interférences constructives avec les diffuseurs du milieu (sur les chemins réciproques) qui conduisent au phénomène de localisation [VN99 ; Mam05]. Dans ce cas, pour un récepteur i positionné à la même position que la source, l'intensité moyenne s'exprime ainsi

$$\langle I_{i,coh}(\vec{x}, t, f) \rangle = \frac{I_0}{4D\pi t} |J_0(k_0 \|\vec{x} - \vec{x}_0\|)|^2 \exp\left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{x}_0\|}{l_{ext}}\right), \quad (2.4)$$

où J_0 est la fonction de Bessel de 1ère espèce et d'ordre 0, et l_{ext} est la longueur d'extinction. Les conclusions du travail de RAMANIRAKA [Ram19] montrent qu'en milieu multiplement diffusant sans bord réfléchissant (bord PML) et pour une matrice fluide (figure 2.2a), les coefficients de diffusivité estimés (Tableau 2.2) ont des valeurs sensiblement différentes entre mesures en transmission et en rétrodiffusion, et les tendances observées sont identiques : la diffusivité évolue inversement par rapport au taux de diffuseurs, c'est à dire le pouvoir diffusant du milieu. Ceci conforte l'application de mesures en rétrodiffusion en vue d'une caractérisation du matériau à partir des signaux diffusés sur des éprouvettes de grande dimension (épaisseur au moins 30 fois plus grande que la longueur d'onde afin que les effets de réflexion soient négligeables). Toutefois, en milieu borné, l'estimation du coefficient de diffusivité en rétrodiffusion

Taux de diffuseurs	D en transmission [m^2/s]	D en rétrodiffusion [m^2/s]
20%	24	18
40 %	18	12

Tableau 2.2 – Diffusivités moyennes (sur 10 valeurs) estimées en transmission directe et en rétrodiffusion pour le milieu multiplément diffusant sans bords réfléchissants (20% et 40% de diffuseurs) avec un mortier considéré fluide. L'écart-type est de $4 \text{ m}^2/\text{s}$.

n'est pas possible car l'intensité moyenne est dominée par la réverbération par les frontières qui participent également au phénomène de rétrodiffusion cohérente. Les éléments d'une approche alternative pour extraire une signature du pouvoir diffusant du matériau en milieu borné est présentée dans le paragraphe qui suit.

2.2.1.2 Analyse du pic de réverbération cohérente

Dans le cadre de mesures sur des petites éprouvettes (longueur d'onde non négligeable devant les dimensions moyennes de l'éprouvette), le signal mesuré provient de 2 types de contributions : la diffusion par les agrégats du milieu et la réverbération par les bords réfléchissants du domaine. Dans ce cas, la réverbération par les bords peut masquer les contributions volumiques de la diffusion par les agrégats. Tout comme la diffusion volumique, la réverbération par les parois de l'échantillon qui est analogue à une cavité peut donner naissance à une surintensité au point d'émission et sur les trajets symétriques au point d'émission [GCR11 ; CGR+11]. Ce phénomène de localisation est appelé Réverbération cohérente et nous y ferons référence dans le manuscrit par l'appellation CRE issue de l'anglais « Coherent Reverberation Enhancements ». Il a été montré que pour un bloc parallépipédique, la surintensité vaut 2.25 en 2D et 3.37 en 3D [GCR11]. Ces valeurs sont au-dessus du facteur 2 observé avec la rétrodiffusion cohérente liée aux phénomènes de localisation dans un milieu multiplément diffusif. Ceci s'explique par l'apparition de nouveaux chemins qui alimentent l'intensité cohérente en plus des chemins réciproques, et qui sont propres à ces géométries. Dans le cadre du milieu avec bords libres simulé dans cette étude, des surintensités sont observées au niveau des points symétriques de la source (figure 2.5a). En l'absence de diffuseur dans le matériau (taux de 0%), le CRE pour un milieu rectangulaire 2D est de 2.25. Or, en présence de diffuseurs dans le milieu, les chemins spécifiques à la réverbération cohérente subissent des interférences destructives avec ces hétérogénéités volumiques : la valeur du CRE est ainsi sensée diminuer avec l'augmentation du taux de diffuseurs.

La figure 2.5 affiche les CRE (moyenne sur 20 réalisations) estimés au point d'émission S et au point symétrique S' . Le CRE correspond à l'intensité du pic de réverbération cohérente normalisé par l'intensité incohérente (mesurée en dehors des zones de surintensité). On note qu'au niveau du point d'émission S , la valeur du CRE (courbe bleue de la figure 2.5b) diminue sensiblement pour ensuite se stabiliser autour de la valeur 2, caractéristique de la rétrodiffusion cohérente causée par des diffuseurs volumiques tandis qu'au niveau du point symétrique S' , la valeur de CRE chute davantage avec l'augmentation du taux de diffuseurs et conforte ainsi l'hypothèse que les chemins de réverbération cohérente sont perturbés par la présence des diffuseurs, cassant ainsi les interférences constructives au niveau des points de mesure symétriques par rapport à la position de la source. Ces premières observations

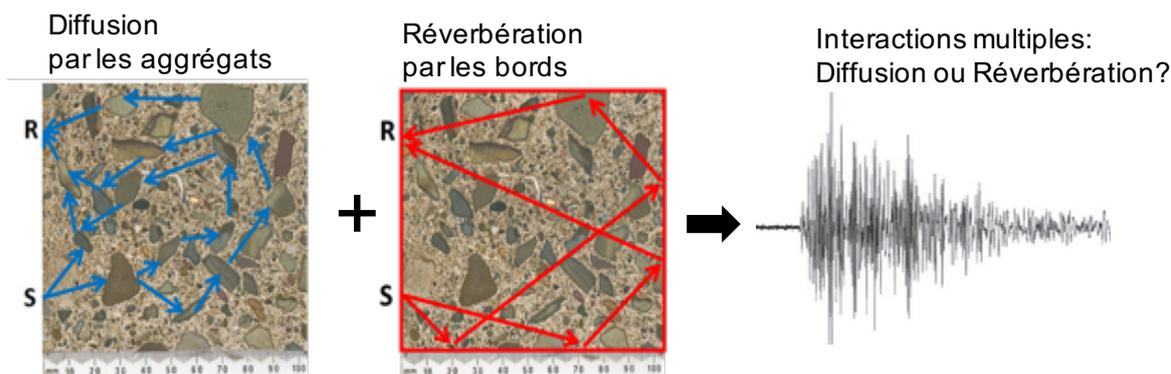


Figure 2.4 – Le signal mesuré en R pour une source en S provient de la contribution de 2 types d’interaction multiples : la diffusion par les agrégats et la réverbération par les bords.

qualitatives confirment le potentiel des approches basées sur l’étude du CRE pour caractériser un milieu multiple diffusant tel que des éprouvettes de béton. Toutefois, plusieurs verrous restent à lever sur les aspects théoriques, numériques et expérimentaux qui sont actuellement examinés dans le cadre des travaux de thèse d’Adel Messaoudi qui sont sous la direction de R. Cottreau au Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique de Marseille.

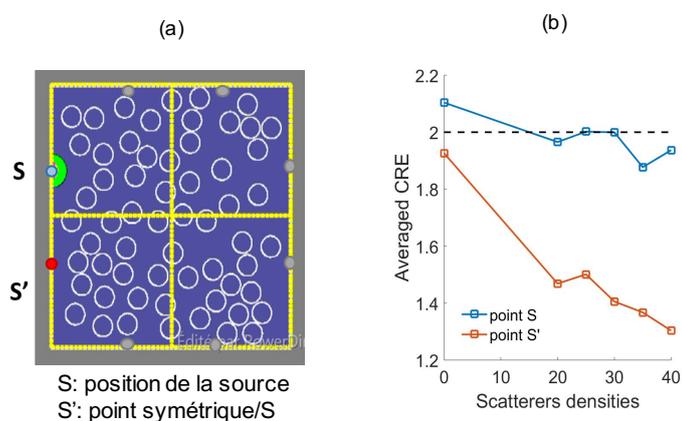


Figure 2.5 – (a) Les ronds dessinés en gris et en rouge correspondent aux points symétriques par rapport à la source S (point bleu) où une surintensité est mesurée (b) CRE en fonction du taux de diffuseurs pour deux positions de récepteurs, c’est-à-dire variation de l’intensité du pic de réverbération cohérente normalisé par l’intensité incohérente (mesurée en dehors des zones de surintensité)

2.2.2 Diffusion et contact imparfait aux interfaces

Les travaux discutés dans la section précédente 2.2.1 ont montré la sensibilité du paramètre de diffusion à la densité de diffuseurs en considérant un contact parfait entre la matrice cimentaire et les agrégats. Or, rappelons que le but final des travaux consiste à identifier un potentiel endommagement du béton à un stade le plus précoce

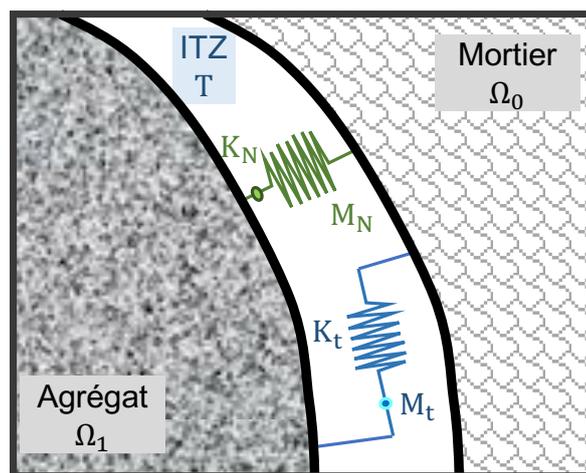


Figure 2.6 – Modélisation de l'ITZ par l'approche masse-ressort.

possible. Tout endommagement se manifeste en premier lieu dans les zones de contrainte maximale. Au niveau du béton, en raison des contraintes de cisaillement appliquées par l'agrégat sur la pâte de ciment pendant le mélange, l'eau a tendance à se séparer des particules de ciment. Il en résulte une fine couche avec plus d'eau autour de l'agrégat, donc plus de porosité lorsque le béton a fait sa prise. Ces zones se trouvant à l'interface entre la matrice cimentaire et les agrégats sont appelées Interfacial Transition Zone (ITZ) [KKBC14; KHD+18; PH00] et sont sujettes à des contraintes maximales. Ainsi, à un stade précoce, l'endommagement se manifesterait d'abord au niveau de l'ITZ par le développement de contacts imparfaits à l'interface. Or, les approches récentes visant à caractériser l'endommagement du béton à partir des ondes ultrasonores repose sur des modèles numériques de propagation des ondes ultrasonores dans un milieu diffusant avec des contacts parfaits aux interfaces [SK04; CLLP12; YCA+19a]. Ainsi, des travaux ont été entrepris pour inclure une description de l'ITZ dans la modèle numérique de propagation de l'onde ultrasonore dans le béton-modèle du paragraphe précédent (Tableau 2.1). L'impact de l'ITZ a été examinée à la fois sur les paramètres de la partie cohérente (figure 2.1b), c'est-à-dire vitesse de phase et atténuation, [RRPG19] et sur la partie incohérente ou coda des signaux ultrasonores à partir de l'étude de la diffusivité [RRPG].

D'un point de vue ultrasonore, l'ITZ peut être considérée comme un contact imparfait entre les inclusions (agrégats) et la matrice (mortier). En fait, l'ITZ est connue pour être une couche mince très poreuse autour de chaque agrégat avec un faible module d'élasticité [PH00; LP08; KKBC14; KHD+18]. Pour modéliser un tel contact imparfait, un modèle rhéologique consistant en une combinaison de ressorts linéaires normaux et tangentiels et de masses est utilisé. Ce modèle est ensuite discrétisé et inséré dans le schéma de différences finies 2D du logiciel Prospero [LP06; Lom10]. L'approche masse-ressort pour l'ITZ est illustrée sur la figure 2.6.

Les conditions masse-ressort décrivant les conditions de saut à un contact imparfait sont :

$$[u_N(P, t)] = \frac{1}{K_N} \sigma_{N0}(P, t); \quad [\sigma_N(P, t)] = M_N \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sigma_{N0}(P, t) \quad (2.5)$$

$$[u_T(P, t)] = \frac{1}{K_T} \sigma_{T0}(P, t); \quad [\sigma_T(P, t)] = M_T \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sigma_{T0}(P, t) \quad (2.6)$$

où $[u_N(P, t)]$, $[u_T(P, t)]$, $[\sigma_N(P, t)]$ et $[\sigma_T(P, t)]$ sont respectivement le déplacement normal, le déplacement tangentiel, la contrainte normale et les sauts de contrainte tangentielle à travers l'interface Γ au point P et au temps t , du domaine Ω_0 et Ω_1 .

Grâce à la simplicité du modèle, il est possible de décrire une large gamme de contacts (de l'adhérence parfaite aux surfaces sans contrainte) en ajustant seulement les valeurs de rigidité et de masse. En général, les rigidités et les masses sont définies comme [Lom10] :

$$K_N = \frac{\lambda + 2\mu}{h}; K_T = \frac{\mu}{h}; \quad M_N = 0; M_T = 0, \quad (2.7)$$

où h est l'épaisseur et λ , μ les coefficients de Lamé de la couche élastique "intermédiaire" entre les milieux Ω_0 à Ω_1 . L'épaisseur h est assez petite par rapport aux autres dimensions et les masses sont négligées. Pour une application au béton, un seul paramètre est défini pour décrire l'ITZ : le "niveau de contact", noté CL pour « Contact Level » [Ram19] qui tient compte des propriétés physiques réelles de l'ITZ, $E(ITZ)$ et $E(mortar)$ qui sont les modules d'Young de l'ITZ et de la matrice cimentaire :

$$CL = \frac{E(ITZ)/E(mortar)}{h}. \quad (2.8)$$

En substituant l'expression (2.8) et les formules de modules d'Young en fonction des coefficients de Lamé dans (2.7), il vient

$$K_N = CL \times \rho_0 (c_0^P)^2; K_T = CL \times \rho_0 (c_0^S)^2; \quad M_N = 0; M_T = 0, \quad (2.9)$$

où ρ_0 , c_0^P et c_0^S sont respectivement la densité, la vitesse des ondes P et la vitesse des ondes S dans le mortier. Notons que le niveau de contact, CL, diminue lorsque l'interface devient de moins en moins parfaite, ce qui est le cas lorsque le niveau d'endommagement augmente.

2.2.2.1 Impact de l'ITZ sur les paramètres cohérents : atténuation et vitesse de phase

Avant d'explorer les effets de l'ITZ sur la coda des signaux ultrasonores transmis dans un milieu multiplement diffus tel que le béton, son impact est étudié sur la partie cohérente, c'est-à-dire à partir de l'étude de la moyenne de l'onde ballistique située au début du signal (figure 2.1). Cette onde cohérente est assimilée à une onde se propageant dans un milieu effectif [Mam05] qui est dispersif et atténuant dans le cas du béton [SRB07]. Deux paramètres cohérents sont généralement employés pour caractériser le

béton : la vitesse de phase et l'atténuation [VMG+01 ; PA05 ; LGDK06 ; PJQ+07b ; SRB07]. La vitesse de propagation des ondes mécaniques est directement liée aux propriétés mécaniques d'un milieu élastique : le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν) et la densité (ρ) [CLLP12 ; YCA+19b]. Elle est donc utilisée pour évaluer l'évolution des propriétés mécaniques du béton [VMG+01 ; PA05 ; LGDK06]. En revanche, l'atténuation est plus sensible aux variations des propriétés du matériau. En effet, deux phénomènes physiques sont à l'origine de l'atténuation de l'onde à travers le béton : la diffusion multiple des ultrasons par les granulats et autres diffuseurs éventuels (vides, fissures, etc.), et l'absorption due aux effets viscoélastiques essentiellement dans le mortier [VMG+01 ; PA05 ; LGDK06]. Cette étude s'intéresse à détecter et caractériser un endommagement précoce qui se manifeste par l'apparition de micro-fissures. C'est pourquoi nous nous attachons à extraire la partie de l'atténuation uniquement liée à la diffusion multiple. Sur la base des travaux de Schubert et al. [SK04], Ramaniraka et al. [RRPG19] montrent que la variabilité des propriétés mécaniques dans les bétons ne permet pas à elle seule d'expliquer les écarts observés entre les atténuations (issues de la diffusion) estimées à partir de données expérimentales [PA05 ; Cha17 ; Cke08] et celles estimées à partir de données simulées à 500 kHz en reprenant les mêmes paramètres mécaniques des bétons sondés pour chacune des expériences. En effet, même après compensation de cette variabilité, un écart d'atténuation (numérique versus expérimentale) de 3 Np/m à 12 Np/m subsiste. Des simulations ont donc été conduites à 500 kHz en incluant le modèle d'ITZ présenté plus haut pour déterminer si cette dernière permettrait d'expliquer ces écarts. L'atténuation est estimée pour plusieurs niveaux de contact au niveau des interfaces granulat/mortier, soit des CL variant de 250 m^{-1} à 2750 m^{-1} (figure 2.7). Ces valeurs de CL correspondent à des épaisseurs d'ITZ entre $35 \mu\text{m}$ et $400 \mu\text{m}$ en considérant un module d'Young dans l'ITZ de 10 % du module d'Young du mortier. Pour rappel, les études sur la caractérisation de l'ITZ ont montré des épaisseurs comprises entre $10 \mu\text{m}$ et $150 \mu\text{m}$ [KHD+18 ; KKBC14]. Ensuite, les valeurs d'atténuation mesurées expérimentalement dans la littérature sont ensuite positionnées sur le graphique de la figure 2.7. Les valeurs de CL projetées sur l'axe des abscisses pour ces atténuations sont respectivement 600 m^{-1} , 725 m^{-1} et 1100 m^{-1} . Ceci correspond à des épaisseurs d'ITZ de $165 \mu\text{m}$, $135 \mu\text{m}$ et $90 \mu\text{m}$ respectivement (en considérant un module d'Young dans l'ITZ de 10 % du module d'Young du mortier). Or ces valeurs d'épaisseurs d'ITZ sont dans les ordres de grandeurs relevés dans la littérature [PH00 ; LP08 ; KKBC14 ; KHD+18].

Ces observations confortent ainsi l'explication des écarts observés sur le coefficient d'atténuation par la présence de l'ITZ.

La vitesse de phase effective estimée à partir de la composante cohérente est également observée. Une corrélation a été conduite pour voir son effet en fonction de l'endommagement. La figure 2.8a montre l'évolution de la vitesse de phase effective en fonction du niveau de contact à l'interface (CL) à partir des simulations numériques. On note que la vitesse de phase effective diminue avec le CL, tendance qui correspond à une augmentation de l'endommagement du matériau. Cette tendance est comparée à des valeurs de vitesse issues de la littérature [Cha03] et mesurées sur des éprouvettes de béton soumises à différents niveaux d'endommagement thermique (figure 2.8b). On note qualitativement une très bonne corrélation entre la baisse de vitesse effective liée au CL et celle liée à l'endommagement. Ceci conforte les possibilités de caractérisation de l'endommagement à partir d'une estimation du niveau de contact à l'interface via le CL et la mesure de la vitesse de phase.

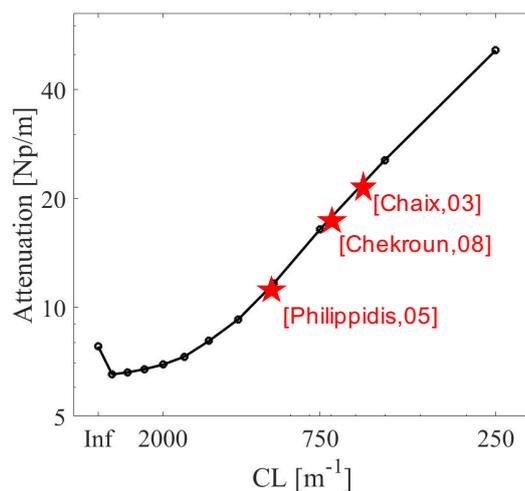


Figure 2.7 – Atténuations des ondes P obtenues à partir de simulations numériques pour différents niveaux de contact à 500 kHz - échelle logarithmique sur les axes x et y ; étoiles rouges = valeurs expérimentales d'atténuation (11 Np/m [PA05] , 17 Np/m [Cke08] , 22 Np/m [Cha17] données dans le tableau 2 de la référence [RRPG19])

L'effet de l'ITZ sur les paramètres cohérents du signal ultrasonore vient d'être examiné et cette étude a montré le potentiel de caractériser le niveau d'endommagement du matériau à partir de l'estimation d'un paramètre décrivant le niveau de contact à l'interface, nommé Contact Level (CL) issu à la fois de l'étude de la vitesse de phase et de l'atténuation.

2.2.2.2 Impact de l'ITZ sur les paramètres incohérents : diffusivité

L'impact de l'ITZ sur les ondes ultrasonores diffusées est maintenant examiné expérimentalement et numériquement afin de conclure sur la faisabilité de caractériser l'état du matériau et un endommagement potentiel. La démarche consiste à estimer le paramètre de diffusivité D à partir du signal ultrasonore mesuré pour différents niveaux d'endommagement et de les corrélérer à un niveau de contact à l'interface (CL) en vue de quantifier un potentiel niveau d'endommagement. Cette étude a été menée sur des éprouvettes de béton endommagées thermiquement. Les mesures ultrasonores ont été conduites sur quatre éprouvettes de béton (dimensions 9 cm × 9 cm × 26 cm) provenant du même lot et soumises à des sollicitations thermiques différentes : un spécimen « non endommagé » (20°C), et trois spécimens endommagés (120°C, 250°C et 400°C respectivement). Ensuite la diffusivité est estimée à partir de la solution 1D de l'équation de diffusion par optimisation au sens des moindres carrées. L'évolution de la diffusivité en fonction du niveau d'endommagement est affichée sur la figure 2.9 (courbe bleue). Cette dernière diminue lorsque le niveau d'endommagement thermique augmente. Ceci indique que le pouvoir diffusant des éprouvettes en béton augmente avec l'endommagement.

En parallèle, des simulations numériques 2D ont été implémentées avec le logiciel Prospero afin de reproduire autant que possible le set-up expérimental sur des éprouvettes rectangulaires (dimensions 9 cm × 26 cm) pour plusieurs niveaux de contact au niveau de l'ITZ , c-a-d des CL compris entre 250 m⁻¹ et 1250 m⁻¹. Ces valeurs sont

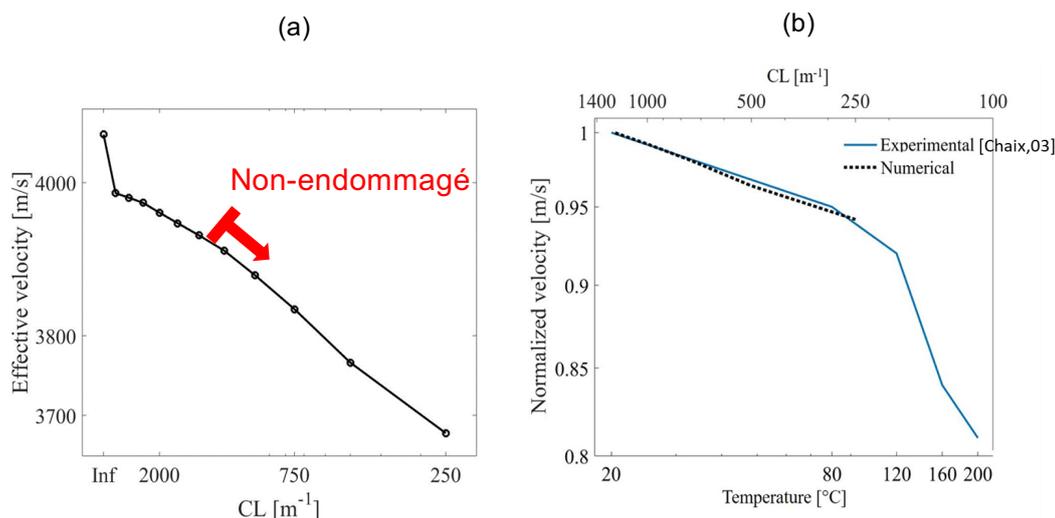


Figure 2.8 – (a) Vitesse de phase effective estimée à partir des simulations numériques conduites à 500 kHz pour différents niveaux de contact (b) courbe pleine bleue : vitesse de phase effective mesurée pour plusieurs niveaux d’endommagement thermique et normalisée par la vitesse effective de l’éprouvette non endommagée [Cha03] ; courbe pointillée noire : vitesse de phase effective simulée pour différents niveaux de contact normalisée par la vitesse effective simulée pour un $CL = 1250 \text{ m}^{-1}$ (niveau de contact supposé pour un milieu non endommagé)

motivées par les corrélations observées entre CL et valeurs des paramètres cohérents (atténuation et vitesse de phase) en fonction de l’endommagement thermique présentées dans la section précédente (§2.2.2.1). Les valeurs de diffusivité estimées à partir des signaux simulés en fonction du niveau de contact sur l’ITZ (CL) sont présentées sur la figure 2.9 (courbe rouge). On note que la diffusivité diminue lorsque le CL diminue, ce qui correspond à un niveau de contact à l’interface agrégat/matrice de plus en plus imparfait. Or cette tendance correspond à une augmentation de l’endommagement du matériau qui se manifeste aussi expérimentalement par une diminution de la diffusivité (courbe bleue figure 2.9). On note ainsi une forte corrélation entre les différents niveaux d’endommagement thermique et la qualité de l’ITZ au travers du CL qui permet de quantifier le niveau de contact aux interfaces. Il est ainsi proposé d’examiner cette corrélation en reliant directement les valeurs de diffusivité mesurées expérimentalement à des valeurs de CL grâce au graphique 2.9 puis à des épaisseurs d’ITZ en considérant l’équation 2.8 et un rapport de module d’Young entre ITZ et matrice cimentaire de 10%.

La tendance ainsi révélée par la figure 2.10 est d’une grande importance. Elle montre que plus l’endommagement du béton est élevé, plus la qualité de l’ITZ est faible. Cette perte de qualité est due à la densification des fissures au sein de l’ITZ. De plus, la variation du CL et l’épaisseur de l’ITZ (Figure 2.10) sont inversement proportionnelles. Ceci est un résultat très encourageant pour l’évaluation quantitative des caractéristiques de l’ITZ d’un béton endommagé basée sur la corrélation entre les mesures de diffusivité et le modèle numérique proposé au début de la section 2.2.2 qui tient compte des caractéristiques réelles de l’ITZ. Cependant, il est important de noter que, dans le cas d’une sollicitation thermique extrême, des phénomènes plus complexes

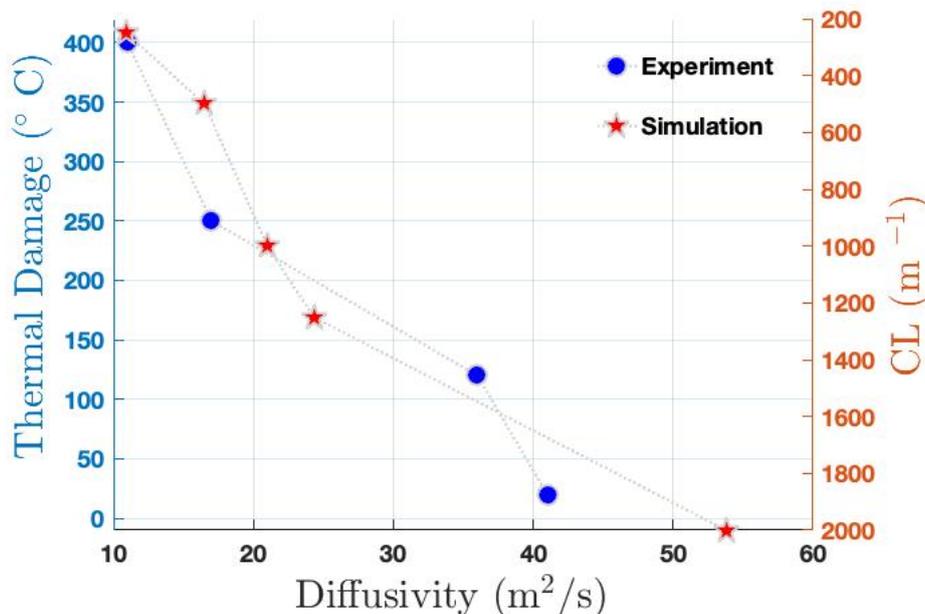


Figure 2.9 – Disques bleus : diffusivité estimées à partir des mesures ultrasonores sur les 4 éprouvettes de béton sollicités thermiquement (20°C : spécimen « non endommagé » 120°C, 250°C et 400°C : spécimens endommagés) ; Étoiles rouges : diffusivité estimées à partir des signaux ultrasonores simulés pour différents niveaux de contact (CL) à l'interface agrégat/matrice cimentaire.

(ex : transformation physique et chimique des granulats) sont impliqués en plus de l'ITZ [NSR09].

2.2.3 Synthèse

Pour synthétiser, les travaux présentés dans cette section rentrent dans le cadre de l'évaluation non destructive du béton en vue de caractériser un potentiel endommagement à un stade le plus précoce possible. Or, le mécanisme d'endommagement prend naissance aux interfaces granulat/mortier qui sont des zones de concentration maximale de contraintes. Dans cette région se trouve une zone poreuse nommée la zone de transition interfaciale (ITZ). La contribution de ces recherches réside dans la prise en compte de l'ITZ dans le modèle de propagation direct de l'onde dans le béton par un modèle rhéologique de masse-ressort au niveau des interfaces granulats/mortier. Ces travaux ont permis de démontrer une très bonne corrélation entre les paramètres de l'ITZ et le degrés d'endommagement thermique d'une structure en béton à partir de comparaisons entre simulations et données expérimentales issues de la littérature et de cette étude.

L'analyse a été conduite dans un régime de fréquences (quelques centaines de kHz - quelques MHz) où les effets de diffractions et diffusions multiples par les agrégats du béton sont prépondérants afin d'étudier localement la micro-structure du milieu. Pour ce faire, l'impact de l'ITZ sur l'onde cohérente (moment d'ordre 1) a tout d'abord été examinée au travers de l'estimation de l'atténuation ultrasonore et la vitesse de phase pour plusieurs niveaux d'endommagement thermique et plusieurs niveaux de contact à l'interface quantifiés par le paramètre de Contact Level (CL).

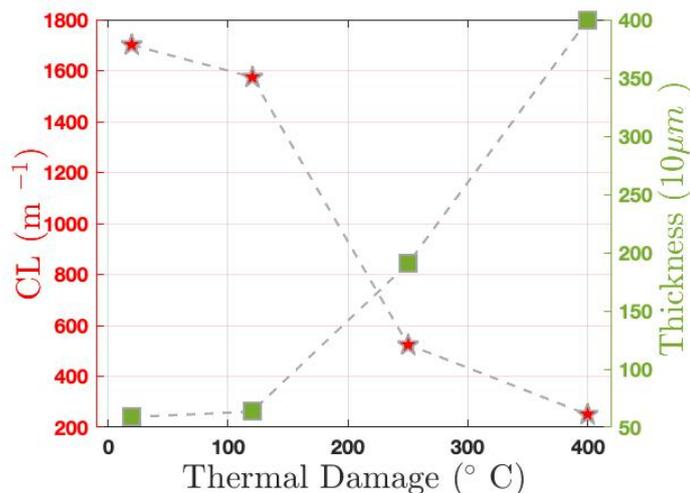


Figure 2.10 – Étoiles rouges : Relation entre le niveau de contact à l’interfaces agrégat/matrice et le niveau d’endommagement thermique; Carrés verts : Relation entre l’épaisseur de l’ITZ et le niveau d’endommagement pour un module d’Young d’ITZ égal à 10% du module de la matrice cimentaire.

Cette analyse a permis de montrer une forte corrélation entre les valeurs de CL et les valeurs d’atténuation et vitesse de phase. Ensuite, cette étude a été étendue à l’analyse de l’énergie (moment d’ordre 2) de la partie incohérente ou coda du signal au travers du paramètre de diffusivité. Le paramètre de diffusivité voit sa valeur augmenter lorsque le milieu est moins diffusif et diminuer lorsque l’endommagement augmente. Ces travaux ont montré également une forte corrélation entre les différentes valeurs de CL et valeurs de diffusivité estimées pour différents niveaux d’endommagement thermique. Les résultats issus aussi bien de l’analyse des paramètres cohérents (atténuation et vitesse de phase) que du paramètre incohérent de diffusivité suggèrent ainsi la possibilité de caractériser quantitativement l’endommagement via le paramètre de CL à partir des estimations d’atténuation, de vitesse de phase et de diffusivité. Ainsi, les perspectives sur ce thème d’étude visent à poursuivre l’analyse de l’ITZ et améliorer sa modélisation afin de permettre *in fine* une caractérisation quantitative de l’endommagement à partir de paramètres tels que le CL caractérisant l’interface. Par ailleurs, l’ITZ est le siège de phénomènes non linéaire à l’interface [DJM13; PUL+14] relativement sensibles à l’endommagement. Cette voie est également en investigation au LMA dans le cadre des travaux de recherche des collègues travaillant sur la caractérisation du béton (C. Payan, V. Garnier, M. Ramaniraka, J.-F. Chaix) et le développement de simulations numériques en milieu diffusant et en présence de phénomènes non linéaires (B. Lombard). De plus, une thèse en collaboration entre le CEA Saclay et le LMA (encadrants : J.F. Chaix et M. Ramaniraka) sur la modélisation du béton est actuellement en cours. Celle-ci fait suite aux travaux de thèse de M. Ramaniraka dont les résultats ont été présentés ci-dessus.

Enfin, à l’opposé de ces approches « locales » imposées par le régime de fréquences (quelques centaines de kHz - quelques MHz) qui permettent uniquement une auscultation avec une faible portée mais avec de relativement bonnes résolutions, nous avons proposé des analyses à plus basses fréquences (quelques centaines de Hz) [EPRG18a; EPR+21] pour suivre l’état d’intégrité de structures complexes en béton

en condition *in situ* dans le régime résonant dans le cadre d'un projet de recherche de collaboration entre l'ANDRA Chatou, le LMA et l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux. Ces derniers travaux s'appliquent notamment pour le suivi de l'intégrité des enceintes de confinement des centrales nucléaires pendant l'essai de débit de fuite intégré [EPR+21] et la surveillance de l'intégrité des colis en béton armé de déchets radioactifs [EPRG18a].

2.3 Caractérisation passive d'un objet élastique en milieu diffus

Publication associées [A5], [A7], [A9], [A16]
[CI6], [CI7], [CI11], [CI12], [CI18], [CI26], [CI27], [CI30]

Collaborations LMA : R. Côte, P. Cristini, M. Pachebat, V. Roggerone,
A. Caisson, L. Abosse
MPL/SIO, San Diego, USA : W. Kuperman, S. Sternini, A. Bottero,
J. Sarkar, D. Alden
LANL, Los Alamos, USA : J. Tippmann
NRL, Washington DC, USA : E. Williams

Projets/contrats associés [P1], [P5], [C4]

Cette section présente mes travaux de recherche sur la caractérisation d'une cible ou un objet élastique en milieu diffus par corrélation de bruit et méthode d'holographie acoustique dans le régime résonant à des fréquences comprises entre 1 kHz et 10 kHz. Les méthodes développées trouvent des applications en contrôle non destructif pour caractériser l'intégrité d'une pièce ou d'une structure, et plus particulièrement en acoustique sous-marine dans le cadre de la caractérisation de cibles immergées ou enfouies en milieu marin. La caractérisation de cible enfouie ou immergée demeure un problème ouvert du fait de la complexité des réponses acoustiques de la cible et de l'environnement marin (réverbération, stratification, rugosité, inhomogénéités) ainsi que de la variabilité du milieu. Une stratégie pour avancer dans cette problématique consiste à mesurer la réponse acoustique de l'objet à caractériser en régime bistatique, c'est-à-dire mesurer l'onde diffractée par ce dernier selon différentes directions d'insonification et de réception afin de réunir le maximum d'informations [BDY+08].

Ensuite, la caractérisation passe par la comparaison de ces différentes mesures expérimentales avec des données simulées soit par comparaison des formes d'ondes ou de signatures discriminantes de l'objet [BHS+11]. Or les simulations numériques peuvent rapidement devenir très gourmandes en temps de calcul et de ressources informatiques et nécessitent de connaître la composition interne exacte de l'objet à caractériser. Afin de pallier ces difficultés, mes travaux de recherche proposent une méthodologie alternative : la réponse *in vacuo* de la cible est mesurée au préalable puis couplée à une modélisation du milieu pour différents scénarios d'environnement et d'insonification basée sur le formalisme des sources équivalentes [KSF+89; BCC08], beaucoup moins gourmande en temps de calculs que les méthodes par éléments finis. Cette approche présente l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance de la composition interne de la cible [RKW13]. La mesure préalable de la réponse de la cible [WTRK16] est une démarche qui s'apparente aux travaux de [BDY+08] dans lesquels la réponse bistatique de l'objet est mesurée en bassin pour plusieurs directions d'émission/réception avant d'être analysée pour en extraire des signatures discriminantes. Toutefois, notre démarche se distingue de ces travaux sur les points suivants : (1) l'approche propose de mesurer la réponse mécanique

in vacuo de la cible, c-a-d sa matrice d'impédance ou d'admittance mécanique, et non pas sa réponse dans l'eau, (2) la réponse bistatique est ensuite calculée pour un ou plusieurs scénarios d'environnements et d'insonifications quelconques à partir d'une unique mesure de cette réponse *in vacuo*, (3) le dispositif de mesure est en aérien et non pas en eau, permettant ainsi une mise en oeuvre plus facile qu'en cuve (4) et la méthodologie développée pour estimer la réponse *in vacuo* est basée sur l'exploitation de la cohérence d'un champ de bruit. Cette démarche a été préconisée en vue d'exploiter les sources d'opportunités à des fins de caractérisation passive à partir de la seule analyse du bruit ou de l'exploitation d'un champ soit réverbéré, multiplement diffusé ou multiplement réfléchi. Cette approche permet ainsi de s'affranchir des difficultés posées par des mesures nécessitant un champ libre et ouvre aussi des voies d'application en SHM dans le monitoring de l'intégrité de structure à partir du bruit ambiant dans un réacteur par exemple. Ces recherches sont le fruit d'un travail qui a été initié lors de mon post-doctorat aux États-Unis au Marine Physical Laboratory (UCSD, San Diego) sous la supervision de W. Kuperman en collaboration avec E. Williams du Naval Research Laboratory (Washington DC) en 2013 et que j'ai poursuivi lors de mon embauche en tant que MCF à l'Université d'Aix-Marseille et au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille. Ces recherches ont été menées dans le cadre de plusieurs projets et contrats [P1,P4,C5] dont je suis responsable. De plus, la proximité des problématiques de caractérisation de ces recherches avec celles du CEA Cadarache a conduit à des échanges entre le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille, le Marine Physical Laboratory (UCSD, San Diego) : des échanges ou mobilité ont eu lieu entre post-doctorants américains (J. Tippmann, S. Sternini) et français (E. Lubeigt, K. Metwally et A. Bottero). Les développements récents et présents intègrent les contributions d'autres collègues du LMA (R. Guillermain, M. Pachebat, R. Côte, P.-O. Matéi) et d'un post-doctorant (V. Roggerone) dont j'ai supervisé le travail.

La présentation de mes travaux commence dans le paragraphe 2.3.1 par une description du problème de diffraction par un objet (qui est à la base du calcul de sa réponse bistatique) à partir du formalisme des matrices d'impédance ou d'admittance puis introduit la méthode de corrélation de bruit pour estimer la réponse mécanique *in vacuo* de la cible, à savoir la matrice d'impédance mécanique ou d'admittance mécanique à partir de mesures de pressions et vitesses normales en surface de l'objet [RKW13]. La méthode est démontrée numériquement et expérimentalement pour des mesures en surface à partir d'accéléromètres et microphones[WTR+17].

Afin de perturber le moins possible la réponse mécanique de la cible, un nouveau dispositif de mesure sans contact a ensuite été mis en oeuvre pour s'affranchir du couplage vibratoire entre structure et capteurs qui peut devenir non négligeable pour un large réseau de capteurs comme c'est le cas dans cette étude. Le dispositif comprend ainsi un réseau de microphones miniatures digitaux mems (microsystèmes électromécaniques) double couche [SRS+19]. Les mesures n'étant plus en surface de l'objet, une méthode d'holographie acoustique (§2.3.2) permettant de rétropropager et estimer les champs de pressions et vitesses normales à la surface a été mise en place en considérant notamment les difficultés posées par les faibles rapports signal sur bruit engendrés par des mesures en aérien (conditions aux frontières presque rigides) compliquant l'estimation des vitesses normales locales à sa surface [SRS+20]. Enfin pour vérifier la validité de l'admittance mécanique estimée, la réponse bistatique déterminée à partir de cette dernière est comparée à la réponse bistatique simulée.

2.3.1 Réponse *in vacuo* (matrices d'impédance mécanique ou d'admittance mécanique) d'une cible par corrélation de bruit

Le problème de diffraction acoustique par un objet élastique peut être décrit à partir de trois impédances ou admittances [Bor90 ; LS06 ; Bob06] : \mathbf{Z}_i , \mathbf{Z}_a et \mathbf{Z}_s , qui sont respectivement l'impédance acoustique, l'impédance interne et l'impédance mécanique (cf. figure 2.11). Elles relient pressions et vitesses via les relations

$$\mathbf{p}_i = -\mathbf{Z}_i \mathbf{v}_i, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{p}_t = -\mathbf{Z}_s \mathbf{v}_t, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{p}_s = \mathbf{Z}_a \mathbf{v}_s, \quad (2.12)$$

où \mathbf{p}_i et \mathbf{v}_i , \mathbf{p}_s et \mathbf{v}_s puis \mathbf{p}_t et \mathbf{v}_t sont des vecteurs de dimension $(N \times 1)$ et dont les éléments correspondent respectivement aux pressions et vitesses normales incidentes, diffractées et totales ($\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_s$ et $\mathbf{v}_t = \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_s$) aux N points considérés à la surface de l'objet.

Les impédances acoustiques et internes caractérisent la vibration du fluide extérieur, à l'extérieur et à l'intérieur de la surface du corps et ne dépendent donc que de la forme du corps élastique et des propriétés du fluide extérieur. L'impédance mécanique [OHa67 ; GY95 ; Bob06] caractérise la réponse du corps élastique dans le vide, et ne dépend donc que des paramètres mécaniques de l'objet.

En combinant les équations (2.10), (2.11) et (2.12), le champ diffracté à la surface de l'objet \mathbf{p}_s s'exprime selon

$$\mathbf{p}_s = \left(\mathbf{Z}_a^{-1} + \mathbf{Z}_s^{-1} \right)^{-1} \left(\mathbf{Z}_i^{-1} - \mathbf{Z}_s^{-1} \right) \mathbf{p}_i. \quad (2.13)$$

NB : Sachant que l'impédance et l'admittance sont reliées par la relation $\mathbf{Y} = \mathbf{Z}^{-1}$, l'expression 2.13 s'écrit de façon équivalente $\mathbf{p}_s = (\mathbf{Y}_a + \mathbf{Y}_s)^{-1} (\mathbf{Y}_i - \mathbf{Y}_s) \mathbf{p}_i$.

La description du problème de diffraction selon l'expression 2.13 est intéressante car elle permet de découpler les paramètres du milieu environnant (via \mathbf{Z}_i et \mathbf{Z}_a) de la réponse intrinsèque ou *in vacuo* de l'objet (via \mathbf{Z}_s). Ainsi à partir de la connaissance de \mathbf{Z}_s , il est possible de déterminer le champ diffracté à la surface de la cible à partir de l'équation 2.13 dans un milieu homogène quelconque et pour des conditions d'incidences quelconque (via \mathbf{p}_i). Alternativement, le champ diffracté peut être calculé en champ proche ou champ lointain pour un environnement hétérogène quelconque en couplant la matrice d'impédance mécanique à une approche de superposition telle que les sources équivalentes [KSF+89 ; BCC08] ou l'équation intégrale de Helmholtz [Kir98] (figure 2.11) sans nécessiter de modélisation de la structure interne de l'objet si sa réponse intrinsèque est connue, c-à-d son impédance mécanique \mathbf{Z}_s ou admittance mécanique ($\mathbf{Y}_s = \mathbf{Z}_s^{-1}$). Ainsi, ces travaux [RKW13 ; RKW14] se sont concentrés sur l'élaboration d'une nouvelle méthode d'estimation de cette impédance mécanique ou de son inverse, l'admittance mécanique, basée sur les corrélations des champs de pressions et vitesses normales mesurées N points couvrant toute la surface de l'objet,

$$\mathbf{Z}_s = \left\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \right\rangle_L \left\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \right\rangle_L^{-1} \text{ ou } \mathbf{Y}_s = \left\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \right\rangle_L \left\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \right\rangle_L^{-1}, \quad (2.14)$$

où l'exposant H est l'opérateur hermitien pour le conjugué transpose, et $\langle \cdot \rangle$ est la

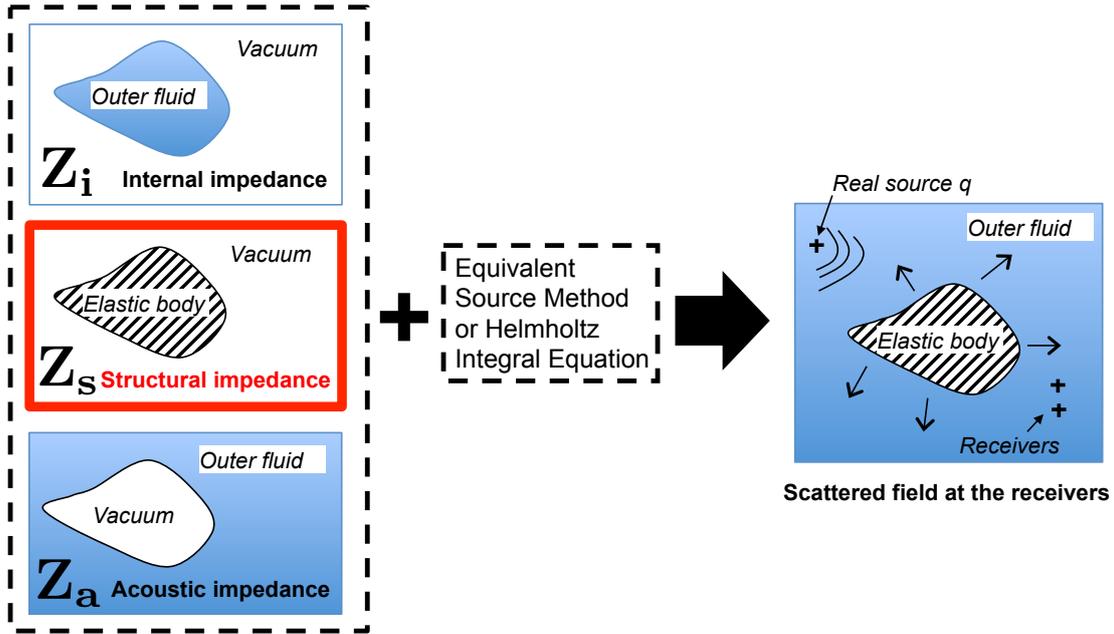


Figure 2.11 – Décomposition du problème de diffraction en fonction des 3 matrices : Z_i , Z_a , Z_s , respectivement matrice d'impédance interne, matrice d'impédance de rayonnement et matrice d'impédance mécanique.

moyenne des intercorrélations sur L réalisations d'insonification. Sous l'hypothèse d'un champ d'insonification défini selon une distribution gaussienne, il a été démontré que $L > 3N$ [RMB74] est suffisant pour construire une matrice d'intercorrélations bien conditionnée et de rang plein pour permettre le calcul de la matrice inverse $\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \rangle_L^{-1}$.

L'équation (2.14) suggère que la matrice d'impédance mécanique peut être mesurée en plaçant l'objet dans un champ de bruit aléatoire et en effectuant les intercorrélations de pressions et vitesses normales sur tous les couples de capteurs. Cette formulation s'apparente à la méthodologie de corrélation de bruit associée à l'extraction des fonctions de Green [LW01 ; CP03 ; WL04 ; RSK+05 ; SRK05 ; Wea08]. Dans cette étude, il est important d'exciter l'objet en tous ses points pour effectuer une inversion stable de la matrice d'impédance, condition remplie par une distribution uniforme ou Gaussienne du champ incident. La méthodologie proposée ci-dessus pour déterminer la matrice d'impédance mécanique a été démontrée numériquement sur une coque cylindrique en aluminium 2D remplie d'air et immergée dans de l'eau. Les propriétés de la coque sont les suivantes : module d'Young $E_1 = 70$ GPa, coefficient de Poisson $\mu_1 = 0.33$, densité $\rho_1 = 2700$ kg/m³, amortissement $\eta_1 = 0.05$, rayon extérieur $r_1 = 22.5$ cm et épaisseur de coque $e_1 = 1$ cm. La figure 2.12 montre une très bonne adéquation entre l'impédance estimée pour $L = 5000$ réalisations spatiales et l'impédance analytique obtenues à 2 kHz [RKW13 ; RKW14 ; RKW16]. Les résultats numériques ont été obtenus par pseudo-inversion de la matrice $\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \rangle$ en ne considérant que les 18 premières valeurs propres correspondant aux 9 premiers modes (modes prépondérants à la fréquence considérée).

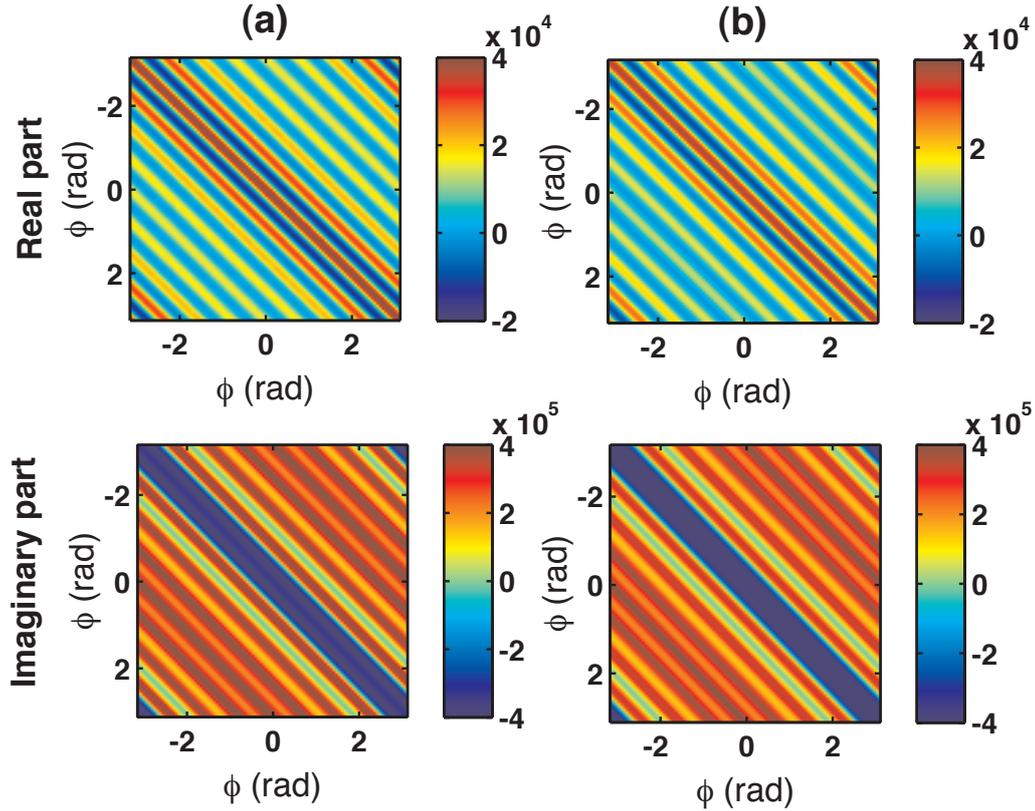


Figure 2.12 – Impédance mécanique (Pa s/m) sur 100 points à la surface d’une coque cylindrique atténuante avec un amortissement $\eta_1 = 0.05$ (a) Résultat numérique avec pseudo-inversion de $\langle \mathbf{v}\mathbf{p}^H \rangle$ effectuée avec les 18 plus grandes valeurs propres ; (b) Solution analytique utilisant 9 modes.

La méthode a ensuite été testée expérimentalement sur une coque sphérique [TKRW16; WTRK16; WTR+17] imprimée par impression 3D en plastique Vero de module d’Young $E_1 = 3.25$ GPa, coefficient de Poisson $\mu_1 = 0.327$, densité $\rho_1 = 1180$ kg/m³ et amortissement $\eta_1 = 0.015$. Le rayon extérieur de la coque sphérique mesure 9.92 cm et son épaisseur est 0.092 cm. Le dispositif expérimental (figure 2.13a) comprend 8 microphones et 8 accéléromètres colocalisés sur un demi arc de cercle selon une suite de Fibonacci. Cette séquence a été utilisée car les différences entre deux positions spatiales sont toutes inégales, ce qui permet d’obtenir une corrélation moyenne d’ensemble unique pour $\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \rangle_L$ et $\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \rangle_L$ sur 29 longueurs d’arc différentes entre 2 capteurs. Afin de permettre le calcul de l’impédance mécanique ou admittance mécanique (équation (2.14)) qui nécessite le calcul de $\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \rangle_L$ et $\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \rangle_L$ sur toute la surface de l’objet et non pas uniquement sur un demi-arc de cercle, 2 hypothèses ont été émises : la coque sphérique est symétrique par rapport à n’importe quel axe de rotation et le champ d’excitation est isotrope. Sous ces hypothèses, 250 points discretisant toute la surface de la sphère ont été virtuellement reconstruits par interpolation linéaire à partir des 8 positions de capteurs. Puis, l’admittance mécanique est estimée entre 1 et 6 kHz pour $L = 300$ réalisations spatiales du champ incidents, c-à-d 300 positions de sources. Les figures 2.13b et 2.13c représentent respectivement l’amplitude et la phase des admittances mécaniques estimées expérimentalement et simulées pour 250 points de mesures surfaciques. Les résultats expérimentaux et numériques montrent une

bonne adéquation aussi bien pour l'amplitude que la phase des impédances mécaniques. On note que les résultats apparaissent de plus en plus bruités lorsque la fréquence augmente : cette difficulté résulte d'une baisse de rapport-signal-sur-bruit liée à la résolution de mesure ne permettant pas de capturer correctement les modes aux plus hautes fréquences. De plus, le choix d'estimer l'admittance mécanique n'est pas anodin : les mesures étant conduites en air (fluide léger), le contraste d'impédance est très important et les vitesses de vibrations de la coque sont ainsi très faibles par rapport à un couplage en fluide lourd comme dans le cas des simulations conduites dans [RKW13; RYW+14]. Ainsi l'inversion de $\langle \mathbf{v}_t \mathbf{p}_t^H \rangle$ est très instable par rapport à $\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \rangle$. Par ailleurs, l'inversion de $\langle \mathbf{p}_t \mathbf{p}_t^H \rangle$ est effectuée par pseudo-inversion et le choix du seuil, qui a une importance capitale dans l'estimation de \mathbf{Y}_s , est déterminé en considérant les 3 premiers modes de vibrations prédominants comme discuté dans [WTR+17].

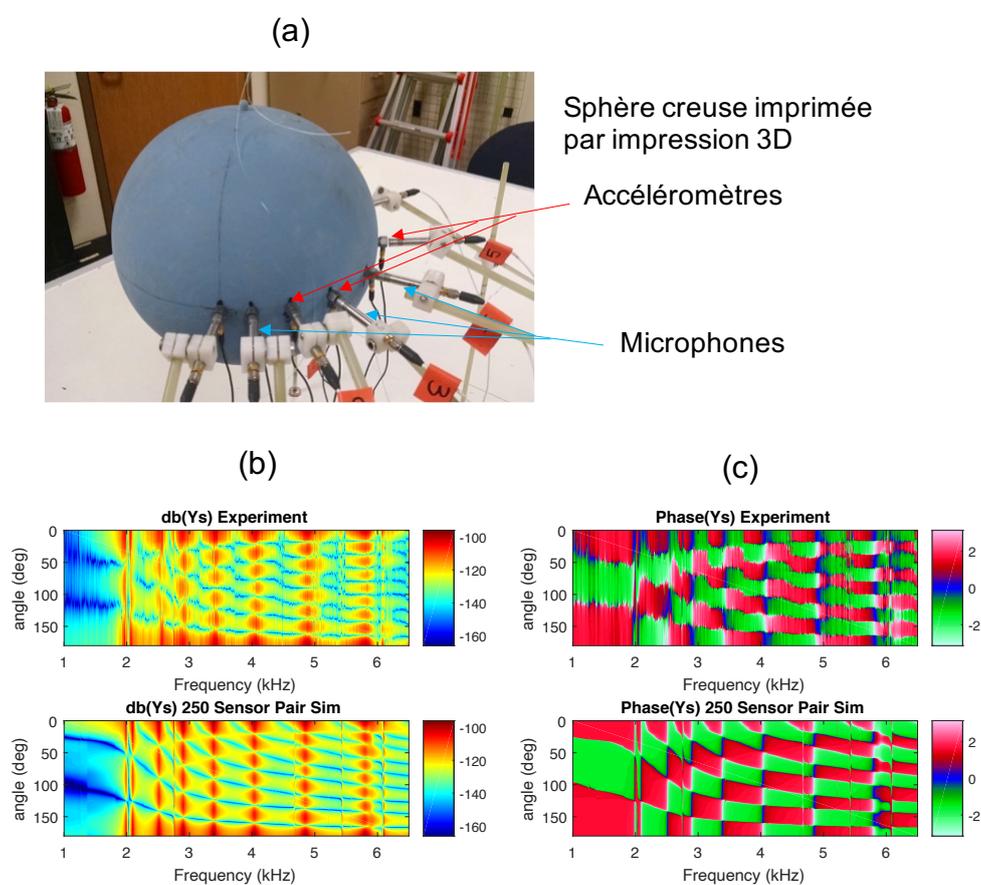


Figure 2.13 – (a) Photo du dispositif expérimental (b) Amplitude de la matrice d'admittance (c) Phase de la matrice d'admittance

La méthodologie d'estimation de l'impédance ou admittance mécanique a été démontrée numériquement puis expérimentalement sur un jeu réduit de points de mesures. L'étape suivante consiste donc à l'implémenter à l'aide d'un dispositif permettant de mesurer les matrices d'impédance mécanique ou admittance mécanique sur toute la surface sans nécessiter d'interpolation en vue de l'appliquer sur des objets de formes plus complexes. Cela implique l'utilisation d'un large réseau de capteurs (250 paires de capteurs dans l'exemple de la coque sphérique ci-dessus). Ainsi, il devient nécessaire de privilégier des mesures sans contact afin de perturber le moins possible

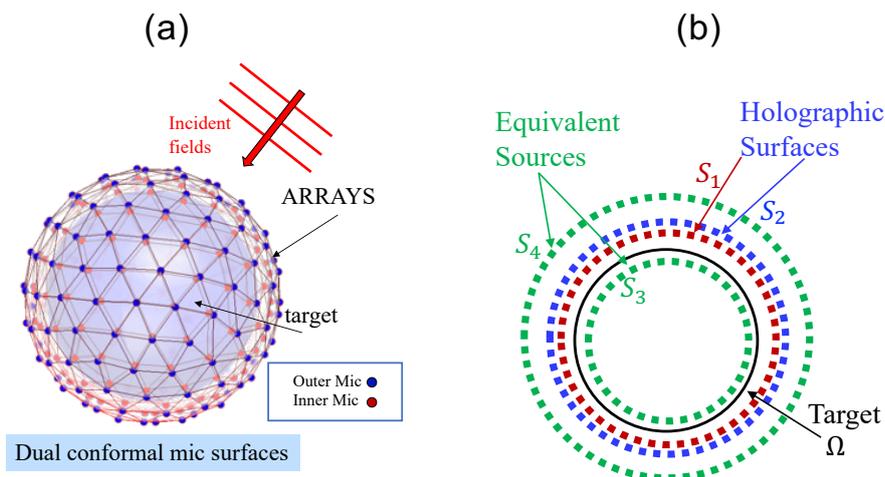


Figure 2.14 – (a) Schéma du dispositif de mesure double couche (b) Positionnement des surfaces de sources équivalentes pour le calcul des champs incident et diffracté.

la réponse de l'objet par des couplages vibratoires entre structure et capteurs comme cela pourrait être le cas avec des accéléromètres. Pour ce faire, une méthodologie et un dispositif de mesure par holographie acoustique sont présentés dans la suite du manuscrit.

2.3.2 Méthode d'holographie acoustique pour la détermination des matrices d'impédance/admittance mécaniques

La détermination de l'admittance mécanique ou impédance mécanique à partir de la méthode de corrélation (§2.3.1), nécessite de connaître les pressions et vitesses normales à la surface de l'objet. Or, pour minimiser les couplages entre capteurs et cible afin d'estimer sa seule réponse intrinsèque, il est proposé d'utiliser un dispositif de mesure sans contact. Une méthodologie [SRS+19 ; SRS+20] basée sur un dispositif d'holographie acoustique composé d'une antenne de microphones double couche conforme à la surface de l'objet a été développée (figure 2.14a).

En contre partie des avantages de ce dispositif sans contact pour diminuer les effets de couplage, ce set-up rajoute la difficulté suivante : pressions et vitesses normales ne sont plus alors mesurées en surface, il est donc nécessaire de rajouter une étape pour estimer ces deux grandeurs à la surface de l'objet à partir de mesures déportées sur une surface conforme à la forme de l'objet. Une antenne de microphones double couche est employée afin d'accéder à des informations de directionnalité pour permettre de remonter à la vitesse normale et de séparer les composantes incidente et diffractée du champ mesuré. La méthode d'holographie développée dans cette étude consiste ainsi à mesurer les champs de pressions au niveau de chaque couche de microphones que nous nommons hologramme 1 pour les microphones les plus proches de l'objet et hologramme 2 pour les microphones les plus éloignés (respectivement désignés par « Inner mic » en rouge et « Outer mic » en bleu sur la figure 2.14). Sur la base du formalisme des sources équivalentes [KSF+89 ; BCC08 ; BS12 ; BHZB13], les champs de pressions mesurés sur des récepteurs en \mathbf{r} s'expriment en fonction de sources virtuelles de débit \mathbf{q} situées légèrement à l'intérieur de l'objet en \mathbf{r}_3 (surface S_3 sur la figure 2.14b) pour calculer le

champ diffracté

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}) = \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3)\mathbf{q}(\mathbf{r}_3), \quad (2.15)$$

et légèrement à l'extérieur de l'objet en \mathbf{r}_4 (surface S_4 sur la figure 2.14b) pour déterminer le champ incident :

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}) = \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_4)\mathbf{q}(\mathbf{r}_4), \quad (2.16)$$

où les éléments de la matrice $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)$ correspondent aux fonctions de Green en champ libre $\frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}$ avec $i = 3$ ou 4 . Ainsi, les champs de pressions totales mesurés sur chacun des hologrammes en \mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_2 s'expriment comme la combinaison linéaire des composantes incidente et diffractée selon le système linéaire suivant

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{31} & \mathbf{G}_{41} \\ \mathbf{G}_{32} & \mathbf{G}_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{t,3} \\ \mathbf{p}_{t,4} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

où \mathbf{G}_{ij} sont les matrices de fonctions de Green en milieu infini entre les sources virtuelles en \mathbf{r}_i ($i = 3$ ou 4) et les hologrammes en \mathbf{r}_j ($j = 1$ ou 2), $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}(\mathbf{r}_i)$ correspond au débit des sources virtuelles et $\mathbf{p}_{t,j} = \mathbf{p}_t(\mathbf{r}_j)$ est le champ de pressions totales aux hologrammes. Grâce à ce formalisme, il est possible de séparer les composantes incidente et diffractée du champ total qui correspondent aux contributions respectives des sources \mathbf{q}_4 et \mathbf{q}_3 . Afin de déterminer les pressions et vitesses normales à la surface de la cible, le système (2.17) est inversé pour estimer les débits des sources virtuelles \mathbf{q}_3 et \mathbf{q}_4 , puis les champs de pression et de vitesse normale sont déterminés à la surface en \mathbf{r}_s à partir des fonctions de Green exprimées en pression et en vitesse normale (équation d'Euler) selon

$$\mathbf{p}_t(\mathbf{r}_s) = \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_3)\mathbf{q}(\mathbf{r}_3) + \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_4)\mathbf{q}(\mathbf{r}_4), \quad (2.18)$$

$$\mathbf{v}_t(\mathbf{r}_s) = \frac{1}{i\omega\rho} \left(\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_3)}{\partial \mathbf{n}_s} \mathbf{q}(\mathbf{r}_3) + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_4)}{\partial \mathbf{n}_s} \mathbf{q}(\mathbf{r}_4) \right), \quad (2.19)$$

où \mathbf{n}_s représente la normale sortante par rapport à la surface de l'objet. La méthode de corrélation présentée dans le paragraphe précédent (§2.3.1) peut ensuite être appliquée à partir des pressions et vitesses normales estimées à la surface (équations 2.18 et 2.19). Une difficulté subsiste car les mesures sont effectuées en air, milieu dans lequel le comportement vibratoire de l'objet est proche d'une cible rigide. Ainsi, les valeurs de vitesses normales sont très faibles en surface et leurs estimations directes à partir des équations 2.17 et 2.19 fournissent des valeurs erronées qui conduisent à une mauvaise estimation de l'admittance mécanique (équation (2.14)). Dans [SRS+20], une approche est proposée pour palier ce problème de rapport signal sur bruit en isolant la composante rayonnée élastique $\mathbf{p}_r(\mathbf{r}_s)$ de l'onde de pression mesurée par soustraction de la composante rigide $\mathbf{p}_{bl}(\mathbf{r}_s)$:

$$\mathbf{p}_r(\mathbf{r}_s) = \mathbf{p}_s(\mathbf{r}_s) - \mathbf{p}_{bl}(\mathbf{r}_s), \quad (2.20)$$

$$= \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_3)\mathbf{q}(\mathbf{r}_3) - \mathbf{Z}_a \mathbf{Y}_i \mathbf{p}_i(\mathbf{r}_s). \quad (2.21)$$

La composante rigide est déterminée à partir des matrices d'impédance de rayonnement, d'admittance interne et du champ incident $\mathbf{p}_i(\mathbf{r}_s) = \mathbf{G}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_4)\mathbf{q}(\mathbf{r}_4)$ où

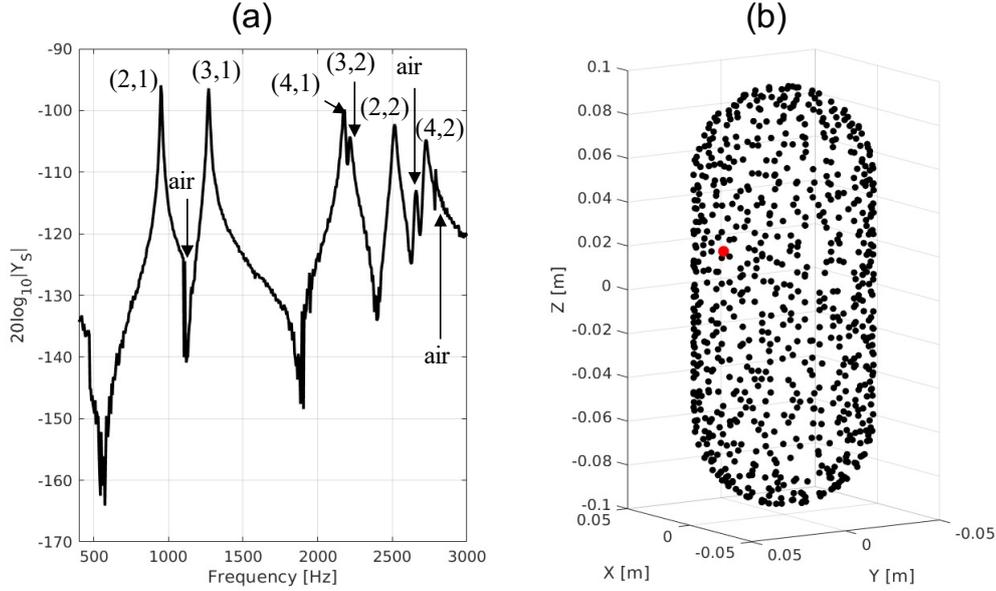


Figure 2.15 – (a) Auto-admittance au point représenté en rouge sur la partie (b) de cette figure (b) Schéma des 749 points de discrétisation à la surface du cylindre hémisphérique

$\mathbf{q}(\mathbf{r}_4) = \mathbf{q}_4$ est calculé au préalable par inversion du système 2.17. Enfin, la vitesse normale à la surface exprimée en fonction de la vitesse rigide $\mathbf{v}_{bl}(\mathbf{r}_s)$ s'écrit $\mathbf{v}_t(\mathbf{r}_s) = \mathbf{v}_{bl}(\mathbf{r}_s) + \mathbf{v}_r(\mathbf{r}_s)$ où $\mathbf{v}_r(\mathbf{r}_s)$ est la composante élastique rayonnée. Or la vitesse est nulle à la surface d'un objet rigide, ainsi $\mathbf{v}_{bl}(\mathbf{r}_s) = 0$ et on a donc $\mathbf{v}_t(\mathbf{r}_s) = \mathbf{v}_r(\mathbf{r}_s)$. Ainsi, une fois $\mathbf{p}_r(\mathbf{r}_s)$ déterminée à partir des équations (2.21), la vitesse rayonnée, c-a-d la vitesse totale, est calculée à partir de cette dernière et de l'admittance de rayonnement,

$$\mathbf{v}_r(\mathbf{r}_s) = \mathbf{v}_t(\mathbf{r}_s) = \mathbf{Y}_a \mathbf{p}_r(\mathbf{r}_s). \quad (2.22)$$

La méthode de corrélation de la section 2.3.1 est ensuite appliquée à partir des vitesses normales de l'équation (2.22) et pressions totales calculées à partir de (2.18) pour déterminer l'admittance mécanique ou impédance mécanique. Dans [SRS+20], l'admittance mécanique est alternativement calculée à partir des champs directement estimés pour plusieurs réalisations spatiales sans calcul de l'intercorrélation. Les deux approches (avec et sans corrélation) fournissent des résultats identiques dans ces simulations. toutefois, la méthode de corrélation est sujette à de meilleurs résultats en présence de bruit par le jeu du moyennage sur L réalisations. La méthode d'holographie acoustique avec le formalisme des sources équivalentes et la soustraction de la composante rigide a été démontrée numériquement sur un cylindre creux à bords hémisphériques en plastique PLA (polyactic acid) ayant les propriétés suivantes : module d'Young $E_1 = 3.3$ GPa, coefficient de Poisson $\mu_1 = 0.33$, densité $\rho_1 = 1250$ kg/m³, amortissement $\eta_1 = 0.01$, rayon extérieur $r_1 = 4$ cm pour le corps cylindrique et les 2 bords sphériques, hauteur du cylindre $h_1 = 19$ cm et épaisseur de coque $e_1 = 2.7$ mm. La figure 2.15a affiche la self admittance estimée au point rouge représenté sur la figure 2.15b. Les pics de résonances identifiés sur la figure 2.15a correspondent bien aux modes de résonances issus de l'analyse en mode propre conduite numériquement sur ce cylindre [SRS+20].

Ensuite, la réponse bistatique du cylindre creux à bords hémisphériques a

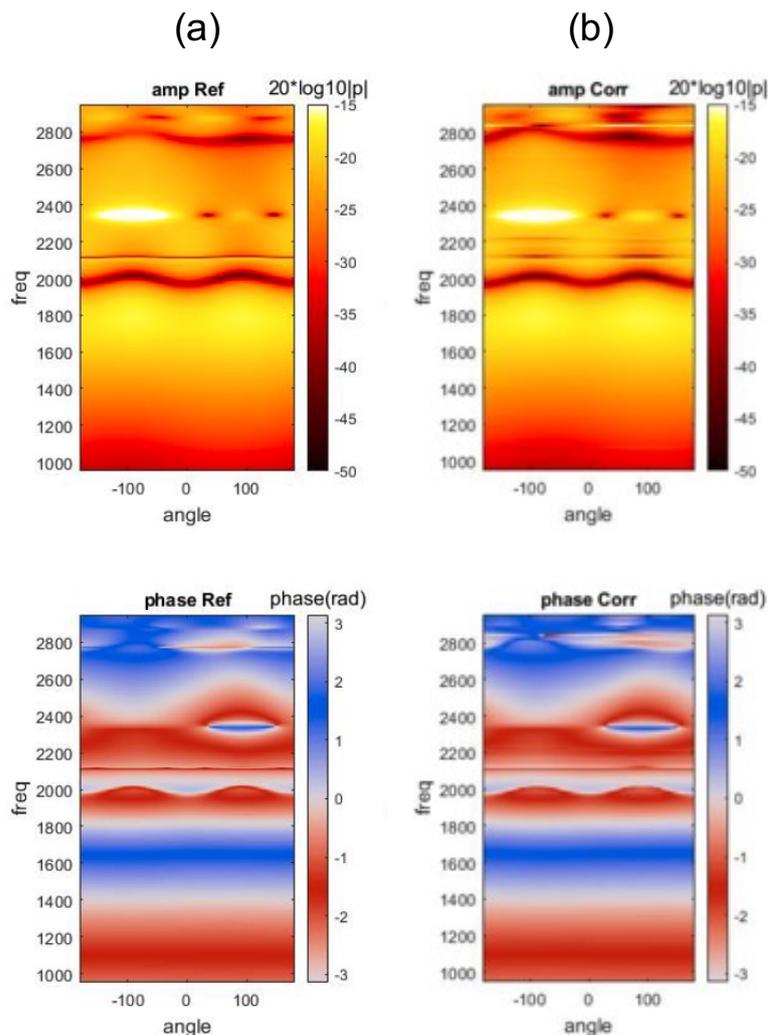


Figure 2.16 – Réponse bistatique du cylindre à bords hémisphériques dans l'eau pour des récepteurs positionnés à 1m du centre du cylindre et pour une incidence de 60° (a) Résultats simulés (b) Résultats après application de la méthode d'holographie et de corrélation avec un seuil de 25 dB pour l'inversion de C_{pp}/C_{vp} .

été déterminée en eau à partir de l'admittance mécanique estimée et en utilisant le formalisme des sources équivalentes. Cette dernière est comparée à la réponse bistatique simulée en eau sur les figures 2.16a et 2.16b, et montre une très bonne adéquation avec les résultats simulés, validant ainsi numériquement la méthodologie proposée.

Notons que plusieurs détails techniques de grande importance tels que le nombre de points de discretisation et de sources équivalentes, l'inversion du système linéaire 2.17 par pseudo-inversion avec une régularisation de Tikhonov, la détermination des matrices d'impédance et d'admittance internes et de rayonnement à l'aide du formalisme des sources équivalentes ne sont pas détaillés dans ce manuscrit mais ont été analysés pour permettre une estimation optimale des impédances et admittances. Ces points techniques sont discutés en détail dans [SRS+20].

2.3.3 Synthèse

Pour synthétiser, cette section 2.3 a présenté mes travaux de recherche portant sur la caractérisation de cible ou objet élastique en milieu diffus par corrélation de bruit et méthode d'holographie acoustique. La méthodologie développée consiste à estimer la réponse intrinsèque de la cible, c'est-à-dire sa matrice d'impédance ou admittance mécanique, à partir de mesures sans contact à l'aide d'une antenne holographique. La méthode a été démontrée numériquement et l'étape suivante tient dans sa démonstration expérimentale. Un dispositif de mesure est en cours de développement [SRS+19] : il est composé d'un réseau de capteurs double couche, il s'agit plus spécifiquement de plusieurs cartes électroniques pré-imprimées supportant 2 microphones miniatures digitaux mems (microsystèmes électromécaniques) connectées à un système d'acquisition à base de carte FPGA. L'estimation de l'impédance/admittance mécanique selon l'approche décrite dans cette partie nécessite des mesures simultanées sur un large réseau de capteurs (>150 capteurs) ou reconstituées par mesures successives. Dans le premier cas, il est important de vérifier que le large réseau de capteurs et son support de maintien aient un impact négligeable sur la mesure de la réponse intrinsèque de la cible, tandis que dans le deuxième cas, les conditions de mesure entre plusieurs acquisitions doivent être strictement identiques. Mes travaux de recherche actuels visent à répondre à cette problématique expérimentale. D'autres challenges techniques tels que le maintien des capteurs autour de la cible à imager, la gestion physique d'un large réseau de capteurs (fils, connectiques, etc ...) ou la gestion du transfert de large volumes de données subsistent et sont aussi en cours d'étude. De plus, la méthode de corrélation repose sur l'hypothèse de champ diffus. Il est donc proposé de conduire des mesures dans une salle réfléchissante afin de se rapprocher au mieux d'un champ diffus. Des mesures préliminaires [RRCB21] sont donc en cours pour vérifier dans un premier temps les propriétés du champ acoustique de la pièce de mesure avant d'appliquer toute la méthode de mesure avec l'objet à caractériser.

Par ailleurs, la méthode présentée dans cette section repose sur le formalisme des sources équivalentes. Or, ce formalisme est basé sur l'hypothèse que le champ acoustique rayonné ou diffracté par la cible peut être décrit par l'impact combiné de plusieurs sources monopolaires ou multipolaires (dans cette étude, il s'agit de sources monopolaires). Or, cette hypothèse n'est plus vérifiée en présence d'arêtes ou bords (points brillants) sur l'objet. Une méthodologie [RGR21] basée sur une approche simplifiée d'éléments de frontières de telle sorte que les sources $\mathbf{q}_3 = \mathbf{q}(\mathbf{r}_3)$ soient positionnées en surface est en cours d'élaboration afin de pallier cette difficulté.

2.4 Caractérisation en milieu anisotrope, atténuant et stratifié

Cette dernière section présente mes travaux de recherche portant sur la caractérisation de milieux anisotropes, atténuants et stratifiés dans le cadre d'applications en acoustique sous-marine pour l'identification des sédiments (§2.4.1) puis en contrôle non destructif pour le suivi d'endommagement dans les matériaux composites (§2.4.2). Il s'agit de deux environnements différents mais qui sont chacun le siège de phénomènes de diffraction, atténuation, réflexion, transmission de l'onde acoustique ou onde ultrasonore à des échelles différentes. De plus, ces deux développements reposent sur l'inversion d'un modèle multicouches. Etant donné que ces travaux ne représentent pas la majeure partie de mes activités de recherche, la présentation qui suit est relativement succincte.

2.4.1 Caractérisation sédiments marins

Publication associées [CI3], [CN7]

Collaborations MPL, San Diego, USA : Y. Caglar

IFREMER, Brest : J.-F. Bourillet

MAREE, Lorient : X. Demoulin, C. Lemagnen, L.-A. Gueguen

Ce volet porte sur les suites données à mes travaux de thèse portant sur la caractérisation des sédiments marins [RLD+11] et durant laquelle seul le problème direct avait été abordé. Sur la base du modèle multicouche développé dans [RLD+11], j'ai développée au début de mon post-doctorat (entre 2009 et 2011) au Marine Physical Laboratory (UCSD, San Diego, Etats-Unis) une méthode d'estimation des paramètres sédimentaires à partir des données de sondeurs de sédiment à des fréquences moyennes comprises entre 1 kHz et 10 kHz. Ce travail a été fait en partenariat avec Y. Caglar, précédemment chercheur au Marine Physical Laboratory (UCSD, San Diego, Etats-Unis), et J.-F. Bourillet, chercheur sédimentologue à l'IFREMER Brest. Et plus récemment, quelques travaux annexes sur l'identification d'inclusions dans les sédiments marins ont été entrepris dans le cadre de stages de master (C. Lemagnen et L.-A. Gueguen) que j'ai co-encadrés avec X. Demoulin de l'entreprise MAREE (Lorient).

Les principales difficultés pour calculer les propriétés des sédiments à partir des données de sondeurs de sédiment proviennent des contributions des couches non résolues et des couches présentant des gradients continus d'impédance ainsi que de la quantité croissante de paramètres à estimer lorsque le nombre de couches augmente. La méthode développée surmonte ce problème et permet d'estimer l'impédance, l'épaisseur et l'atténuation de chaque couche détectée par le sondeur de sédiment. Un algorithme génétique [Gol89; YGH07] à partir du module « algorithme génétique » de la Toolbox Matlab « Optimisation global » est d'abord utilisé pour approcher . Ensuite, une optimisation non linéaire avec contraintes basée sur l'approche par points intérieurs (Toolbox Matlab « Optimisation ») est appliquée sur ces solutions approximatives pour obtenir une estimation affinée des paramètres du sédiment. La méthode [RBY10] a été testée sur des données synthétiques puis sur des données expérimentales acquises en mer sur la terrasse de Mériadzek située sur la plateaux continental à 2200 m de profondeur au large de l'océan Atlantique (figure 2.17). Les profils examinés (figure 2.18a) ont été acquis lors de la campagne d'essais TVTB en Juin 2007 sur environ 1 km de long au niveau de la terrasse de Meriadzek (courbe noire sur la figure 2.17) à l'aide du sondeur de sédiment *Echoes 3 500* équipant le navire océanographique le *Pourquoi Pas ?* de l'IFREMER. Il émet des signaux centrés sur 3.5 kHz définis entre 1.8 kHz et 5.3 kHz. De plus, une campagne de carottage a été menée sur cette même zone. Les caractéristiques du fond ont été mesurées grâce au banc d'analyse MSCL (Multi Sensor Core Logger) de GEOTEK sur la carotte KESC3-06 prélevée avec le carottier Calypso du *Pourquoi pas ?* lors de la mission ESCAROT en Mars 2006 [WLA06]. L'impédance en fonction de la profondeur estimée à partir du sismogramme mesuré par le sondeur de sédiment est comparée sur la figure 2.18b au profil d'impédance mesuré sur la carotte KESC3-06. Compte tenu du caractère expérimental, les profils d'impédance estimés et réels montrent une bonne adéquation. Dans cette zone, l'atténuation étant faible (< 0.02 dB/m/kHz), il n'est pas possible de conclure sur une valeur quantitative fiable en fonction de la profondeur ; on peut toutefois signaler que qualitativement l'ordre de grandeur du coefficient d'atténuation estimé (0.005 dB/m/kHz) était consistant avec cette remarque.



Figure 2.17 – Plan de situation de la zone de mesures avec le sondeur de sédiment lors de la campagne d’essais TVTB en Juin 2007 par l’IFREMER et de carottage avec le carottier Calypso du *Pourquoi Pas ?* lors de la mission ESCAROT en mars 2006 [WLA06].

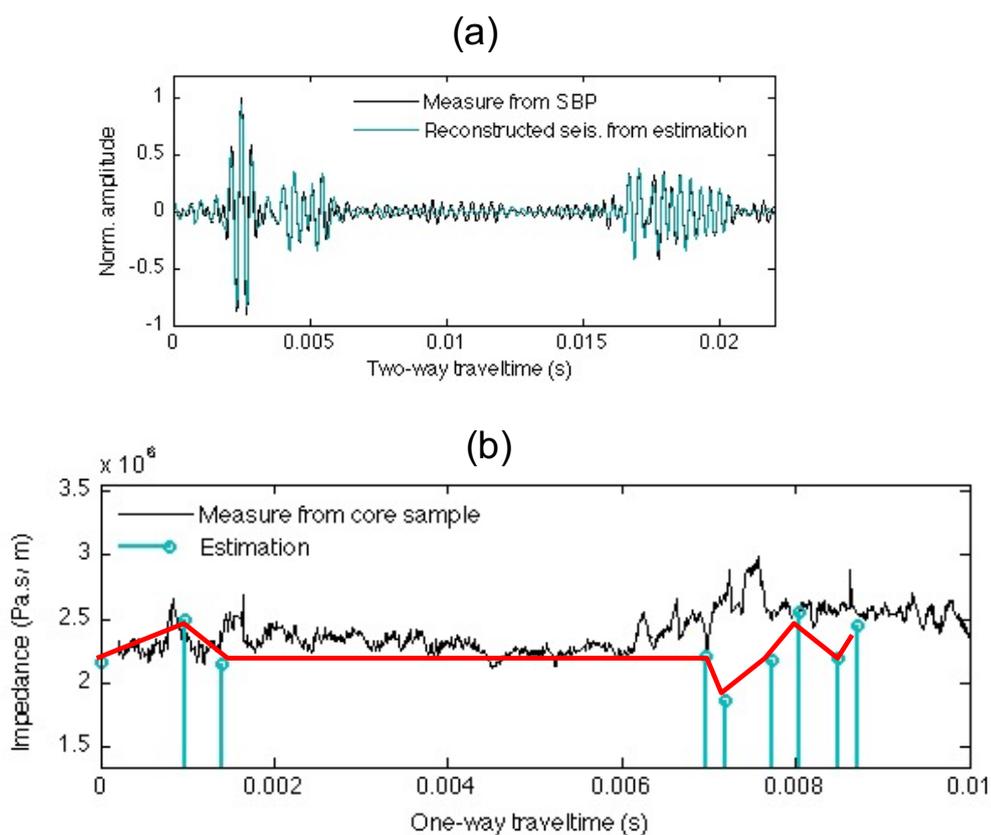


Figure 2.18 – (a) Comparaison du sismogramme mesuré par le sondeur de sédiment (SBP) Echoes 3500 avec le sismogramme reconstruit à partir du jeu de paramètres estimés (b) Comparaison des impédances estimées à partir de la méthode d’inversion développée et des impédances mesurées sur la carotte KESC3-06 [WLA06].

2.4.2 Caractérisation de matériaux composites

Publication associées [A11]

[CN2], [CN3]

Collaborations LMA : C. Payan, J. Moysan, C. Hochard, J.-P. Charles

MATEIS, Lyon : J. Adrien, N. Godin

Ecole Navale, Crozon : B. Giraud, A. Salomon

Projets/contrats associés [P2]

Les matériaux composites sont largement utilisés dans de nombreux secteurs d'activité tels que l'aéronautique, l'industrie automobile et navale, ou le génie civil qui nécessitent l'utilisation de matériaux à la fois légers et mécaniquement efficaces. Afin de garantir l'intégrité et la sécurité de toute structure composite, il est primordial d'effectuer des tests sur les matériaux tout au long de la vie de la structure, depuis le processus de fabrication jusqu'à la mise en service. Les techniques de contrôle non destructif basées sur les ultrasons ont montré un grand potentiel au cours des dernières décennies pour atteindre cet objectif. En effet, les ondes ultrasonores permettent de réaliser des inspections locales ou globales des structures composites afin d'évaluer l'état de santé de la structure et la qualité de l'air [M F70 ; SS82 ; HCBO15]. Lorsqu'une structure composite est endommagée, une perte de rigidité est généralement observée par rapport à une structure intacte [Tho09 ; TH09]. Cette perte de rigidité, également appelée facteur d'endommagement, permet de qualifier l'endommagement du matériau à l'échelle macroscopique. Afin d'obtenir une estimation de ce facteur, il faut tout d'abord mesurer les constantes d'élasticité du composite et suivre leur évolution. Parmi les différentes approches existantes [CJS+90 ; RW92 ; WL99 ; CH01 ; PGS+17 ; NYHM17], il a été montré que l'analyse de la birefringence acoustique [Cla85 ; Sch95 ; SPDB08 ; SDRB13] fournit des informations sur la rigidité de plaques composites et est sensible à l'endommagement [RFAB13 ; FK16]. Dans le cadre d'un projet CNRS PEPS [P2] en collaboration avec le LMA (C. Payan, J. Moysan, C. Hochard, et J.-P. Charles) et le laboratoire MATEIS de Lyon (J. Adrien et N. Godin), j'ai poursuivi cette approche afin de détecter et caractériser un endommagement diffus dans des plaques composites stratifiées à partir de l'étude de la biréfringence des ondes de cisaillement. Par rapport aux précédentes études [RFAB13 ; SDRB13 ; FK16], la méthode proposée permet de caractériser localement l'endommagement d'une plaque composite à partir de mesures de cisaillement au contact en mode pulse-écho entre 0.5 MHz et 2 MHz, et des estimations des modules de cisaillement hors-plan et du coefficient d'atténuation [RPMH18]. De plus, elle ne nécessite pas de mesures préalables sur une plaque saine de référence.

Cette analyse a été conduite sur deux éprouvettes stratifiées, l'une saine et l'autre endommagée, comportant chacune 6 plis ou couches élémentaires tissés déséquilibrés à fibre de verre/matrice époxy avec, respectivement, 83% et 17 % de fibres de verre orientées selon les directions **1** et **2** (cf. figure 2.20). La plaque endommagée a été obtenue à partir d'essais de traction (solicitation selon la direction **1**) avec décharge jusqu'à la rupture et l'étude de son comportement d'endommagement est détaillée dans [Tho09]. Comme dans le cas des structures en béton, l'endommagement à un stade précoce apparaît sous forme de micro-fissures au niveau des interfaces fibre/matrice pour ensuite se propager entre les plis et entraîner des phénomènes de délamination. Les valeurs d'endommagement mesurées sur le diagramme de traction après déchargement sont de 0.48 et 0.15 dans les directions **1** et **2**. Ces valeurs réfèrent à la perte de rigidité dans le module d'Young pour chaque direction $d = 1 - E/E_0$, où E est la rigidité du

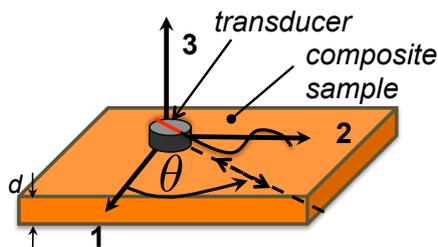


Figure 2.19 – Schéma du dispositif de mesure en mode pulse-écho des ondes de cisaillement. Le transducteur émet dans l'échantillon composite une onde de cisaillement polarisée selon la direction θ définie par le trait rouge sur le transducteur (angle de polarisation θ par rapport à l'axe **1**). L'onde réfléchie par la face arrière est mesurée par le même transducteur au même angle de polarisation θ . Les modules de cisaillement hors plan G_{13} et G_{23} sont respectivement mesurés pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$.

matériau endommagé et E_0 la rigidité du matériau sain.

Les coefficients de cisaillement hors plan G_{13} et G_{23} , et la variation d'atténuation Δk ont été estimés sur les éprouvettes saine et endommagée suivant le set-up expérimental représenté sur la figure 2.19 et selon la méthodologie décrite dans [RPMH18] à partir d'un modèle direct multicouches. Les résultats obtenus montrent que le ratio des modules de cisaillement $R_g = G_{23}/G_{13}$ sont sensibles à l'endommagement avec une valeur de ratio supérieure par rapport à l'éprouvette saine (figure 2.21b). Ceci suggère une baisse de rigidité en cisaillement plus importante dans la direction **1**, or cette observation est en accord avec les essais de traction qui ont causés davantage de dommage dans la direction **2** (du fait de la direction des sollicitations en traction dans la direction **1**). Quant à la variation du coefficient d'atténuation (figure 2.21a), elle est supérieure pour l'éprouvette endommagée et elle diminue au fur et à mesure que le point de mesure s'éloigne de la zone de rupture pour atteindre la même valeur que pour l'éprouvette saine. En effet, l'endommagement est plus important proche de la zone de rupture et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne [Tho09]. Ce résultat suggère la possibilité d'utiliser la variation du coefficient d'atténuation comme un indicateur local quantitatif de l'endommagement.

En conclusion, cette étude a permis de développer une méthode locale de caractérisation ultrasonore de l'endommagement de plaques composites stratifiées basée sur l'analyse de la birefringence des ondes de cisaillement. Des ouvertures possibles de ce travail pourraient être : d'étendre cette approche à une plus large gamme de composites, tels que des composites avec des matériaux différents (fibres de carbone) et comportant des orientations différentes entre plis.

2.5 Conclusions

Ce chapitre a permis de présenter le deuxième volet de mes travaux sur la caractérisation de structures complexes en milieu complexe. Mes recherches ont principalement porté sur deux types de problématiques examinées dans le régime acoustique et ultrasonore :

- **caractériser un milieu lui-même complexe** en présence de phénomènes de

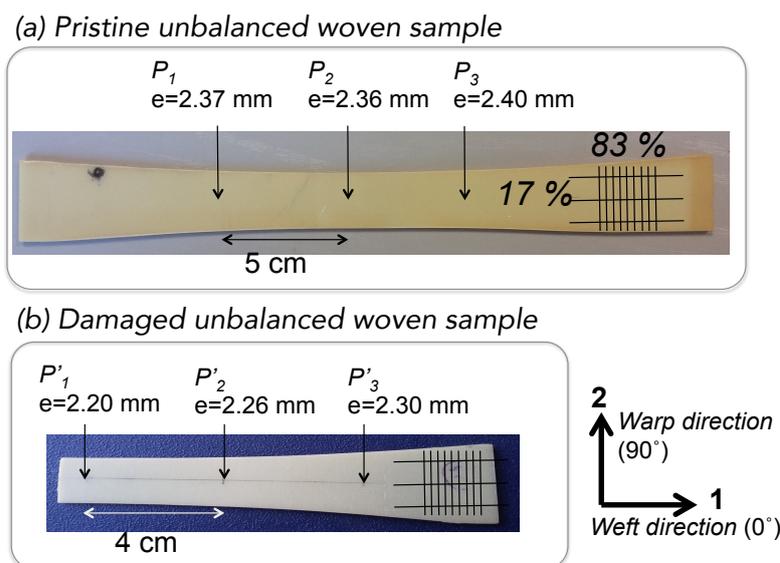


Figure 2.20 – Schéma des éprouvettes composites tissées (a) saine et (b) endommagée avec l'emplacement respectif du point de mesure. Le repère est tel que les modules de cisaillement G_{13} et G_{23} sont les modules dans la direction **1** (Weft direction) et direction **2** (Warp direction), respectivement.

diffusion et de diffraction, d'atténuation, de stratification et/ou d'anisotropie.

- Les méthodes de caractérisation développées dans le cadre de milieux stratifiés et atténuants ont été faites dans le contexte de l'identification des sédiments marins (§2.4.1) et du contrôle non destructif de plaques composites qui comprennent aussi de l'anisotropie (§2.4.2). Pour ces deux applications, la démarche repose sur une approche paramétrique avec un modèle direct multicouches avec bien entendu des paramètres d'entrée et de sortie différents pour chacune des applications.
- Ensuite, la majeure partie de mes travaux ont porté sur la caractérisation d'un milieu diffus dans le contexte du génie civil, plus spécifiquement pour l'évaluation non destructive de l'intégrité de structures en béton (§2.2.1) dans un régime de fréquences (quelques centaines de kHz - quelques MHz) dans lequel phénomènes de diffusion et diffraction multiples et éventuellement réverbération cohabitent. L'objectif est d'être en mesure de détecter et caractériser à un stade le plus précoce possible un potentiel endommagement du matériau. Or dans le cadre du béton, la zone de transition interfaciale (ITZ) à l'interface entre granulats et mortier est la plus propice à l'apparition de micro-fissures car il s'agit d'une région de contraintes maximales. Les travaux développés ont permis de contribuer à l'objectif d'évaluation quantitative de l'endommagement en corrélant les paramètres du modèle d'ITZ, à savoir le niveau de contact à l'interface, appelé « Contact Level (CL) », avec les paramètres d'atténuation, vitesses de phase et diffusivité en fonction de plusieurs niveaux d'endommagements thermiques. En effet, les résultats obtenus suggèrent la possibilité d'appliquer le problème inverse et de quantifier l'endommagement via les niveaux de contact à l'interface, c-à-d les CL, à partir des mesures de l'atténuation, de la vitesse de phase et de la diffusivité.

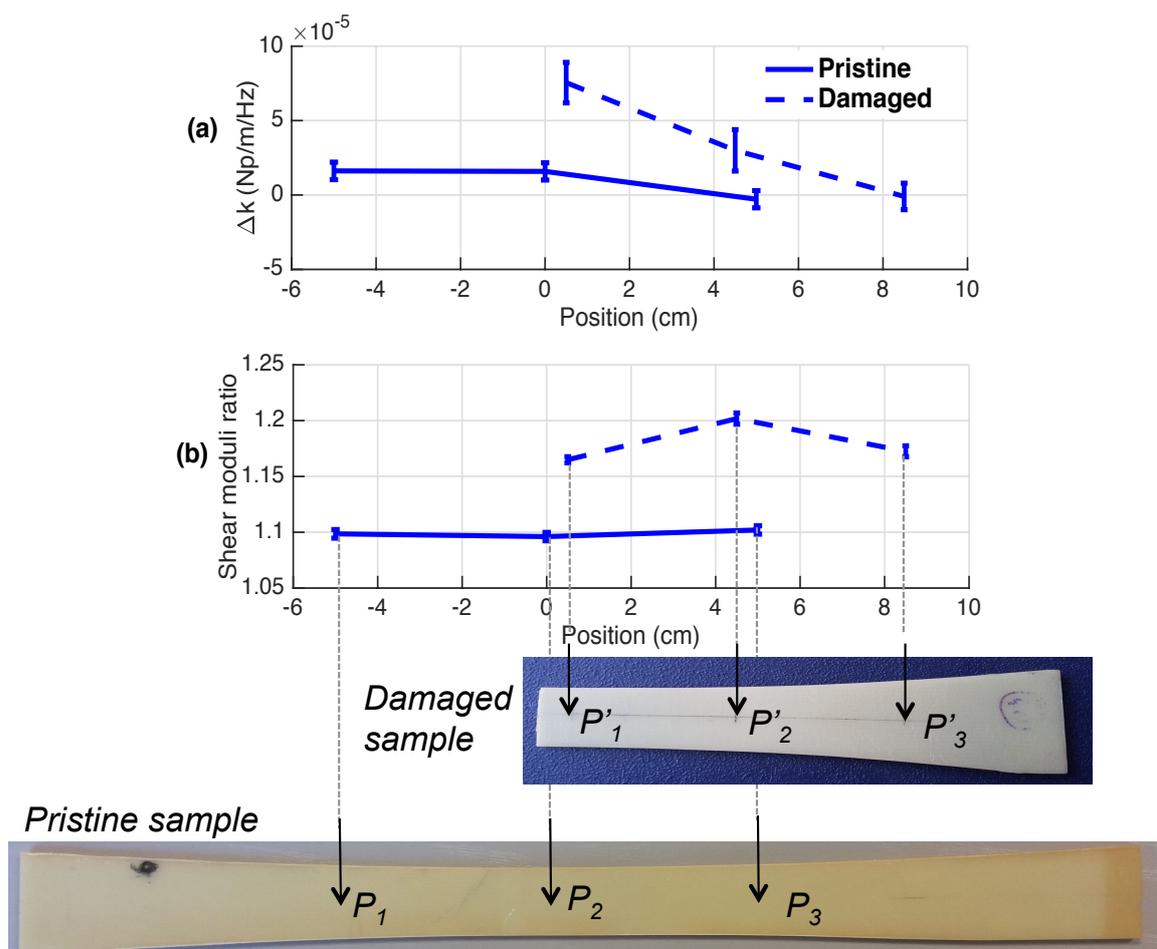


Figure 2.21 – (a) Variation du coefficient d'atténuation entre les directions **1** et **2** tels que schématisé sur la figure 2.19 pour les plaques composites stratifiées saine et endommagée en fonction de la position de mesure ultrasonore (b) Ratio des modules de cisailment hors plan $R_g = G_{13}/G_{23}$ et G_{23} pour les plaques composites saines et endommagée en fonction de la position de mesure ultrasonore .

Les perspectives ouvertes par ce thème de recherche concernent ainsi l'analyse du problème inverse vers l'objectif de caractérisation quantitative de l'endommagement dans les structures en béton à partir du modèle incluant l'ITZ. D'autres développements concernent aussi le suivi de l'intégrité de structure en béton en régime résonant. L'approche est alors différente de l'analyse de la diffusion et se concentre sur le suivi du comportement global de la structure via l'étude des modes et coefficients modaux dans les régimes linéaires et non linéaires.

- L'autre problématique examinée (§2.3) est celle de la **caractérisation d'une cible élastique immergée dans un environnement complexe, plus spécifiquement dans un milieu diffus en vue d'une caractérisation passive**. L'approche préconisée vise à exploiter la redondance d'information induite par les réflexions multiples d'un milieu réverbérant ou réfléchissant, ou d'exploiter les propriétés d'un champ diffus de bruit. Les méthodes développées trouvent des applications initialement en acoustique sous-marine dans l'identification de cibles et aussi pour le suivi de l'intégrité de structures (Structural Health Monitoring, SHM) rencontrées dans les réacteurs nucléaires par exemple en exploitant les sources d'opportunités telles que les vibrations liées aux pompes. La démarche globale proposée dans ces travaux consiste à mesurer et extraire la réponse intrinsèque de l'objet à partir de mesures sans contact en domaine aérien dans un champ statistiquement diffus en appliquant une méthode de corrélation (§2.3.1) et de proposer des alternatives pour estimer les champs de pression et vitesse normales à la surface de l'objet élastique (§2.3.2). Cette démarche nécessite donc à la fois des développements scientifiques et techniques pour développer les traitements nécessaires pour estimer les informations de pression et vitesse en surface de l'objet, et pour mettre en oeuvre un dispositif de mesure avec un large réseau de capteurs sans contact. Dans ce cadre, un dispositif d'holographie composé d'un large réseau de capteurs digitaux microphones mems (microsystèmes électromécaniques) double couche a été mis en oeuvre et fait toujours l'objet de développements. Et, une méthode d'holographie basée sur le formalisme des sources équivalentes a été implémentée pour estimer pressions et vitesses normales en surface à partir de mesures sans contact. Une solution a aussi été proposée pour répondre aux difficultés induites par des mesures en fluide léger (comportement de la cible élastique proche d'un objet rigide).

Les suites de ce travail concernent la démonstration expérimentale de la méthode d'holographie pour estimer la réponse intrinsèque d'un objet élastique dans un environnement diffus. Pour cela, des développements seront entrepris pour avancer sur divers aspects techniques et scientifiques tels que le nombre et la disposition des capteurs, leur maintien, la sensibilité de la mesure, la quantification des éventuelles perturbations environnementales (causées par le système de maintien, variation de température, câbles, etc ...). Les perspectives annoncées ici sur la démonstration expérimentale des approches développées sont similaires à celles annoncées dans la section 1.4 sur les développements expérimentaux. Une partie de ces verrous sera analysée dans le cadre de travaux de thèse avec le CEA Cadarache (Thèse CEA-LMA de Théo Langlet, 2021 - 2024). Par ailleurs, la prise en compte des effets de diffraction par des arêtes est une limitation de la méthode d'holographie décrite dans le paragraphe 2.3.2. Une alternative basée sur un formalisme simplifié des éléments de frontières est en cours de développement et fera l'objet d'analyses futures. Enfin, une autre voie concerne l'exploitation de la réponse intrinsèque

de l'objet élastique. Cette dernière peut être réinjectée dans un modèle pour déterminer la réponse bi-statique de la cible pour des conditions de milieu et d'insonification quelconques. Ceci pourra faire l'objet d'analyses futures en vue de calculer la réponse bistatique à des fins de classifications.

Chapitre 3

Synthèse et Perspectives

Sommaire

3.1 Synthèse	79
3.2 Perspectives	81
3.2.1 Caractérisation et Suivi de sources secondaires en mouvement	81
3.2.2 Localisation et caractérisation en milieu diffus	82

3.1 Synthèse

Avant de clotûrer ce mémoire par les perspectives de mes travaux de recherche, ces derniers sont synthétisés dans le paragraphe qui suit. Mes activités de recherche s'articulent principalement autour de la problématique suivante : développer des méthodes acoustiques robustes pour la détection, localisation et caractérisation d'objets en environnement complexe ou de l'environnement lui-même. Mon approche, à forte composante expérimentale, est basée :

- sur la compréhension des phénomènes physiques en jeu (diffusion acoustique, atténuation, réverbération, anisotropie, etc. . . .) et de leurs interactions avec la configuration de mesure par l'utilisation de modèles analytiques et numériques, et par la mise en place d'expériences en milieu contrôlé en laboratoire,
- sur l'utilisation de techniques de traitement du signal et traitement d'antenne en accord avec la modélisation des phénomènes physiques en jeu déterminée à l'étape précédente (filtrage adapté, retournement temporel, analyse temps-fréquence, etc. . . .) ,
- sur la validation expérimentale des méthodes de détection, localisation et/ou caractérisation proposées sur des données acquises en laboratoire et sur le terrain.

Mon premier thème de recherche présenté dans le chapitre 1 porte sur le développement de méthodes de détection et localisation acoustiques et ultrasonores de sources acoustiques et de diffracteurs acoustiques ou ultrasonores. Elles sont toutes basées sur une approche perturbative. Deux stratégies de localisation ont été employées : la première (§1.2) repose sur l'utilisation d'un modèle numérique du milieu inspecté (approche paramétrique) tandis que la seconde (§1.3) repose soit sur l'utilisation d'observations expérimentales du milieu inspecté ou d'un modèle très simplifié de ce dernier. Les méthodes développées rentrent dans le cadre d'applications en contrôle non destructif pour la localisation d'éventuels défauts dans des soudures ou structures tubulaires (milieux réfléchissants et anisotropes), pour des applications en acoustique sous-marine pour la localisation de sources acoustiques en milieu marin (milieu réverbérant) et pour la localisation d'un objet diffractant dans un milieu multiplement diffusant.

Le deuxième thème de recherche présenté dans le chapitre 2 porte sur le développement de méthodes de caractérisation en milieu diffus dans le cadre de deux études distinctes. La première étude (§2.2) concerne la caractérisation du béton afin de prévenir un éventuel endommagement précoce. Or le béton est un milieu élastique dans lequel siègent les phénomènes de diffusion multiple. L'approche développée dans mes travaux repose ainsi sur l'analyse des phénomènes de diffusion sur le signal et du lien avec la micro-structure, à savoir la nature du contact à l'interface entre la matrice cimentaire et les agrégats constituant le béton. La seconde étude (§2.3) vise à caractériser une structure élastique de manière passive, c'est-à-dire uniquement par écoute du champ sonore ambiant et sans utilisation de projecteurs acoustiques. Les méthodes ont été initialement développées pour des applications en acoustiques sous-marine. Elles reposent sur le développement de méthodes d'holographie acoustique et sur le formalisme des matrices d'impédance ou d'admittance mécaniques (§2.3). Par ailleurs, j'ai aussi travaillé sur le développement de méthodes de caractérisation de milieux stratifiés tels que les sédiments marins pour des applications en acoustique sous-marine (§2.4.1) ainsi que de plaques composites (§2.4.2) à des fins de contrôle non destructif.

Mes travaux de recherche ont permis la mise en place de synergies et de collaborations sur le plan local, national et international entre des acteurs académiques (Marine Physical Laboratory San Diego aux Etats-Unis, Naval Research Laboratory Washington DC aux Etats-Unis, laboratoire MATEIS Lyon, laboratoire I2M Bordeaux, LMDC Toulouse, IEMN Lille, laboratoire ISTERRE Grenoble, laboratoire STIC ENSTA Bretagne, IFREMER) et des acteurs industriels (CEA Cadarache, ANDRA Paris, MAREE Lorient, EDF Chatou et Clamart, MISTRAS Group). Ces collaborations ont été mises en oeuvre dans le cadre de programmes de recherche académiques nationaux et internationaux et de contrats industriels (cf. liste des contrats et programmes de recherche donnée en Annexe A).

Dans le cadre de mes activités de recherche, j'ai supervisé ou co-supervisé le travail de 7 post-doctorants, ATER, ou ingénieurs d'étude ou de recherche (cf. liste des activités d'encadrement en Annexe A). J'ai co-encadré 2 thèses soutenues en 2017 et 2019, et je co-dirige actuellement 2 autres thèses (soutenances prévues en 2023 et 2024). Je me suis attachée à renforcer les synergies entre recherche et formation via l'encadrement de stages de master (14), de projets tutorés et des activités de vulgarisation scientifique par des participations à des journées de la science et séminaires sur mes travaux de recherche auprès d'étudiants apprentis de deuxième année à l'IUT GMP d'Aix-En-Provence.

En terme de production scientifique (cf. Annexe B), j'ai produit 17 articles

post-thèses dans des revues internationales à comité de lecture de rang A et participé à 33 communications dont 2 invitées à des congrès internationaux à comité de sélection.

3.2 Perspectives

Mes efforts actuels et futurs de recherche visent à poursuivre les travaux sur les problématiques de localisation et caractérisation acoustiques et ultrasonores en milieu diffus ainsi que la localisation de sources acoustiques et ultrasonores secondaires (c'est-à-dire des diffracteurs acoustiques ou ultrasonores) en mouvement. Chacune de ces perspectives de recherche est discutée ci-dessous.

3.2.1 Caractérisation et Suivi de sources secondaires en mouvement

Cette perspective de recherche s'inscrit dans la continuité des travaux présentés dans le premier chapitre sur l'utilisation de méthodes basées sur l'approche perturbative et dans le cas de sources en mouvement. La thèse de Jules Fermé débutée en novembre 2020 que je co-encadre avec S. Mensah et J.-F. Chaix (LMA Marseille) et M. Cavaro (CEA Cadarache) vise à implémenter des algorithmes de caractérisation des champs de vitesses dans un écoulement liquide inaccessible optiquement selon ces approches et à les tester expérimentalement. Cet axe de recherche comprend des perspectives à la fois sur le plan algorithmique qu'expérimental.

Développements analytiques et algorithmiques

La thèse de Jules Fermé porte plus spécifiquement sur le suivi de profils de vitesse d'un écoulement liquide à travers une paroi par l'utilisation de diffuseurs acoustiques gazeux (microbulles). Ces travaux s'effectuent dans le contexte du contrôle non invasif des structures de réacteurs nucléaires. La mesure du champ des vitesses dans un écoulement avec diffuseurs est possible via l'application de techniques acoustiques de vélocimétrie par images de particules (écho-PIV) [KHS04; Poe16] mais elles sont difficilement applicables en milieu acoustiquement borné tel qu'une tuyauterie car les interactions multiples avec les frontières viennent masquer la signature des particules et les effets de couplage entre le fluide et le tube ne sont pas considérés. La prise en compte d'un tel environnement complexe pourrait être effectuée en intégrant un modèle du milieu dans la technique d'imagerie. Le Matched Field Processing [BKM93; HM14b] et l'énergie topologique [DG10; RSGJ12; LMR+17a] qui utilisent une modélisation du milieu à un instant donné sont ainsi des méthodes d'imagerie candidates pour être utilisées en conjonction avec une approche d'écho-PIV pour suivre les profils de vitesse d'un écoulement liquide à travers une paroi via l'utilisation de diffuseurs acoustiques gazeux (microbulles). L'écho-PIV couplée à une technique d'imagerie topologique a été expérimentée en immersion pour cartographier les vitesses d'un liquide en mouvement avec des diffuseurs solides [RJG13]. Mes recherches présentes et futures visent ainsi à poursuivre cette approche et déterminer dans quelle mesure elle peut être appliquée pour le suivi du déplacement de bulles (diffuseurs gazeux) avec la prise en compte des phénomènes de couplage entre l'écoulement liquide et la paroi, les éventuels phénomènes non linéaires [CPMB11], et les potentiels effets de diffusion multiple dans le cas de distributions denses de bulles. Une partie de ces verrous sont examinés numériquement

et expérimentalement dans le cadre des travaux de thèse de Jules Fermé (2020 - 2023) et ceux non résolus feront l'objet de mes recherches à plus long terme dans le cadre soit d'un travail de thèse ultérieur ou de post-doctorat.

Développements expérimentaux

De par le caractère appliqué de ces travaux de recherche, les méthodes développées ont vocation à être testées et validées expérimentalement.

Une première partie des développements expérimentaux concerne la mise en oeuvre d'un banc expérimental de mesure permettant de générer des distributions de bulles calibrées dans un liquide dont l'écoulement est contrôlé et d'être en mesure de conduire des mesures optiques et acoustiques synchronisées sur ce dispositif afin de tester les méthodes acoustiques de suivi de profil de vitesse de l'écoulement et les comparer aux résultats optiques. Grâce à l'expertise conjointe du LMA Marseille [CFAM15 ; AMF+17] et du CEA Cadarache [Cav15 ; Dho18], un banc est actuellement en cours de développement au CEA Cadarache qui dispose d'une installation dédiée permettant de générer des allées de tourbillons de Von Karman dans une section carrée et ensemencée en microbulles. Une veine expérimentale comportant des générateurs de microbulles vient d'être développée. Une fois le dispositif mis en place, les recherches viseront à étudier expérimentalement les performances (bande fréquentielle, disposition des capteurs, rapport signal sur bruit, variabilité environnementale, vitesse d'écoulement, densité de bulles) des méthodes développées.

Étant donné l'analogie des problématiques traitées dans cet axe de recherche avec celles examinées en ultrasons médicaux sur la caractérisation quantitative de la microstructure des suspensions concentrées [FC13 ; LRD+20], je prévois aussi une ouverture de mes recherches sur cette problématique aux travaux en ultrasons médicaux portés par E. Franceschini au sein du LMA.

3.2.2 Localisation et caractérisation en milieu diffus

Dans la continuité des travaux présentés dans les sections 1.3.4 et 2.3, mes autres perspectives de recherche à moyen et long termes visent à progresser dans :

1. le développement de méthodes de localisation de défaut d'un objet élastique ou de sources acoustiques ou ultrasonores en champ diffus ou réverbérant afin d'exploiter les sources d'opportunités présentes dans la structure ou le milieu environnant,
2. et le développement de méthodes de caractérisation acoustique d'une cible élastique en milieu diffus ou réverbérant afin d'exploiter également les sources d'opportunités et les interactions multiples du champ acoustique avec le milieu environnant.

Ces travaux s'inscrivent dans l'objectif de localiser un défaut ou une source acoustique ou ultrasonore par moyens passifs (pas de projecteurs acoustiques ou ultrasonores), ou en milieu fortement réverbérant ou diffusant dans lequel la signature de l'objet à caractériser ou du défaut à localiser seraient masqués par le bruit ambiant (scénario de faible rapport signal sur bruit). Ces développements visent des applications en contrôle non destructif et suivi d'intégrité de structure (plus communément appelé SHM pour Structural Health Monitoring en anglais), ainsi qu'en acoustique sous-marine dans le cadre de l'identification de cibles en milieu marin.

Pour ces deux thématiques de localisation et caractérisation, mon approche consiste à poursuivre les efforts aussi bien sur le plan expérimental qu'algorithmique.

Développements analytiques et algorithmiques

Je prévois de poursuivre une approche perturbative afin de localiser ou caractériser quantitativement une variation de paramètres d'une structure en milieu réverbérant ou diffus. Ce type d'approche est largement utilisé dans le cadre de la tomographie de diffraction [Dev82; Dev84; PSTU16] ou tomographie acoustique par méthode adjointe [Tar84; PW90; Nor04; HPC+04; SCK11] moyennant des approximations sur l'expression du champ dans le milieu avant occurrence de la perturbation (champ en milieu infini, conditions de Sommerfeld) et sur le potentiel de variation perturbé (variation uniquement liée à la célérité). Elle repose ainsi sur l'approximation de Born ou l'approximation de diffusion simple en milieu diffusant. Mes travaux ont consisté à proposer des méthodes de localisation de sources [RWKR11b; RK12b; LMR+17a; MLR+18b] dans des environnements ne respectant plus les hypothèses ci-dessus (champ en milieu fini, variation de célérité et densité, présence de diffusion multiple ou interactions multiples entre la perturbation et le milieu environnant). Le but est de poursuivre ces développements dans le cadre de l'imagerie passive ou de l'imagerie en environnement fortement réfléchissant où la signature du signal d'intérêt serait masqué. Les méthodes d'imagerie passive ont fait l'objet de nombreux développements en sismique et en acoustique sous-marine [BBG92; CP03; SRK05; SCS07; BSC+08; SSG+10], et sont actuellement une voie de développements dans le cadre de la localisation et caractérisation de défaut ou du suivi de l'intégrité d'une structure [CMD+14; CRP+15]. Mes travaux futurs sont engagés dans cette voie pour des applications en contrôle non destructif et SHM, notamment dans le cadre de la thèse de Théo Langlet sur l'imagerie passive à des fins de contrôle dans le réacteur nucléaire. Cette thèse, débutée en novembre 2021, est en collaboration avec le LMA (P.O. Matéi, R. Côte) et le CEA Cadarache (F. Michel). Ces travaux viendront aussi s'appuyer sur la poursuite de mes collaborations avec le Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, précurseur des développements théoriques et expérimentaux de l'imagerie passive en acoustique sous-marine.

Dans l'approche que je souhaite poursuivre, il y a deux verrous en particulier que je souhaiterais lever et qui sont en rapport avec la démonstration expérimentale des méthodes développées.

(1) L'approche perturbative nécessite d'extraire la signature de la variation du ou des paramètres d'intérêt. Or dans un scénario de faible RSB comme c'est le cas en milieu réverbérant ou diffus, il est difficile d'extraire une signature exploitable par simple opération de soustraction sans filtrage préalable du signal. De plus, ceci suppose que l'on dispose d'un modèle de référence fin du milieu qui n'est pas toujours disponible dans la réalité. L'idée sera ainsi de rechercher des stratégies pour se diriger vers des approches ne nécessitant pas de modèle fin de référence (« baseline free ») en vue d'extraire la signature d'une perturbation de façon robuste dans des scénarios de faibles RSB. Ce problème pourra être examiné au travers d'approches statistiques [AMH18], par projection sur une base pertinente selon le problème traité [TZL15] ou par méthode d'interférométrie [Sni06; LPRM10; RK12a]. En l'absence de recours à un modèle fin du milieu, l'idée est de se diriger vers des méthodes de localisation et caractérisation basées sur une description expérimentale du problème direct [HM14a; Har15]. Les méthodes de localisation [LRM+19] et caractérisation par holographie acoustique [RKW13; WTR+17; SRS+20; RGR21] développées récemment dans mes travaux de recherche rentrent dans ce cadre. Leur faisabilité a été démontrée numériquement et la

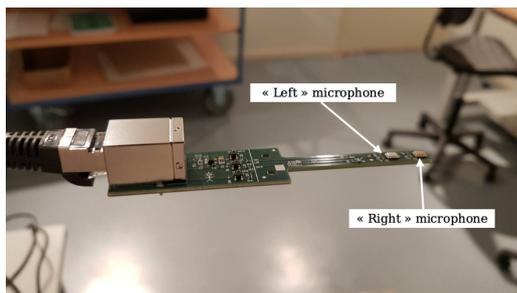


Figure 3.1 – Photo du capteur double couche composé de 2 microphones acoustiques mems dénommés « left microphone » et « right microphone »

démonstration expérimentale est en cours.

(2) Le deuxième verrou concerne les difficultés posées par les hypothèses sur la distribution du champ environnant dans les méthodes d'imagerie passives récemment développées dans mes travaux [LRM+19; RKW13; WTR+17; SRS+20; RGR21]. Ces méthodes supposent une distribution uniforme du champ dans le milieu environnant. Or d'un point de vue expérimental cela ne sera pas toujours respecté dans les applications visées par ces travaux (réacteur nucléaire, pièce réfléchissante ordinaire). Ainsi, des recherches seront engagées pour proposer des méthodes robustes par rapport à la distribution du champ du milieu étudié soit en recréant artificiellement un champ uniforme dans une pièce réfléchissante [JR00], soit en n'exploitant qu'une composante partielle du champ [FKSR08] ou par des approches déconvolutives [GCRC11].

Les performances et robustesse des méthodes en cours de développement ou qui seront développées reposent beaucoup sur le dispositif expérimental et la configuration de mesure. C'est pourquoi, une autre grande partie de mes perspectives de recherche porte sur le développement expérimental de larges antennes de mesure acoustique.

Développements expérimentaux

L'élaboration de méthodes de localisation et caractérisation ne nécessitant pas de modèle fin du milieu de référence et basées sur une description expérimentale du milieu reposent sur le développement d'un dispositif de mesure avec un grand nombre de capteurs récepteurs. Or, conjointement avec le Marine Physical Laboratory (États-Unis) et le Naval Research Laboratory (États-Unis), un dispositif d'acquisition est en cours de développement afin de permettre la mesure simultanée et en parallèle du champ rayonné par une structure sur un large réseau de capteurs. Le dispositif est composé d'une large antenne de capteurs double couche. Chaque capteur (cf. figure 3.1) est constitué de deux microphones acoustiques miniatures *mems* (*mems* réfère à l'anglais Microelectromechanical systems qui est un microsystème électromécanique). L'antenne de mesure a été conçue de telle manière à être la plus versatile possible et s'adapter au mieux au milieu ou la structure imagée en permettant par exemple d'avoir une antenne conformale à l'objet étudié et d'adapter le nombre de capteurs selon l'échantillonnage spatial désiré.

Pour le cylindre creux hémisphérique étudié dans le paragraphe 2.3.2 (cf. représentation figure 2.15), il serait nécessaire d'avoir environ 200 capteurs double couche (soit 400 microphones) pour permettre un échantillonnage spatial suffisant pour estimer la matrice d'admittance avec une précision satisfaisante à partir de la méthode

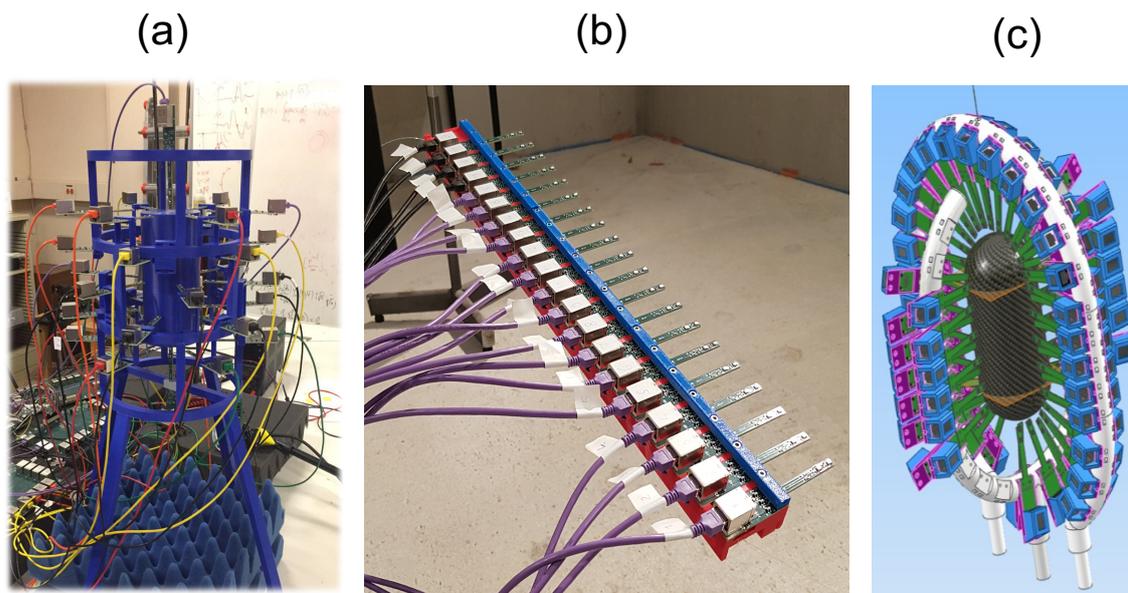


Figure 3.2 – Supports de capteurs permettant la construction (a) d’une antenne de 24 capteurs bi-couche autour d’un cylindre (b) d’une antenne linéaire de 20 capteurs bi-couche (c) d’une antenne de 92 capteurs positionnés sur des arceaux en rotation autour de l’objet

d’holographie développée dans mes activités de recherche et présentée dans la section [2.3.2](#).

Or la mise en place d’une telle antenne et de son dispositif d’acquisition est soumise à plusieurs challenges. Les développements électroniques doivent permettre l’acquisition des signaux sur un large nombre de voies parallèles synchronisées. Même s’il s’agit d’un problème « vieux comme le monde » pour tout expérimentateur, il s’agit d’une problématique récurrente et non triviale en particulier dans le cas du transfert de larges volumes de données. A l’heure actuelle, l’acquisition a été implémentée sur un système intermédiaire permettant l’acquisition sur 50 voies parallèles (soit 100 microphones). Les développements électroniques en cours portent sur l’acquisition sur plus de voies à partir de cartes FPGA.

Le dispositif de mesure se veut le plus versatile possible afin de permettre la construction de différentes géométries d’antenne les plus adaptées au milieu ou à la structure étudiée. Pour ce faire, la solution proposée est celle de construire un système de support de capteurs fonction du problème analysé. La figure [3.2](#) montre quelques exemples de supports de capteur conçus et fabriqués par impression 3D. L’élaboration d’un tel support de capteurs pour une large antenne s’avère être un challenge technique car il faut concevoir un système qui permette de bien maintenir et positionner les capteurs tout en permettant un retrait et repositionnement facile des capteurs. Or ces deux attentes vont à l’inverse l’une de l’autre. De plus, l’antenne doit perturber le moins possible le champ acoustique environnant tout en permettant des mesures avec un large nombre de capteurs. Le challenge technique réside ainsi dans la détermination du support de capteur présentant le meilleur compromis entre toutes les contraintes énoncées ci-dessus.

Pour cela, la suite des développements expérimentaux résideront dans une analyse expérimentale de la sensibilité du dispositif de mesure par rapport aux variations

environnementales (température, modification de l'environnement par ajout, suppression, changement de position de l'objet étudié ou de capteurs, mouvement du support de capteur). Ce type d'analyse sera fondamentale pour achever la démonstration expérimentale des méthodes développées. Cette étude ira également de paire avec une analyse expérimentale de la configuration de mesure (disposition et nombres de capteurs) en vue d'une optimisation du compromis entre la facilité de mise en oeuvre expérimentale et les performances de localisation et caractérisation.

Les perspectives énoncées sur mon axe de recherche « localisation et caractérisation en milieu diffus » seront réalisés dans le cadre de mes collaborations avec le CEA Cadarache, le Marine Physical Laboratory (États-Unis) et le Naval Research Laboratory (États-Unis). La thèse de Théo Langlet que je co-encadre avec P.-O. Mattei (LMA), R. Côte (LMA) et F. Michel (CEA Cadarache), débutée en novembre 2021, permettra de répondre à une partie des problématiques algorithmiques et expérimentales énoncées ci-dessus sur le volet localisation. Sur le volet caractérisation d'objet, j'envisage un partenariat avec l'ENSTA Bretagne afin de travailler sur un programme de recherche mettant en application les méthodes d'holographie acoustique développées à des fins d'identification de cibles en milieu marin.

Bibliographie

- [AD07] A. AUBRY et A. DERODE, “Ultrasonic imaging of highly scattering media from local measurements of the diffusion constant : Separation of coherent and incoherent intensities”, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, t. 75, n° 2, p. 1-9, 2007, ISSN : 15393755. DOI : [10.1103/PhysRevE.75.026602](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.026602).
- [AMF+17] Y. ACHAOU, K. METWALLY, D. FOUAN, Z. HAMMADI, R. MORIN, E. DEBIEU, C. PAYAN et S. MENSAH, “Tunable microbubble generator using electrolysis and ultrasound”, *AIP Advances*, t. 7, n° 1, p. 15 011, jan. 2017. DOI : [10.1063/1.4973720](https://doi.org/10.1063/1.4973720). adresse : <https://doi.org/10.1063/1.4973720>.
- [AMH17] K. S. ALGURI, J. E. MICHAELS et J. B. HARLEY, “Robust baseline subtraction for ultrasonic full wavefield analysis”, *AIP Conference Proceedings*, t. 1806, 2017, ISSN : 15517616. DOI : [10.1063/1.4974546](https://doi.org/10.1063/1.4974546).
- [AMH18] K. S. ALGURI, J. MELVILLE et J. B. HARLEY, “Baseline-free guided wave damage detection with surrogate data and dictionary learning”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 143, n° 6, p. 3807-3818, 2018, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.5042240](https://doi.org/10.1121/1.5042240). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.5042240>.
- [AWT01] P. ANUGONDA, J. S. WIEHN et J. A. TURNER, “Diffusion of ultrasound in concrete”, *Ultrasonics*, t. 39, n° 6, p. 429-435, 2001, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/S0041-624X\(01\)00077-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(01)00077-4).
- [BASH00] N. O. BOOTH, A. T. ABAWI, P. W. SCHEY et W. S. HODGKISS, “Detectability of low-level broad-band signals using adaptive matched-field processing with vertical aperture arrays”, *IEEE Journal of oceanic Engineering*, t. 25, n° 3, p. 296-313, 2000, ISSN : 0364-9059.
- [BBC13] C. BELLIS, M. BONNET et F. CAKONI, “Acoustic inverse scattering using topological derivative of far-field measurements-based L2 cost functionals”, *Inverse Problems*, 2013, ISSN : 02665611. DOI : [10.1088/0266-5611/29/7/075012](https://doi.org/10.1088/0266-5611/29/7/075012).
- [BBG92] M. J. BUCKINGHAM, B. V. BERKNOUT et S. A. L. GLEGG, “Imaging the ocean with ambient noise”, *Nature*, t. 356, n° 6367, p. 327-329, 1992, ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/356327a0](https://doi.org/10.1038/356327a0). adresse : <https://doi.org/10.1038/356327a0>.

- [BCC08] C.-X. BI, X.-Z. CHEN et J. CHEN, “Sound field separation technique based on equivalent source method and its application in nearfield acoustic holography”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 123, n° 3, p. 1472-1478, 2008, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2837489](https://doi.org/10.1121/1.2837489). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.2837489>.
- [BDBD13] M. BONNET, G. DELGADO, M. BONNET et G. DELGADO, “The topological derivative in anisotropic elasticity”, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, t. 66, p. 557-586, 2013.
- [BDY+08] J. A. BUCARO, L. R. DRAGONETTE, T. YODER, L. CARIN, M. SANIGA, L. KRAUS, S. DEY et B. H. HOUSTON, “Broadband acoustic scattering measurements of underwater unexploded ordnance (UXO)”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 123, n° 2, p. 738-746, 2008, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2821794](https://doi.org/10.1121/1.2821794).
- [BG17] J.-P. BALAYSSAC et V. GARNIER, *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. Elsevier, 2017, ISBN : 0081023057.
- [BHS+11] J. A. BUCARO, B. H. HOUSTON, H. SIMPSON, Z. WATERS, M. SANIGA, S. DEY, A. SARKISSIAN, D. CALVO, L. KRAUS et T. YODER, “Wide area detection and identification of underwater UXO using structural acoustic sensors”, rapp. tech., 2011.
- [BHZB13] C.-X. BI, D.-Y. HU, Y.-B. ZHANG et J. S. BOLTON, “Reconstruction of the free-field radiation from a vibrating structure based on measurements in a noisy environment”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 134, n° 4, p. 2823-2832, 2013, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4819118](https://doi.org/10.1121/1.4819118). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4819118>.
- [BKM93] A. B. BAGGEROER, W. A. KUPERMAN et P. N. MIKHALEVSKY, “An overview of matched field methods in ocean acoustics”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, t. 18, n° 4, p. 401-424, 1993, ISSN : 15581691. DOI : [10.1109/48.262292](https://doi.org/10.1109/48.262292).
- [BKS88] A. B. BAGGEROER, W. A. KUPERMAN et H. SCHMIDT, “Matched field processing : Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 83, n° 2, p. 571-587, 1988.
- [Bob06] Y. I. BOBROVNITSKII, “Impedance theory of sound scattering : General relations”, *Acoustical Physics*, t. 52, n° 5, p. 513-517, 2006, ISSN : 1063-7710. DOI : [10.1134/S1063771006050034](https://doi.org/10.1134/S1063771006050034). adresse : <http://link.springer.com/10.1134/S1063771006050034>.
- [Bon06] M. BONNET, “Topological sensitivity for 3D elastodynamic and acoustic inverse scattering in the time domain”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, t. 195, n° 37-40, p. 5239-5254, 2006, ISSN : 00457825. DOI : [10.1016/j.cma.2005.10.026](https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.10.026).
- [Bor90] G. V. BORGIOTTI, “Effect of the compliance on the scattering of an elastic object immersed in fluid : A general formulation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 87, p. 1055-1061, 1990. DOI : [10.1121/1.398832](https://doi.org/10.1121/1.398832).

- [BS03] M. P. BENDSOE et O. SIGMUND, *Topology Optimization : Theory, Methods and Applications*. 2003, ISBN : 3540429921.
- [BS12] C.-X. BI et J. STUART BOLTON, “An equivalent source technique for recovering the free sound field in a noisy environment”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 131, n° 2, p. 1260-1270, 2012, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3675004](https://doi.org/10.1121/1.3675004).
- [BSBR96] R. T. BACHMAN, P. W. SCHEY, N. O. BOOTH et F. J. RYAN, “Geoacoustic databases for matched-field processing : Preliminary results in shallow water off San Diego, California”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 99, n° 4, p. 2077-2085, 1996, ISSN : 0001-4966.
- [BSC+08] F. BRENGUIER, N. M. SHAPIRO, M. CAMPILLO, V. FERRAZZINI, Z. DUPUTEL, O. COUTANT et A. NERCESSIAN, “Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise”, *Nature Geoscience*, t. 1, n° 2, p. 126-130, 2008, ISSN : 17520894. DOI : [10.1038/ngeo104](https://doi.org/10.1038/ngeo104). arXiv : [0706.1935](https://arxiv.org/abs/0706.1935).
- [Cap69] J. CAPON, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis”, *Proceedings of the IEEE*, t. 57, n° 8, p. 1408-1418, 1969, ISSN : 1558-2256 VO - 57. DOI : [10.1109/PROC.1969.7278](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278).
- [Cav15] M. CAVARO, “A Void Fraction Characterisation by Low Frequency Acoustic Velocity Measurements in Microbubble Clouds”, *Physics Procedia*, t. 70, p. 496-500, jan. 2015. DOI : [10.1016/j.phpro.2015.08.294](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.294). adresse : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015PhPro..70.496C>.
- [CFAM15] K. CZARNECKI, D. FOUAN, Y. ACHAOUÏ et S. MENSAH, “Fast bubble dynamics and sizing”, *Journal of Sound and Vibration*, t. 356, p. 48-60, 2015, ISSN : 0022-460X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.06.038>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X15005398>.
- [CGC03] J.-F. CHAIX, V. GARNIER et G. CORNELOUP, “Concrete damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves”, *NDT & E International*, t. 36, n° 7, p. 461-469, 2003, ISSN : 0963-8695. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00066-5). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869503000665>.
- [CGR+11] S. CATHELIN, T. GALLOT, P. ROUX, G. RIBAY et J. D. ROSNY, “Coherent backscattering enhancement in cavities The simple-shape cavity revisited”, *Wave Motion*, t. 48, n° 3, p. 214-222, 2011, ISSN : 0165-2125. DOI : [10.1016/j.wavemoti.2010.10.006](https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2010.10.006). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2010.10.006>.
- [CH01] M. CASTAINGS et B. HOSTEN, “Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates”, *NDT and E International*, t. 34, n° 4, p. 249-258, 2001, ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/S0963-8695\(00\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00065-7).
- [Cha03] J.-F. CHAIX, *Caractérisation non destructive de l'endommagement de bétons : Apport de la multidiffusion ultrasonore*, 2003.
- [Cha17] J.-f. CHAIX, “De la diffusion des ondes ultrasonores à la Caractérisation Non Destructive des matériaux hétérogènes”, thèse de doct., 2017.

- [Che08] M. CHEKROUN, *Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface*, 2008.
- [Che60] L. A. CHERNOV, *Wave Propagation in a Random Medium*, McGraw-Hil. New York : Translated from the Russian by R. A. Silverman, 1960. DOI : [10.1126/science.132.3423.345](https://doi.org/10.1126/science.132.3423.345).
- [Chu82] S. D. CHUPOV, “Interference structure of a sound field in a layered ocean”, *Ocean Acoustics, Current State*, p. 71-91, 1982.
- [CJS+90] B. CASTAGNÈDE, J. T. JENKINS, W. SACHSE, S. BASTE, B. CASTAGNEDE, J. T. JENKINS et W. SACHSE, “Optimal determination of the elastic constants of composite materials from ultrasonic wavespeed measurements Optimai determination of the elastic constants of composite materials from ultrasonic wave .. speed measurements”, *Journal of Applied Physics*, t. 67, p. 2753-2761, 1990. DOI : [10.1063/1.345441](https://doi.org/10.1063/1.345441).
- [Cke08] M. CKEKROUN, “Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface”, thèse de doct., 2008.
- [Cla85] A. V. CLARK, “On the use of acoustic birefringence to determine components of plane stress”, *Ultrasonics*, t. 23, n° 1, p. 21-30, 1985, ISSN : 0041-624X. DOI : [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(85\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0041-624X(85)90007-1). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X85900071>.
- [Cla87] C. S. CLAY, “Optimum time domain signal transmission and source localization in a waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.*, t. 81, n° 3, p. 660-4, 1987, ISSN : 00014966. DOI : [10.1121/1.395223](https://doi.org/10.1121/1.395223).
- [Cla91] ———, “Low-resolution acoustic scattering models : Fluid-filled cylinders and fish with swim bladders”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 89, n° 5, p. 2168-2179, mai 1991, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.400910](https://doi.org/10.1121/1.400910). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.400910>.
- [CLLP12] M. CHEKROUN, L. LE MARREC, B. LOMBARD et J. PIRAUX, “Multiple scattering of elastic waves : a numerical method for computing the effective wavenumbers”, *Waves in Random and Complex Media*, p. 1-24, 2012. DOI : [10.1080/1745503YYxxxxxxx](https://doi.org/10.1080/1745503YYxxxxxxx).
- [CMD+14] L. CHEHAMI, E. MOULIN, J. DE ROSNY, C. PRADA, O. BOU MATAR, F. BENMEDDOUR et J. ASSAAD, “Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation”, *Journal of Applied Physics*, t. 115, n° 10, 2014, ISSN : 10897550. DOI : [10.1063/1.4867522](https://doi.org/10.1063/1.4867522).
- [Coc11] K. COCKRELL, “Understanding and utilizing waveguide invariant range-frequency striations in ocean acoustic waveguides”, thèse de doct., 2011, ISBN : 0001408100.
- [CP03] M. CAMPILLO et A. PAUL, “Long-range correlations in the diffuse seismic coda”, *Science*, t. 299, p. 547-549, 2003.
- [CPMB11] M. CAVARO, C. PAYAN, J. MOYSAN et F. BAQUÉ, “Microbubble cloud characterization by nonlinear frequency mixing”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 129, n° 5, EL179-EL183, avr. 2011, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3565474](https://doi.org/10.1121/1.3565474). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.3565474>.

- [CRC+12] M. CORCIULO, P. ROUX, M. CAMPILLO, D. DUBUCQ et W. KUPERMAN, “Multiscale matched-field processing for noise-source localization in exploration geophysics”, *GEOPHYSICS*, t. 77, n° 5, KS33-KS41, août 2012, ISSN : 0016-8033. DOI : [10.1190/geo2011-0438.1](https://doi.org/10.1190/geo2011-0438.1). adresse : <https://doi.org/10.1190/geo2011-0438.1>.
- [CRP+15] L. CHEHAMI, J. D. ROSNY, C. PRADA, E. MOULIN et J. ASSAAD, “Experimental study of passive defect localization in plates using ambient noise”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, t. 62, n° 8, p. 1544-1553, 2015, ISSN : 08853010. DOI : [10.1109/TUFFC.2014.006935](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006935).
- [CS10] K. L. COCKRELL et H. SCHMIDT, “Robust passive range estimation using the waveguide invariant”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 127, n° 5, p. 2780-2789, 2010, ISSN : 0001-4966.
- [CVD+00] B. CHASSIGNOLE, D. VILLARD, M. DUBUGET, J.-C. BABOUX et R. E. GUERJOUMA, “Characterization of austenitic stainless steel welds for ultrasonic NDT”, *AIP Conference Proceedings*, t. 509, n° 1, p. 1325-1332, mai 2000, ISSN : 0094-243X. DOI : [10.1063/1.1307835](https://doi.org/10.1063/1.1307835). adresse : <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1307835>.
- [CZO87] H. COX, R. ZESKIND et M. OWEN, “Robust adaptive beamforming”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, t. 35, n° 10, p. 1365-1376, 1987, ISSN : 0096-3518 VO - 35. DOI : [10.1109/TASSP.1987.1165054](https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165054).
- [Dah16] E. B. DAHER, “Analysis and Design of non-uniform arrays for direction finding”, thèse de doct., Villanova University, Pennsylvania, 2016.
- [Dev82] A. J. DEVANEY, “A filtered backpropagation algorithm for diffraction tomography”, *Ultrasonic Imaging*, 1982, ISSN : 01617346. DOI : [10.1177/016173468200400404](https://doi.org/10.1177/016173468200400404).
- [Dev84] ———, “Geophysical diffraction tomography”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 22, n° 1, 1984.
- [DG10] N. DOMINGUEZ et V. GIBIAT, “Non-destructive imaging using the time domain topological energy method”, *Ultrasonics*, 2010, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2009.08.014](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2009.08.014).
- [Dho18] L. D’HONDT, “Acoustical characterization of micro-bubbles clouds for application to fourth generation nuclear reactors”, thèse de doct., Aix-Marseille University, France, 2018, p. 172. adresse : http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig%7B%5C_%7Dq=RN:51119940.
- [DJM13] X. DU, L. JIN et G. MA, “A meso-scale analysis method for the simulation of nonlinear damage and failure behavior of reinforced concrete members”, *International Journal of Damage Mechanics*, t. 22, n° 6, p. 878-904, 2013, ISSN : 1056-7895.
- [DK07] C. DEBEVER et W. A. KUPERMAN, “Robust matched-field processing using a coherent broadband white noise constraint processor”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 122, n° 4, p. 1979-1986, 2007, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2769830](https://doi.org/10.1121/1.2769830). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.2769830>.

- [DK99] G. L. D’SPAIN et W. A. KUPERMAN, “Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 106, n° 5, p. 2454-2468, 1999, ISSN : 0001-4966.
- [DKQ+10] F. DEROO, J.-Y. KIM, J. QU, K. SABRA et L. J. JACOBS, “Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 127, n° 6, p. 3315-3318, 2010, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3409480](https://doi.org/10.1121/1.3409480). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3409480>.
- [Dom06] N. DOMINGUEZ, “Modélisation de la propagation ultrasonore en milieu complexe : Application au contrôle non destructif et à la caractérisation de la porosité dans les matériaux composites stratifiés”, thèse de doct., 2006.
- [DRCM19] T. DRUET, A. RECOQUILLAY, B. CHAPUIS et E. MOULIN, “Passive guided wave tomography for structural health monitoring”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 146, n° 4, p. 2395-2403, 2019, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.5128332](https://doi.org/10.1121/1.5128332).
- [DRLL15] M. L. DIONG, A. ROUEFF, P. LASAYGUES et A. LITMAN, “Precision analysis based on Crame-Rao bound for 2D acoustics and electromagnetic inverse scattering”, *Inverse Problems*, t. 31, n° 7, p. 75 003, 2015, ISSN : 0266-5611. DOI : [10.1088/0266-5611/31/7/075003](https://doi.org/10.1088/0266-5611/31/7/075003). adresse : <http://dx.doi.org/10.1088/0266-5611/31/7/075003>.
- [DW07] S. E. DOSSO et M. J. WILMUT, “Bayesian focalization : Quantifying source localization with environmental uncertainty”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 121, n° 5, p. 2567-2574, mai 2007, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2715451](https://doi.org/10.1121/1.2715451). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.2715451>.
- [EKS94] H. A. ESCHENAUER, V. V. KOBELEV et A. SCHUMACHER, “Bubble method for topology and shape optimization of structures”, *Structural Optimization*, 1994, ISSN : 09344373. DOI : [10.1007/BF01742933](https://doi.org/10.1007/BF01742933).
- [EPR+21] J. N. EIRAS, C. PAYAN, S. T. RAKOTONARIVO, A. SPALVIER et V. GARNIER, “Vibration monitoring of nuclear power plant containment buildings during the Integrated Leakage Rate Test for structural condition assessment”, *submitted to Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2021.
- [EPRG18a] J. N. EIRAS, C. PAYAN, S. RAKOTONARIVO et V. GARNIER, “Experimental modal analysis and finite element model updating for structural health monitoring of reinforced concrete radioactive waste packages”, *Construction and Building Materials*, t. 180, p. 531-543, 2018, ISSN : 09500618. DOI : [10.1016/j.conbuildmat.2018.06.004](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.004).
- [EPRG18b] ———, “Experimental modal analysis and finite element model updating for structural health monitoring of reinforced concrete radioactive waste packages”, *Construction and Building Materials*, t. 180, p. 531-543, 2018, ISSN : 0950-0618.

- [FC13] E. FRANCESCHINI et G. CLOUTIER, “Modeling of ultrasound backscattering by aggregating red blood cells”, in *Quantitative ultrasound in soft tissues*, Springer, 2013, p. 117-145.
- [Fic09] A. FICHTNER, *Full Seismic Waveform Modelling and Inversion*, Advances i, H. PROFESSOR KOLUMBAN, éd. Springer, 2009, p. 615, ISBN : 0724-3111\|r0945-4292. DOI : [10.1017/CB09781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004). arXiv : [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- [FK16] P. FEY et M. KREUTZBRUCK, “Quantification of fatigue state in CFRP using ultrasonic birefringence”, *AIP Conference Proceedings*, t. 1706, 2016, ISSN : 15517616. DOI : [10.1063/1.4940506](https://doi.org/10.1063/1.4940506).
- [FKSR08] S. E. FRIED, W. A. KUPERMAN, K. G. SABRA et P. ROUX, “Extracting the local Green’s function on a horizontal array from ambient ocean noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 124, n° 4, EL183-EL188, 2008, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2960937](https://doi.org/10.1121/1.2960937).
- [Fol45] L. L. FOLDY, “The Multiple Scattering of Waves. I. General Theory of Isotropic Scattering by Randomly Distributed Scatterers”, *Physical Review*, t. 67, n° 3-4, p. 107-119, fév. 1945. DOI : [10.1103/PhysRev.67.107](https://doi.org/10.1103/PhysRev.67.107). adresse : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.67.107>.
- [FS91] S. FENG et D. SORNETTE, “Acoustical nondestructive evaluation of heterogeneous materials in the multiple scattering regime”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 90, n° 4, p. 1742-1748, oct. 1991, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.401654](https://doi.org/10.1121/1.401654). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.401654>.
- [FSC13] E. FRANCESCHINI, R. K. SAHA et G. CLOUTIER, “Comparison of three scattering models for ultrasound blood characterization”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, t. 60, n° 11, p. 2321-2334, 2013, ISSN : 1525-8955 VO - 60. DOI : [10.1109/TUFFC.2013.6644736](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.6644736).
- [FT10] E. B. FLYNN et M. D. TODD, “A Bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, t. 24, n° 4, p. 891-903, 2010, ISSN : 0888-3270. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.09.003>. adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327009002635>.
- [GCR11] T. GALLOT, S. CATHELIN et P. ROUX, “Coherent backscattering enhancement in cavities. Highlights of the role of symmetry”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 129, n° 4, p. 1963-1971, 2011, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3557029](https://doi.org/10.1121/1.3557029). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3557029>.
- [GCRC11] T. GALLOT, S. CATHELIN, P. ROUX et M. CAMPILLO, “A passive inverse filter for Green’s function retrieval”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 131, n° 1, EL21-EL27, déc. 2011, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3665397](https://doi.org/10.1121/1.3665397). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.3665397>.

- [GGM03] S. GARREAU, P. GUILLAUME et M. MASMOUDI, “THE TOPOLOGICAL ASYMPTOTIC FOR PDE SYSTEMS : THE ELASTICITY CASE”, *SIAM Journal on Control optimization*, t. 25, n° 4, p. 1416-1428, 2003.
- [Gol89] D. E. GOLDBERG, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st. USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989, ISBN : 0201157675.
- [GY95] C. F. GAUMOND et T. YODER, “Determination of structural impedance from scattering data”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 97, p. 1415-1422, 1995. DOI : [10.1121/1.412083](https://doi.org/10.1121/1.412083).
- [GZL+09] L. GAILLET, H. ZEJLI, A. LAKSIMI, C. TESSIER, M. DRISSI-HABTI et S. BENMEDAKHENE, “Detection by acoustic emission of damage in cable anchorage”, in *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2009, p. 2-7. adresse : <https://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/15.pdf>.
- [Har15] J. B. HARLEY, “Data-Driven and Calibration-Free Lamb Sensor Arrays”, *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL*, t. 62, n° 8, p. 1516-1529, 2015.
- [HCBO15] W. HARIZI, S. CHAKI, G. BOURSE et M. OURAK, “Mechanical damage characterization of glass fiber-reinforced polymer laminates by ultrasonic maps”, *Composites Part B : Engineering*, t. 70, p. 131-137, 2015, ISSN : 1359-8368. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.014>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814005265>.
- [HM14a] J. B. HARLEY et J. M. F. MOURA, “Data-driven matched field processing for Lamb wave structural health monitoring”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 135, n° 3, p. 1231-1244, 2014, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4863651](https://doi.org/10.1121/1.4863651). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4863651>.
- [HM14b] J. B. HARLEY et J. M. MOURN, “Matched field processing localization with random sensor topologies”, *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, n° 1, p. 1404-1408, 2014, ISSN : 15206149. DOI : [10.1109/ICASSP.2014.6853828](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2014.6853828).
- [HPC+04] P. HURSKY, M. B. PORTER, B. D. CORNUELLE, W. S. HODGKISS et W. A. KUPERMAN, “Adjoint modeling for acoustic inversion”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 115, n° 2, p. 607-619, 2004, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1636760](https://doi.org/10.1121/1.1636760). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1636760>.
- [HPSM04] P. HURSKY, M. B. PORTER, M. SIDERIUS et V. K. McDONALD, “High-frequency (8 -16 kHz) model-based source localization”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 115, n° 6, p. 3021-3032, 2004, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1690078](https://doi.org/10.1121/1.1690078). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1690078>.

- [HRD21] H. HAFIDI ALAOUI, S. RODRIGUEZ et M. DESCHAMPS, “Detection of defects in a 2D fluid-solid periodic cluster”, *Ultrasonics*, t. 112, p. 106-307, 2021, ISSN : 0041-624X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106307>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X20302420>.
- [HTS+01] R. HENNINO, N. TRÉGOURÈS, N. M. SHAPIRO, L. MARGERIN, M. CAMPILLO, B. A. van TIGGELEN et R. L. WEAVER, “Observation of Equipartition of Seismic Waves”, *Physical Review Letters*, t. 86, n° 15, p. 3447-3450, avr. 2001. DOI : [10.1103/PhysRevLett.86.3447](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3447). adresse : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.3447>.
- [HWTD14] Y. HUMEIDA, P. D. WILCOX, M. D. TODD et B. W. DRINKWATER, “A probabilistic approach for the optimisation of ultrasonic array inspection techniques”, *NDT and E International*, t. 68, p. 43-52, 2014, ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/j.ndteint.2014.07.007](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.07.007). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.07.007>.
- [JD92] D. H. JOHNSON et D. E. DUDGEON, *Array Signal Processing : Concepts and Techniques*. USA : Simon & Schuster, Inc., 1992, ISBN : 0130485136.
- [JKP+11] F. B. JENSEN, W. A. KUPERMAN, M. B. PORTER, H. SCHMIDT et J. F. BARTRAM, “Signals in Noise - Chap10”, in *Computational Ocean Acoustics*, W. M. HARTMANN, éd., 2nd Editio, Springer-Verlag New York, 2011, chap. 10, p. 705-772.
- [JR00] F. JACOBSEN et T. ROISIN, “The coherence of reverberant sound fields”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 108, n° 1, p. 204-210, 2000, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.429457](https://doi.org/10.1121/1.429457).
- [Jr15] L. W. S. JR, *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*, 1^{re} éd. Springer International Publishing, 2015, p. 377, ISBN : 978-3-319-07271-5. DOI : [10.1007/978-3-319-07272-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07272-2).
- [KHD+18] M. KÖNIGSBERGER, M. HLOBIL, B. DELSAUTE, S. STAQUET, C. HELLMICH et B. PICHLER, “Hydrate failure in ITZ governs concrete strength : A micro-to-macro validated engineering mechanics model”, *Cement and Concrete Research*, t. 103, p. 77-94, 2018, ISSN : 0008-8846. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.002>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617302934>.
- [KHS04] H. B. KIM, J. R. HERTZBERG et R. SHANDAS, “Development and validation of echo PIV”, *Experiments in Fluids*, t. 36, n° 3, p. 455-462, 2004, ISSN : 1432-1114. DOI : [10.1007/s00348-003-0743-5](https://doi.org/10.1007/s00348-003-0743-5). adresse : <https://doi.org/10.1007/s00348-003-0743-5>.
- [Kir98] S. KIRKUP, *The Boundary Element Method in Acoustics*. 1998, p. 1-161.
- [KKBC14] D. KEINDE, S. KAMALI-BERNARD, F. BERNARD et I. CISSE, “Effect of the interfacial transition zone and the nature of the matrix-aggregate interface on the overall elastic and inelastic behaviour of concrete under compression : a 3D numerical study”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, t. 18, n° 10, p. 1167-1176, nov. 2014, ISSN : 1964-8189. DOI : [10.1080/19648189.2014.896757](https://doi.org/10.1080/19648189.2014.896757). adresse : <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.896757>.

- [KSF+89] G. H. KOOPMANN, L. SONG, J. B. FAHNLIN, G. H. KOOPMANN, L. SONG et J. B. FAHNLIN, “A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 86, n° 2433 - 2438, 1989. DOI : [10.1121/1.398450](https://doi.org/10.1121/1.398450).
- [KSGV16] G. K. KOCUR, E. H. SAENGER, C. U. GROSSE et T. VOGEL, “Time reverse modeling of acoustic emissions in a reinforced concrete beam”, *Ultrasonics*, t. 65, n° October, p. 96-104, 2016, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2015.10.014](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.10.014). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2015.10.014>.
- [LDC+19] O. LOMBARD, L. D’HONDT, M. CAVARO, S. MENSAH et C. PAYAN, “Bubble flow velocity measurement in multiple scattering regime”, *Ultrasonics*, t. 95, p. 63-69, 2019, ISSN : 0041-624X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.03.005>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X18306887>.
- [LDM+06] E. LAROSE, J. DE ROSNY, L. MARGERIN, D. ANACHE, P. GOUEDARD, M. CAMPILLO et B. VAN TIGGELEN, “Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes”, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, t. 73, n° 1, p. 1-8, 2006, ISSN : 15502376. DOI : [10.1103/PhysRevE.73.016609](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.016609).
- [LGDK06] Z. LAFHAJ, M. GOUEYGOU, A. DJERBI et M. KACZMAREK, “Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content”, *Cement and Concrete Research*, t. 36, n° 4, p. 625-633, 2006, ISSN : 0008-8846. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605002760>.
- [LMC+15] E. LUBEIGT, S. MENSAH, J.-F. CHAIX, S. RAKOTONARIVO, G. GOBILLOT et F. BAQUÉ, “Ultrasonic Imaging in Liquid Sodium : A Differential Method for Damages Detection”, *Physics Procedia*, t. 70, p. 550-553, 2015, ISSN : 1875-3892.
- [LMR+17a] E. LUBEIGT, S. MENSAH, S. RAKOTONARIVO, J. F. CHAIX, F. BAQUÉ et G. GOBILLOT, “Topological imaging in bounded elastic media”, *Ultrasonics*, t. 76, p. 145-153, 2017, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.01.002). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2017.01.002>.
- [LMR+17b] E. LUBEIGT, S. MENSAH, S. RAKOTONARIVO, J.-F. CHAIX, F. BAQUÉ et G. GOBILLOT, “Topological imaging in bounded elastic media”, *Ultrasonics*, t. 76, p. 145-153, 2017, ISSN : 0041-624X.
- [Lom10] B. LOMBARD, “Modélisation numérique de la propagation et de la diffraction d’ondes mécaniques”, Habilitation à Diriger des Recherches, Aix-Marseille Université, 2010.
- [LP06] B. LOMBARD et J. PIRAUX, “Numerical modeling of elastic waves across imperfect contacts.”, *SIAM Journal on Scientific Computing*, t. 28, n° 1, p. 172-205, jan. 2006, ISSN : 1064-8275. DOI : [10.1137/05062740X](https://doi.org/10.1137/05062740X). adresse : <https://doi.org/10.1137/05062740X>.

- [LP08] K. M. LEE et J. H. PARK, “A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone”, *Cement and Concrete Research*, t. 38, n° 3, p. 396-402, 2008, ISSN : 0008-8846. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.019>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607002414>.
- [LPRM10] E. LAROSE, T. PLANES, V. ROSSETTO et L. MARGERIN, “Locating a small change in a multiple scattering environment”, *Applied Physics Letters*, t. 96, n° 20, p. 3-5, 2010, ISSN : 00036951. DOI : [10.1063/1.3431269](https://doi.org/10.1063/1.3431269).
- [LRD+20] O. LOMBARD, J. ROUYER, E. DEBIEU, F. BLANC et E. FRANCESCHINI, “Ultrasonic backscattering and microstructure in sheared concentrated suspensions”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 147, n° 3, p. 1359-1367, 2020, ISSN : 0001-4966.
- [LRM+19] E. LUBEIGT, S. RAKOTONARIVO, S. MENSAH, J.-F. CHAIX, F. BAQUÉ et W. A. KUPERMAN, “Passive structural monitoring based on data-driven matched field processing”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 145, n° 4, EL317-EL322, 2019, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.5099170](https://doi.org/10.1121/1.5099170).
- [LS06] I. LUCIFREDI et H. SCHMIDT, “Subcritical scattering from buried elastic shells”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 120, n° 6, p. 3566-3583, 2006.
- [Lub17] E. LUBEIGT, “Imagerie topologique de domaines élastiques bornés : Application au contrôle non destructif des soudures”, thèse de doct., Aix-Marseille University, 2017.
- [LW01] O. I. LOBKIS et R. L. WEAVER, “On the emergence of the Green’s function in the correlations of a diffuse field”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 110, n° September, p. 3011-3017, 2001. DOI : [10.1121/1.1417528](https://doi.org/10.1121/1.1417528).
- [M F70] M. F. MARKHAM, “Measurement of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics”, *Composites*, t. 1, n° 3, p. 145-149, 1970.
- [Mak79] J. N. MAKSYM, “A robust formulation of an optimum cross-spectral beamformer for line arrays”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 65, n° 4, p. 971-975, avr. 1979, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.382603](https://doi.org/10.1121/1.382603). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.382603>.
- [Mam05] V. MAMOU, “Caractérisation ultrasonore d’échantillons hétérogènes multiplement diffuseurs”, thèse de doct., 2005, ISBN : 0031-949X. DOI : [10.1016/j.compositesa.2014.08.013](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.013). arXiv : [arXiv:1305.6593v1](https://arxiv.org/abs/1305.6593v1).
- [MLR+18a] K. METWALLY, E. LUBEIGT, S. RAKOTONARIVO, J. F. CHAIX, F. BAQUÉ, G. GOBILLOT et S. MENSAH, “Weld inspection by focused adjoint method”, *Ultrasonics*, t. 83, n° October, p. 80-87, 2018, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2017.08.009](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.009). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.009>.
- [MLR+18b] K. METWALLY, E. LUBEIGT, S. RAKOTONARIVO, J.-F. CHAIX, F. BAQUÉ, G. GOBILLOT et S. MENSAH, “Weld inspection by focused adjoint method”, *Ultrasonics*, t. 83, p. 80-87, 2018, ISSN : 0041-624X.

- [Mor87] P. MORA, “Nonlinear elastic inversion of multioffset seismic data”, t. 52, n° 9, p. 1211-1228, 1987. DOI : [10.1190/1.1893013](https://doi.org/10.1190/1.1893013).
- [MRNM11] C. MARANDET, P. ROUX, B. NICOLAS et J. MARS, “Target detection and localization in shallow water : An experimental demonstration of the acoustic barrier problem at the laboratory scale”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 129, n° 1, p. 85-97, 2011, ISSN : 0001-4966.
- [Nor04] S. J. NORTON, “Iterative algorithms for computing the shape of a hard scattering object : Computing the shape derivative”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 116, n° 2, p. 1002, 2004, ISSN : 00014966. DOI : [10.1121/1.1771611](https://doi.org/10.1121/1.1771611). adresse : <http://link.aip.org/link/JASMAN/v116/i2/p1002/s1%7B%5C%7DAgg=doi>.
- [NSR09] A. NOUMOWÉ, R. SIDDIQUE et G. RANC, “Thermo-mechanical characteristics of concrete at elevated temperatures up to 310Â°C”, *Nuclear Engineering and Design*, t. 239, n° 3, p. 470-476, 2009, ISSN : 0029-5493. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.11.020>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549308006298>.
- [NYHM17] M. NIKBAKHT, J. YOUSEFI, H. HOSSEINI-TOUDESHPY et G. MINAK, “Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization”, *Composites Part B : Engineering*, t. 113, p. 185-196, 2017, ISSN : 1359-8368. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.047>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816314159>.
- [OFB09] A. A. OBERAI, G. R. FEIJÓO et P. E. BARBONE, “Lanczos iterated time-reversal.”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 125, n° 2, EL70, 2009, ISSN : 1520-8524. DOI : [10.1121/1.3056662](https://doi.org/10.1121/1.3056662). adresse : <http://dx.doi.org/10.1121/1.3056662>.
- [OHa67] G. J. O’HARA, “Mechanical Impedance and Mobility Concepts”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 41, n° 5, p. 1180-1184, 1967, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1910456](https://doi.org/10.1121/1.1910456). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1910456>.
- [PA05] T. P. PHILIPPIDIS et D. G. AGGELIS, “Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete”, *Ultrasonics*, t. 43, n° 7, p. 584-595, 2005, ISSN : 0041-624X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X04003117>.
- [PGM10] C. PAYAN, V. GARNIER et J. MOYSAN, “Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete”, *Cement and Concrete Research*, t. 40, n° 3, p. 473-476, 2010, ISSN : 00088846. DOI : [10.1016/j.cemconres.2009.10.021](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.021). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.021>.

- [PGS+17] D. S. PAOLINO, H. GENG, A. SCATTINA, A. TRIDELLO, M. P. CAVATORTA et G. BELINGARDI, “Damaged composite laminates : Assessment of residual Young’s modulus through the Impulse Excitation Technique”, *Composites Part B : Engineering*, t. 128, p. 76-82, 2017, ISSN : 1359-8368. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.008>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817301129>.
- [PH00] G. PROKOPSKI et J. HALBINIAK, “Interfacial transition zone in cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, t. 30, n° 4, p. 579-583, 2000, ISSN : 0008-8846. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00210-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00210-6). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600002106>.
- [PJQ+07a] W. PUNURAI, J. JARZYNSKI, J. QU, K. E. KURTIS et L. J. JACOBS, “Characterization of dissipation losses in cement paste with diffuse ultrasound”, *Mechanics Research Communications*, t. 34, n° 3, p. 289-294, 2007, ISSN : 00936413. DOI : [10.1016/j.mechrescom.2006.10.003](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.10.003).
- [PJQ+07b] W. PUNURAI, J. JARZYNSKI, J. QU, J.-Y. KIM, L. J. JACOBS et K. E. KURTIS, “Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques”, *Cement and Concrete Research*, t. 37, n° 1, p. 38-46, 2007, ISSN : 0008-8846. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.016>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606002377>.
- [PL13] T. PLANÈS et E. LAROSE, “A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete”, *Cement and Concrete Research*, t. 53, p. 248-255, 2013, ISSN : 00088846. DOI : [10.1016/j.cemconres.2013.07.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.009). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.009>.
- [PLRM15] T. PLANÈS, E. LAROSE, V. ROSSETTO et L. MARGERIN, “Imaging multiple local changes in heterogeneous media with diffuse waves”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 137, n° 2, p. 660-667, 2015, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4906824](https://doi.org/10.1121/1.4906824). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4906824>.
- [PMSF05] C. PRADA, S. MANNEVILLE, D. SPOLIANSKY et M. FINK, “Decomposition of the time reversal operator : Detection and selective focusing on two scatterers”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 99, n° 4, p. 2067-2076, 2005, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.415393](https://doi.org/10.1121/1.415393).
- [Poe16] C. POELMA, “Ultrasound Imaging Velocimetry : a review”, *Experiments in Fluids*, t. 58, n° 1, p. 3, 2016, ISSN : 1432-1114. DOI : [10.1007/s00348-016-2283-9](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2283-9). adresse : <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2283-9>.
- [PQG+13] C. PAYAN, A. QUIVIGER, V. GARNIER, J. F. CHAIX et J. SALIN, “Applying diffuse ultrasound under dynamic loading to improve closed crack characterization in concrete”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 134, n° 2, EL211-EL216, juil. 2013, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4813847](https://doi.org/10.1121/1.4813847). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.4813847>.

- [PSTU16] P. R. PALADHI, A. SINHA, A. TAYEBI et L. UDPA, “Generalized Backpropagation Algorithms for Diffraction Tomography”, p. 1-20, 2016. arXiv : [1605.01754](http://arxiv.org/abs/1605.01754). adresse : <http://arxiv.org/abs/1605.01754>.
- [PUL+14] C. PAYAN, T. J. ULRICH, P. Y. LE BAS, T. SALEH et M. GUIMARAES, “Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization : Application to concrete thermal damage”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 136, n° 2, p. 537-546, 2014, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4887451](https://doi.org/10.1121/1.4887451). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4887451>.
- [PW90] R. G. PRATT et M. H. WORTHINGTON, “INVERSE THEORY APPLIED TO MULTI-SOURCE CROSS-HOLE TOMOGRAPHY.Part1 :Acoustic wave equation method”, *Geophysical Prospecting*, t. 38, n° 3, p. 287-310, avr. 1990, ISSN : 0016-8025. DOI : [10.1111/j.1365-2478.1990.tb01846.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1990.tb01846.x). adresse : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1990.tb01846.x>.
- [QM12] N. QUAEGBEUR et P. MASSON, “Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit-receive array for Non-Destructive Evaluation”, *Ultrasonics*, 2012, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2012.08.017](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.017).
- [Qui12] A. QUIVIGER, “Ultrasons diffus pour la caractérisation d’une fissure dans le béton : Approche linéaire et non linéaire”, thèse de doct., 2012, p. 209.
- [Ram19] M. RAMANIRAKA, “Exploitation de la diffusion multiple et considération de l’Interfacial Transition Zone pour la caractérisation ultrasonore du béton”, thèse de doct., Aix-Marseille Université, 2019, p. 159.
- [RBY10] S. RAKOTONARIVO, J.-F. BOURILLET et C. YARDIM, “Estimation of sediment parameters from subbottom profiling data using genetic algorithms”, in *10th European Conference on Underwater Acoustics*, 2010.
- [RDCD14] S. RODRIGUEZ, M. DESCHAMPS, M. CASTAINGS et E. DUCASSE, “Guided wave topological imaging of isotropic plates”, *Ultrasonics*, t. 54, n° 7, p. 1880-1890, 2014, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2013.10.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2013.10.001). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2013.10.001>.
- [RFAB13] M. RHEINFURTH, P. FEY, S. ALLINGER et G. BUSSE, “Ultrasonic birefringence as a measure of mechanically induced fatigue damage in laminated composites”, *International Journal of Fatigue*, t. 48, p. 80-89, 2013.
- [RGR21] V. ROggerONE, R. GUILLERMIN et S. T. RAKOTONARIVO, “A new hybrid method between equivalent source method and boundary element method for modeling diffraction”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 150, n° 4, A208-A208, oct. 2021, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/10.0008135](https://doi.org/10.1121/10.0008135). adresse : <https://doi.org/10.1121/10.0008135>.
- [Ric00] J. RICKETT, *Traveltime sensitivity kernels : Banana-doughnuts or just plain bananas ?*, 2000.

- [RJG13] S. RODRIGUEZ, X. JACOB et V. GIBIAT, “Plane wave echo particle image velocimetry”, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, t. 19, n° 1, p. 30116, mai 2013. DOI : [10.1121/1.4799639](https://doi.org/10.1121/1.4799639). adresse : <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4799639>.
- [RK12a] S. T. RAKOTONARIVO et W. A. KUPERMAN, “Model-independent range localization of a moving source in shallow water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 132, n° 4, p. 2218-2223, 2012, ISSN : 0001-4966.
- [RK12b] —, “Model-independent range localization of a moving source in shallow water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 132, n° 4, p. 2218-2223, 2012, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4748795](https://doi.org/10.1121/1.4748795). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4748795>.
- [RKT04] S. K. RAMAMOORTHY, Y. KANE et J. A. TURNER, “Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 115, n° 2, p. 523-529, 2004, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1642625](https://doi.org/10.1121/1.1642625). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1642625>.
- [RKW13] S. T. RAKOTONARIVO, W. A. KUPERMAN et E. G. WILLIAMS, “Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 134, n° 6, p. 4401-4411, 2013, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4828833](https://doi.org/10.1121/1.4828833). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4828833>.
- [RKW14] —, “Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 135, n° 4, p. 2350, 2014, ISSN : 0001-4966.
- [RKW16] S. RAKOTONARIVO, W. KUPERMAN et E. WILLIAMS, “Prédiction de l’impédance mécanique d’un objet élastique à partir de la corrélation de bruit aléatoire”, in *13ème Congrès Français d’Acoustique*, 2016.
- [RLD+11] S. RAKOTONARIVO, M. LEGRIS, R. DESMARE, J.-P. SESSARÉGO et J.-F. BOURILLET, “Forward modeling for marine sediment characterization using chirp sonars”, *Geophysics*, t. 76, n° 4, T91-T99, 2011, ISSN : 0016-8033. DOI : [10.1190/1.3590717](https://doi.org/10.1190/1.3590717). adresse : <http://library.seg.org/doi/10.1190/1.3590717>.
- [RMB74] I. S. REED, J. D. MALLETT et L. E. BRENNAN, “Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, t. AES-10, n° 6, p. 853-863, 1974, ISSN : 1557-9603 VO - AES-10. DOI : [10.1109/TAES.1974.307893](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893).
- [RPMH18] S. T. RAKOTONARIVO, C. PAYAN, J. MOYSAN et C. HOCHARD, “Local damage evaluation of a laminate composite plate using ultrasonic birefringence of shear wave”, *Composites Part B : Engineering*, t. 142, n° February, p. 287-292, 2018, ISSN : 13598368. DOI : [10.1016/j.compositesb.2018.01.006](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.006). adresse : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.006>.

- [RRCB21] S. T. RAKOTONARIVO, V. ROggerONE, A. CAISSON et A. BOTTERO, “Experimental evaluation of a sound diffuse field in a ordinary room”, in *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 150, Acoustical Society of America, oct. 2021, A118-A118. DOI : [10.1121/10.0007825](https://doi.org/10.1121/10.0007825). adresse : <https://doi.org/10.1121/10.0007825>.
- [RRPG] M. RAMANIRAKA, S. RAKOTONARIVO, C. PAYAN et V. GARNIER, “Effect of Interfacial Transition Zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete”, *Cement and Concrete Research*, t. submitted,
- [RRPG19] M. RAMANIRAKA, S. RAKOTONARIVO, C. PAYAN et V. GARNIER, “Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete”, *Cement and Concrete Research*, t. 124, n° July, p. 105809, 2019, ISSN : 00088846. DOI : [10.1016/j.cemconres.2019.105809](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105809). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884619303060>.
- [RSGJ12] S. RODRIGUEZ, P. SAHUGUET, V. GIBIAT et X. JACOB, “Fast topological imaging”, *Ultrasonics*, t. 52, n° 8, p. 1010-1018, 2012, ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2012.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.002). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.002>.
- [RSK+05] P. ROUX, K. G. SABRA, W. A. KUPERMAN, A. ROUX et A. ROUX, “Ambient noise cross correlation in free space : Theoretical approach”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 79, 2005. DOI : [10.1121/1.1830673](https://doi.org/10.1121/1.1830673).
- [RVC+14] S. RODRIGUEZ, M. VEIDT, M. CASTAINGS, E. DUCASSE et M. DESCHAMPS, “One channel defect imaging in a reverberating medium”, *Applied Physics Letters*, t. 105, n° 24, p. 0–4, 2014, ISSN : 00036951. DOI : [10.1063/1.4904837](https://doi.org/10.1063/1.4904837). adresse : <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904837>.
- [RW92] S. I. ROKHLIN et W. WANG, “Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 91, p. 3303-3312, 1992.
- [RWKR11a] S. T. RAKOTONARIVO, S. C. WALKER, W. A. KUPERMAN et P. ROUX, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling of the actual medium”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 130, n° 6, p. 3566-3573, 2011, ISSN : 0001-4966.
- [RWKR11b] S. T. RAKOTONARIVO, S. C. WALKER, W. A. KUPERMAN et P. ROUX, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling of the actual medium”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 130, n° 6, p. 3566-3573, 2011, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3652859](https://doi.org/10.1121/1.3652859). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3652859>.
- [RYW+14] S. RAKOTONARIVO, S. YILDIZ, E. G. WILLIAMS, P. ROUX et W. A. KUPERMAN, “Model tank experiments and using a random noise field to determine scattering properties of an object”, in *2nd International conference on Underwater Acoustics*, 2014.

- [RZ11] D. ROUSEFF et L. M. ZURK, “Striation-based beamforming for estimating the waveguide invariant with passive sonar”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 130, n° 2, EL76-EL81, 2011, ISSN : 0001-4966.
- [Sah12] P. SAHUGUET, “Imagerie ultrasonore de fantômes biologiques par optimisation topologique”, thèse de doct., 2012.
- [SB86] J. SANIE et N. M. BILGUTAY, “Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 80, n° 6, p. 1816-1824, déc. 1986, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.394296](https://doi.org/10.1121/1.394296). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.394296>.
- [SCD09] E. K. SKARSOULIS, B. D. CORNUELLE et M. a. DZIECIUCH, “Travel-time sensitivity kernels in long-range propagation.”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 126, n° 5, p. 2223-33, 2009, ISSN : 1520-8524. DOI : [10.1121/1.3224835](https://doi.org/10.1121/1.3224835). adresse : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19894803>.
- [Sch95] E. SCHNEIDER, “Ultrasonic birefringence effect-Its application for materials characterisations”, *Optics and Lasers in Engineering*, t. 22, n° 4-5, p. 305-323, 1995, ISSN : 01438166. DOI : [10.1016/0143-8166\(94\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0143-8166(94)00032-6).
- [SCK11] J. SARKAR, B. D. CORNUELLE et W. A. KUPERMAN, “Information and linearity of time-domain complex demodulated amplitude and phase data in shallow water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 130, n° 3, p. 1242-1252, 2011, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3613709](https://doi.org/10.1121/1.3613709). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3613709>.
- [SCM+00] N. M. SHAPIRO, M. CAMPILLO, L. MARGERIN, S. K. SINGH, V. KOSTOGLODOV et J. PACHECO, “The energy partitioning and the diffusive character of the seismic coda”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, t. 90, n° 3, p. 655-665, 2000, ISSN : 1943-3573.
- [SCS07] L. STEHLY, M. CAMPILLO et N. M. SHAPIRO, “Traveltime measurements from noise correlation : Stability and detection of instrumental time-shifts”, *Geophysical Journal International*, t. 171, n° 1, p. 223-230, 2007, ISSN : 0956540X. DOI : [10.1111/j.1365-246X.2007.03492.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03492.x). arXiv : [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- [SDRB13] I. SOLODOV, D. DÖRING, M. RHEINFURTH et G. BUSSE, “New Opportunities in Ultrasonic Characterization of Stiffness Anisotropy in Composite Materials”, *Non destructive testing of Materials and Structures*, t. 11, n° 6, p. 382-387, 2013, ISSN : 15430790. DOI : [10.1007/978-94-007-0723-8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8).
- [SK04] F. SCHUBERT et B. KOEHLER, “Numerical time-domain simulation of diffusive ultrasound in concrete”, *Ultrasonics*, t. 42, n° 1-9, p. 781-786, 2004, ISSN : 0041-624X.
- [SKH+03] H. SONG, W. A. KUPERMAN, W. S. HODGKISS, P. GERSTOFT et J. S. KIM, “Null broadening with snapshot-deficient covariance matrices in passive sonar”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, t. 28, n° 2, p. 250-261, 2003, ISSN : 1558-1691 VO - 28. DOI : [10.1109/JOE.2003.814055](https://doi.org/10.1109/JOE.2003.814055).

- [SKSJ11] D. P. SCHURR, J. Y. KIM, K. G. SABRA et L. J. JACOBS, “Damage detection in concrete using coda wave interferometry”, *NDT and E International*, t. 44, n° 8, p. 728-735, 2011, ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/j.ndteint.2011.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.07.009). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.07.009>.
- [SMR+12] J. SARKAR, C. MARANDET, P. ROUX, S. WALKER, B. D. CORNUELLE et W. A. KUPERMAN, “Sensitivity kernel for surface scattering in a waveguide”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 131, n° 1, p. 111-118, jan. 2012, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3665999](https://doi.org/10.1121/1.3665999). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.3665999>.
- [Sni06] R. SNIEDER, “The theory of coda wave interferometry”, *Pure and Applied Geophysics*, t. 163, n° 2-3, p. 455-473, 2006, ISSN : 00334553. DOI : [10.1007/s00024-005-0026-6](https://doi.org/10.1007/s00024-005-0026-6).
- [SPDB08] I. SOLODOV, K. PFLEIDERER, D. DÖRING et G. BUSSE, “Nondestructive evaluation of anisotropy in composite materials via acoustic birefringence”, *Research in Nondestructive Evaluation*, t. 19, n° 3, p. 129-143, 2008, ISSN : 09349847. DOI : [10.1080/09349840801954223](https://doi.org/10.1080/09349840801954223).
- [SRB07] F. SAINT-PIERRE, P. RIVARD et G. BALLIVY, “Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation”, *Cement and Concrete Research*, t. 37, n° 6, p. 948-956, 2007, ISSN : 0008-8846. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.022>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000671>.
- [SRK05] K. G. SABRA, P. ROUX et W. A. KUPERMAN, “Emergence rate of the time-domain Green’s function from the ambient noise cross-correlation function”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 118, n° 6, p. 3524-3531, 2005, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2109059](https://doi.org/10.1121/1.2109059).
- [SRS+19] J. SARKAR, S. T. RAKOTONARIVO, S. STERNINI, A. BOTTERO, E. G. WILLIAMS, J. D. TIPPMANN et W. A. KUPERMAN, “Holographic array for determining structural acoustic properties”, in *Proceedings of the Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE)*, 2019.
- [SRS+20] S. STERNINI, S. T. RAKOTONARIVO, J. SARKAR, A. BOTTERO et W. A. KUPERMAN, “holographic measurements Bistatic scattering of an elastic object using the structural admittance and noise-based holographic measurements”, t. 734, 2020. DOI : [10.1121/10.0001705](https://doi.org/10.1121/10.0001705).
- [SS82] I. G. SCOTT et C. M. SCALA, “A review of non-destructive testing of composite materials”, *NDT International*, t. 15, n° 2, p. 75-86, 1982, ISSN : 0308-9126. DOI : [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(82\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0308-9126(82)90001-3). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308912682900013>.
- [SSG+10] M. SIDERIUS, H. SONG, P. GERSTOFT, W. S. HODGKISS, P. HURSKY et C. HARRISON, “Adaptive passive fathometer processing”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 127, n° 4, p. 2193-2200, avr. 2010, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.3303985](https://doi.org/10.1121/1.3303985). adresse : <https://doi.org/10.1121/1.3303985>.

- [SWB+07] K. G. SABRA, E. S. WINKEL, D. A. BOURGOYNE, B. R. ELBING, S. L. CECCIO, M. PERLIN et D. R. DOWLING, “Using cross correlations of turbulent flow-induced ambient vibrations to estimate the structural impulse response. Application to structural health monitoring”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 121, n° 4, p. 1987-1995, 2007, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.2710463](https://doi.org/10.1121/1.2710463). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.2710463>.
- [Tar84] A. TARANTOLA, “Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation”, *Geophysics*, t. 49, n° 8, p. 1259-1266, 1984, ISSN : 0016-8033. DOI : [10.1190/1.1441754](https://doi.org/10.1190/1.1441754). arXiv : T. adresse : papers3://publication/uuid/2E33761D-91E1-40BB-88A6-BBAEA3C4FD95.
- [Tar88] ———, “Theoretical background for the inversion of seismic waveforms including elasticity and attenuation”, *Pure and Applied Geophysics*, t. 128, n° 1-2, p. 365-399, 1988, ISSN : 00334553. DOI : [10.1007/BF01772605](https://doi.org/10.1007/BF01772605). arXiv : [BF01772605](https://arxiv.org/abs/BF01772605) [[10.1007](https://arxiv.org/abs/10.1007)].
- [TH09] Y. THOLLON et C. HOCHARD, “A general damage model for woven fabric composite laminates up to first failure”, *Mechanics of Materials*, t. 41, n° 7, p. 820-827, 2009.
- [Tho09] Y. THOLLON, “Analyse du comportement à rupture de Composites Stratifiés Constitués De Plis Tissés Sous chargements statique et de fatigue”, thèse de doct., 2009.
- [TK08] H. TAO et J. L. KROLIK, “Waveguide invariant focusing for broadband beamforming in an oceanic waveguide”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 123, n° 3, p. 1338-1346, 2008, ISSN : 0001-4966.
- [TK97] G. TUREK et W. A. KUPERMAN, “Applications of matched-field processing to structural vibration problems”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 101, n° 3, p. 1430-1440, 1997, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.418168](https://doi.org/10.1121/1.418168). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.418168>.
- [TKRW16] J. D. TIPPMANN, W. KUPERMAN, S. T. RAKOTONARIVO et E. WILLIAMS, “Measurement of a target’s structural admittance and the prediction of its scattered field in different media”, in *5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan*, 2016.
- [TTG13] R. TOKMASHEV, A. TIXIER et B. B. GUZINA, “Experimental validation of the topological sensitivity approach to elastic-wave imaging”, *Inverse Problems*, t. 29, n° 12, 2013, ISSN : 02665611. DOI : [10.1088/0266-5611/29/12/125005](https://doi.org/10.1088/0266-5611/29/12/125005).
- [TTL05] J. TROMP, C. TAPE et Q. LIU, “Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels”, *Geophysical Journal International*, t. 160, n° 1, p. 195-216, 2005, ISSN : 0956540X. DOI : [10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x).
- [Tur98] J. A. TURNER, “Scattering and Diffusion of Seismic Waves”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, t. 88, n° 1, 1998.

- [Twe52] V. TWERSKY, “Multiple Scattering of Radiation by an Arbitrary Configuration of Parallel Cylinders”, *Journal of the Acoustical Society of America*, t. 24, p. 42-47, 1952. DOI : [10.1121/1.1906845](https://doi.org/10.1121/1.1906845).
- [TZL15] J. D. TIPPMANN, X. ZHU et F. LANZA DI SCALEA, “Application of damage detection methods using passive reconstruction of impulse response functions”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, t. 373, n° 2035, 2015, ISSN : 1364503X. DOI : [10.1098/rsta.2014.0070](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0070).
- [VMG+01] L. VERGARA, R. MIRALLES, J. GOSÁLBEZ, F. J. JUANES, L. G. ULLATE, J. J. ANAYA, M. G. HERNÁNDEZ et M. A. G. IZQUIERDO, “NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar”, *NDT & E International*, t. 34, n° 8, p. 557-562, 2001, ISSN : 0963-8695. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00020-2). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869501000202>.
- [VN99] M. C. VAN ROSSUM et T. M. NIEUWENHUIZEN, “Multiple scattering of classical waves : Microscopy, mesoscopy, and diffusion”, *Reviews of Modern Physics*, t. 71, n° 1, p. 313-371, 1999, ISSN : 00346861. DOI : [10.1103/revmodphys.71.313](https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.313). arXiv : [9804141](https://arxiv.org/abs/9804141) [cond-mat].
- [WE05] F. WALDHAUSER et W. L. ELLSWORTH, “A Double-Difference Earthquake Location Algorithm : Method and Application to the Northern Hayward Fault, California”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, t. 90, n° 6, p. 1353-1368, 2005, ISSN : 0037-1106. DOI : [10.1785/0120000006](https://doi.org/10.1785/0120000006).
- [Wea08] R. L. WEAVER, “Ward identities and the retrieval of Green’s functions in the correlations of a diffuse field”, *Wave motion*, t. 45, p. 596-604, 2008.
- [Wea82] L. WEAVER, “On diffuse waves in solid media”, *Journal of the Acoustical Society of America*, p. 1608-1609, 1982.
- [Wes92] E. K. WESTWOOD, “Broadband matched-field source localization”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 91, n° 5, p. 2777-2789, 1992, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.402958](https://doi.org/10.1121/1.402958). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.402958>.
- [WL04] R. L. WEAVER et O. I. LOBKIS, “Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green’s function (L)”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 116, n° 5, p. 2731-2734, 2004, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.1810232](https://doi.org/10.1121/1.1810232).
- [WL99] T.-T. WU et Y.-H. LIU, “On the measurement of anisotropic elastic constants of fiber-reinforced composite plate using ultrasonic bulk wave and laser generated Lamb wave”, *Ultrasonics*, t. 37, n° 6, p. 405-412, 1999.
- [WLA06] P. WOERTHER, E. LE BRETON et R. APPRIOUAL, “Compte-rendu de la mise en oeuvre des capteurs de pression et des accéléromètres sur le carottier Calypso N/O du Pourquoi Pas ? : Mission ESCAROT 3”, IFREMER, rapp. tech., 2006.

- [WTR+17] E. G. WILLIAMS, J. D. TIPPMANN, S. T. RAKOTONARIVO, Z. J. WATERS, P. ROUX et W. A. KUPERMAN, “Experimental estimation of in vacuo structural admittance using random sources in a non-anechoic room”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 142, n° 1, p. 103-109, 2017, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4990953](https://doi.org/10.1121/1.4990953). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4990953>.
- [WTRK16] E. G. WILLIAMS, J. D. TIPPMANN, S. T. RAKOTONARIVO et W. A. KUPERMAN, “Measurement of the structural admittance matrix using external random noise sources”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 140, n° 4, p. 3210, 2016, ISSN : 0001-4966.
- [XBS15] N. XIANG, D. BUSH et J. E. SUMMERS, “Experimental validation of a coprime linear microphone array for high-resolution direction-of-arrival measurements”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 137, n° 4, EL261-EL266, 2015, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4915000](https://doi.org/10.1121/1.4915000). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4915000>.
- [YCA+19a] T. YU, J.-F. CHAIX, L. AUDIBERT, D. KOMATITSCH, V. GARNIER et J.-M. HÉNAULT, “Simulations of ultrasonic wave propagation in concrete based on a two-dimensional numerical model validated analytically and experimentally”, *Ultrasonics*, t. 92, p. 21-34, 2019, ISSN : 0041-624X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.018>. adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X18303251>.
- [YCA+19b] —, “Simulations of ultrasonic wave propagation in concrete based on a two-dimensional numerical model validated analytically and experimentally”, *Ultrasonics*, t. 92, p. 21-34, 2019, ISSN : 0041-624X.
- [YGH07] C. YARDIM, P. GERSTOFT et W. S. HODGKISS, “Statistical maritime radar duct estimation using hybrid genetic algorithm-Markov chain Monte Carlo method”, *Radio Science*, t. 42, n° 03, p. 1-15, 2007, ISSN : 1944-799X.
- [YRR+14a] S. YILDIZ, P. ROUX, S. T. RAKOTONARIVO, C. MARANDET et W. A. KUPERMAN, “Target localization through a data-based sensitivity kernel : A perturbation approach applied to a multistatic configuration”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 135, n° 4, p. 1800-1807, 2014, ISSN : 0001-4966. DOI : [10.1121/1.4868362](https://doi.org/10.1121/1.4868362). adresse : <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4868362>.
- [YRR+14b] —, “Target localization through a data-based sensitivity kernel : A perturbation approach applied to a multistatic configuration”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 135, n° 4, p. 1800-1807, 2014, ISSN : 0001-4966.
- [Yu18] T. YU, *Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton pour l'amélioration du diagnostic des structures de génie civil*, 2018.
- [ZRLT08] Y. ZIADÉ, H. ROUSSEL, M. LESTURGIE et W. TABBARA, “A coherent model of forest propagation - Application to detection and localization of targets using the DORT method”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, t. 56, n° 4, p. 1048-1057, 2008, ISSN : 0018926X. DOI : [10.1109/TAP.2008.919150](https://doi.org/10.1109/TAP.2008.919150).

Annexes

Sommaire

A. Curriculum Vitae	109
B. Liste des publications et communications scientifiques	117
C. Sélection d'articles post-thèse	125

A. Curriculum Vitae

Situation actuelle

Sandrine Tahina, RAKOTONARIVO
Maîtresse de Conférences, section 60
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille UMR 7031
Aix-Marseille Université, IUT GMP Aix-En-Provence
+33(0)4 13 94 62 97
sandrine.rakotonarivo@univ-amu.fr

Formation

- 2005-2009 **Thèse de doctorat en Acoustique, Université de Bretagne Occidentale, Brest**
Caractérisation quantitative des fonds marins à l'aide des sondeurs de sédiment (1 kHz – 10 kHz) : modélisation directe pour l'inversion sur données réelles
Mention très honorable
- 2004-2005 **Master II recherche, Ingénierie Acoustique et Mécanique, Université du Maine, Le Mans**
- 2004 **Diplôme d'ingénieur en Génie Mécanique, Filière Acoustique et Vibrations industrielles, UTC, Compiègne**
- 1999 **Bac S - Mention Bien, Lycée Marie Curie, Tarbes**

Expériences professionnelles

- 2018 2019 Séjour invité au Marine Physical Laboratory/Scripps Inst. of Oceanography (USA) – En position de Congés pour Recherche ou Conversion Thématique (6 mois) et de Délégation (6 mois)

- Depuis 2013 Maîtresse de Conférences, Aix Marseille Université - IUT GMP Aix-En-Provence et Équipe Ondes et Imagerie du LMA UMR 7031
- 2009 2013 Post-doctorat, Marine Physical Laboratory/Scripps Inst. of Oceanography (USA)
- 2008 2009 ATER, Aix Marseille Université - IUT GMP Aix-En-Provence
- 2005 2008 Doctorat, Thèse CIFRE entre l'entreprise IXBLUE (La Ciotat) et le Laboratoire STIC de l'ENSTA Bretagne (Brest)

Contrats et programmes de recherche

a) Projets académiques nationaux et internationaux

- [P5] **Projet AMIDEX International « 3D-InHoAc », 2019 - 2022, 196k€**
Partenaires : LMA Marseille, Marine Physical Lab (San Diego, USA) et Naval Research Lab. (Washington DC, USA)
 « 3D Innovative holographic acoustic methods for complex structures characterization (3D-InHoAc) »
Rôle : Porteur et responsable scientifique
- [P4] **Projet ANR ANDRA sur l'optimisation de la gestion des déchets radioactifs de démantèlement, 2015 - 2018, 450 k€**
Partenaires : ANDRA Paris, LMA Marseille, LMDC Toulouse, I2M Bordeaux
 « Dynamique et Contrôle non-destructif »
Porteur du projet : V. Garnier
Rôle : Responsable de la tâche T4
- [P3] **Projet ANR ENDE sur l'Evaluation Non Destructives des Enceintes de confinement des centrales nucléaires, 2014 - 2021, 1 731 k€**
Partenaires : LMA Marseille, LMDC Toulouse, I2M Bordeaux, ISTERRE Grenoble, IENM Lille, IFFSTAR Nantes, EDF Clamart, MISTRAS Group
 « Evaluation Non Destructives des Enceintes de confinement des centrales nucléaires »
Porteur du projet : V. Garnier
Rôle : Participation scientifique (2014 - 2018)
- [P2] **Programme de recherche PEPS Composite, 2015 - 2016, 12 k€**
Partenaires : LMA Marseille et MATEIS Lyon
 « Potentiel de l'analyse de la biréfringence des ondes de cisaillement par méthode non linéaire pour la détection de l'endommagement diffus »
Rôle : Porteur et responsable scientifique

- [P1] **Programme de recherche « Basic research » subventionné par l'Office of Naval Research, Etats-Unis, 2012 - 2014, 230 k\$**
Partenaires : Marine Physical Lab (San Diego, USA) et Naval Research Lab. (Washington DC, USA)
 « Sensor based computational methods for acoustic structures »
Rôle : Porteur

b) Contrats industriels

- [C7] **Contrat d'accompagnement de thèse T. Langlet entre le CEA Cadarache et le CNRS, 2021 - 2024**
Partenaires : CEA Cadarache (F. Michel) et LMA Marseille (P.-O. Matéi, R. Côte)
 « Imagerie passive basse fréquence »
Rôle : Porteur et responsable scientifique
- [C6] **Contrat d'accompagnement de thèse J. Fermé entre le CEA Cadarache et Centrale Innovation, 2020 - 2023**
Partenaires : CEA Cadarache (M. Cavaro) et LMA Marseille (S. Mensah)
 « Caractérisation acoustique du champ de vitesse dans un écoulement liquide avec microbulles »
Porteur du projet : S. Mensah
Rôle : Participation scientifique
- [C5] **Contrat entre le CEA Cadarache et Centrale Innovation, 2019 - 2020, 165 k€**
Partenaires : CEA Cadarache (F. Baqué, G. Gobillot) et LMA Marseille (S. Mensah, J.-F. Chaix)
 « Etude de la vision lointaine en sodium liquide »
Porteur du projet : S. Mensah
Rôle : Participation scientifique
- [C4] **Contrat entre le CEA Cadarache et ProtisValor/AMU, 2017 - 2019, 166 k€**
Partenaires : CEA Cadarache (F. Baqué, G. Gobillot) et LMA Marseille (S. Mensah, J.-F. Chaix)
 « Etude de la vision lointaine en sodium liquide »
Rôle : Porteur et responsable scientifique
 Mise en place également d'une collaboration avec le Marine Physical Laboratory via le détachement d'une ingénieure de recherche aux Etats-Unis (Décembre 2017 – Novembre 2018)

- [C3] **Contrat entre le CEA Cadarache et le CNRS, 2017, 63 k€**
Partenaires : CEA Cadarache (F. Baqué, G. Gobillot) et LMA Marseille (S. Mensah, J.-F. Chaix)
 « Etude de la vision lointaine en sodium liquide : étude préliminaire »
Rôle : Porteur et responsable scientifique
- [C2] **Contrat d'accompagnement de thèse E. Lubeigt entre le CEA Cadarache et le CNRS, 2013-2016**
Partenaires : CEA Cadarache (F. Baqué, G. Gobillot) et LMA Marseille (S. Mensah, J.-F. Chaix)
 « Imagerie ultrasonore pour la détection de défauts dans les soudures »
Rôle : Participation scientifique
- [C1] **Contrat de collaboration stage J. Lin entre EDF Chatou et le CNRS, 2015**
Partenaires : CEA Cadarache (J.-M. Hénault) et LMA Marseille (J.-F. Chaix, V. Garnier)
 « Analyse d'ondes ultrasonores rétrodiffusées dans les bétons (apport des capteurs multi-éléments) »
Rôle : Participation scientifique

Enseignements

Cours Magistraux, Travaux dirigés et Travaux pratiques :

- niveau licence à l'PIUT GMP Aix-En-Provence : Mathématiques, Electricité, Hydraulique industrielle, Ultrasons, Résistance des matériaux et projets tuteurés
- niveau master à l'UCSD, San Diego, États Unis (dispensés en anglais) : Acoustique sous-marine et traitement du signal

Encadrements

a) Post-doctorants, ATER, Ingénieurs d'étude et de recherche

- **Supervision d'une ingénieure d'étude, Lelisie Abosse**
 Contrat AMIDEX – LMA, Mai 2021 – Octobre 2021
 Porteur du contrat : S. Rakotonarivo
 « Développements en électronique à base de cartes FPGA pour l'acquisition de données numériques multicanaux »
- **Encadrement d'un post-doctorant, Vincent Roggerone**
 Contrat AMIDEX – LMA, Mars 2020 - Avril 2022
 Porteur du contrat : S. Rakotonarivo
 « Imagerie par holographie acoustique »

- **Co-Encadrement d'un ingénieur de recherche, Khaled Metwally**
 Contrat CEA – LMA – Central Innovation, Avril 2019 – Avril 2020
 Porteur du contrat : S. Mensah & J.F. Chaix
 « Imagerie ultrasonore en sodium liquide»
- **Co-Encadrement d'un post-doctorant, Simone Sternini**
 Contrat ONR – Marine Physical Lab. – USA, Jan 2019 – Jan 2020
 Porteur du contrat : W. Kuperman
 « Caractérisation d'objet élastique par holographie acoustique»
- **Co-encadrement d'un ATER, Manda Ramaniraka**
 Contrat ATER AMU - LMA, Oct 2018 – Août 2019
 « Caractérisation du béton à l'aide des ondes ultrasonores rétrodiffusées»
- **Encadrement d'une ingénieure de recherche, Emma Lubeigt**
 Contrat CEA – LMA – Protisvalor, Mai 2017 – Avril 2019
 Porteur du contrat : S. Rakotonarivo
 « Imagerie ultrasonore en sodium liquide»
- **Co-Encadrement d'un post-doctorant, Jesus Eiras**
 Projet DCND (ANR ANDRA), Oct. 2016 – Oct. 2018
 Porteur du contrat : V. Garnier
 « Auscultation du béton par analyse non linéaire dynamique»

b) Thèses

- **Co-direction de la thèse de Théo Langlet (50%)**
 Thèse CEA – LMA, Oct. 2021 – Sept. 2024
 Directeur : P.-O. Matéi et Co-encadrant : R. Côte
 « Imagerie passive basse fréquence»
- **Co-direction de la thèse de Jules Fermé (50%)**
 Thèse CEA – LMA, Oct. 2020 – Sept. 2023
 Directeur : S. Mensah et Co-directrice : S. Rakotonarivo
 « Caractérisation acoustique du champ de vitesse dans un écoulement liquide avec microbulles»
- **Co-direction de la thèse de Manda Ramaniraka (50%)**
 Bourse ministérielle, Oct 2015 - Oct 2018
 Directeur : V. Garnier et Co-directrice : S. Rakotonarivo
 « Caractérisation du béton à l'aide des ondes ultrasonores rétrodiffusées»
- **Co-encadrement de la thèse d'Emma Lubeigt (33%)**
 Thèse CEA - LMA , Nov 2013 – Nov 2016
 Directeur : S. Mensah et Co-directeur : JF. Chaix
 « Imagerie ultrasonore pour la détection de défauts dans les soudures »

c) Master

- **Encadrement de Antoine Caisson (100 %)**
 Projet de Master 2 (École centrale, Lyon), Avril 2021 à Septembre 2021
 « Mesure de la réponse acoustique d'un objet élastique par holographie acoustique »
- **Co-Encadrement de Nathan Sithilonga (33%)**
 Projet tuteuré de license (UCSD, San Diego, USA), Septembre 2018 à Mars 2019
 « Conception et fabrication d'un support de capteur Mems par impression 3D »
- **Co-Encadrement de Laure-Anne Gueguen (50%)**
 Projet de Master 2 (ENSTA, Brest) – collaboration avec la société MAREE, Avril à Août 2017
 « Localisation d'inclusions dans le sédiment avec le célérimètre INSEA2 »
- **Encadrement de B. Giraud et A. Salomon (100%)**
 Projet de fin d'étude Master 2 (École Navale, Brest) - Août à Novembre 2016
 « Contrôle non destructif de matériaux composites par ultrasons »
- **Co-Encadrement de Camille Lemagnen (50%)**
 Projet de Master 2 (École , Grenoble) – collaboration société MAREE, Avril à Août 2016
 « Détection d'inclusions dans le sédiment avec le célérimètre INSEA2 »
- **Co-Encadrement de Jing Lin (50%)**
 Projet de Master 2 (École des Mines, Albi) – collaboration avec EDF, Mars à Août 2015
 « Analyse d'ondes ultrasonores rétrodiffusées dans les bétons Apport des capteurs multi-éléments »
- **Encadrement de Boyan Zhang (50%)**
 Projet tuteuré de Master 2 (UCSD, San Diego, USA), Janvier à Juillet 2013
 « Mise en place d'expériences pour l'évaluation de l'impédance structurale à partir de la mesure du bruit »
- **Encadrement de Sarah White (50%)**
 Projet tuteuré de Master 2 (UCSD, San Diego, USA), Janvier à Juillet 2013
 « Détection et caractérisation passive de défaut sur un panel composite »
- **Encadrement de Damiel Bienfait et Matthieu Chauvet (70%)**
 Projet de fin d'étude Master 2 (École Navale, Brest), Août à Octobre 2012
 « Expériences en laboratoire pour la localisation passive de source »

- **Encadrement de Flavie Monnoury et Anthony Laurent (70%)**
Projet de fin d'étude Master 2 (École Navale, Brest), Août à Octobre 2011
« Détection et localisation passives de cible en guide d'onde marin »
- **Co-Encadrement de Pierre-Antoine De Sèze et Maxime De Boissieu (50 %)**
Projet de fin d'étude Master 2 (École Navale, Brest), Août à Octobre 2010
« Localisation et discrimination de cibles enfouies dans les sédiments marins »

Responsabilités et Activités collectives

a) Activités et Responsabilités administratives et pédagogiques

- Depuis 2019 : Référente du groupe de travail mathématiques dans le cadre du projet pédagogique national AMI de transformation pédagogique et numérique HYBRID'GMP
<https://hybridgmp.iutenligne.net/>
- Depuis 2018 : nommée au conseil de laboratoire du LMA
- Depuis 2017 : Commission de recrutement des futurs étudiants de 1ère année de DUT sur la plateforme ParcoursSup
- Depuis 2016 : Participation à la cellule de soutien pour les élèves de 1ère année de l'IUT GMP et référente pour l'organisation des soutiens de maths
- 2016 - 2018 : Responsable de la poursuite d'étude au département GMP, IUT Aix, Aix-Marseille Université
- 2017 - 2019 : Participation au projet national "Réussir son entrée en IUT" d'IU-Tenligne et création de ressources
<https://reussir.iutenligne.net/>
- 2017 - 2019 : Participation au groupe de travail sur le PASS DUT secondaire et création de ressources
<https://iut.univ-amu.fr/passiut>

b) Jurys de thèse et comités de sélection

- Décembre 2019 : Thèse de Tobias Van Baarsel (Examinatrice), Université de Grenoble et Laboratoire ISTERRE, Grenoble
« Inversion des perturbations de surface par traitement d'antenne en guide d'onde ultrasonore »

- Juin 2019 : Thèse de Manda Ramaniraka (Co-directrice), Aix-Marseille Université et Laboratoire LMA, Marseille
« Exploitation de la diffusion multiple et considération de l'interfacial transition zone pour la caractérisation ultrasonore du béton »
- Décembre 2018 : Thèse de Mathieu Grialou (Examinatrice), INSA Lyon et Laboratoire de Vibration et d'Acoustique, Lyon
« Sous-structure vibro-acoustique : Combinaison de simulations et d'identification expérimentale de sous-domaines pour l'acoustique des véhicules à basse fréquence »
- Février 2017 : Thèse de Emma Lubeigt (Co-encadrante), Aix-Marseille Université et Laboratoire LMA, Marseille
« Imagerie topologique de domaines élastiques bornés : application au contrôle non destructif des soudures »
- Comité de sélection poste MCF 0993 section 60, Aix-Marseille Université, Mai 2021
- Comité de sélection poste MCF 0670 section 60, Aix-Marseille Université, Mai 2015
- Comité de sélection poste Prag Anglais, Aix-Marseille Université, Avril 2014

c) Vulgarisation scientifique

- 2015 - 2019 : Animation de la journée de la science à l'IUT GMP Aix-En-Provence sur le thème de l'imagerie ultrasonore pour le contrôle non destructif
- 2016 - 2017 : Séminaire en anglais sur mes travaux de recherche auprès des apprentis 2A de l'IUT GMP Aix-En-Provence

d) Responsabilité de laboratoire d'essais ou TP

- Depuis 2013 : Gestion et suivi du matériel du laboratoire TP Hydrauliques de l'IUT GMP Aix-En-Provence
- 2013 - 2018 : Gestion et suivi du matériel du laboratoire TP Ultrasons de l'IUT GMP Aix-En-Provence
- 2011 - 2013 : Gestion et suivi du matériel du laboratoire d'essais ultrasonores, MPL , UCSD, San Diego, États-Unis

Travaux d'expertises

- Expertise des articles soumis à des revues scientifiques internationales : Journal of the Acoustical Society of America, Acta Acustica, Ultrasonics, Non Destructive testing and Evaluation journal, Measurement, Journal of composites : Part A
- Membre de l'Acoustical Society of America et de la Société Française d'Acoustique.

B. Liste des publications et communications scientifiques

Publications et communications scientifiques

Sandrine Tahina RAKOTONARIVO

2 Mars 2022

1 Revues scientifiques à comité de lecture

- [A18]M. Ramaniraka, **S. T. Rakotonarivo**, C. Payan, and V. Garnier. 2022, “Effect of the interfacial transition zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete”, *Cement and Concrete Research* **152**.
- [A17]J. N. Eiras, C. Payan, **S. Rakotonarivo**, A. Spalvier, and V. Garnier. 2021, “Vibration monitoring of nuclear power plant containment buildings during the integrated leakage rate test for structural condition assessment”, *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 1–9.
- [A16]S. Sternini, **S. T. Rakotonarivo**, J. Sarkar, A. Bottero, W. A. Kuperman, and E. G. Williams. 2020, “Bistatic scattering of an elastic object using the structural admittance and noise-based holographic measurements”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **148**, 734–747.
- [A15]J. N. Eiras, C. Payan, **S. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2020, “Damage detection and localization from linear and nonlinear global vibration features in concrete slabs subjected to localized thermal damage”, *Structural Health Monitoring*, 1475921720941792.
- [A14]M. Ramaniraka, **S. Rakotonarivo**, C. Payan, and V. Garnier. 2019, “Effect of the interfacial transition zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete”, *Cement and Concrete Research* **124**.
- [A13]E. Lubeigt, **S. Rakotonarivo**, S. Mensah, J.-F. Chaix, F. Baqué, and W. A. Kuperman. 2019, “Passive structural monitoring based on data-driven matched field processing”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **145**, EL317–EL322.
- [A12]J. N. Eiras, C. Payan, **S. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2018, “Experimental modal analysis and finite element model updating for structural health monitoring of reinforced concrete radioactive waste packages”, *Construction and Building Materials* **180**, 531–543.
- [A11]**S. T. Rakotonarivo**, C. Payan, J. Moysan, and C. Hochard. 2018, “Local damage evaluation of a laminate composite plate using ultrasonic birefringence of shear wave”, *Composites Part B: Engineering* **142**, 287–292.
- [A10]K. Metwally, E. Lubeigt, **S. Rakotonarivo**, J.-F. Chaix, F. Baqué, G. Gobillot, and S. Mensah. 2018, “Weld inspection by focused adjoint method”, *Ultrasonics* **83**, 80–87.

- [A9]E. G. Williams, J. D. Tippmann, **S. T. Rakotonarivo**, Z. J. Waters, P. Roux, and W. A. Kuperman. 2017, “Experimental estimation of in vacuo structural admittance using random sources in a non-anechoic room”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **142**, 103–109.
- [A8]E. Lubeigt, S. Mensah, **S. T. Rakotonarivo**, J.-F. Chaix, F. Baqué, and G. Gobillot. 2017, “Topological imaging in bounded elastic media”, *Ultrasonics* **76**, 145–153.
- [A7]**S. T. Rakotonarivo**, W. A. Kuperman, and E. G. Williams. 2015, “Erratum: Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise [J. Acoust. Soc. Am. 134, 4401–4411 (2013)]”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **138**, 2426.
- [A6]S. Yildiz, P. Roux, **S. T. Rakotonarivo**, C. Marandet, and W. A. Kuperman. 2014, “Target localization through a data-based sensitivity kernel: A perturbation approach applied to a multistatic configuration”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **135**, 1800–1807.
- [A5]**S. T. Rakotonarivo**, W. A. Kuperman, and E. G. Williams. 2013, “Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **134**, 4401–4411.
- [A4]**S. T. Rakotonarivo** and W. A. Kuperman. 2012, “Model-independent range localization of a moving source in shallow water”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**, 2218–2223.
- [A3]**S. T. Rakotonarivo**, M. Legris, R. Desmare, J.-P. Sessarégo, and J.-F. Bourillet. 2011, “Forward modeling for marine sediment characterization using chirp sonars”, *Geophysics* **76**, T91–T99.
- [A2]**S. T. Rakotonarivo**, S. C. Walker, W. A. Kuperman, and P. Roux. 2011, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling of the actual medium”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **130**, 3566–3573.
- [A1]T. A. Evans, J. C. S. Lai, E. Toledano, L. McDowall, **S. T. Rakotonarivo**, and M. Lenz. 2005, “Termites assess wood size by using vibration signals”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **102**, 3732–3737.

2 Congrès internationaux à comité de sélection

- [CI33]V. Roggerone, R. Guillermin, and **S. T. Rakotonarivo**. 2022/01/10 2021, “A new hybrid method between equivalent source method and boundary element method for modeling diffraction”, in *The journal of the acoustical society of america*, Vol. 150, 4 (), A208–A208.
- [CI33]**S. T. Rakotonarivo**, V. Roggerone, A. Caisson, and A. Bottero. 2022/01/10 2021, “Experimental evaluation of a sound diffuse field in a ordinary room”, in *The journal of the acoustical society of america*, Vol. 150, 4 (), A118–A118.

- [CI32]A. Bottero, E. G. Williams, W. A. Kuperman, and **S. Rakotonarivo**. 2019, “Broadband monostatic acoustic scattering simulations of underwater unexploded ordnance using time-domain spectral-elements”, in 179th meeting of the acoustical society of america, Vol. 146, 4 (), pp. 3005–3005.
- [CI31]M. Ramaniraka, **S. T. Rakotonarivo**, C. Payan, and V. Garnier. 2019, “Correlation between interfacial transition zone characteristics and ultrasonic wave velocity and attenuation in concrete”, in 46th annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation qnde 2019 ().
- [CI30]J. N. Eiras, C. Payan, **S. T. Rakotonarivo**, N. Ranaivamonana, and V. Garnier. 2019, “Damage detection and localization in concrete slabs through linear and nonlinear vibration analysis, Enabling intelligent life-cycle health management for industry internet of things”, in Structural health monitoring 2019, edited by F.-K. Chang and F. Kopsaftopoulos (The 12th International Workshop on Structural Health Monitoring).
- [CI29]S. Sternini, J. Sarkar, **S. Rakotonarivo**, A. Bottero, E. G. Williams, J. D. Tippmann, and W. A. Kuperman. 2019, “Determining structural acoustic properties from noise-based holographic measurements”, in 179th meeting of the acoustical society of america, Vol. 146, 4 (), pp. 2943–2943.
- [CI28]J. Sarkar, S. Sternini, **S. Rakotonarivo**, A. Bottero, E. G. Williams, J. D. Tippmann, and W. A. Kuperman. 2019, “Holographic array for determining structural acoustic properties”, in Uace 2019, underwater acoustics conference and exhibition, edited by J. Papadakis (), pp. 543–550.
- [CI27]M. Ramaniraka, **S. T. Rakotonarivo**, C. Payan, and V. Garnier. 2019, “Ultrasonic wave propagation in scattering media with imperfect contact at the matrix-inclusions interfaces”, in International congress on ultrasonics ().
- [CI26]M. Ramaniraka, **S. T. Rakotonarivo**, V. Garnier, and J.-F. Chaix. 2018, “Concrete characterization using backscattered ultrasonic waves: the case of reverberant laboratory specimens”, in 12th european conference on non-destructive testing ecndt ().
- [CI25]V. Garnier, J. E. Fernandez, S. Razafindratsima, C. Payan, **S. T. Rakotonarivo**, Z. M. Sbartai, J. P. Balayssac, and S. Lesoille. 2018, “Dynamic Non Destructive Testing for dismantling”, in Dem 2018, international conference on dismantling challenges: industrial reality, prospects and feedback experience ().
- [CI24]S. Razafindratsima, M. Sbartai, J.-P. Balayssac, C. Payan, **S. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2018, “Modelling the diffusion of electromagnetic waves in concrete”, in 17th international conference on ground penetrating radar (gpr) (), pp. 1–6.
- [CI23]V. Garnier, J. M. Henault, B. Piwakowski, C. Payan, O. Abraham, J.-F. Chaix, **S. T. Rakotonarivo**, G. Villain, M. Lott, and C. Ciccarone. 2018, “Non Destructive Evaluation for containment monitoring”, in Tince 2018-technological innovations in nuclear civil engineering ().
- [CI22]V. Garnier, B. Piwakowski, J. M. Henault, J. Verdier, J. P. Balayssac, N. Ranaivamonana, J. F. Chaix, **S. T. Rakotonarivo**, G. Villain, and O. Abraham. 2018, “Non Destructive Evaluation of the durability and damages of concrete in nuclear power plant”, in 12th european conference on non-destructive testing ecndt ().

- [CI21]E. Lubeigt, **S. Rakotonarivo**, S. Mensah, J.-F. Chaix, W. A. Kuperman, J. Sarkar, F. Baqué, and G. Gobillot. 2018, “Passive structural monitoring based on matched processing”, in 176th meeting of the acoustical society of america ().
- [CI20]E. Williams, **S. Rakotonarivo**, J. Sarkar, and W. Kuperman. 2018, “Predicting the bistatic scattering from subsea buried targets using in-air laboratory measurements”, in 6th international conference on noise and vibration emerging methods, Vol. 257, 1 (), pp. 919–930.
- [CI19]J. E. Fernandez, C. Payan, **S. T. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2018, “Structural health monitoring of intermediate-level radioactive waste packages”, in Bindt/ewshsm 2018 meeting ().
- [CI18]M. Ramaniraka, **S. T. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2017, “Characterization of complex media using backscattered ultrasonic waves: application to concrete inspection”, in 16th anglo-french physical acoustics conference ().
- [CI17]V. Garnier, J.-M. Henault, H. Hafid, J. Verdier, J. F. Chaix, O. Abraham, Z. M. Sbartaï, J. P. Balayssac, B. Piwakowski, and G. Villain. 2017, “Containment nuclear plant structures evaluation by non destructive testing: strategy and results”, in Tince 2016, technological innovations in nuclear civil engineering ().
- [CI16]E. Lubeigt, S. Mensah, **S. Rakotonarivo**, J.-F. Chaix, G. Gobillot, and F. Baqué. 2017, “Flaws detection and localization in weld structure using the topological energy method”, in Aip conference proceedings, Vol. 1806, 1 (), p. 90010.
- [CI15]K. Metwally, E. Lubeigt, **S. T. Rakotonarivo**, J.-F. Chaix, F. Baqué, G. Gobillot, and S. Mensah. 2017, “Sensitivity enhancement of the topological imaging method: Application to weld inspection”, in 5th international conference on advancements in nuclear instrumentation measurement methods and their applications (animma) ().
- [CI14]J. D. Tippmann, **S. T. Rakotonarivo**, W. Kuperman, E. Williams, Z. J. Waters, and P. Roux. 2016, “(Invited) Measurement of a target’s structural admittance and the prediction of its scattered field in different media”, in Proceedings of the 2nd international congress on acoustics ().
- [CI13]J. D. Tippmann, W. Kuperman, **S. T. Rakotonarivo**, and E. Williams. 2016, “(Invited) Measurement of the structural admittance matrix using external random noise sources”, in 5th joint meeting of the acoustical society of america and acoustical society of japan ().
- [CI12]E. Lubeigt, S. Mensah, J.-F. Chaix, **S. Rakotonarivo**, G. Gobillot, and F. Baqué. 2016, “Crack Detection and Localization in Weld Structure Using the Topological Energy Method”, in Review of progress in quantitative nondestructive evaluation ().
- [CI11]E. Lubeigt, S. Mensah, J.-F. Chaix, **S. Rakotonarivo**, G. Gobillot, and F. Baqué. 2015, “Ultrasonic Imaging in Liquid Sodium: A Differential Method for Damages Detection”, in International congress on ultrasonics, Vol. 70 (), pp. 550–553.
- [CI10]E. Lubeigt, S. Mensah, J.-F. Chaix, **S. Rakotonarivo**, and G. Gobillot. 2015, “Ultrasonic imaging in liquid sodium: Topological energy for damages detection”, in 4th international conference on advancements in nuclear instrumentation measurement methods and their applications (animma) (), pp. 1–5.

- [CI9]**S. Rakotonarivo**, S. Yildiz, E. G. Williams, P. Roux, and W. A. Kuperman. 2014, “(Invited) Model tank experiments and using a random noise field to determine scattering properties of an object”, in 2nd international conference on underwater acoustics ().
- [CI8]**S. T. Rakotonarivo**, W. A. Kuperman, and E. G. Williams. 2014, “Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise”, in 166th meeting of the acoustical society of america, Vol. 135 ().
- [CI7]S. Yildiz, C. Marandet, **S. T. Rakotonarivo**, P. Roux, and W. A. Kuperman. 2013, “Data-based sensitivity kernel in a highly reverberating cavity”, in Proceedings of meetings on acoustics ica2013, Vol. 19 ().
- [CI6]**S. T. Rakotonarivo** and W. A. Kuperman. 2012, “Invariant-Based Range-Localization from a Frequency-Time Spectrogram”, in Proceedings of the 11th european conference on underwater acoustics ().
- [CI5]**S. Rakotonarivo**, J.-F. Bourillet, and C. Yardim. 2010, “(Invited) Estimation of sediment parameters from subbottom profiling data using genetic algorithms”, in 10th european conference on underwater acoustics ().
- [CI4]**S. T. Rakotonarivo**, S. C. Walker, W. A. Kuperman, and P. Roux. 2010, “Remote localization of a moving target in a random scattering medium based on the Born approximation.”, in 2nd pan-american meeting on acoustic ().
- [CI3]**S. Rakotonarivo**, M. Legris, R. Desmare, and F. Jean. 2008, “Theoretical justification of a coherent forward model for subbottom profiler data inversion”, in 9th european conference on underwater acoustics, Vol. 123, 5 (), p. 3350.

3 Congrès nationaux à comité de sélection

- [CN13]V. Garnier, J.-P. Balayssac, J.-F. Lataste, C. Payan, S. T. Eiras, S. Razafindratsima, and B. Yven. 2020, “Développement de techniques de mesure in situ de pathologie de béton par rétrodiffusion d’ondes ultrasonores”, in Diagnobéton 2020 ().
- [CN12]**S. T. Rakotonarivo**, M. Chaix, T. Yu, and V. Garnier. 2018, “Approche numérique et expérimentale de la multidiffusion des ultrasons dans les solides élastiques hétérogènes: application à la caractérisation non destructive des bétons”, in 14ème congrès français d’acoustique, edited by SFA ().
- [CN11]**S. T. Rakotonarivo**, E. Lubeigt, K. Metwally, J. F. Chaix, F. Baqué, G. Gobillot, and S. Mensah. 2018, “Détection et localisation de défauts par imagerie topologique et focalisation de sources: application à l’inspection des soudures”, in 14ème congrès français d’acoustique, edited by SFA ().
- [CN10]M. Ramaniraka, V. Garnier, **S. T. Rakotonarivo**, and C. Payan. 2018, “Nécessité de la prise en compte de l’ITZ dans les simulations numériques de propagation d’ondes ultrasonores dans le béton”, in Journée cofrend 2018, edited by COFREND ().

- [CN9]M. Sbartai, S. Razafindratsima, J.-P. Balayssac, C. Payan, **S. T. Rakotonarivo**, and V. Garnier. 2018, “Using diffusivity and dissipation of electromagnetic waves in concrete as new non-destructive parameters for nuclear structures evaluation”, in Ruge 2018-36èmes rencontres universitaires de génie civil ().
- [CN8]J.-F. Chaix, **S. Rakotonarivo**, M. Ramaniraka, and V. Garnier. 2017, “Caractérisation ultrasonore multi-éléments de bétons par analyse de la diffusion de l’énergie”, in Congrès cofrend 2017 ().
- [CN7]C. Lemagnen, R. Jan, D. Clec’h, X. Demoulin, and **S. T. Rakotonarivo**. 2017, “Imagerie ultrasonore de l’intérieur des sédiments: premiers éléments du projet OS-CARABIS”, in Conférence carhamb’ar cartographie des habitats marins benthiques: de l’acquisition à la restitution ().
- [CN6]**S. Rakotonarivo**, J.-F. Chaix, L. Jing, J.-M. Henault, and V. Garnier. 2016, “Développement de techniques de mesure in situ de pathologie de béton par rétrodiffusion d’ondes ultrasonores”, in Diagnobéton 2016, edited by COFREND ().
- [CN5]**S. Rakotonarivo**, C. Payan, J. Moysan, C. Hochard, and J.-P. Charles. 2016, “Estimation des coefficients de cisaillement hors-plan d’un matériau composite par analyse de la biréfringence des ondes de cisaillements”, in 13ème congrès français d’acoustique, edited by SFA ().
- [CN4]**S. Rakotonarivo**, W. Kuperman, and E. Williams. 2016, “Prédiction de l’impédance mécanique d’un objet élastique à partir de la corrélation de bruit aléatoire”, in 13ème congrès français d’acoustique, edited by SFA ().
- [CN3]C. Payan, **S. Rakotonarivo**, C. La Rocca, M. C. Remillieux, P.-Y. Le Bas, and T. J. Ulrich. 2015, “Advanced nonlinear ultrasonic methods for health monitoring of composite structures”, in Colloque symposium franco-chinois sur les matériaux composites ().
- [CN2]**S. Rakotonarivo**, C. Payan, J. Moysan, C. Hochard, and J.-P. Charles. 2015, “Caractérisation non destructive de l’anisotropie d’un matériau composite à l’aide des ondes ultrasonores transverses”, in 19èmes journées nationales sur les composites, edited by JNC ().
- [CN1]**S. Rakotonarivo**, M. Legris, R. Desmare, and F. Jean. 2006, “Impact of measurement geometry on quantitative characterisation of sediment with high-resolution sub-bottom profiling systems (1 kHz–15 kHz)”, in Proceedings sea tech week, caractérisation du milieu marin, edited by IXBLUE ().

4 Communications orales, Séminaires, Workshops

- [CS15]K. Metwally, E. Lubeigt, **S. Rakotonarivo**, S. Mensah, J.-F. Chaix, M. Cavaro, F. Baqué, and W. A. Kuperman. 2019, “Low frequency passive imaging for detection and localization of defects in immersed pipe”, in Workshop passive imaging and monitoring in wave physics: from seismology to ultrasound ().
- [CS14]J. F. Chaix and **S. T. Rakotonarivo**. 2018, in Gdr meca wave ().

- [CS13]V. Garnier, J. Moysan, M.-A. Ploix, **S. T. Rakotonarivo**, G. Corneloup, I. Lilliamand, J. Mailhé, C. Payan, S. Gendrey, E. Lubeigt, J. N. Eiras, P. Kauffmann, F. Ouvrier-Bufferet, Q. Marsac, and M. Ramaniraka. 2018, “Echographie ultrasonore des matériaux pour la caractérisation non destructive des structures”, in Congrès national de la recherche des iuts ().
- [CS12]**S. T. Rakotonarivo** and C. Destouche. 2016, “Analyse avancée des signaux”, in Séminaire cea-lma sur les actions de collaborations ().
- [CS11]**S. T. Rakotonarivo**. 2016, “Contrôle non destructif par ultrasons pour l’imagerie de défauts”, in Journée “problèmes inverses et imagerie” lma ().
- [CS10]**S. T. Rakotonarivo**. 2015, “Séminaire de présentation des outils numériques disponibles au lma-thématique cnd: civa, prospero, specfem et comsol”présentation partie comsol”, in ().
- [CS9]**S. T. Rakotonarivo**. Mar. 2013, “Model-independent range localization of a moving source in shallow water”, San Diego, USA.
- [CS8]**S. T. Rakotonarivo**. Apr. 2013, “Localisation et suivi acoustique d’une perturbation en milieu multiplement diffusif ou reverberant”, Grenoble, France.
- [CS7]**S. T. Rakotonarivo**. May 2013, “Localisation et suivi acoustique d’une perturbation en milieu multiplement diffusif ou reverberant”, Marseille, France.
- [CS6]**S. T. Rakotonarivo**. Dec. 2012, “Geoacoustic characterization and target localization in the marine environment using sonar data”, San Diego, USA.
- [CS5]**S. T. Rakotonarivo**, W. Kuperman, and P. Roux. 2011, “Laboratory experiments for the study of wave propagation in complex media”, in Comité de revue de projet de l’office américain des recherches navales (onr) ().
- [CS4]**S. T. Rakotonarivo**. 2011, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling the actual medium”, in Aos seminar at the marine physical laboratory, ucsd/sio ().
- [CS3]**S. T. Rakotonarivo**, S. C. Walker, W. Kuperman, and P. Roux. 2011, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling the actual medium”, in Workshop recent developments in wave physics of complex media ().
- [CS2]**S. T. Rakotonarivo**. 2009, “Caractérisation du béton par ultrasons: estimation de l’atténuation à partir de la rétrodiffusion”, in Rapport scientifique, pôle contrôle non destructive du lma (ex-lend) ().
- [CS1]**S. T. Rakotonarivo**. 2007, “Impact de la rugosité sur la rétrodiffusion des signaux de sondeur de sédiment: résultats d’expériences en laboratoire”, in Conférence du groupe ixmarine, ixtechday’07 ().

C. Sélection d'articles post-thèse

- ¹M. RAMANIRAKA, S. T. RAKOTONARIVO, C. PAYAN et V. GARNIER, “Effect of the Interfacial Transition Zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete”, *Cement and Concrete Research* **152** (2021).
- ²S. STERNINI, S. T. RAKOTONARIVO, J. SARKAR, A. BOTTERO, W. A. KUPERMAN et E. G. WILLIAMS, “Bistatic scattering of an elastic object using the structural admittance and noise-based holographic measurements”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **148**, 734-747 (2020).
- ³M. RAMANIRAKA, S. RAKOTONARIVO, C. PAYAN et V. GARNIER, “Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete”, *Cement and Concrete Research* **124** (2019).
- ⁴E. LUBEIGT, S. RAKOTONARIVO, S. MENSAH, J.-F. CHAIX, F. BAQUÉ et W. A. KUPERMAN, “Passive structural monitoring based on data-driven matched field processing”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **145**, EL317-EL322 (2019).
- ⁵E. LUBEIGT, S. MENSAH, S. RAKOTONARIVO, J.-F. CHAIX, F. BAQUÉ et G. GOBILLOT, “Topological imaging in bounded elastic media”, *Ultrasonics* **76**, 145-153 (2017).
- ⁶S. T. RAKOTONARIVO, S. C. WALKER, W. A. KUPERMAN et P. ROUX, “Localization of a small change in a multiple scattering environment without modeling of the actual medium”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **130**, 3566-3573 (2011).
- ⁷S. T. RAKOTONARIVO et W. A. KUPERMAN, “Model-independent range localization of a moving source in shallow water”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **132**, 2218-2223 (2012).
- ⁸S. T. RAKOTONARIVO, W. A. KUPERMAN et E. G. WILLIAMS, “Prediction of a body’s structural impedance and scattering properties using correlation of random noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America* **134**, 4401-4411 (2013).
- ⁹S. T. RAKOTONARIVO, C. PAYAN, J. MOYSAN et C. HOCHARD, “Local damage evaluation of a laminate composite plate using ultrasonic birefringence of shear wave”, *Composites Part B: Engineering* **142**, 287-292 (2018).
- ¹⁰J. N. EIRAS, C. PAYAN, S. RAKOTONARIVO et V. GARNIER, “Experimental modal analysis and finite element model updating for structural health monitoring of reinforced concrete radioactive waste packages”, *Construction and Building Materials* **180**, 531-543 (2018).