



HAL
open science

A la conquête des ondes guidées : un pas de plus vers des structures multifonctionnelles intelligentes

Marc Rébillat

► **To cite this version:**

Marc Rébillat. A la conquête des ondes guidées : un pas de plus vers des structures multifonctionnelles intelligentes. Acoustique [physics.class-ph]. Conservatoire National des Arts et Métiers, 2023. tel-04481530

HAL Id: tel-04481530

<https://hal.science/tel-04481530>

Submitted on 28 Feb 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

le Conservatoire National des Arts et Métiers

À la conquête des ondes guidées : un pas de plus vers des structures multifonctionnelles intelligentes

SPÉCIALITÉS : Acoustique & Traitement du Signal

par

Marc RÉBILLAT

Soutenue le Mardi 7 Novembre 2023

Composition du jury

<i>Président :</i>	ANTONI JÉRÔME	Professeur des Universités, INSA Lyon, France
<i>Rapporteurs :</i>	PRADA CLAIRE	Directrice de Recherche, ESPCI, France
	DERAEMAEKER ARNAUD	Professeur, ULB, Belgique
	BERENGUER CHRISTOPHE	Professeur des Universités, Grenoble INP, France
<i>Examineurs :</i>	SIMON LAURENT	Professeur des Universités, Université du Maine, France
	DELALANDE STÉPHANE	Professeur Titulaire de Chaire, CNAM, France
	CANU STÉPHANE	Professeur des Universités, INSA Rouen, France
	MECHBAL NAZIH	Professeur des Universités, ENSAM, France

Mis en page avec la classe thesul.

À Caroline,
à Gabriel & Joan.

Remerciements

La conquête des ondes guidées s'est avérée être un long périple au cours duquel j'ai eu la chance d'être accompagné et épaulé par un jury, des collègues, des amis, ainsi que ma famille. C'est avant tout grâce à eux que je suis arrivé à bon port !

Je souhaite d'abord chaleureusement remercier le jury qui a accepté d'évaluer ces travaux au prix de la lecture d'un manuscrit conséquent et d'une soutenance pas trop éprouvante je l'espère. Merci donc à C. Prada, A. Deraemaeker et C. Bérenguer, que je ne connaissais pas au moment où je les ai conviés à rapporter sur le manuscrit, pour les échanges scientifiques que nous avons eus et pour leurs retours concernant mes travaux. Merci également à J. Antoni et L. Simon qui me suivent, de près ou de loin, depuis quelques années déjà et que j'espère encore croiser souvent. Enfin merci à S. Delalande et à S. Canu, avec qui j'échange depuis moins longtemps mais qui m'apportent à cette occasion un éclairage neuf sur les problématiques traitées ici.

Je souhaite ensuite remercier les doctorants et post-doctorants que j'ai co-encadrés et avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler. Merci à Claude F., Damien B., Emmanuel L., Hadrien P., Mattias S., Meriem G., Nassim B., Ouadie H., Rafik H., Shawn K., Shweta P., Shuanglin G., William B., Xixi L. et Sebastian R. C'était un réel plaisir d'échanger avec vous !

Je veux également remercier les membres du laboratoire PIMM de façon générale, ceux de l'équipe DYSCO, et plus particulièrement ceux avec qui j'ai échangé et travaillé au cours de ces 10 dernières années. Merci donc à M. Guskov, E. Monteiro et N. Ranc pour les co-encadrements de thèses et de post-doctorats. Et merci à A.-S. Poudrel, F. Ababsa, G. Martin, P. Lorong, E. Balmes, P. Margerit, A. Illoul, I. Koutiri, A. Lejeune, C. Gengembre, F. Letellier, N. Hascoët, J.-P. Marquez Costa, P. Chinesta, S. Roland, M. Gervais, S. Girault, I. Iliopoulos, L. Berthe & E. Richaud, pour les échanges au quotidien, les idées débattues, et les projets divers et variés imaginés autour d'un café, au restaurant ou ailleurs...

J'aimerais également profiter de cet espace pour adresser mes plus vifs remerciements à Nazih MECHBAL, un collègue devenu ami, qui m'a accueilli au PIMM alors que l'activité commençait tout juste à exister et avec qui nous avons mis en place la plate-forme expérimentalo-numérique SHM@PIMM ainsi que de nombreux projets connexes. Il a su me faire confiance, même si les objectifs et la méthodologie pouvaient parfois paraître poétiques. Il est toujours venu me chercher pour m'associer à des projets plus ou moins matures, mais toujours pertinents et intéressants. Au final, j'ai le sentiment que nous avons construit ensemble quelque-chose de tangible, de durable, et qui a permis de nous faire avancer collectivement autour de certaines problématiques scientifiques et technologiques. Nous verrons où nous mènent les prochaines années !

Un petit mot également pour ceux à cause de qui tout ça est arrivé, dans le sens où ils m'ont toujours encouragés à poursuivre dans cette voie à différents moments de ma carrière. Tout d'abord, merci à T. Hélie, qui a été mon premier tuteur de stage en L1 et qui a su me faire découvrir les saveurs inégalables des séries de Volterra. Ensuite, merci à X. Boutillon, B. Katz & E. Corteel qui m'ont encadré au cours de ma thèse où tout n'était pas gagné d'avance étant donné la diversité des goûts musicaux en jeu. Également, je souhaite remercier mon collègue et ami de longue date, K. Ege, qui depuis la thèse, ne cesse de jeter un œil bienveillant sur mes travaux et reste toujours disponible en cas de besoins urgents ! Merci également à l'équipe ATIAM (Lise, Tifanie & Gaétan) que j'ai plaisir à retrouver régulièrement et je leur souhaite de continuer à vibrer dans leurs domaines respectifs.

Les derniers mots seront pour remercier ma famille, qui se demande depuis tout ce temps "*ce que je cherche, et si je trouve*" et ne semble pas toujours convaincue de mes explications. La réponse tient dans ces *quelques* pages et j'espère à présent que c'est plus clair pour vous ! En tout cas, merci pour votre soutien inconditionnel même quand je manquais d'assurance, et

merci au trois générations de relectrices (Josiane [AGM], Marie-Pierre [GM] et Caroline [M]) qui m'ont permis d'éviter de laisser trop de fautes dans le manuscrit et de rendre sa lecture abordable, je l'espère, au plus grand nombre! Merci aussi aux deux patriarches, Jean & Jean-Claude, plus discrets, mais toujours présents. Merci également énormément à Caroline mon épouse, qui accompagne mon quotidien d'enseignant-chercheur, un métier un peu particulier c'est vrai, et qui m'a soutenu sans relâche depuis toutes ces années. Et merci à mes enfants Gabriel & Joan, qui ont suivi avec beaucoup d'attention la rédaction de "*mon livre*" et m'ont encouragé à le finir!

Merci enfin à ceux que j'aurais pu oublier (je m'en excuse...) et à ceux que je ne connais pas mais qui liront ces quelques lignes avant de se lancer à la conquête des ondes guidées. En espérant que ce manuscrit soit pour eux un bon point d'entrée et qu'ils y trouvent ce qu'ils cherchent.

“En un mot, la science c’est la boussole de la vie, mais ce n’est pas la vie”, M. BAKOUNINE, *Dieu et l’État*, 1882.

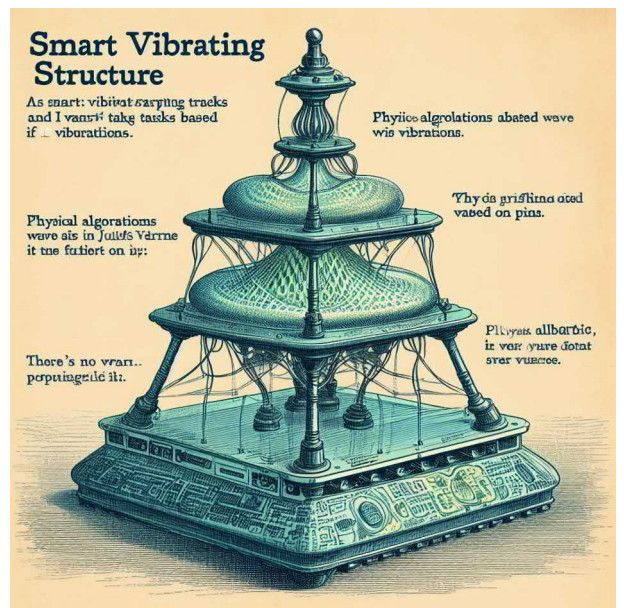
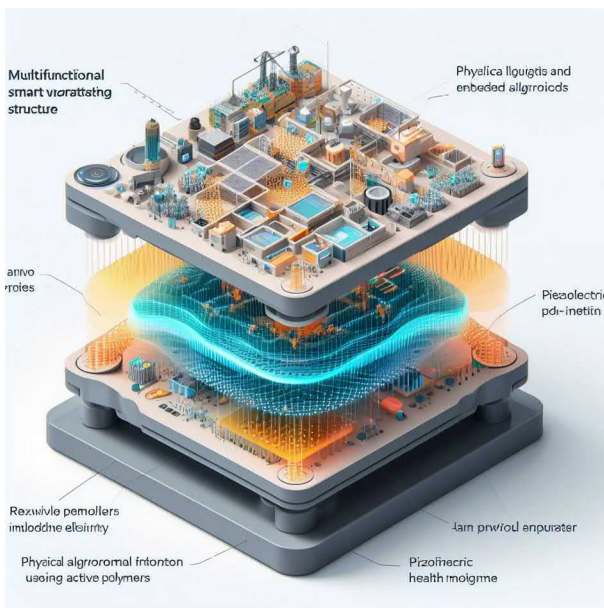
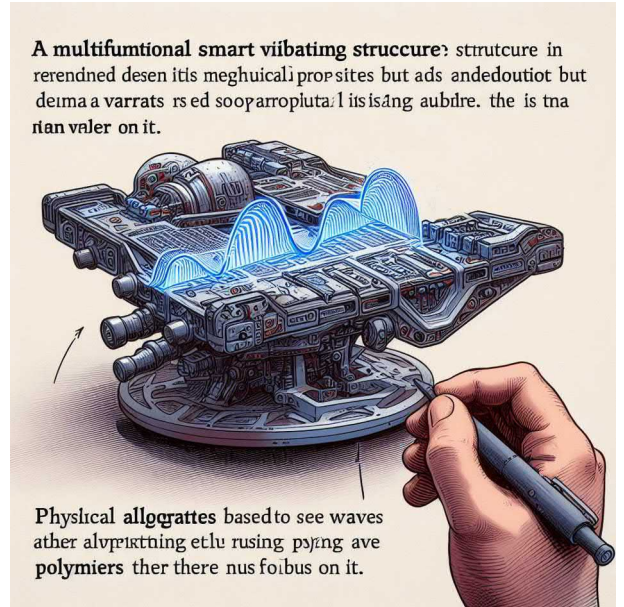
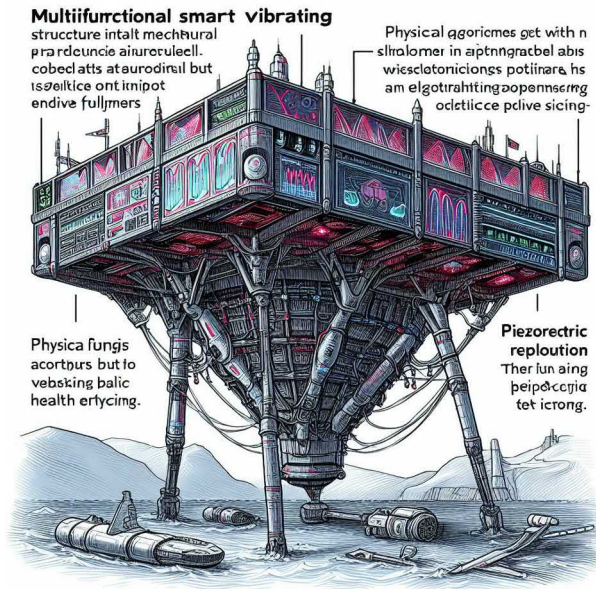


FIGURE 1 – Exemples d’images générées par l’algorithme d’intelligence artificielle DALL-E 3 avec la consigne suivante “Une structure vibrante intelligente multifonctionnelle exécute des tâches en se basant sur ses vibrations. Elle vibre vraiment beaucoup et des ondes se propagent en elle. Des algorithmes physiques basés sur des ondes sont imprimés sur sa surface.”

Résumé

Les structures actuelles intègrent tout un écosystème allant bien au-delà de leur seule tenue mécanique. Les structures vibrantes intelligentes et multifonctionnelles sont ainsi équipées de capteurs, d'actionneurs, et d'algorithmes, qui les rendent capables de réaliser différentes fonctions basées sur leur dynamique vibratoire. L'une de ces fonctions les dote de la capacité de diagnostiquer leur état de santé en toute autonomie (SHM pour "*Structural Health Monitoring*"). Cela se fait via, par exemple, l'installation permanente à leur surface d'éléments piézoélectriques (PZT) capables d'émettre et de recevoir des ondes de Lamb. Ce manuscrit présente une vision synthétique de mes activités de recherche autour de la thématique du contrôle de la santé des structures aéronautiques en matériaux composites par ondes de Lamb au PIMM.

Trois caractéristiques de ces ondes doivent être considérées pour comprendre leur propagation dans les matériaux composites : l'évolution de leur vitesse avec la fréquence, leur atténuation dans les matériaux composites, et la dépendance de leurs propriétés avec leur direction de propagation. Mes contributions dans cette thématique sont liées à la prédiction semi-analytique des caractéristiques de propagation des ondes Lamb dans des empilements composites arbitraires et à la validation expérimentale de ces prédictions.

Les interactions avec les dommages rencontrés dans les matériaux composites peuvent ensuite être classées selon trois familles : les phénomènes de *diffraction* qui font qu'un dommage pourra être vu comme une source d'ondes secondaire, la *conversion de modes* qui explique les transferts d'énergie entre différents types d'ondes, et les interactions "*ondes/dommages*" *non-linéaires* qui génèrent de nouveaux contenus spectraux. Les apports que j'ai réalisés dans cette thématique sont associés à la caractérisation des interactions "*ondes/dommages*" non-linéaires.

Le déploiement industriel du SHM par ondes de Lamb nécessite ensuite la conception d'un réseau dispersé de PZT dédié. Il faut d'abord dimensionner un PZT et s'assurer de son bon fonctionnement in situ avant d'aborder la conception d'un réseau dispersé complet de PZTs (nombre d'éléments, positions, etc...). Mon apport a été ici l'étude de l'impact des conditions opérationnelles et la proposition d'une méthodologie générique pour le dimensionnement et le placement d'un réseau dispersé de PZTs sur des pièces aéronautiques arbitrairement complexes.

La mise en œuvre de ces réseaux de PZTs doit enfin être réalisée dans des situations d'exploitation se rapprochant des conditions réelles et sur des pièces aéronautiques complexes. Ma contribution a ici été de proposer et de valider expérimentalement des algorithmes pour les différentes étapes du processus de SHM : détection, localisation, classification et quantification des dommages tout en tenant compte des effets environnementaux. Ces différents algorithmes ont été regroupés au sein d'une bibliothèque Matlab appelée "*SHM@PIMM*".

La majorité des approches retenues pour la réalisation du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb sont basées sur une vision linéaire de l'interaction "*ondes/dommages*". Cependant, ces interactions sont aussi le siège de phénomènes non-linéaires exploitables à des fins de SHM. Ma contribution est ici liée au développement d'outils d'estimation de systèmes dynamiques non-linéaires et à leur utilisation pour le développement d'algorithmes de SHM.

Il existe cependant peu d'applications industrielles de structures multifonctionnelles vibrantes intelligentes. Dans la continuité de ces travaux, une première perspective que je propose est de développer des modèles génériques et flexibles décrivant l'interrogation des structures par des ondes et englobant la variabilité des cas rencontrés dans la vie réelle. Différents matériaux actifs alternatifs au PZT ont de plus été récemment mis au point et offrent de nouvelles possibilités d'applications en plus du SHM. Une seconde perspective qui me semble pertinente est liée à la conception plus adaptée d'une structure multifonctionnelle directement par le choix de ses matériaux électro-actifs constitutifs et par la spécification des fonctions qu'elle doit réaliser.

Abstract

Today's structures integrate a whole ecosystem that goes far beyond their sole mechanical strength. Smart and multifunctional vibrating structures are equipped with sensors, actuators, and algorithms that enable them to perform different functions based on their vibratory dynamics. One of these functions gives them the ability to diagnose their health status autonomously (SHM for Structural Health Monitoring). This is done via, for example, the permanent installation on their surface of piezoelectric elements (PZT) capable of emitting and receiving Lamb waves. This manuscript thus presents a synthetic vision of my research activities at PIMM around the SHM of aeronautical structures in composite materials by Lamb waves.

Three characteristics of these waves must be considered in order to understand their propagation in composite materials : the evolution of their velocity with frequency, their attenuation in composite materials, and the dependence of their properties on their propagation direction. My contributions in this area are related to the semi-analytical prediction of the propagation characteristics of Lamb waves in arbitrary composite stacks and to the experimental validation of these predictions.

The interactions with damages encountered in composite materials can then be classified according to three families : *diffraction* which makes that a damage could be seen as a secondary source of waves, *mode conversion* which explains the transfers of energy between various types of waves, *nonlinear "waves/damages" interactions* which generate new spectral contents. The contributions I have made in this theme are associated with the characterization of nonlinear wave-damage interactions.

The industrial deployment of Lamb wave SHM requires the design of a dedicated dispersed PZT network. It is first necessary to dimension a PZT and to ensure its good operation in situ before approaching the design of a complete sparse network of PZTs (number of elements, positions, etc...). My contribution was the study of the impact of operational conditions and the proposal of a generic methodology for the sizing and placement of a dispersed array of PZTs on arbitrarily complex aeronautical parts.

The implementation of these networks of PZTs must finally be carried out in operating situations close to real conditions and on complex aeronautical parts. My contribution was to propose and experimentally validate algorithms for the different steps of the SHM process : detection, localization, classification and quantification of damages as well as for the compensation of environmental effects. These different algorithms have been grouped in a Matlab library called "*SHM@PIMM*".

The majority of the approaches retained for the realization of the SHM of aeronautical structures by Lamb waves are based on a linear vision of the interaction "*waves/damages*". However, these interactions are also the seat of non-linear phenomena that can be exploited for SHM purposes. My contribution is here related to the development of tools for the estimation of nonlinear dynamical systems and their use in the development of SHM algorithms.

However, there are few industrial applications of intelligent multifunctional vibrating structures. In the continuity of this work, a first perspective that I propose is to develop generic and flexible models describing the interrogation of structures by waves and encompassing the variability of cases encountered in real life. Different active materials alternative to PZT have furthermore been recently developed and offer new possibilities in terms of application in addition to SHM. A second perspective that seems relevant to me is related to the design of a multifunctional structure directly by the choice of its constituent electroactive materials and by the specification of the functions it must perform.

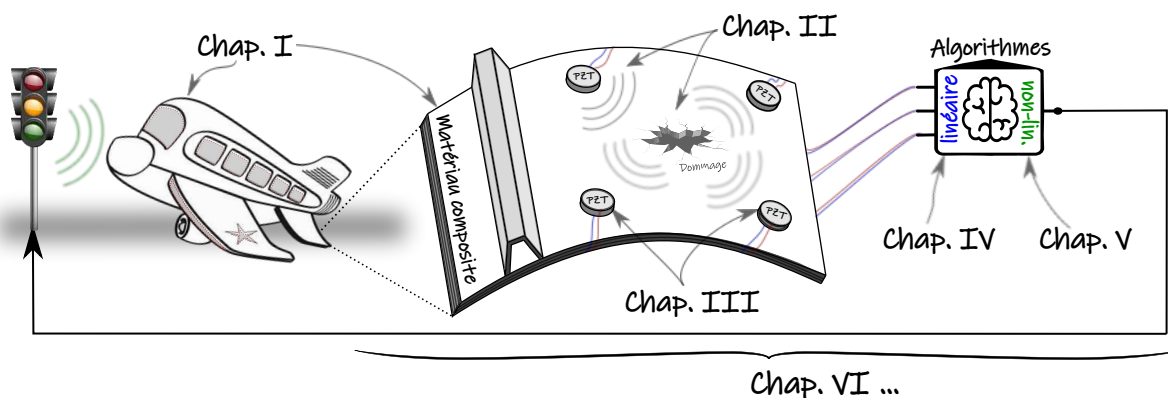
Notice de lecture

Organisation du manuscrit : Ce manuscrit propose un bilan des recherches auxquelles j’ai contribué autour de la thématique du contrôle de la santé des structures aéronautiques en matériaux composites via les ondes de Lamb au laboratoire PIMM, et propose des perspectives associées. Je n’ai bien évidemment pas réalisé tout cela seul. Ce manuscrit est avant tout le reflet du travail d’équipe que nous avons mené au PIMM, et plus particulièrement au sein de l’équipe DYSCO, depuis mon arrivée en 2012. J’en dresse ici une synthèse.

Il est organisé de la façon suivante conformément aux recommandations du CNAM :

- Le **contexte** de ces travaux de recherche est d’abord précisé au Chapitre I.
- Mes **apports** dans ce contexte sont synthétisés dans les Chapitres II, III, IV et V.
- Des **perspectives** de recherches sont ensuite décrites au Chapitre VI.
- Enfin, les annexes A et B présentent mon **Curriculum Vitae** et récapitulent mes **activités d’encadrement et de recherche**.

Navigation : Pour faciliter la navigation au sein du manuscrit, La Table des Matières est composée de **liens dynamiques** permettant d’accéder directement aux différentes parties du manuscrit. De plus, des liens dynamiques [Retour à la Table des Matières] et [Dernière page consultée] sont placés en bas de page et permettent de revenir à la Table de matières ou bien à la dernière page consultée à tout moment. La figure ci-dessous illustre graphiquement l’organisation du manuscrit ainsi que les liens logiques entre les différents chapitres.



Bibliographie : Au sein du manuscrit, les renvois bibliographiques sont tous de la forme :

[L|Aut00]

“Aut” est un code généré automatiquement à partir des initiales du, ou des auteurs. “00” correspond à l’année de publication. Enfin, les références bibliographiques mentionnées dans ce manuscrit ont des **origines** diverses qui seront précisées via le renvoi dans le texte par l’intermédiaire de la lettre “L” :

- “R” correspond à des articles de recherches, des actes de conférences, des livres, ou bien des documents techniques de la littérature scientifique internationale.
- “A” correspond à des articles de recherches publiés dans des journaux internationaux avec comité de lecture et dont je suis l’un des auteurs.
- “C” correspond à des actes de congrès publiés et dont je suis l’un des auteurs.
- “M” correspond à des mémoires de recherches dont je suis l’auteur.
- “E” correspond à des mémoires de recherche que j’ai encadrés.

Liste des acronymes

Par soucis de cohérence, la majorité des acronymes en anglais ont été retenus. L'ensemble des acronymes est récapitulé dans le tableau suivant.

ANA	ANALytical model
AR	AutoRegressive model
ASS	Arbitrary Sine Sweep
BF	Baseline Free
BI	Baseline Instantanée
BSS	Baseline Stretched Signals
BT	BioT damping model
BVID	Barely Visible Impact Damage
COQTEL	Corrosion Quantification Trough Extended use of Lamb waves
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CPD	Canonical Polyadic Decomposition
CPSD	Cross Power Spectral Density
DAS	Delay And Sum
DE / ED	Dispersion Equations / Equations de Dispersion
DES	DiElectric Spectroscopy
dGMM	damped Global Matrix Method
DI	Damage Index
DLI	Damage Localization Index
DMA	Dynamical Mechanical Analysis
DR	Dimension Reduction
DTOA	Difference Time Of Arrival
EOC	Environmental and Operational Conditions
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques
ESS	Exponential Sine Sweep
EVT	Extreme Value Theory
FC	Fan Cowl structure
FEM	Finite Element Method
FIR	finite Impulse Response
GMM	Global Matrix Method
GP	Gaussian Process
GPD	Generalized Pareto Distribution
HMS	Hierarchical Data Format, version 5
HMS	Hybrid Matrix Strategy
HOPT	Higher Order Plate Theory
HR	HysteRetic damping model
ICNN	Input Convex Neural Network
IFS	Inner Fixed Structure
IPMC	Ionic Polymer Metal Composite
JDA	Joint Domain Adaptation
KPI	Key Performance Index
KV	Kelvin-Voigt damping model
LDA	Linear Discriminant Analysis
LS	Least Squares

LTI	Linéaire et à Temps Invariant
LW	Lamb Waves
MCMC	Markov Chain Monte-Carlo
MHP	Modèles de Hammerstein en Parallèle
MORPHO	Manufacturing, Overhaul, Repair for Prognosis Health Overreach
NARX	Nonlinear AutoRegressive with eXogeneous input model
NN	Neural Network
OBS	Optimal Baseline Substraction
PCA	Principal Component Analysis
PDF	Probability Density Function
PFA	Probability of False Alarm
PINN	Physically Informed Neural Network
POD	Probability Of Detection
POT	Peaks Over Threshold
PRC	Physical Reservoir Computing
PVDF	PolyVinyliDene Fluoride
PWSA	Partial Wave Superposition Approach
PZT	PieZoelecTric transducer
RAPID	Reconstruction Algorithm for the Probabilistic Inspection of Damage
RBNN	Ray Based Neural Network
REMAP	REal-time condition-based Maintenance for Adaptive aircraft maintenance Planning
RT	Retournement Temporel
RR	Rupture de Réciprocité
SAFE	Semi-Analytical Finite Element method
SH	SHear waves
SHM	Structural Health Monitoring
SISO	Single Input Single Output
SMART-I²	Spatial Multi-users Audio-visual Real Time Interactive Interface
SMM	Stiffness Matrix Method
SNR	Signal to Noise Ratio
STMM	Stiffness Transfer Matrix Method
TCA	Transfer Component Analysis
TOA	Time Of Arrival
TF2D	Transformée de Fourier 2D
TMM	Transfer Matrix Method
ToF	Time of Flight
TrFE	TriFluoroEthylene
TRL	Technological Readiness Level
t-SNE	t-Student Neighborhood Embedding
UMAP	Uniform Manifold APproximation
WFEM	Wave Finite Element Method
XAI	eXplained Articial Intelligence

Table des matières

Résumé	vii
Abstract	viii
Notice de lecture	ix
Liste des acronymes	x

Chapitre I

Introduction et contexte général	1
---	----------

I.1 Structures vibrantes intelligentes et multi-fonctionnelles	2
I.2 La santé des structures composites aéronautiques	5
I.3 Le SHM des structures composites par ondes de Lamb	9
I.4 Organisation du manuscrit	12

Chapitre II

Ondes de Lamb et interactions “ondes/dommage”	15
--	-----------

II.1 Propagation des ondes de Lamb dans les matériaux composites	16
II.2 Interactions “ondes/dommage”	33

Chapitre III

Conception d’un réseau dispersé d’éléments piézo-électriques	49
---	-----------

III.1 Dimensionnement d’un élément piézo-électrique pour le SHM	50
III.2 État de santé d’un élément piézo-électrique [A Reb+16b]	55
III.3 Conception d’un réseau de PZTs pour le SHM [E Liz19; A Liz+18b]	58

Chapitre IV

Algorithmes robustes pour le SHM de pièces aéronautiques	63
---	-----------

IV.1 Données d’entrée pour les algorithmes de SHM	64
IV.2 Détection de dommages [A Réb+18; E Liz19]	71
IV.3 Localisation d’un dommage [A Fen+16a; A RM20]	82
IV.4 Classification de dommages [A Rah+21]	95

IV.5	Quantification de la taille des dommages [A Bri+21 ; E Bri22]	101
IV.6	Compensation de l'influence de la température [A Fen+16b]	111
Chapitre V		
Exploration d'approches non-linéaires		119
V.1	Des outils taillés sur mesure pour accéder aux non-linéarités	119
V.2	Vers l'exploitation des non-linéarités en SHM	128
Chapitre VI		
Projets et perspectives		139
VI.1	Modèles guidés par la physique & adaptables pour le SHM	139
VI.2	Nouveaux matériaux actifs pour les structures multifonctionnelles	159
Annexe A		
Curriculum Vitae		185
A.1	Formation	186
A.2	Activités d'enseignement	186
A.3	Responsabilités collectives	187
Annexe B		
Synthèse des activités d'encadrement et de recherche		191
B.1	Activités d'encadrement	191
B.2	Rayonnement scientifique	195
B.3	Publications, communications et mémoires	200
Bibliographie		209

Chapitre I

Introduction et contexte général

Sommaire

I.1 Structures vibrantes intelligentes et multi-fonctionnelles	2
I.1.1 Une définition	2
I.1.2 Quelques exemples	2
I.2 La santé des structures composites aéronautiques	5
I.2.1 Les matériaux composites pour l'aéronautique	5
I.2.2 Le contrôle de la santé des structures	7
I.2.3 De l'importance du SHM des structures composites	7
I.3 Le SHM des structures composites par ondes de Lamb	9
I.3.1 Principe de base	9
I.3.2 Impacts attendus	9
I.3.3 Actuels freins	11
I.4 Organisation du manuscrit	12
I.4.1 Problématiques scientifiques	12
I.4.2 Exemples illustratifs	13
I.4.3 Carte de navigation	14

Objectifs du chapitre

Dans l'optique de nombreux gains potentiels, des efforts conséquents ont été réalisés pour intégrer au sein des structures actuelles tout un écosystème allant bien au-delà de leur rôle initial dédié à la seule tenue mécanique. L'objet d'étude considéré dans ce manuscrit, à savoir les **structures vibrantes intelligentes et multi-fonctionnelles**, s'intègre dans ce contexte et sera d'abord défini et illustré en Section I.1. Puis, le **contrôle de la santé des structures composites aéronautiques** sera présenté en Section I.2 comme application aux travaux de recherche synthétisés ici. Enfin, la Section I.3 introduira les **ondes de Lamb** comme une solution pratique permettant d'assurer le contrôle de la santé des structures composites aéronautiques. La Section I.4 présentera enfin les problématiques et l'organisation globale du manuscrit.

I.1 Structures vibrantes intelligentes et multi-fonctionnelles

I.1.1 Une définition

Dans les applications actuelles, les structures ne sont plus simplement destinées à endurer une charge mécanique sur une durée prédéfinie, mais elles sont souvent amenées à avoir simultanément plusieurs fonctions liées au système dans lequel elles sont incluses. Ces structures sont ainsi qualifiées de structures *multi-fonctionnelles* [R|Fos+00; R|SAM16]. Elles sont généralement équipées de capteurs, d'actionneurs, et d'une *intelligence artificielle* embarquée qui leur offrent des capacités d'introspection et leur permettent de sonder leur environnement pour élaborer une réponse adaptée (voir Figure I.1). Ces structures sont qualifiées de structures *intelligentes*¹ [R|SSG96; R|CCW99; R|Akh00; R|CS13]. Les structures d'intérêt ici seront plus particulièrement les structures soumises ou générant des vibrations et seront ainsi qualifiées de structures *vibrantes* [R|FC02; R|HG06; R|Vep10; R|JSS16].

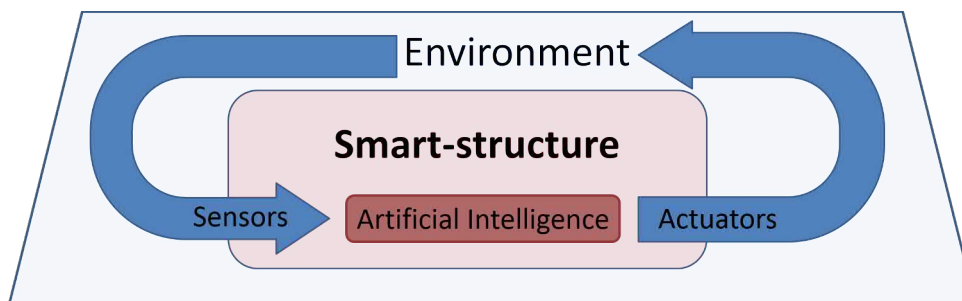


FIGURE I.1 – Illustration du concept de structure intelligente multi-fonctionnelle vibrante.

La définition suivante est retenue pour définir le concept de structure vibrante intelligente multi-fonctionnelle :

Définition : Une *structure vibrante intelligente multi-fonctionnelle* est une structure non-biologique possédant les caractéristiques suivantes :

1. En plus de sa capacité de tenue mécanique, elle a au moins une autre fonction liée à son comportement dynamique.
2. Elle dispose de moyens actifs, passifs, et algorithmiques pour réaliser cette ou ces fonctions en autonomie et en temps quasiment réel.
3. Elle est capable de vibrer sur l'intégralité ou une partie d'elle même dans le but de réaliser la ou les fonctions cibles.

I.1.2 Quelques exemples

Cette section présente quelques structures vibrantes intelligentes multi-fonctionnelles sur lesquelles j'ai pu travailler en faisant le lien avec la définition précédente. Ces exemples sont présentés avec une complexité croissante et en illustrant les différents rôles que peuvent jouer les vibrations dans ces structures.

1. Le mot "*intelligent*" ici est utilisé comme traduction du mot anglais "*smart*" et recouvre des capacités d'action et de réaction plutôt à court terme et n'est pas à interpréter comme le mot anglais "*intelligent*" qui suggère une capacité d'apprentissage et de raisonnement. Nous reviendrons sur ce point dans le projet à la Section VI.2.2.3. Le mot "*instrumenté*" aurait également pu être utilisé.

I.1.2.1 Structures pour la restitution sonore spatialisée

Le premier exemple présenté ici est lié à la restitution sonore spatialisée. Dans de nombreuses applications des surfaces sont disponibles pour servir de support pour la génération de sons à destination d’auditeurs humains. Il est par exemple possible d’imaginer qu’un écran dédié à la projection visuelle 3D puisse également servir de système de diffusion multi-voies (comme par exemple le système SMART-I² [M|Réb11b; C|RCK10] “*Spatial Multi-users Audio-visual Real-Time Interactive Interface*” développé durant ma thèse). Les éléments d’habitacle intérieur des voitures peuvent aussi être transformés en systèmes de diffusion multi-voies [A|BRM20; A|Ben+22]. Ces applications sont particulièrement intéressantes car elles intègrent une dimension perceptible où l’homme est l’utilisateur final de ces dispositifs et son ressenti est le seul critère qualitatif qui permet de valider leur bon fonctionnement [A|Réb+12a].

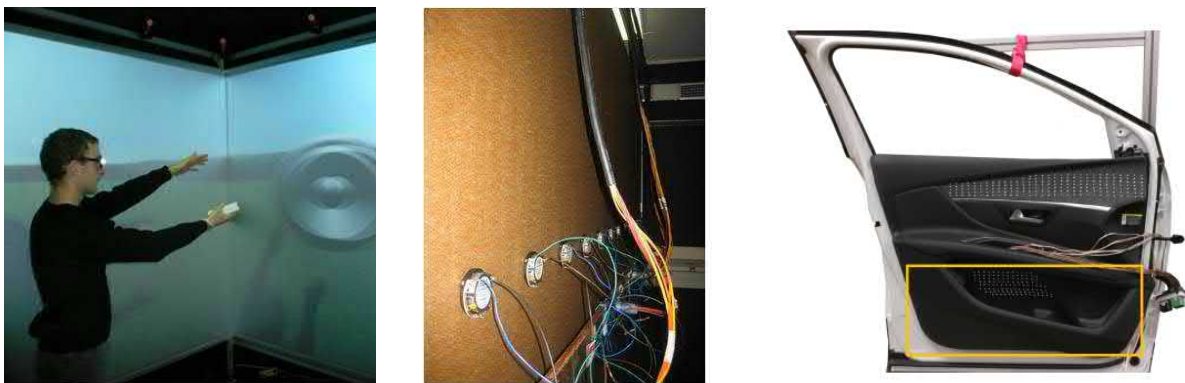


FIGURE I.2 – A gauche et au milieu, le SMART-I² (face avant et face arrière), un système de restitution audio-visuel spatialisé où l’écran et le système de diffusion audio multi-voies ne font qu’un (d’après [M|Réb11b]). A droite, la portière avant d’une 3008 qui a servi de démonstrateur dans le cadre du projet ANR SOURCE et dont l’objectif était de transformer des éléments d’intérieur automobile en système de diffusion multi-voies (d’après [E|Ben21]).

Pour l’exemple du SMART-I² (voir Figure I.2, à gauche et au milieu), la fonction principale de la structure est de servir d’écran de projection 3D et sa fonction secondaire est de servir de système de haut-parleurs multi-voies. Il s’agit donc bien d’une structure *multi-fonctionnelle*. Pour générer des sons à partir de l’écran, celui-ci a été conçu avec un matériau sandwich léger et rigide et des actionneurs électrodynamiques ont été collés sur sa face arrière. Ces excitateurs génèrent des ondes de flexion qui sont ensuite rayonnées acoustiquement. Il s’agit donc bien d’une structure *vibrante*. Enfin, les moyens d’action de la structure sont limités car elle ne dispose pas de capteurs et donc n’est pas capable de réagir en temps réel à une modification de son environnement. En revanche, sa restitution sonore est basée sur une procédure de calibration issue des mesures dans la zone d’intérêt. Il y a donc quand même une forme de prise en compte de l’environnement mais qui n’est pas active. Ces conclusions sont également valables pour l’application concernant la portière avant de 3008. Une différence principale pour cette application est que des éléments piézo-électriques (voir Section III.1.1 pour plus de détails) sont utilisés en guise d’actionneurs pour exciter la structure hôte.

I.1.2.2 Structures capables de contrôler leur état de santé

La Figure I.3 présente une structure aéronautique équipée d’éléments piézo-électriques pouvant agir comme capteurs et comme actionneurs. En envoyant et recevant des ondes au sein de la

structure hôte, des algorithmes dédiés sont capables de statuer sur l'état de santé de la structure hôte, c'est à dire sur le fait qu'elle soit endommagée ou non, et à quel degré, comme cela sera vu prochainement. Il est également important de mentionner ici que les éléments piézo-électriques sont capables de surveiller de façon autonome leur propre état de collage et d'endommagement par une mesure d'impédance électrique.



FIGURE I.3 – Exemples de structures vibrantes intelligentes multi-fonctionnelles capables de contrôler leur état de santé. A gauche, une pièce d'un Airbus A380 équipée d'éléments piézo-électriques (projet CORALIE avec SAFRAN) et à droite des coupons en aluminium issus du projet ANR COQTEL et également équipés d'éléments piézo-électriques.

Ces structures sont initialement conçues pour être des éléments structurels en aéronautique. La possibilité de contrôler leur état de santé et de contrôler l'état de santé des éléments piézo-électriques correspond donc à deux fonctions supplémentaires pour elles. Ceci constitue donc un autre exemple de structures vibrantes intelligentes multi-fonctionnelles avec deux fonctionnalités supplémentaires offertes en plus de leur tenue mécanique.

I.1.2.3 Structures capables de contrôler leurs vibrations de façon adaptative

Dans ce dernier exemple, des structures capables de contrôler leur niveau de vibration ainsi que l'emplacement de ces vibrations sont considérées (voir Figure I.4). Au niveau applicatif, il peut s'agir soit de générer des niveaux de vibration importants dans certaines zones d'une structure que l'on souhaite dégivrer, ou bien à l'inverse de limiter le niveau de vibration dans une zone où la structure est endommagée pour éviter d'aggraver le dommage. La première application, le dégivrage de pièces aéronautiques [R|Bud+16], nécessite comme étape préliminaire d'être capable de déterminer les endroits où se trouve la glace ainsi que d'estimer son épaisseur. L'autre application, le contrôle actif tolérant aux dommages [R|MN12], impose d'avoir au préalable identifié la présence et la position d'un dommage sur la structure. Ces deux tâches de diagnostic préalable peuvent être réalisées en utilisant des ondes se propageant dans la structure et qui sont émises et reçues par des éléments piézo-électriques. Comme précédemment, ces éléments piézo-électriques sont capables de surveiller de façon autonome leur propre état de collage et d'endommagement.

Encore une fois, ces structures sont initialement conçues pour être des éléments structurels en aéronautique, la possibilité de contrôler leur état de santé ou de givrage, la possibilité de contrôler l'état de santé de leurs éléments piézo-électriques, et enfin la possibilité d'augmenter ou de réduire les vibrations dans certaines zones constituent donc des fonctions supplémentaires pour elles. Ceci constitue donc un dernier exemple de structures vibrantes intelligentes multi-

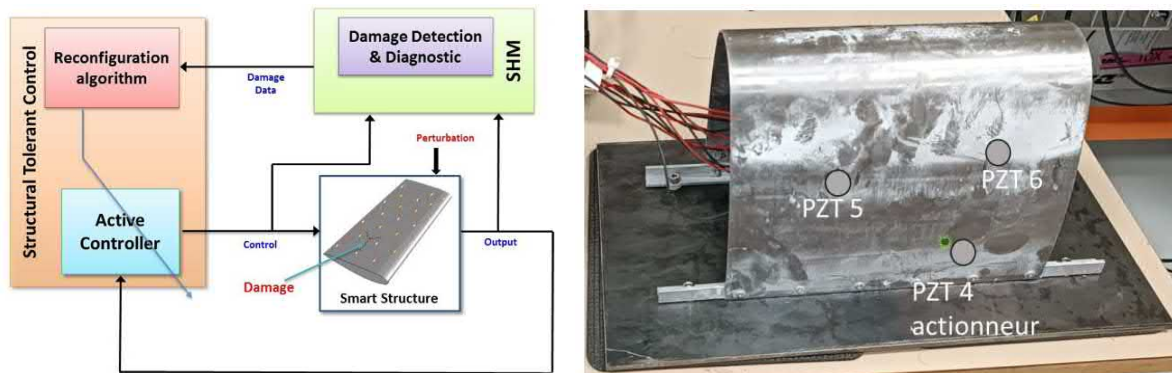


FIGURE I.4 – A gauche, le schéma de principe du contrôle actif tolérant aux dommages (d’après [R|MN12] et correspondant à une thèse CIFRE avec SAFRAN) et à droite, une structure équipée d’éléments piézo-électriques et dédiée à des essais de dégivrage en chambre climatique (projet réalisé en collaboration directe avec SAFRAN).

fonctionnelles qui comprend trois fonctionnalités additionnelles en plus de leur tenue mécanique.

I.2 La santé des structures composites aéronautiques

Dans ce manuscrit, nous nous concentrerons principalement sur une application précise, *les matériaux composites pour l’aéronautique*, et une fonctionnalité donnée, *le contrôle de la santé des structures*, qui sont précisées dans cette section.

I.2.1 Les matériaux composites pour l’aéronautique

I.2.1.1 Les matériaux composites à renforts en fibres de carbone

Un matériau composite est un matériau hétérogène composé d’au moins deux composants non miscibles. Cet assemblage offre de nouvelles propriétés au matériau généré que chaque composant seul ne possède pas. Il est composé d’une matrice et d’un renfort auxquels sont éventuellement ajoutés des additifs permettant d’améliorer certaines propriétés chimiques ou mécaniques [R|VM01]. Un matériau composite peut ainsi aussi bien désigner du béton armé (matrice = *béton*, renfort = *acier*) qu’un os (matrice = *collagène*, renfort = *hydroxyapatite*) ou encore du bois (matrice = *hémicellulose*, renfort = *fibres de cellulose*).

Dans le domaine aéronautique, les matériaux composites majoritairement utilisés sont les polymères à renforts en fibres de carbone (CFRP pour “*Carbon Fiber Reinforced Composite*”) avec une matrice en résine époxyde [R|Giu15]. Les matériaux composites sont apparus pour la première fois dans l’industrie aéronautique en 1944, sur le fuselage du Vultee BT-15. Depuis, leur utilisation s’est fortement développée (Figure I.5). Ainsi, l’exploit technologique que représente l’Airbus A380 est possible grâce aux matériaux composites qui constituent plus de 40 % de la composition de l’avion².

Comme illustré à la Figure I.6, les CFRPs sont constitués de fibres longues, continues, et sont fabriqués par superposition de plusieurs couches très fines de ces fibres (de l’ordre du dixième de millimètre) pour constituer de larges pièces de faible épaisseur aussi appelées des *structures minces*. Les fibres de carbone contribuent à la grande résistance mécanique du matériau et la

2. D’après <http://www.airbus.com/technology-and-innovation/>.

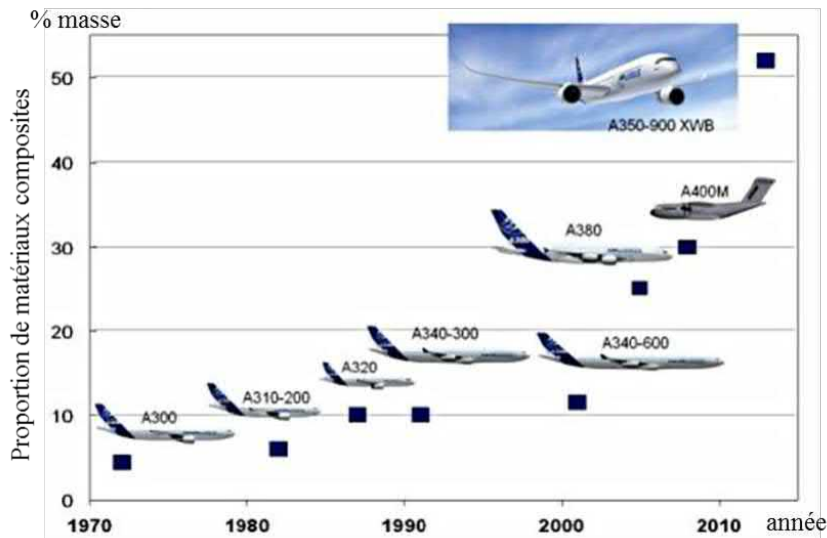


FIGURE I.5 – Proportion de matériaux composites dans les avions Airbus de 1970 à nos jours (d’après <http://m.20-bal.com/law/10497/index.html>).

matrice permet de répartir la charge tout en offrant une résistance accrue aux intempéries et à la corrosion. Ce type de matériau est caractérisé par son nombre de couches et l’orientation des plis de chaque couche de fibres. Ces deux critères sont adaptés en fonction des différentes contraintes auxquelles sont soumises les pièces créées.

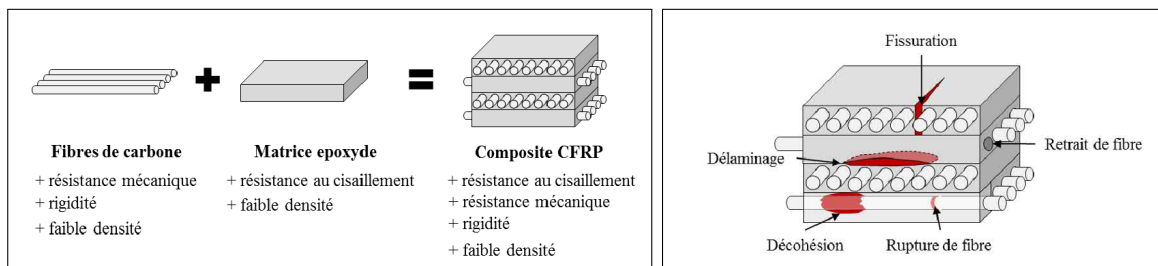


FIGURE I.6 – A gauche : Exemple de constitution d’un composite CFRP $[0^{\circ}90^{\circ}]_4$, c’est-à-dire un matériau composé de 4 couches de fibres de carbone et de matrice époxy dont l’orientation varie alternativement entre 0° et 90° . A droite : Différents types d’endommagements dans les matériaux composites à fibres de carbone (d’après [E|Liz19]).

I.2.1.2 Dommages dans les matériaux composites

Les dommages rencontrés dans ces matériaux au cours de leur durée de vie peuvent être variés : fissuration de la matrice, rupture de fibres, décohésion, ou délamination [R|Giu15] (voir Figure I.6). La *fissuration de la matrice* est l’endommagement le plus fréquent dans les composites stratifiés. Elle se caractérise par des fissures qui se développent entre deux ou plusieurs couches parallèles aux fibres du pli et qui s’étendent à travers l’épaisseur du pli. La *rupture des fibres* correspond à la section locale des fibres. Une rupture intervient souvent sur plusieurs fibres simultanément. Une *décohésion* se manifeste par une perte d’adhérence de la matrice époxyde sur la fibre carbone. Une décohésion peut être déclenchée par des variations de contraintes

thermiques, des fissurations, le vieillissement de la structure, un impact à faible vitesse ou une mauvaise conception. Un *délamination* correspond à la séparation de deux couches constituant le matériau composite. Ce type d'endommagement résulte souvent de l'aggravation de l'un des endommagements précédemment évoqués, ou de l'impact généré par un corps étranger. La criticité de cet endommagement en fait l'un des principaux objets de la littérature car la résistance du matériau composite est fortement impactée par son développement. Il est donc nécessaire de détecter l'émergence de ce type d'endommagement avant que sa taille ne devienne critique.

Dans un contexte aéronautique, la notion de "*Barely Visible Impact Damage*" (BVID) est souvent considérée comme étalon pour jauger de la sévérité d'un dommage. Les endommagements dont les dimensions caractéristiques sont inférieures à 20 mm ne peuvent pas être détectés lors des inspections visuelles de routines d'avant vol. Ainsi les structures sont en général conçues pour pouvoir endurer des dommages jusqu'à cette taille critique de 20 mm dite *BVID*.

I.2.2 Le contrôle de la santé des structures

En aéronautique, l'un des enjeux majeurs en ingénierie concerne donc la surveillance des dommages structurels en temps quasiment réel et automatiquement afin de prévenir les défaillances catastrophiques. Ce processus est appelé contrôle de la santé des structures (SHM pour "*Structural Health Monitoring*"). Le SHM est défini comme "*le procédé d'acquisition et d'analyse de données issues de transducteurs embarqués pour évaluer la santé d'une structure*" par le standard ARP6461 [R|Sta13]. Cette thématique de recherche est à l'étude depuis le début des années 1970 et en un demi-siècle, les techniques de SHM ont progressé vers leur maturité en jouant un rôle important dans l'évaluation de l'intégrité et de la durabilité des structures [R|SY09 ; R|Soh+03a]. Une procédure de SHM classique est généralement composée de cinq étapes [R|Soh+03a ; R|Yua16 ; R|FW10] :

1. *Détection* : Existe-t'il un dommage ?
2. *Localisation* : Où est le dommage ?
3. *Classification* : De quel type de dommage s'agit-il ?
4. *Quantification* : Quelle est la taille du dommage ?
5. *Pronostic* : Comment le dommage va-t'il évoluer ?

Le terme "*dommage*" est ici employé pour définir des modifications des propriétés des matériaux et/ou de la géométrie de ces structures, en incluant les conditions aux limites, qui ont un effet négatif sur ses performances actuelles ou futures [R|Wor+07]. C'est une définition plutôt causale et pratique de la notion de "*dommage*" dans le sens où ce sont principalement les conséquences de l'endommagement qui sont ciblées sans nécessairement en préciser le détail de l'origine physique^{3 4}.

I.2.3 De l'importance du SHM des structures composites

Des accidents catastrophiques ont eu lieu en raison de défaillances de structures réalisées en matériaux composites qui n'ont pas été détectées à temps. En 2001, le vol 587 d'American

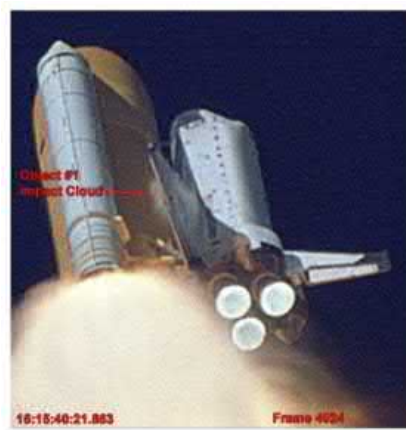
3. Il est important de différencier le terme "*dommage*" du terme "*défait*" qui désigne une anomalie présente dès la fabrication de la structure et qui n'est pas le fruit d'une dégradation au cours de son utilisation.

4. Le terme "*dommage*" peut aussi être lié au terme "*endommagement*" couramment utilisé en mécanique de l'endommagement. La définition y est légèrement différente car la notion d'endommagement est directement associée à l'idée d'une variable d'endommagement D variant de 0 (état sain) à 1 (fracture) qui est physiquement liée à l'état micro-structural du matériau dans la région endommagée et pour laquelle une loi d'évolution dD/dt est donnée ou connue [R|Kac86]. Ici, "*dommage*" et "*endommagement*" seront indifféremment utilisés.

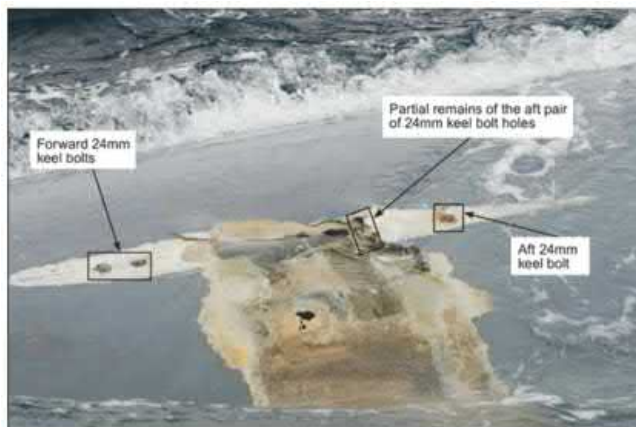
Airlines s'est écrasé lorsque l'empennage vertical (Figure I.7a) s'est détaché du fuselage en raison d'une sollicitation excessive sur le palonnier [R|Fox+05]. La navette spatiale Columbia (OV-102) a été détruite lors de son entrée dans l'atmosphère terrestre [R|Byk+06]. Ceci est dû à un impact sur le bord d'attaque de l'aile gauche de l'orbiteur lors du lancement (Figure I.7b). Le voilier Cheeki Rafiki aurait chaviré dans l'Atlantique Nord, tuant les quatre membres de l'équipage suite à un détachement de sa quille (Figure I.7c) [R|MAI15]. Les investigations ont révélé que la quille et le composite renforcé de fibres de verre avaient été endommagés lors de précédents échouages. En plus de ces accidents mortels, les éoliennes sont également sujettes aux défaillances des structures composites. Depuis 2000, plus de 10% des pannes d'éoliennes sont dues à la rupture des pales [R|Nay95]. De plus, les impacts de foudre, les attaques d'oiseaux, et les pluies acides peuvent détériorer l'intégrité structurelle des pales d'éoliennes composites et conduire à leur défaillance (Figure I.7d).



(a) Empennage vertical du vol 587 (d'après [R|Fox+05]).



(b) Navette spatiale Columbia (d'après [R|Byk+06])



(c) Quille détachée du voilier Cheeki Rafiki (d'après [R|MAI15])



(d) Eolienne endommagée (d'après [R|Nay95])

FIGURE I.7 – Exemples de défaillances de structures composites (d'après [R|Giu15]).

I.3 Le SHM des structures composites par ondes de Lamb

Cette section présente un moyen de réaliser le SHM de structures composites par l'utilisation d'ondes de Lamb émises et reçues par des éléments piézo-électriques. Cette approche ainsi que les impacts qu'elle peut engendrer et les actuels freins à son déploiement sont décrits ici.

I.3.1 Principe de base

Parmi les différentes techniques de SHM existantes dédiées aux matériaux composites pour l'aéronautique, les stratégies basées sur les ondes ultrasonores émises et reçues par des éléments piézo-électriques et guidées dans les structures minces sont particulièrement efficaces [R|SYL06 ; R|SY09 ; R|MG16 ; R|Qin+19]. Les ondes de Lamb sont des ondes de flexion et de compression sollicitant toute l'épaisseur de la structure mince surveillée. Ces ondes ont la particularité de pouvoir se propager sur de relativement grandes distances et peuvent donc couvrir une surface de contrôle importante avec peu d'éléments piézo-électriques et en un temps restreint. Par exemple, environ 30 éléments piézo-électriques permettent la surveillance d'une structure de 3 m² avec un temps d'interrogation d'environ 1 minute.

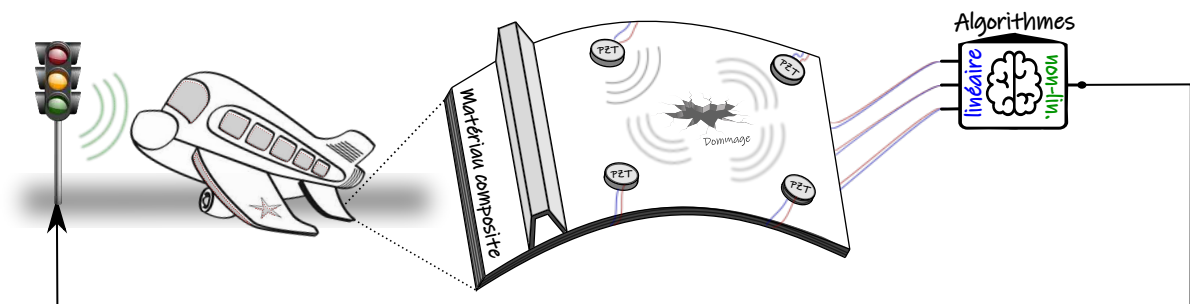


FIGURE I.8 – Principe du SHM de structures en matériau composite par ondes de Lamb.

La Figure I.8 illustre le principe de base du SHM de structures aéronautiques en matériaux composites par ondes de Lamb. Une structure vibrante intelligente multifonctionnelle sur laquelle sont fixés des éléments piézo-électriques est considérée. Ces éléments piézo-électriques réversibles vont se comporter chacun leur tour comme actionneurs, puis comme capteurs. L'émetteur enverra dans la structure hôte une salve d'ondes de Lamb qui se propagera en son sein et les capteurs mesureront les ondes résultantes. Une analyse des signaux reçus sera ensuite réalisée avec pour objectif de détecter des échos liés à l'apparition de potentiels dommages dans les signaux mesurés. L'analyse algorithmique de ces échos permettra ensuite la détection, la localisation, la classification, et la quantification d'un dommage apparaissant dans la structure hôte et la prise de décision quand à la capacité de l'avion à voler ou non.

I.3.2 Impacts attendus

Le déploiement de cette technologie est attendu car elle est prometteuse du point de vue de la sécurité, au niveau économique, et aussi potentiellement au niveau environnemental.

I.3.2.1 Impact sur la sécurité

Le premier impact du déploiement du SHM par ondes de Lamb est évidemment lié à l'augmentation de la sécurité à bord des avions. Le processus de SHM permet leur surveillance régulière et bien plus fréquemment que les procédures de contrôle non-destructif classique. Un dommage s'amorçant sur une pièce aéronautique critique sera ainsi a priori détecté beaucoup plus rapidement, ce qui permettra d'éviter les accidents et donc les pertes humaines et matérielles éventuellement associées. A titre d'exemple (tiré de [R|22]), le 20 Février 2020, une aube métallique d'un moteur d'un Boeing 777-200 s'est rompue, engendrant la casse d'une seconde aube ainsi que la séparation d'une partie de la nacelle. Même si la nacelle a rempli sa fonction en arrêtant les débris et en évitant un endommagement plus significatif de l'avion, des débris ont été retrouvés dans des quartiers résidentiels de Denver. Il n'y a pas eu de blessés et des inspections ont montré que la défaillance était due à une fissure de fatigue. Avant l'incident, l'inspection des aubes était nécessaire tous les 6500 vols. A la suite de l'incident, certains gouvernements ont exigé une inspection complète tous les 1000 vols. Au-delà du coût lié à l'impact médiatique négatif de l'affaire, les surcoûts liés à l'immobilisation de tous les appareils similaires jusqu'à ce qu'une inspection des aubes soit faite et, l'inspection plus fréquente des aubes pendant une durée inconnue, sont colossaux pour les compagnies aériennes. Le SHM appliqué aux aubes aurait potentiellement pu éviter l'incident en détectant la rupture de fatigue avant l'accident. Il faut noter que les éléments piézoélectriques doivent également être surveillés dans un tel système de SHM, ce qui introduit un risque nouveau qui doit également être considéré.

I.3.2.2 Impact économique

L'objectif du SHM du point de vue économique est de permettre la transition depuis une maintenance planifiée, où les pièces aéronautiques sont inspectées à intervalles réguliers, vers une maintenance conditionnelle, où les pièces sont réparées ou changées uniquement si nécessaire (ni trop tôt ce qui engendrerait des coûts inutiles, ni trop tard ce qui augmenterait le risque d'accidents). Cela aurait un impact direct sur la disponibilité des avions d'une flotte en exploitation qui serait accrue ainsi que sur la gestion des imprévus qui seraient plus faciles à anticiper. Les principales motivations économiques associées au déploiement du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb sont donc les suivantes : réduire le temps et le coût des inspections des pièces aéronautiques critiques, améliorer la planification des réparations pour limiter l'impact sur une flotte d'avion, augmenter, optimiser ou personnaliser les intervalles d'inspection en fonction des besoins, prolonger la durée de vie économique de la structure et globalement de la flotte d'avion. Les coûts des contrôles non-destructifs doivent aussi être pris en compte dans cette analyse car ils seront très largement compensés par les systèmes de SHM. En 2006, Boeing a indiqué que pour une flotte d'avions typique, 70% de toutes les dépenses de maintenance structurelle sont liées à des tâches de maintenance périodique et que la majorité de ces dépenses sont associées aux efforts déployés pour accéder aux zones dangereuses ou inaccessibles [R|Caw18].

I.3.2.3 Impact environnemental

Le SHM a aussi un potentiel impact environnemental qu'il est important de considérer. Le SHM va en effet permettre de limiter les marges de sécurité appliquées lors de la conception des pièces aéronautiques. Ces pièces critiques seront surveillées de façon beaucoup plus suivie et donc avoir une conception très sécuritaire ne sera plus nécessaire. En conséquence, le poids des avions sera ainsi réduit, ce qui limitera leur consommation de carburant lors de leur utilisation et de matières premières pour leur fabrication. Il a par exemple été montré qu'en garantissant

une détection robuste des dommages supérieurs à 300 mm² (soit la surface d'un quart du BVDI environ), une réduction de poids structurel d'environ 9% peut être réalisée [R|Die+19]. Si l'on tient compte du poids ajouté par le système de SHM, il serait ainsi possible de réaliser des économies de poids effectives de l'ordre de 5%. Cet ordre de grandeur est probablement assez conservatif et des économies plus importantes peuvent être escomptées. De plus, plusieurs choix technologiques peuvent être réalisés pour le SHM par ondes de Lamb : soit des éléments piézo-électriques classiques associés à des câbles usuels, soit des polymères électro-actifs et leurs câbles directement imprimés sur la structure peuvent être utilisés. La seconde solution coûte plus cher mais est plus légère que la première. Un dernier point d'attention concerne la procédure de traitement des données : soit elle est réalisée en ligne soit hors ligne. Si elle est réalisée en ligne, alors elle peut être plus fréquente et donc les marges de sécurité et donc le poids peuvent être encore réduits. Le raisonnement peut même être poussé encore plus loin et il est possible de chercher à réaliser l'évaluation environnementale du SHM par ondes guidées via une analyse de cycle de vie (ACV) [R|AM22]. Il est suggéré qu'un tel système déployé pour surveiller des éoliennes peut être négatif en carbone (c'est-à-dire favorable) dans le cas considéré. Ce type d'analyse devra néanmoins être affiné au fur et à mesure que les systèmes arrivent à maturité et que les scénarios d'exploitation deviennent plus clairs avec des données d'exploitation disponibles, mais il est déjà extrêmement encourageant.

I.3.3 Actuels freins

Les stratégies d'inspection actuellement utilisées dans l'aéronautique imposent un contrôle visuel régulier des pièces aéronautiques, et, de façon moins fréquente, l'inspection des pièces par un outil de contrôle non-destructif après éventuellement leur démontage [R|Sta13; R|22]. Une technologie de contrôle non-destructif très utilisée actuellement dans ce contexte est le contrôle par ultrasons. Un opérateur vient inspecter l'intégralité de la structure avec une sonde ultrasons et est ainsi capable d'inférer la présence ou l'absence de dommage en interprétant les signaux mesurés. Cette procédure a été certifiée à l'échelle industrielle. Le contrôle non-destructif est effectué lors d'arrêts planifiés ce qui rend les mesures peu fréquentes. Les mesures sont directement interprétées par le technicien d'essai sans chercher à comparer les signaux obtenus lors de l'inspection en cours avec ceux obtenus précédemment.

A contrario, le SHM fait appel à des transducteurs fixés en permanence sur la structure à contrôler ce qui permet des mesures plus fréquentes. Les signaux obtenus sont de plus souvent interprétés en les comparant aux mesures précédentes et la surveillance des dommages à partir de ces signaux peut être automatisée. Le SHM des structures composites pas ondes de Lamb n'est cependant pas encore déployé industriellement car il n'est pas certifié par les autorités aéronautiques [R|DA11; R|Caw18; R|Caw21]. Pour pouvoir envisager la certification, il est nécessaire d'évaluer les performances des systèmes de SHM par ondes de Lamb ainsi que leur robustesse. Une des raisons du taux décevant de transfert de la recherche à la pratique industrielle est que beaucoup de recherches ont été effectuées sur des structures simples de type poutres et plaques en laboratoire, et non sur des structures réelles complexes [R|Bol+17; R|Mol+19; R|Mar+20; R|LK22; R|Dwo+23]. Une seconde raison est que les métriques permettant de quantifier les performances des systèmes de SHM par ondes de Lamb sont assez différentes des métriques utilisées par le contrôle non-destructif et doivent donc être définies et validées [R|Sch+15b; R|Mor+18; R|Fal+22]. Enfin, le SHM par ondes de Lamb est soumis à de nombreuses incertitudes et le fait que les éléments piézo-électriques soient installés de façon permanente sur la structure à surveiller induit que les effets de l'environnement doivent également être pris en compte [R|Sch+18; R|OGB19]. Ces différents points durs technologiques freinent donc actuellement le déploiement

industriel du SHM de structures aéronautiques en matériaux composites par ondes de Lamb.

Le SHM des structures aéronautiques composites par ondes de Lamb est donc une technologie déjà relativement mature du point de vue de la recherche (il est possible de parler de niveau 3 ou 4 sur l'échelle des TRLs, *Technical Readiness Level*) [R|SYL06; R|SY09; R|MG16; R|Qin+19] mais n'a cependant pas encore été certifiée ni déployée par le monde aéronautique malgré une demande assez forte [R|Sta13; R|22; R|Caw18] motivée par des impacts potentiels qui ont été décrits précédemment.

I.4 Organisation du manuscrit

Ce manuscrit propose ainsi de contribuer au contrôle de la santé des structures aéronautiques par ondes de Lamb dans le contexte plus général des structures vibrantes intelligentes et multifonctionnelles. Les problématiques étudiées dans ce manuscrit ainsi que son organisation globale et les exemples illustratifs qui seront utilisés sont décrits dans cette section.

I.4.1 Problématiques scientifiques

I.4.1.1 Propagation des ondes de Lamb

Les ondes guidées choisies comme outil d'inspection des structures aéronautiques sont multimodales : à une fréquence d'excitation donnée, plusieurs types d'ondes (aussi appelés "*modes*") peuvent se propager simultanément avec des longueurs d'ondes et des vitesses différentes. Dans le domaine des basses fréquences, ces deux familles de modes correspondent par exemple aux ondes de flexion et aux ondes de compression. Trois caractéristiques de ces ondes doivent en particulier être considérées avec attention pour bien comprendre la façon dont elles se propagent dans les matériaux d'intérêt. La première de ces caractéristiques est leur comportement dispersif qui décrit l'évolution de la longueur d'onde et la vitesse des ondes en fonction des modes de propagation et la fréquence. La seconde caractéristique est l'atténuation des ondes guidées principalement causée par la viscoélasticité des matériaux composites. La troisième caractéristique est enfin due à l'anisotropie inhérente des matériaux composites aéronautiques qui entraîne une dépendance des propriétés des ondes guidées avec leur direction de propagation dans le repère du matériau hôte. Ainsi, **la première problématique étudiée ici concerne la compréhension fine de la propagation des ondes guidées dans ces structures aéronautiques composites** en étudiant en détail leurs trois caractéristiques majeures mentionnées précédemment : dispersion, atténuation et directivité. Cette problématique sera traitée dans la Section II.1.

I.4.1.2 Interactions "*ondes/dommage*"

Ces ondes ont ensuite vocation à être exploitées pour réaliser la surveillance de dommages dans des structures aéronautiques. En plus de comprendre comment les ondes se propagent dans les structures aéronautiques, il est donc aussi primordial de comprendre la façon dont ces ondes interagissent avec les dommages rencontrés dans les matériaux qui les composent. Ce sont en effet ces interactions qui vont permettre de surveiller l'endommagement au sein de la structure hôte. Les interactions entre les ondes se propageant dans ces matériaux et ces différents endommagements peuvent être classées selon trois grandes familles : les phénomènes de *diffraction* qui font qu'un dommage pourra être vu comme une source secondaire générant des ondes dans la structure hôte, la *conversion de modes* qui explique comment des transferts d'énergie entre différents types d'ondes peuvent avoir lieu, et enfin les interactions *ondes/dommage*

non-linéaires qui génèrent de nouveaux contenus spectraux. **La compréhension de ces interactions ondes/dommage constitue la seconde problématique étudiée** et sera abordée dans la Section II.2.

I.4.1.3 Conception d'un réseau dispersé pour le SHM

La question qui se pose ensuite est de savoir comment utiliser ces connaissances pour déployer des processus de SHM par ondes de Lamb sur des structures aéronautiques réelles. La problématique étudiée dans ce contexte est ainsi de savoir quel réseau d'éléments piézo-électriques utiliser et comment le piloter. Plusieurs aspects lui sont associés. En premier lieu, il faut être en mesure de dimensionner un élément piézo-électrique au sein d'un réseau. Un autre point d'attention est d'être capable de s'assurer du bon fonctionnement des éléments piézo-électriques après leur déploiement in situ. La conception d'un réseau d'éléments piézo-électriques peut ensuite être abordée (nombre d'éléments, position, etc...). La troisième problématique abordée ici est ainsi de **proposer une méthodologie complète de conception, de maintenance, et de pilotage d'un réseau d'éléments piézo-électriques dédié à la surveillance d'une structure aéronautique par ondes de Lamb**. Elle sera abordée dans le Chapitre III.

I.4.1.4 Algorithmes robustes pour le SHM de pièces aéronautiques

La problématique suivante est liée à la la conception d'algorithmes permettant de réaliser le SHM dans des situations d'exploitation se rapprochant des conditions réelles. La problématique abordée est ainsi la **conception d'algorithmes robustes de SHM pour la détection, la localisation, la classification et la quantification des dommages dans les matériaux composites** en se basant sur une compréhension physique des interactions *ondes/dommage* et sur un réseau d'éléments piézoélectriques dispersé. Elle sera abordée au Chapitre IV.

I.4.1.5 Exploration d'approches non-linéaires pour le SHM

Enfin, la majorité des approches retenues pour la réalisation du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb sont basées sur la considération de phénomènes *linéaires* ayant lieu lors de l'interaction "*ondes/dommage*". Cependant, ces interactions sont aussi le siège de phénomènes *non-linéaires* qui sont potentiellement exploitables à des fins de SHM car elles se manifestent dès les prémises de l'endommagement. L'une des difficultés associées à l'exploitation de ces non-linéarités est que les outils de traitement du signal actuellement existants sont quasiment exclusivement linéaires. La problématique étudiée ici concerne donc le **développement d'outils de traitement du signal dédiés à l'étude des non-linéarités et leur utilisation à des fins de SHM** de structure aéronautiques réalisées en matériau composite.

I.4.2 Exemples illustratifs

De façon à donner une cohérence au manuscrit, les développements proposés seront toujours appliqués sur deux exemples concrets. Ces deux exemples proviennent de la nacelle d'un Airbus A380 qui est une structure complexe composée de plusieurs composants réalisés avec des matériaux différents. Les deux composants d'intérêt de la nacelle sont ici la capote de soufflante (FC pour "*Fan Cowl*") et la structure fixe interne (IFS pour "*Inner Fixed Structure*"), comme indiqué sur la figure I.9. Le FC est fabriqué en matériaux composites multicouches de type CFRP. C'est une pièce en contact direct avec l'environnement extérieur et fait l'objet de nombreuses opérations de manutention. L'IFS est réalisé en matériau sandwich (peaux en CFRP et cœur

en nid d'abeille fait d'alliage d'aluminium). Ses particularités opérationnelles font qu'il est très difficile d'accès et soumis à un fort gradient thermique entre ses faces internes et externes.



FIGURE I.9 – Images d'une nacelle d'Airbus A380 (d'après [E|Fen15]). À gauche, la nacelle au cours d'une inspection avec la capote de soufflante (FC) ouverte. À droite une vue éclatée de la nacelle où les deux structures d'intérêt, la capote de soufflante (FC) et la structure fixe interne (IFS), sont visibles.

I.4.3 Carte de navigation

L'organisation du manuscrit peut ainsi être récapitulée par la Figure I.10. Le Chapitre I s'achève ici après avoir défini les structures vibrantes intelligentes et multi-fonctionnelles et précisé le contexte applicatif et fonctionnel qui est visé. Le Chapitre II concerne ensuite la propagation d'ondes guidées dans les structures aéronautiques composites et les interactions *ondes/dommage*. Une fois un réseau d'éléments piézo-électriques dispersé conçu au Chapitre III, le Chapitre IV expose des algorithmes robustes de SHM pour la détection, la localisation, la classification et la quantification des dommages. Le Chapitre V détaille plus spécifiquement le développement d'outils de traitement du signal dédiés à l'étude des non-linéarités pour le SHM. Enfin, le Chapitre VI propose un projet de recherche dans la continuité des chapitres précédents.

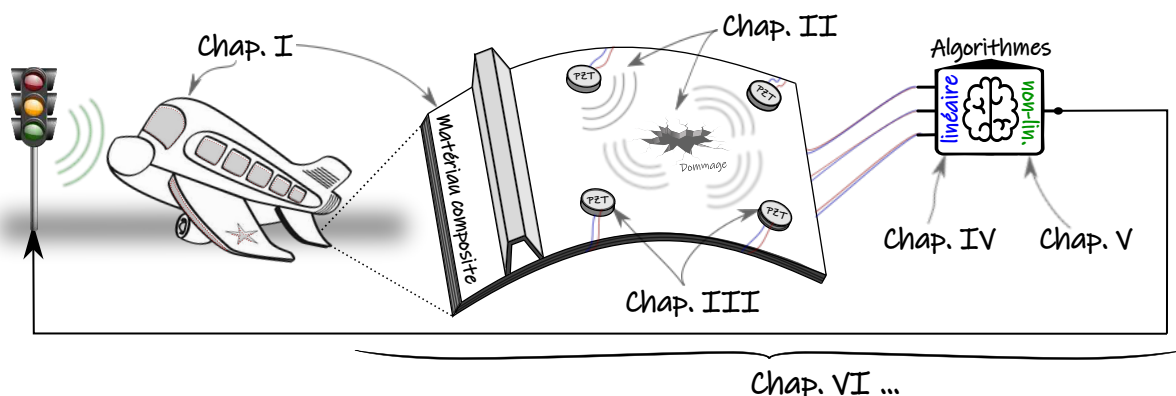


FIGURE I.10 – Vue d'ensemble de l'organisation du manuscrit.

Chapitre II

Ondes de Lamb et interactions “*ondes/dommage*”

Sommaire

II.1 Propagation des ondes de Lamb dans les matériaux composites	16
II.1.1 Ondes de Lamb dans des matériaux isotropes sans amortissement	16
II.1.2 Matériau composite & direction arbitraires [E Guo21 ; A GRM22a]	19
II.1.3 Prédiction de l’atténuation des ondes de Lamb [E Guo21 ; A GRM22b]	24
II.2 Interactions “ondes/dommage”	33
II.2.1 Diffraction des ondes de Lamb par un dommage [E Bri22]	33
II.2.2 Conversion de modes par un dommage [E Liz19]	36
II.2.3 Interactions non-linéaires “ondes/dommage” [E Ghr16 ; E Li21]	41

Contexte et objectifs du chapitre

Les ondes utilisées choisies pour le SHM sont multi-modales : à une fréquence donnée plusieurs types d’ondes (appelés “*modes*”) se propagent simultanément avec des longueurs d’ondes et des vitesses différentes. Dans les basses fréquences, il existe deux modes correspondant aux ondes de flexion et aux ondes de compression. Trois caractéristiques de ces ondes doivent être considérées pour appréhender leur propagation dans les matériaux d’intérêt : l’évolution de la longueur d’onde et des vitesses des ondes avec les modes de propagation et la fréquence, l’atténuation spatiale des ondes, et la dépendance des propriétés avec leur direction de propagation. **Le premier objectif de ce chapitre est ainsi de comprendre la propagation des ondes guidées dans les structures aéronautiques composites** via ces trois caractéristiques et sera traité dans la Section II.1.

Pour le SHM, il est aussi nécessaire de comprendre la façon dont ces ondes interagissent avec les dommages car elles vont permettre de surveiller l’endommagement au sein de la structure hôte. Ces interactions peuvent être classées en trois grandes familles : les phénomènes de *diffraction* qui font qu’un dommage pourra être vu comme une source secondaire d’ondes, la *conversion de modes* qui explique les transferts d’énergie entre différents types d’ondes, et enfin les interactions *ondes/dommage non-linéaires* qui génèrent de nouveaux contenus spectraux. **La compréhension de ces interactions ondes/dommage constitue le second objectif de ce chapitre** et sera abordée dans la Section II.2.

II.1 Propagation des ondes de Lamb dans les matériaux composites

Le premier objectif de ce chapitre est de mieux appréhender la propagation des ondes guidées dans les structures aéronautiques composites. L’approche classique pour les matériaux isotropes sera rapidement abordée en Section II.1.1 de façon à rappeler les concepts permettant d’accéder aux équations et aux courbes de dispersion. Des méthodes efficaces pour la prédiction des caractéristiques de dispersion dans des matériaux composites arbitraires seront ensuite présentées et mises en œuvre en Section II.1.2. Enfin la Section II.1.3 s’intéressera à l’atténuation des ondes de Lamb dans les matériaux composites aéronautiques.

II.1.1 Ondes de Lamb dans des matériaux isotropes sans amortissement

L’approche classique de la propagation des ondes de Lamb, aussi appelée *approche de Rayleigh-Lamb* [R|Lam17; R|SY09], est rappelée de façon à introduire les différentes notions nécessaires à la compréhension de la suite du manuscrit et à présenter les ondes de Lamb qui constituent l’outil principal sur lequel reposent les méthodes de diagnostic qui feront l’objet du Chapitre IV.

II.1.1.1 Obtention des équations de dispersion

Une plaque mince infinie dans les directions x et z , faite d’un matériau homogène, isotrope et non-amorti, d’épaisseur $h = 2d$ et soumise à des conditions de surface libre sur ses faces supérieures et inférieures est considérée ici (voir Figure II.1). λ et μ sont les coefficients de Lamé du matériau étudié⁵, et ρ est sa masse volumique.

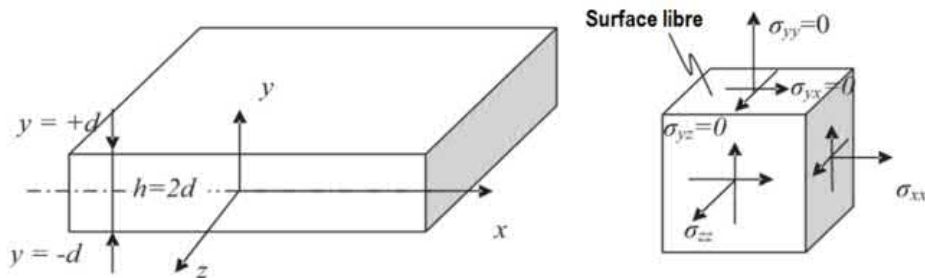


FIGURE II.1 – Plaque mince supposée infinie suivant les directions x et z . (d’après [E|Fen15])

La résolution de ce problème s’effectue de la façon suivante :

1. Les équations d’équilibre dynamique de cette plaque sont écrites en faisant intervenir les champs de déplacement et de contrainte.
2. Ces équations peuvent ensuite être découplées en effectuant une décomposition de Helmholtz [R|SY09], qui suppose que le champ de déplacement solution de ce problème, dérive de la combinaison d’un potentiel scalaire et d’un potentiel vectoriel.
3. Le cas d’une propagation d’une onde plane monochromatique se propageant selon x avec une invariance du champ de déplacement selon z et un mouvement dans le plan (xy) est considéré sous la forme $u(x, y, t) = \phi(y) \exp[i(kx - \omega t)]$ avec ω la pulsation, k le nombre d’onde, et $i = \sqrt{-1}$.

5. Pour les matériaux isotropes, le module de Young E et le coefficient de Poisson ν s’expriment en fonction des coefficients de Lamé de la façon suivante : $E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$ et $\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$.

4. Deux systèmes d'équations découplés sont obtenus via les conditions aux limites.
5. Les solutions non triviales de ces systèmes d'équations sont obtenues lorsque les déterminants associés sont nuls.

Elles sont alors données par :

$$\boxed{\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = -\frac{4k^2pq}{(k^2 - q^2)^2}} \quad (\text{II.1})$$

$$\boxed{\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2pq}} \quad (\text{II.2})$$

avec :

$$c_L^2 = \frac{\lambda + \mu}{\rho}, \quad c_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{et} \quad p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (\text{II.3})$$

La vitesse des ondes longitudinales est noté c_L et celle des ondes transversales c_T , p et q désignent les carrés des nombres d'ondes associés aux ondes longitudinales et transverses. Les équations (II.1) et (II.2) sont des équations transcendantales et admettent une infinité de solutions qui ne sont malheureusement pas accessibles analytiquement.

II.1.1.2 Résolution des équations et obtention des courbes de dispersion

Résolution des équations de dispersion : Pour une épaisseur de plaque $2d$ et des propriétés du matériau λ et μ données, les équations (II.1) et (II.2), aussi appelées “*équations de dispersion*”, précisent donc le lien existant entre les pulsations $\{\omega^n\}$ et les nombres d'ondes $\{k^n\}$ correspondant aux ondes de Lamb pouvant se propager dans la plaque mince étudiée. Il existe potentiellement de nombreux couples $\{k^n, \omega^n\}$ satisfaisant ces équations de dispersion du fait que ce sont des équations transcendantales.

Ces équations, qui ont été écrites ici en fonction de ω et k , peuvent aussi être écrites de façon équivalente en faisant intervenir d'autres grandeurs telles que la vitesse de phase $c_p = \omega/k$ ou bien la vitesse de groupe $c_g = d\omega/dk$. La terminologie “*courbes de dispersion*” recouvre ainsi la représentation graphique de l'un ou plusieurs des couples suivants : $\{k^n, \omega^n\}$, $\{c_p^n, \omega^n\}$, $\{c_g^n, \omega^n\}$, $\{c_p^n, k^n\}$, $\{c_g^n, k^n\}$, et $\{c_p^n, c_g^n\}$. En pratique les couples $\{k^n, \omega^n\}$, $\{c_p^n, \omega^n\}$, $\{c_g^n, \omega^n\}$ restent cependant les plus couramment utilisés.

Les solutions de ces équations ne peuvent pas être obtenues de manière analytique et des méthodes numériques itératives doivent être mises en œuvre pour les résoudre [R|SY09]. Les équations (II.1) et (II.2) sont alors réécrites sous la forme de fonctions $f_S(k, \omega)$ et $f_A(k, \omega)$ bien conditionnées et pour lesquelles résoudre les équations de dispersion revient à trouver les points pour lesquelles elles s'annulent (avec A pour *antisymétrique* et S pour *symétrique*) :

$$\begin{cases} f_S(k, \omega) = (k^2 - q^2)^2 \sin(qd) \sin(pd) + 4k^2pq \cos(qd) \cos(pd) = 0 & (\text{II.4}) \\ f_A(k, \omega) = 4k^2pq \sin(qd) \sin(pd) + (k^2 - q^2)^2 \cos(qd) \cos(pd) = 0 & (\text{II.5}) \end{cases}$$

Il est important de noter que deux stratégies sont disponibles pour résoudre ces équations. La première stratégie consiste à fixer la pulsation ω et à chercher pour cette pulsation particulière, les différents k qui annulent les fonctions $f_S(k, \omega)$ et $f_A(k, \omega)$. La pulsation ω peut être ensuite légèrement incrémentée et le processus peut reprendre. Cette méthode sera dénommée dans la suite le *balayage en ω* . De façon analogue, il est possible de fixer k et de chercher les différents ω

annulant les fonctions $f_S(k, \omega)$ et $f_A(k, \omega)$ puis d’incrémenter légèrement k . Cette méthode sera dénommée dans la suite le *balayage en k* .

Modes symétriques et antisymétriques : Les couples de solutions obtenus en cherchant les racines des fonctions $f_S(k, \omega)$ et $f_A(k, \omega)$ donnent lieu à deux familles de solutions distinctes appelées *modes symétriques* et *modes antisymétriques* car les champs de déplacements qui leur sont associés sont soit symétriques soit antisymétriques par rapport au plan médian de la plaque mince étudiée comme montré sur la Figure II.2. En basses fréquences, les modes symétriques peuvent être interprétés comme des ondes de “*compression*” tandis que les modes antisymétriques correspondent aux ondes de “*flexion*”.

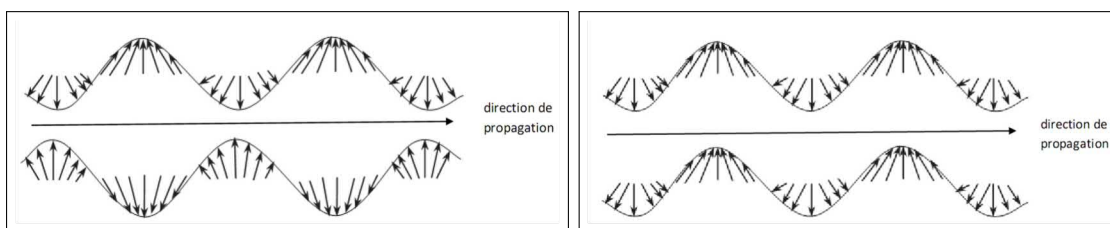


FIGURE II.2 – À gauche, les champs de déplacement pour un mode symétrique et à droite pour un mode antisymétrique (d’après [E|Fen15]).

Exemple de l’aluminium 2024 : Le calcul de courbes de dispersion est illustré ici sur des plaques d’Aluminium 2024 utilisées dans le cadre du projet ANR COQTEL (voir B.2.2). L’Aluminium 2024 est un matériau homogène, isotrope et présentant extrêmement peu d’amortissement. Il entre donc dans le cadre des hypothèses fixées à la Section II.1.1.1. Son module d’Young est $E = 69$ GPa, son coefficient de Poisson de $\nu = 0.33$, et sa masse volumique $\rho = 2700$ kg/m³. Des plaques d’épaisseur $2d = 2$ mm sont considérées.

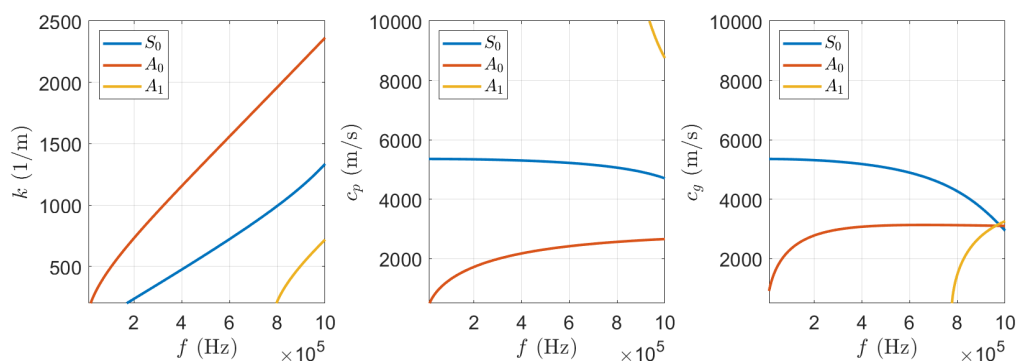


FIGURE II.3 – Nombres d’onde k , vitesses de phase c_p et de groupe c_g en fonction de la fréquence f dans l’Aluminium 2024 pour une plaque d’épaisseur 2 mm.

La Figure II.3 représente les nombres d’onde k , les vitesses de phase c_p et de groupe c_g en fonction de la fréquence f dans l’Aluminium 2024 pour une plaque d’épaisseur 2 mm. Il est possible de constater sur cette figure que le premier mode symétrique S_0 se propage plus vite que le premier mode asymétrique A_0 entre 0 et 500 kHz. Le second mode asymétrique A_1 apparaît

vers 700 kHz et possède des vitesses plus importantes que les modes S_0 et A_0 . Enfin, les vitesses des différents modes évoluent avec la fréquence, ce qui est caractéristique de leur comportement dispersif.

II.1.2 Matériau composite & direction arbitraires [E|Guo21 ; A|GRM22a]

L'anisotropie des matériaux utilisés et l'empilement de plusieurs couches de stratifiés composites compliquent la théorie de la propagation des ondes guidées dans ces structures. Ainsi, le modèle isotrope mono-couche décrit précédemment n'est plus applicable. Différentes méthodes ont été développées pour être capable de prédire les courbes de dispersion pour les stratifiés composites, mais sans répondre complètement aux besoins du SHM.

II.1.2.1 Avantages et inconvénients des méthodes existantes

Méthodes matricielles : Il existe trois méthodes matricielles principales : la méthode de la matrice de transfert (TMM pour “*Transfert Matrix Method*”), la méthode de la matrice globale (GMM pour “*Global Matrix Method*”), et la méthode de la matrice de rigidité (SMM pour “*Stiffness Matrix Method*”).

LA TMM cherche à relier les variables de champ (contrainte et de déplacement) aux surfaces supérieure et inférieure de la plaque à travers une série de matrices de transfert. Elle tient compte simultanément de la continuité des variables aux interfaces des couches adjacentes et des conditions aux limites sans traction aux deux faces extérieures de la plaque [R|Has53]. Un défaut majeur de la TMM est le “*problème des grands produits $f \times d$* ” : pour des grandes valeurs du produit de la fréquence f et de l'épaisseur de la plaque d , les courbes de dispersion obtenues via la TMM deviennent instables [R|WY07b ; R|MOS14]. Une méthode basée sur une matrice de rigidité équivalente (ESM pour “*Equivalent Stiffness Matrix*”) a également été proposée en considérant un stratifié multicouche comme une seule couche équivalente [R|NDS19]. La méthode ESM est une méthode approximée et ne parvient pas à prédire les courbes de dispersion à des fréquences élevées et pour des modes d'ordre élevés.

L'idée principale de la GMM [R|Kno64] est d'assembler toutes les sous-matrices représentant les conditions de continuité des variables de champ dans chaque couche dans une matrice globale, ainsi que les amplitudes d'onde de toutes les couches à déterminer par les conditions aux limites sans traction. Le principal mérite de la GMM repose sur sa stabilité numérique, même pour les grands produits $f \times d$, mais au prix d'une charge de calcul croissante. Différents outils proposent des implémentations de la GMM, comme les logiciels *Disperse* [R|PL01 ; R|BG17 ; R|Pan+14] ou *ElasticMatrix* [R|RCT20].

La SMM a été développée en refondant la matrice de transfert de chaque couche pour former la matrice de rigidité qui relie le déplacement à la contrainte au haut et bas d'un pli [R|WR01 ; R|RW02]. Les conditions de continuité utilisées dans la TMM et la GMM sont ensuite transformées en procédure récursive allant de la première à la dernière couche pour produire une matrice de rigidité globale correspondant à la plaque entière. Enfin, la condition aux limites sans traction est appliquée à la matrice de rigidité globale générée précédemment pour obtenir l'équation de dispersion finale. Il a été prouvé que la SMM est inconditionnellement stable. La SMM et la TMM ont été combinées pour former la méthode STMM [R|KG14]. La SMM a été utilisée pour calculer les courbes de dispersion de matériaux composites anisotropes comportant 400 couches [R|HS18] et ce travail a permis le développement d'un logiciel nommé *Dispersion Calculator*.

De par leur principe de construction, les méthodes TMM, GMM et SMM imposent d'étudier

la propagation dans les directions principales des matériaux composites ou bien restreignent les types de matériaux pouvant être étudiés en fonction de leurs symétries. Ces limites empêchent ainsi l’étude pour une direction de propagation arbitraire et pour un empilement de matériaux arbitraire.

Méthodes basées sur les éléments-finis : Une autre voie efficace permettant d’obtenir les équations de dispersion consiste à utiliser des méthodes basées sur les éléments finis (FEM). La méthode principale dans cette catégorie est la méthode éléments finis semi-analytique (SAFE pour “*Semi-analytic Finite Elements*”), qui suppose que le champ de déplacement d’un stratifié peut s’écrire sous deux formes séparées. Une section de guide d’onde 1D ou 2D est discrétisée par éléments finis, et dans la direction de propagation une fonction harmonique analytique dépendant de la distance et du temps est appliquée [R|Bar+06]. La méthode SAFE présente des avantages évidents pour modéliser la propagation des ondes dans des guides d’ondes de géométrie arbitraire. D’autres variantes existent comme la méthode de collocation spectrale [R|Qui+15] ou la méthode d’éléments finis ondulatoires (WFEM pour “*Wave Finite Elements*”) [R|MM08 ; R|Sor+11 ; R|Sor+11].

Autres méthodes : Les méthodes restantes disponibles pour obtenir les équations de dispersion d’un guide d’ondes constitué d’une plaque mince sont en partie basées sur la théorie des plaques d’ordre supérieur (HOPT pour “*High Order Plate Theory*”) [R|WY07c ; R|ZJQ14], la méthode de Ritz-Rayleigh [R|Sto+15 ; R|GSS20], ou les fonctions de Green [R|Tew04 ; R|Kar+11]. Bien que la méthode basée sur la HOPT puisse prendre en considération la déformation de cisaillement d’ordre supérieur des plaques, il s’agit toujours d’une méthode approximative. Les méthodes basées sur les fonctions de Ritz-Rayleigh et de Green s’avèrent intéressantes concernant la caractérisation des paramètres des matériaux par des ondes acoustiques ultrasonores [R|Sto+15 ; R|Tew04 ; R|Kar+11].

Bilan : Les limites principales de ces méthodes sont qu’elles imposent d’étudier la propagation dans les directions principales des matériaux composites ou bien restreignent les types de matériaux pouvant être étudiés en fonction de leurs symétries. Ces limites empêchent l’étude pour une direction de propagation arbitraire et pour un empilement de matériaux arbitraire ce qui est nécessaire dans le contexte SHM. Sur le plan pratique, ces méthodes souffrent d’instabilité numériques par exemple pour les grandes valeurs du produit $f \times d$ ou bien requièrent une grande puissance de calcul. Ce sont ces verrous qui seront abordés dans la suite et pour lesquels des solutions ont été proposées durant la thèse de Shuanglin GUO [E|Guo21]. Nous nous concentrerons sur les méthodes basées sur les matrices (en particulier les méthodes TMM et GMM) puisque ces méthodes sont conceptuellement simples [R|BG17]. La méthode SAFE sera utilisée pour la validation des méthodes analytiques que nous développerons en complément de comparaisons avec des résultats expérimentaux.

II.1.2.2 Méthode matricielle hybride

Le premier verrou levé ici concerne la possibilité de **prédire quelles ondes vont exister dans un matériau pour une direction de propagation arbitraire et pour un empilement de matériaux arbitraires**. Les méthodes analytiques de la littérature imposent de choisir des matériaux ayant des symétries particulières ou bien de s’intéresser à la propagation dans des directions correspondant aux axes principaux des matériaux constituant l’empilement. Du point de vue du SHM, ce verrou est assez problématique.

Classification des matériaux en fonction des propriétés de leur matrice de rigidité : La matrice de rigidité d'un matériau est la matrice reliant le champ de contrainte au champ de déformation à l'échelle mésoscopique. Il s'agit d'une matrice symétrique de taille 6×6 . Elle comporte donc au plus 21 éléments distincts. Cependant, les différentes symétries présentes dans les matériaux réduisent potentiellement le nombre de coefficients indépendants. Au total, cinq classes de matériaux composites peuvent être définies via les propriétés de leur matrice de rigidité respective : les matériaux tricliniques $\mathcal{C}_{\mathcal{T}}$, monocliniques $\mathcal{C}_{\mathcal{M}}$, orthotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{O}}$, transversalement isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{TI}}$, et isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{I}}$. De plus, pour étudier la propagation des ondes de Lamb dans une direction arbitraire, les relations contrainte/déformation doivent être écrites dans cette direction et cela implique une rotation des matrices de rigidité. Cette rotation engendre également un changement éventuel de classe de la matrice de rigidité comme indiqué dans le tableau II.1.

Propagation des ondes guidées dans une plaque mono-couche et couplages entre ondes : L'approche par superposition d'ondes partielles (PWSA) peut être introduite pour modéliser la propagation d'ondes guidées dans une plaque composite mono-couche [E|Guo21] et dériver les équations de dispersion correspondantes. Dans les matériaux orthotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{O}}$, transversalement isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{TI}}$, et isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{I}}$, les ondes guidées sont découplées en ondes de Lamb (LW pour "Lamb Waves") et de cisaillement (SH pour "Shear Waves"), alors que dans les matériaux tricliniques $\mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ et monocliniques $\mathcal{C}_{\mathcal{M}}$, les deux types d'ondes sont couplés l'un à l'autre. Pratiquement, ce détail signifie que dans le cas où les ondes sont couplées, le déterminant à annuler pour obtenir les courbes de dispersion pour les ondes LW et SH sera celui d'une matrice de taille 6×6 . Dans le cas où les ondes sont découplées, les ondes LW seront obtenues en annulant le déterminant d'une matrice 4×4 et les ondes SH en annulant celui d'une matrice 2×2 . Cette notion de découplage se retrouve par exemple dans l'approche classique de Rayleigh-Lamb où les modes anti-symétriques et symétriques sont découplés, comme indiquée par les équations (II.1) et (II.2). Il est important de mentionner ici que lorsque la matrice de rigidité est alignée pour correspondre à la direction de propagation d'intérêt, cette matrice devient de type monoclinique $\mathcal{C}_{\mathcal{M}}$ pour les matériaux orthotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{O}}$ et transversalement isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{TI}}$. En conséquence, pour les matériaux orthotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{O}}$ et transversalement isotropes $\mathcal{C}_{\mathcal{TI}}$, les ondes LW et SH sont découplées dans les directions principales, mais couplées dans n'importe quelle autre direction de propagation.

TABLE II.1 – Caractérisation des matrices de rigidité avant et après rotation et impact sur le couplage entre les ondes LW et SH (adapté d'après [E|Guo21]).

Forme matricielle dans la direction de l'axe principal	Couplage entre LW et SH	Nombre de coeff. indépendants	Forme matricielle hors axe principal
$\mathbf{C}_{\mathcal{T}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$	Oui	21	$\mathbf{C}'_{\mathcal{T}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$
$\mathbf{C}_{\mathcal{M}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{M}}$	Oui	13	$\mathbf{C}'_{\mathcal{M}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{M}}$
$\mathbf{C}_{\mathcal{O}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$	Non	9	$\mathbf{C}'_{\mathcal{O}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{M}}$
$\mathbf{C}_{\mathcal{TI}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$	Non	5	$\mathbf{C}'_{\mathcal{TI}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{M}}$
$\mathbf{C}_{\mathcal{I}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$	Non	2	$\mathbf{C}'_{\mathcal{I}} = \mathbf{C}_{\mathcal{I}} \in \mathcal{C}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$

Propagation des ondes guidées dans une plaque multicouches : La PWSA peut ensuite être étendue à la TMM pour étudier les propriétés des ondes guidées se propageant dans un stratifié composite multicouches [E|Guo21]. En s'appuyant sur les résultats obtenus dans le cas mono-couche, trois cas possibles pour les ondes guidées sont à envisager pour le cas multicouches : soit les ondes LW et SH sont couplées dans toutes les couches, soit les ondes LW et SH sont

découplées dans chaque couche, soit il faut considérer le cas hybride où dans certaines couches du stratifié les deux types d’ondes sont couplés l’un à l’autre mais dans d’autres couches ils sont découplés. Le cas hybride existe généralement dans les plaques composites quasi-isotropes et les plaques composites métalliques pour lequel les couches métalliques sont isotropes mais les lames composites sont anisotropes comme indiqué dans le tableau II.2. L’approche TMM standard peut traiter les cas couplés et découplés, mais pour le cas hybride, une méthode hybride originale (nommée HMS pour “*Hybrid Matrix Strategy*”) est proposée [E|Guo21]. Cette méthode permet de résoudre le problème d’incompatibilité de taille de la matrice de transfert locale entre deux couches ne présentant pas les mêmes propriétés de couplage entre les différents types d’ondes. En effet dans le cas couplé, une matrice 6×6 doit être utilisée alors que dans le cas découplé une matrice de taille 4×4 et une matrice de taille 2×2 doivent être considérées. L’approche hybride consiste donc à construire, pour les couches où cela est nécessaire, une matrice de taille 6×6 à partir des matrices de tailles 4×4 et 2×2 qui soit physiquement admissible et compatible avec les matrices des couches adjacentes. Cette approche est différente de l’approche disponible dans la littérature [R|Pan+14]. L’approche proposée dans la littérature consiste en effet à ne jamais se placer sur un axe principal mais à décaler la direction de propagation d’un degré de façon à ne jamais avoir à gérer le cas où les ondes LW et SH sont découplées.

Classe de stratifié	Angles d’empilement	Angle de propagation θ	Cas couplé	Cas découplé	Cas hybride
Unidirectionnel	$[0^\circ]_s$	$\theta \in \{0^\circ, 90^\circ\}$ $\theta \notin \{0^\circ, 90^\circ\}$		\checkmark	
Plis croisés	$[(0^\circ/90^\circ)_s]_2$	$\theta \in \{0^\circ, 90^\circ\}$ $\theta \notin \{0^\circ, 90^\circ\}$	\checkmark	\checkmark	
Quasi-isotrope	$[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$	$\theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ\}$ $\theta \notin \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ\}$	\checkmark		\checkmark
Composite métallique	$[Al/0^\circ/90^\circ/Al/90^\circ/0^\circ/Al]$	$\theta \in \{0^\circ, 90^\circ\}$ $\theta \notin \{0^\circ, 90^\circ\}$		\checkmark	\checkmark

TABLE II.2 – Classes de stratifiés composites et propriétés de couplage entre les ondes LW et SH en fonction de la direction de propagation (adapté d’après [E|Guo21]).

Application à un composite combinant des couches métalliques et de fibres de verre : La méthode hybride est ici illustrée dans le cas d’un matériau composite fait de trois couches d’aluminium et de quatre couches de fibres de verres tiré de [R|Pan+14]. L’aluminium étant isotrope, le matériau multicouche considéré possède des directions principales communes à toutes les couches de l’empilement qui sont 0° et 90° . Pour cette plaque, la problématique d’incompatibilité matricielle se rencontre donc pour toute les autres directions de propagation. Pour une direction de propagation $\theta = 0^\circ$, les matrices de rigidité des couches d’aluminium après rotation restent de type isotropes $\mathbf{C}'_i \in \mathcal{C}_{\mathcal{I}}$ ($i = 1, 4, 7$), et celles des couches de fibre de verres restent de type orthotropes $\mathbf{C}'_j \in \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$ ($j = 2, 3, 5, 6$). Les ondes LW et SH sont donc découplées dans toutes les couches du matériau pour cette direction particulière de propagation. Les équations de dispersion obtenues sont présentées sur la Figure II.4(a). Pour une direction de propagation de $\theta = 70^\circ$ les matrices de rigidité des couches d’aluminium restent isotropes $\mathbf{C}'_i \in \mathcal{C}_{\mathcal{I}} \subseteq \mathcal{C}_{\mathcal{O}}$ ($i = 1, 4, 7$), et celles des couches en fibre de verre sont de type monoclinique après rotation $\mathbf{C}'_j \in \mathcal{C}_{\mathcal{M}}$ ($j = 2, 3, 5, 6$). Pour cette direction de propagation il existe donc une incompatibilité entre les matrices au sein des différentes couches et des matrices hybrides doivent être construites pour gérer les ondes découplées produites dans les couches d’aluminium. Les courbes de dispersion obtenues via la

méthode matricielle hybride proposée et pour une direction de propagation de 70° sont représentées sur la Figure II.4(b).

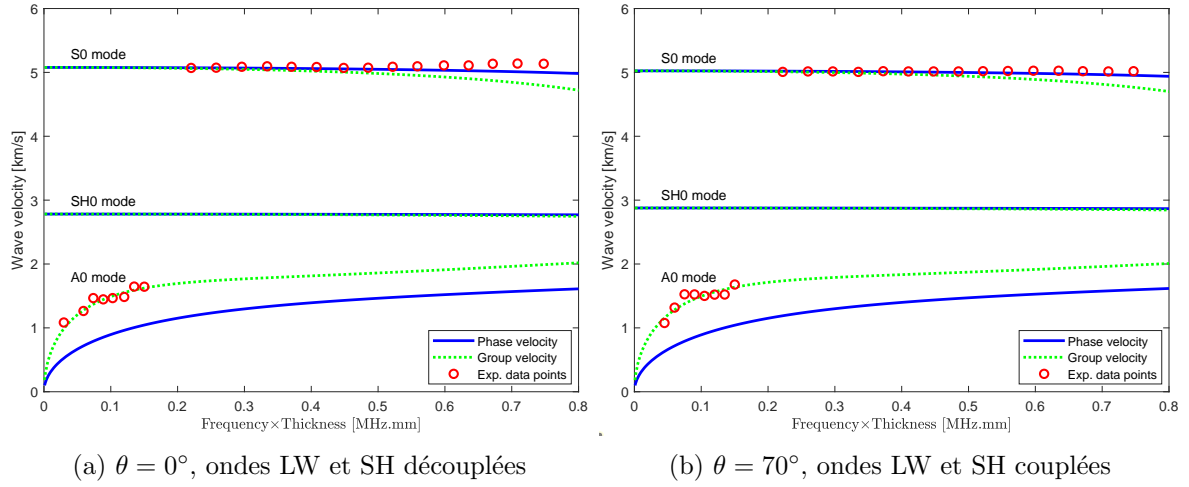


FIGURE II.4 – Equation de dispersion pour le matériau composite fait d’Aluminium et de fibres de verre (d’après [E|Guo21]). Les données expérimentales sont issues de [R|Pan+14].

L’excellente adéquation entre les résultats prédits par la méthode matricielle hybride et les résultats expérimentaux valide l’approche proposée ici. Il est à noter que dans ce cas précis, la méthode de correction proposée par Pant [R|Pan+14] et qui consiste à décaler artificiellement la direction de propagation d’un degré est inefficace, car même après cette rotation, l’Aluminium reste isotrope et donc les ondes LW et SH restent découplées.

II.1.2.3 Optimisation de la méthode matricielle globale

Le second verrou traité ici est relatif à l’**efficacité de calcul de la méthode GMM**. En effet, cette méthode est bien plus stable que la méthode TMM et permet de réaliser des prédictions de courbes de dispersion pour des matériaux composites comportant un très grand nombre de couches et pour des grandes valeurs du produit $f \times d$. Son principal inconvénient est qu’elle nécessite d’assembler les matrices de chaque couche et donc de travailler sur une matrice de taille potentiellement très importante, ce qui a un impact sur son efficacité numérique. Pour résoudre le problème d’efficacité de calcul de la GMM standard, une méthode GMM optimisée a été proposée [E|Guo21]. Elle tire simultanément parti de la matrice globale induite par les conditions de symétrie, du calcul parallèle, et des techniques basées sur les matrices creuses. Les problèmes rencontrés par la TMM pour les grandes valeurs du produit $f \times d$ sont illustrés sur la Figure II.5 et cette figure montre que lorsque les courbes de dispersion d’un stratifié composite à des valeurs de fréquence plus élevées sont recherchées, l’utilisation de la GMM pour réaliser le calcul est nécessaire.

II.1.2.4 Propriété de dichotomie de l’équation de dispersion des ondes guidées se propageant dans des plaques composites anisotropes

Le dernier verrou qui est étudié relativement à cette problématique de prédiction des courbes de dispersion est relatif aux **propriétés mathématiques des équations de dispersion associées aux ondes de Lamb**. Les équations de dispersion construites via la méthode PSWA pour une plaque monocouche ou avec la TMM ou la GMM pour une plaque multicouche font en effet intervenir

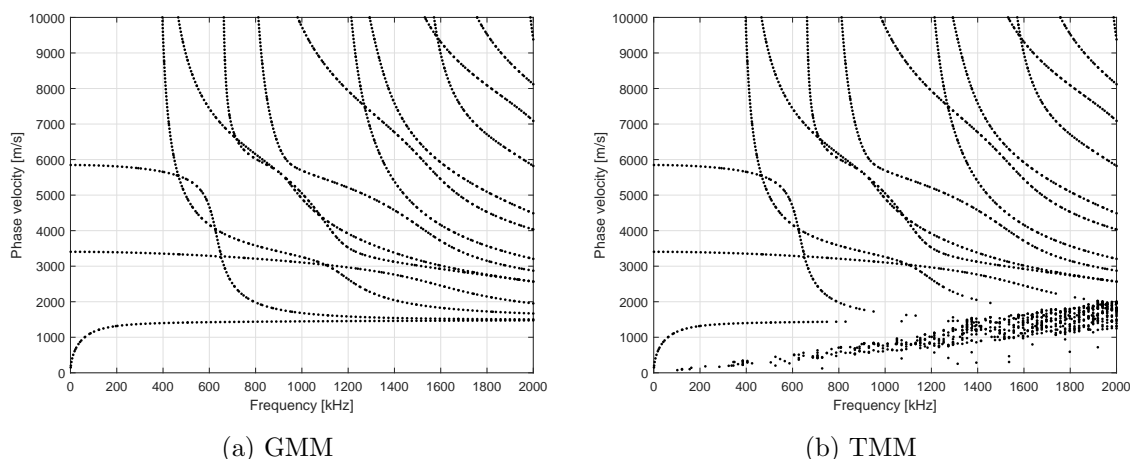


FIGURE II.5 – Courbes de dispersion pour le cas d’étude *Open Guided Waves* [R|Mol+19] pour un angle de propagation $\theta = 0^\circ$ calculées via la GMM (à gauche) et la TMM (à droite) (d’après [E|Guo21]).

des fonctions exponentielles complexes. Lors du calcul du déterminant à annuler, ce déterminant est potentiellement lui aussi à valeurs complexes [E|Guo21]. Cela a pour conséquence que des méthodes numériques spécifiques à la recherche de racines de fonctions complexes doivent être utilisées en général pour accéder aux courbes de dispersion via ces approches. Ces méthodes numériques sont cependant bien moins robustes que les méthodes numériques de recherche de racines pour les fonctions réelles. Notre contribution ici est de mathématiquement démontrer que **les équations de dispersion** construites avec la PWSA pour une plaque monocouche et avec la TMM et la GMM pour un système de plaque multicouches, **possèdent une propriété de dichotomie** dans le cas de matériaux élastiques purs [A|GRM22a]. **Cette propriété induit que ces équations a priori à valeurs complexes se réduisent à des équations à valeurs réelles ou imaginaires pures**, en fonction du comportement de certains paramètres intermédiaires. Pour une plaque monocouche, la propriété de dichotomie peut être analysée via une stratégie d’énumération qui suit l’évolution de ces paramètres intermédiaires. Pour le système de plaques multicouches, une stratégie simple est proposée pour évaluer numériquement la propriété de dichotomie qui consiste à réaliser un échantillonnage pour certaines valeurs des paramètres intermédiaires. Cette propriété est extrêmement utile pour surmonter les instabilités numériques potentiellement rencontrées lors du processus d’obtention des équations de dispersion car elle réduit la recherche de zéros pour une fonction complexe à la recherche de zéros pour une seule fonction réelle.

II.1.3 Prédiction de l’atténuation des ondes de Lamb [E|Guo21 ; A|GRM22b]

Maintenant que les propriétés propagatives des ondes de Lamb ont été étudiées, l’objectif est de mieux comprendre leur atténuation dans les matériaux composites multicouches. Après avoir étudié l’exemple simple des ondes de “*compression*”, des solutions numériques permettant de prédire cette grandeur pour les ondes de Lamb dans un matériau composite avec un empilement arbitraire et pour une direction de propagation arbitraire seront présentées dans cette section.

II.1.3.1 Atténuation spatiale ou temporelle ?

Cette partie commence par l'étude de l'exemple simple des ondes de "compression" pour illustrer l'effet de l'ajout de pertes mécaniques sur la résolution des équations de dispersion et pour donner un sens physique concret aux différentes grandeurs obtenues [C|BRA16]. L'extension aux ondes de Lamb en se basant sur l'approche classique de Rayleigh-Lamb décrite à la Section II.1.1 est ensuite discutée et l'Aluminium 2024 est utilisé comme matériau d'étude pour illustrer les résultats obtenus.

Ondes planes de traction/compression dans un milieu non-amorti : Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'exemple d'ondes planes de "compression" se propageant selon un axe noté x . Pour ce type d'ondes se propageant dans un matériau non-amorti, de masse volumique ρ , de module de Young E , et soumis à des forces volumiques $f(x, t)$, le champ de déplacement $u(x, t)$ est solution de l'équation de propagation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (\text{II.6})$$

En prenant la transformée de Fourier bi-dimensionnelle (TF2D) de cette équation, la fonction de transfert entre la TF2D de la densité volumique de force appliquée dans le matériau $F(k, \omega)$ et la TF2D du champ de déplacement $U(k, \omega)$ s'écrit :

$$\frac{U(k, \omega)}{F(k, \omega)} = \frac{1}{-\rho\omega^2 + Ek^2} \quad (\text{II.7})$$

pour laquelle le dénominateur s'annule lorsque $Ek^2 = \rho\omega^2$ ce qui correspond à l'équation de dispersion classiquement obtenue lors de l'étude des ondes de "traction/compression".

Force harmonique localisée en $x = 0$: Si l'on suppose à présent que la force est ici localisée en $x = 0$, d'amplitude F_0 , et qu'il s'agit d'une excitation harmonique à $\omega = \omega_0$, alors :

$$f(x, t) = F_0 e^{i\omega_0 t} \delta(x) \xrightarrow{\text{TF2D}} F(k, \omega) = F_0 \delta(\omega - \omega_0) \quad (\text{II.8})$$

avec $\delta(\cdot)$ l'impulsion de Dirac définie comme étant l'élément neutre du produit de convolution.

En se basant sur l'Eq. II.7, le champ de déplacement spatio-temporel peut alors être retrouvé via la transformée de Fourier 2D inverse⁶ (TF2D⁻¹) :

$$u(x, t) = \iint_{\mathbb{R}^2} U(k, \omega) e^{ikx + i\omega t} dk d\omega = U_0 e^{\alpha(\omega_0)|x|} e^{i\omega_0 t} \quad (\text{II.9})$$

avec $U_0 = \frac{-F_0}{2\alpha(\omega_0)E}$ et $\alpha(\omega_0)$ tel que $\mathcal{R}[\alpha(\omega_0)] \leq 0$ et :

$$\alpha(\omega_0) = \pm i\omega_0 \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \pm ik(\omega_0) \quad (\text{II.10})$$

Dans ce cas la solution $u(x, t)$ qui est obtenue en ne considérant qu'une seule solution $-ik(\omega_0)$ correspond à une onde de "compression" propagative de la forme :

$$\boxed{u(x, t) = U_0 e^{i\omega_0 t - ik(\omega_0)|x|}} \quad (\text{II.11})$$

6. Il est rappelé ici que : $\forall \beta \in \mathbb{R}^+$, $h(u) = \frac{1}{2\beta} e^{-\beta|u|} \xrightarrow{\text{TL}} H(p) = \int_{\mathbb{R}} h(u) e^{-pu} du = \frac{1}{\beta^2 - p^2}$ avec "TL" désignant la transformée de Laplace.

Le lien existant entre ω_0 et $k(\omega_0)$ est donné par la résolution de l'équation de dispersion $E k^2 = \rho \omega^2$. Avec cette approche, la pulsation ω_0 a été fixée et les nombres d'onde k solutions de l'équation de dispersion ont été trouvés. Cette approche est conceptuellement analogue à l'approche appelée *balayage en ω* présentée à la Section II.1.1.2 pour l'obtention des équations de dispersion en se basant sur les équations de Rayleigh-Lamb, sauf que dans le cas des ondes de “*compression*” présenté ici, les équations de dispersion n'admettent que deux solutions distinctes.

Force distribuée appliquée uniquement à $t = 0$: Une façon alternative d'aborder ce problème consiste à considérer que le matériau est maintenant soumis à une force distribuée spatialement selon la longueur d'onde $2\pi/k_0$ et que cette force est appliquée uniquement à l'instant $t = 0$. Alors :

$$f(x, t) = F_0 e^{ik_0 x} \delta(t) \xrightarrow{\text{TF2D}} F(k, \omega) = F_0 \delta(k - k_0) \quad (\text{II.12})$$

Le champ de déplacement spatio-temporel peut alors être retrouvé via la transformée de Fourier 2D inverse (TF2D⁻¹)⁷ :

$$u(x, t) = U_0 e^{ik_0 x} e^{\lambda(k_0)t} \quad (\text{II.13})$$

avec $U_0 = \frac{-F_0}{2\lambda(k_0)\rho}$ et $\lambda(k_0)$ tel que $\mathcal{R}[\lambda(k_0)] \leq 0$ et :

$$\lambda(k_0) = \pm ik_0 \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \pm i\omega(k_0) \quad (\text{II.14})$$

Dans ce cas la solution $u(x, t)$ qui est obtenue en ne considérant qu'une solution $+i\omega(k_0)$ correspond à une onde de “*compression*” propagative de la forme :

$$u(x, t) = U_0 e^{i\omega(k_0)t - ik_0 x} \quad (\text{II.15})$$

Le lien existant entre k_0 et $\omega(k_0)$ est toujours donné par la résolution de l'équation de dispersion $E k^2 = \rho \omega^2$. Avec cette approche, le nombre d'onde k a été fixé et les deux pulsations ω solutions de l'équation de dispersion ont été trouvées. Cette approche est conceptuellement analogue à l'approche appelée *balayage en k* présentée à la Section II.1.1.2 pour l'obtention des équations de dispersion en se basant sur les équations de Rayleigh-Lamb.

Effet de l'amortissement sur les solutions obtenues : Le modèle le plus classique pour représenter l'amortissement en dynamique des structures est celui du module de Young complexe, éventuellement dépendant de la fréquence :

$$E = E_0(1 + i\eta) = E_0 [1 + i \tan(\delta)] = |E| e^{i\delta} \quad (\text{II.16})$$

Dans ce cas précis, les expressions suivantes sont obtenues pour $\alpha(\omega_0)$ et $\lambda(k_0)$ en garantissant $\mathcal{R}[\alpha(\omega_0)] \leq 0$ et $\mathcal{R}[\lambda(k_0)] \leq 0$ [C|BRA16] :

$$\alpha(\omega_0) = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho}{|E|}} \left(\xi - i\sqrt{1 - \xi^2} \right) = i [k_R(\omega_0) + ik_I(\omega_0)] \quad (\text{II.17})$$

7. Le temps t n'étant supposé défini que pour $t \geq 0$, l'opérateur $|\cdot|$ n'est pas noté ici mais devrait en toute rigueur être précisé.

$$\lambda(k_0) = k_0 \sqrt{\frac{|E|}{\rho}} \left(\xi - i\sqrt{1 - \xi^2} \right) = i[\omega_R(k_0) + i\omega_I(k_0)] \quad (\text{II.18})$$

avec $\xi = \sin(\delta/2)$. Ces solutions définissent un nombre d'ondes complexe $k = k_R + ik_I$ et une pulsation complexe $\omega = \omega_R + i\omega_I$ dont l'interprétation physique sera discutée ultérieurement. Jusqu'à présent ces grandeurs étaient toutes des grandeurs réelles.

Si l'on considère une excitation harmonique à $\omega_0 \in \mathbb{R}$ et localisée en $x = 0$, alors le champ de déplacement solution est donné par :

$$u(x, t) = U_0 e^{-k_I(\omega_0)x} e^{i\omega_0 t - ik_R(\omega_0)x} \quad (\text{II.19})$$

Le champ de déplacement obtenu est donc cette fois-ci une onde qui va s'atténuer spatialement en raison du terme $e^{-k_I(\omega_0)x}$. Les liens entre les parties réelles et imaginaires du nombre d'ondes $k = k_R + ik_I$ et ω_0 sont donnés par l'Eq. II.17. La partie réelle k_R du nombre d'ondes k_0 correspondra à la partie propagative de l'onde (c'est à dire qu'elle fixera sa longueur d'onde $2\pi/k_0$) et sa partie imaginaire k_I décrira son atténuation spatiale par le biais d'une distance d'atténuation caractéristique $1/k_I$.

Si l'on considère à présent une excitation distribuée selon un nombre d'onde $k_0 \in \mathbb{R}$ et localisée à l'instant $t = 0$, alors le champ de déplacement solution est :

$$u(x, t) = U_0 e^{-\omega_I(k_0)t} e^{i\omega_R(k_0)t - ik_0 x} \quad (\text{II.20})$$

Le champ de déplacement obtenu est donc cette fois-ci une onde qui va s'atténuer temporellement en raison du terme $e^{-\omega_I(k_0)t}$. Les liens entre les parties réelles et imaginaires de la pulsation $\omega = \omega_R + i\omega_I$ et k_0 sont donnés par l'Eq. II.18. La partie réelle de la pulsation ω_R décrira la partie propagative (c'est à dire qu'elle fixera la période des oscillations $2\pi/\omega_R$) et sa partie imaginaire ω_I la façon dont les ondes s'atténuent temporellement via un temps d'amortissement caractéristique $1/\omega_I$.

Il est important de constater ici que les deux approches qui donnaient des résultats équivalents dans le cas non-amorti pour la résolution des équations de dispersion donnent à présent des résultats dont l'interprétation physique diffère. Il est donc possible de conclure que dans le cas où il y a de l'amortissement, les approches par *balayage en ω* et *balayage en k* ne sont pas équivalentes au sens où elles ne décrivent pas le même problème physique : dans un cas, des solutions qui s'atténuent en espace sont recherchées et dans un autre cas, ce sont des solutions qui s'atténuent en temps. Dans le contexte de la SHM, l'objectif est de faire propager des paquets d'ondes sur de longues distances et ce sont donc les solutions qui décroissent en espace qui seront les solutions d'intérêt. Mais si l'on s'intéresse à l'analyse modale, ce sont cette fois-ci les décroissances temporelles des signaux qui vont être intéressantes et donc les solutions qui décroissent en temps seront recherchées [C|BRA16].

Enfin, il est important de noter que les vitesses de phase $c_p = \omega/k$ et $c_g = d\omega/dk$ ainsi définies deviennent des grandeurs complexes, ce qui n'a pas de sens physique. Ainsi, dans le cas amorti, la vitesse d'énergie notée c_e nécessite d'être introduite :

$$c_e = \frac{\int_0^d \langle P \rangle dh}{\int_0^d (\langle E_c \rangle + \langle E_p \rangle) dh} \quad (\text{II.21})$$

où h est l'épaisseur de la plaque considérée, $\langle P \rangle$ la moyenne temporelle du vecteur de Poynting dans la direction de propagation de l'onde et $\langle E_c \rangle$ et $\langle E_p \rangle$ les moyennes temporelles des énergies cinétiques et potentielles stockées dans le guide d'onde [E|Guo21 ; A|GRM22b].

Cela permet de définir une grandeur réelle associée à la vitesse de propagation de l'énergie dans le cas amorti.

Ajout d'amortissement aux équations de Rayleigh-Lamb : Le cas plus général des ondes de Lamb telles que prédites par les équations de Rayleigh-Lamb (voir Section II.1.1) est maintenant considéré. L'amortissement peut être directement introduit dans les équations (II.1) et (II.2) en considérant un module de Young complexe comme dans l'Eq. (II.16). Les fonctions dont les racines seront recherchées, données par les équations (II.4) et (II.5), seront donc des fonctions à valeurs complexes.

Dans le cas où des solutions s'atténuant avec l'espace sont recherchées, c'est à dire dans le cas d'un *balayage en ω* , nous aurons $\omega = \omega_0 \in \mathbb{R}$ et $k = k_R + ik_I \in \mathbb{C}$. Le problème à résoudre consistera alors à trouver pour $\omega_0 \in \mathbb{R}$ donné, les couples $(k_R, k_I) \in \mathbb{R}^2$ tels que :

$$\begin{cases} f_S(k_R + ik_I, \omega_0) = (k^2 - q^2)^2 \sin(qd) \sin(pd) + 4k^2 pq \cos(qd) \cos(pd) = 0 & \text{(II.22)} \\ f_A(k_R + ik_I, \omega_0) = 4k^2 pq \sin(qd) \sin(pd) + (k^2 - q^2)^2 \cos(qd) \cos(pd) = 0 & \text{(II.23)} \end{cases}$$

Les résultats obtenus en effectuant un *balayage en ω* pour de l'Aluminium 2024 correspondant à celui de la Section II.1.1 et avec un coefficient d'amortissement $\eta = 1 \%$ sont présentés sur la Figure II.6. La figure de gauche représente l'évolution de la partie réelle du nombre d'onde k_R en fonction de la fréquence $f = \omega/(2\pi)$. Les courbes en traits pleins correspondent aux solutions obtenues pour le cas avec amortissement et les symboles “o” aux solutions obtenues dans le cas sans amortissement. Il est possible de constater ici que l'amortissement étant faible, il influe très peu sur les caractéristiques propagatives des ondes considérées. La figure de droite représente l'évolution de la partie imaginaire du nombre d'onde k_I en fonction de la fréquence $f = \omega/(2\pi)$. Il est encore possible d'observer que $k_I \ll k_R$ en raison du faible amortissement du matériau étudié. Par ailleurs, les courbes associées à k_I pour les différents modes propagatifs semblent assez décorréliées de celles correspondant à k_R .

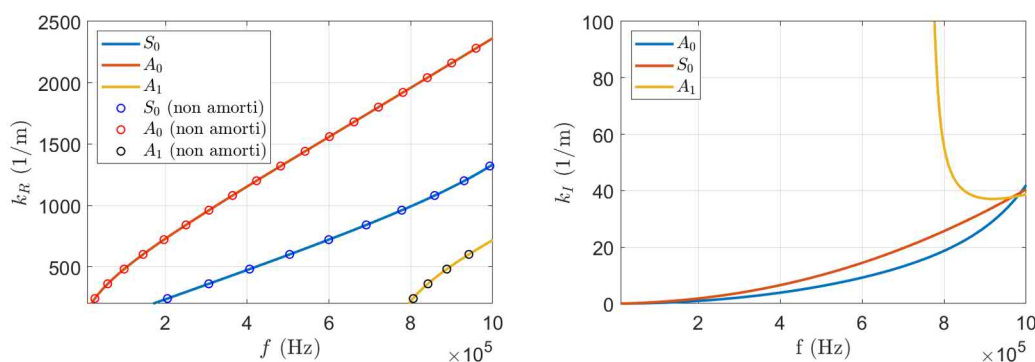


FIGURE II.6 – Prédiction des parties réelles (k_R à gauche) et imaginaires (k_I à droite) du nombre d'onde obtenues par *balayage en ω* dans l'Aluminium 2024 pour une plaque d'épaisseur 2 mm et un coefficient d'amortissement $\eta = 1 \%$. Les symboles “o” représentent les résultats obtenus pour un calcul ne prenant pas en compte l'amortissement.

Dans le cas où des solutions s'atténuant avec le temps sont recherchées, c'est à dire dans le cas d'un *balayage en k* , nous aurons $k = k_0 \in \mathbb{R}$ et $\omega = \omega_R + i\omega_I \in \mathbb{C}$. Le problème à résoudre consistera alors à trouver pour $k_0 \in \mathbb{R}$, les couples $(\omega_R, \omega_I) \in \mathbb{R}^2$ tels que :

$$\begin{cases} f_S(k_0, \omega_R + i\omega_I) = (k^2 - q^2)^2 \sin(qd) \sin(pd) + 4k^2 pq \cos(qd) \cos(pd) = 0 & \text{(II.24)} \\ f_A(k_0, \omega_R + i\omega_I) = 4k^2 pq \sin(qd) \sin(pd) + (k^2 - q^2)^2 \cos(qd) \cos(pd) = 0 & \text{(II.25)} \end{cases}$$

Les résultats obtenus en effectuant un *balayage en k* pour le même matériau sont présentés sur la Figure II.7. La figure de gauche représente l'évolution de la partie réelle de la fréquence $f_R = \omega_R/(2\pi)$ en fonction du nombre d'onde k . Les courbes en traits pleins correspondent toujours aux solutions obtenues pour le cas avec amortissement et les symboles "o" aux solutions obtenues dans le cas sans amortissement. Il est encore possible de constater ici que l'amortissement étant faible, il influe très peu les caractéristiques propagatives des ondes considérées. La figure de droite représente l'évolution de la partie imaginaire de la fréquence $f_I = \omega_I/(2\pi)$ en fonction du nombre d'onde k . Il est encore possible d'observer que $f_I \ll f_R$ toujours en raison du faible amortissement du matériau étudié. Par ailleurs, les courbes associées à f_I pour les différents modes propagatifs semblent encore assez décorréelées de celles correspondant à f_R .

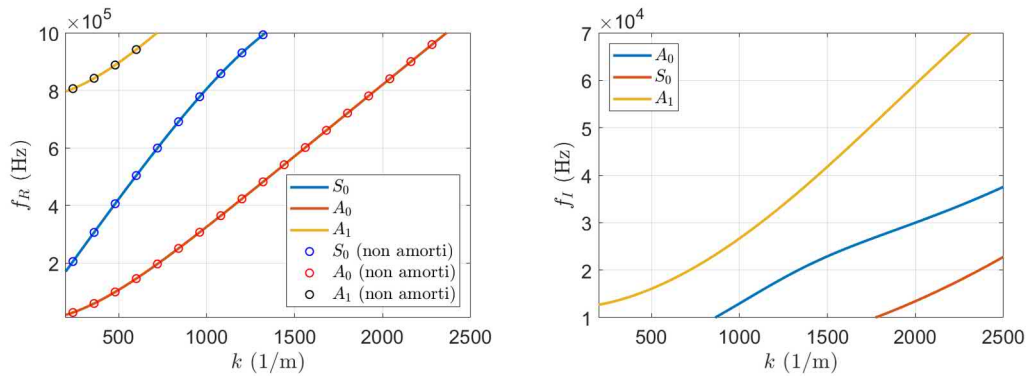


FIGURE II.7 – Prédiction des parties réelles ($f_R = \omega_R/(2\pi)$ à gauche) et imaginaires ($f_I = \omega_I/(2\pi)$ à droite) de la fréquence obtenues par *balayage en k* dans l'Aluminium 2024 pour une plaque d'épaisseur 2 mm et un coefficient d'amortissement $\eta = 1\%$. Les symboles "o" représentent les résultats obtenus pour un calcul ne prenant pas en compte l'amortissement.

En conclusion, les grandeurs qui nous intéresseront par la suite dans le cas du SHM sont k_R et k_I obtenus suite à un *balayage en ω* . Pour une pulsation d'excitation donnée ω , k_R décrira la partie propagative de l'onde (c'est à dire sa longueur d'onde $2\pi/k_R$) et k_I sera lié à sa distance caractéristique d'atténuation $1/k_I$. L'autre approche, *le balayage en k*, est aussi intéressante, mais pas dans le contexte étudié ici. Par ailleurs, dans le cas des ondes de Lamb, il n'y a pas de lien analytique direct liant k_R et k_I comme cela était le cas pour les ondes de "compression" (voir Eq. (II.17)) et donc il n'est pas possible de prédire directement l'atténuation des ondes de Lamb $1/k_I$ à partir de la connaissance de leur partie propagative k_R . De plus, l'amortissement sera plus important pour les matériaux composites multicouches que pour l'Aluminium 2024 qui est considéré comme un matériau peu amorti. Enfin, il est important de préciser que les différentes conclusions tirées ici de l'analyse des équations de Rayleigh-Lamb amorties resteront vraies pour les cas plus complexes des matériaux composites multi-couches pour un empilement arbitraire et une direction de propagation arbitraire.

II.1.3.2 État de l’art relatif à l’atténuation spatiale des ondes de Lamb dans les composites

Les études liées à l’atténuation dans les matériaux composites multicouches sont principalement axées sur des approches numériques du problème. Dans les structures composites, l’amortissement viscoélastique des matériaux est le principal facteur d’atténuation en comparaison de l’atténuation géométrique des ondes [R|GG15; R|Tre+15]. Le modèle d’amortissement de Rayleigh est couramment adopté pour étudier l’atténuation des ondes de Lamb [R|Ram+11; R|MSK21]. Théoriquement, les coefficients d’atténuation des ondes guidées sont calculés à partir des équations de dispersion (ED) en y ajoutant un modèle d’amortissement comme effectué dans la section précédente. Ainsi, des ED à valeurs complexes sont dérivées dans les milieux viscoélastiques et des algorithmes numériques efficaces ont été développés pour en trouver les racines. L’approche plus simple consiste de partir de l’équation classique de Rayleigh-Lamb comme fait précédemment pour décrire la propagation des ondes dans une plaque viscoélastique isotrope homogène [R|ZWQ19; R|CZL21]. L’approche par PWSA est de son côté généralement utilisée pour dériver les ED d’une plaque viscoélastique anisotrope monocouche [R|Nea03; R|Zhu+18]. Pour un système multicouche, la méthode PWSA a été appliquée à la TMM [R|CH03] et à la GMM [R|BSS17]. Certaines approches alternatives se basent sur des ED approximées et parmi elles, il est possible de citer les approches basées sur les polynômes de Legendre [R|DAG16; R|DG21; R|Zha+19] ou sur la théorie des plaques d’ordre supérieur [R|CH07; R|TF11; R|Ort+21]. Des méthodes numériques discrètes sont également largement appliquées pour étudier l’atténuation des ondes de Lamb dans les plaques viscoélastiques multicouches en raison de leur mise en œuvre facile. Par exemple, il est possible de citer la méthode des éléments finis d’ondes (WFEM) utilisant la condition de périodicité de Floquet [R|MM10; R|MS13], la méthode de collocation spectrale (SCM) basée sur les polynômes de Chebyshev [R|Qui+15; R|QLC16], et la méthode des éléments finis semi-analytiques (SAFE) adaptée aux guides d’ondes à section arbitraire [R|Bar+06; R|TLI11; R|MG19]. La caractéristique commune de ces méthodes réside dans le fait que la discrétisation n’a lieu que dans le sens de l’épaisseur de la plaque, augmentant ainsi l’efficacité de calcul par rapport à la modélisation par éléments finis 3D traditionnelle.

En plus des approches purement numériques, les coefficients d’atténuation des ondes de Lamb peuvent également être mesurés expérimentalement, mais les travaux expérimentaux restent assez rares par rapport aux études théoriques et numériques abondantes. L’approche la plus simple consiste à estimer l’atténuation des ondes entre deux capteurs situés dans une direction donnée à deux distances différentes du point d’actionnement [R|Sre+15; R|Ram+11; R|GG15; R|OG12]. Des méthodes d’identification avancées issues du traitement du signal sont également utilisées dans ce contexte, notamment la méthode du crayon matriciel [R|CZL21] et celle de l’estimation des paramètres du signal via des techniques d’invariance par rotation (ESPRIT) [R|Mar+19]. La caractéristique commune des deux méthodes réside dans le fait qu’elles permettent d’identifier non seulement le coefficient d’atténuation mais également le nombre d’onde se propageant à partir de mesures expérimentales.

Dans les travaux de la littérature, de nombreux efforts ont été déployés pour obtenir numériquement les courbes de dispersion en prenant en compte l’amortissement et en fonction de la fréquence dans une direction de propagation fixe. Peu de travaux ont cependant été consacrés à l’étude de la directivité de l’atténuation, en particulier pour les matériaux composites utilisés dans l’aéronautique. Au niveau expérimental, assez peu d’efforts ont été réalisés pour vérifier les prédictions proposées par ces différentes approches. En particulier, les travaux expérimentaux se limitent à des structures rectangulaires et planes très simples et très peu représentatives de la réalité des pièces aéronautiques réalisées en matériaux composites multi-couches.

Le verrou auquel nous nous sommes intéressés ici consiste donc à **prédire l’atténuation des**

ondes guidées se propageant dans des laminés composites viscoélastiques anisotropes en fonction de la fréquence et de la direction de propagation et pour des structures aéronautiques représentatives. Une méthode robuste et efficace basée sur la GMM a été proposée et est validée expérimentalement sur deux pièces composites aéronautiques d'une nacelle d'Airbus A380 (voir Figure I.9). Pour chaque structure, deux cas ont été considérés, des pièces non montées et des pièces montées sur l'avion de façon à être au plus près des conditions réelles de mise en œuvre de la SHM [E|Guo21 ; A|GRM22b].

II.1.3.3 Prédiction de l'atténuation via la méthode dGMM

La méthode GMM optimisée précédemment présentée (voir Section II.1.2.3) a été étendue de façon à être capable de prédire l'atténuation des ondes de Lamb pour un matériau composite composé d'un empilement arbitraire et pour une direction de propagation arbitraire en plus de leurs propriétés propagatives. Ces développements sont présentés ici avant d'être validés sur le FC et l'IFS montés sur un Airbus A380 d'essai [E|Fen15 ; E|Guo21 ; A|GRM22b].

Modèles d'amortissement retenus : De façon à pouvoir représenter plusieurs catégories de matériaux viscoélastiques, trois modèles d'amortissement présentés dans les Eqs. II.26, II.27, et II.28 (modèles hystérétique [HR], de Kelvin-Voigt [KV], et de Biot [BT]) ont été intégrés au sein de la méthode GMM standard pour en former une version étendue : la GMM amortie (dGMM pour “*damped GMM*”).

$$E^* = E(1 + i\gamma_{HR}) \quad [\text{Modèle HR}] \quad (\text{II.26})$$

$$E^*(\omega) = E \left(1 + i\gamma_{KV} \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad [\text{Modèle KV}] \quad (\text{II.27})$$

$$E^*(\omega) = E \left[1 + \frac{2}{\pi} \gamma_{BT} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\epsilon} \right)^2} + i \frac{2}{\pi} \gamma_{BT} \arctan \left(\frac{\omega}{\epsilon} \right) \right] \quad [\text{Modèle BT}] \quad (\text{II.28})$$

Schéma numérique d'obtention des solutions : Dans le cas viscoélastique et comme pour les équations de Rayleigh- Lamb, les équations de dispersion construites avec la dGMM produisent des solutions combinant une pulsation réelle ω ou une fréquence réelle f et un nombre d'onde complexe $k_0 = k_R + ik_I$ en suivant l'approche par *balayage en ω* . Les coefficients d'atténuation des ondes guidées peuvent être extraits de la partie imaginaire k_I du nombre d'onde complexe comme cela a été explicité dans le cas des équations de Rayleigh-Lamb. En raison de la complexité du cas viscoélastique, la résolution de l'équation de dispersion transcendantale multivariée est encore une fois mathématiquement impossible à traiter analytiquement. Pour résoudre ce problème, une approche de recherche de racine en deux étapes est proposée sur la base des solutions produites par la GMM non amortie [E|Guo21 ; A|GRM22b]. L'idée directrice est de supposer que les courbes de dispersion dans le cas amorti se trouveront à proximité de celles correspondant au cas non-amorti et donc de considérer le cas non-amorti comme un bon point de départ pour l'optimisation. Avec cette approche, les courbes de dispersion dans le domaine des nombres d'onde complexes $k_0 = k_R + ik_I$ et en considérant des fréquences réelles f peuvent être calculées.

Validation expérimentale des prédictions numériques de la dGMM : Une méthode d'estimation expérimentale des coefficients d'atténuation est ensuite mise en place pour valider l'approche dGMM proposée précédemment. Avec cette méthode, les coefficients d'atténuation sont identifiés

expérimentalement à partir de signaux mesurés sur l’IFS et le FC pour différents éléments piézoélectriques positionnés dans des directions données et à des distances croissantes [E|Fen15 ; E|Guo21 ; A|GRM22b]. Pour chaque structure, des données expérimentales correspondant à un cas où la structure est montée sur un A380 d’essai et à un cas où la structure n’est pas montée sont analysées de façon à être au plus proche des conditions dans lesquelles la méthodologie de SHM sera déployée.

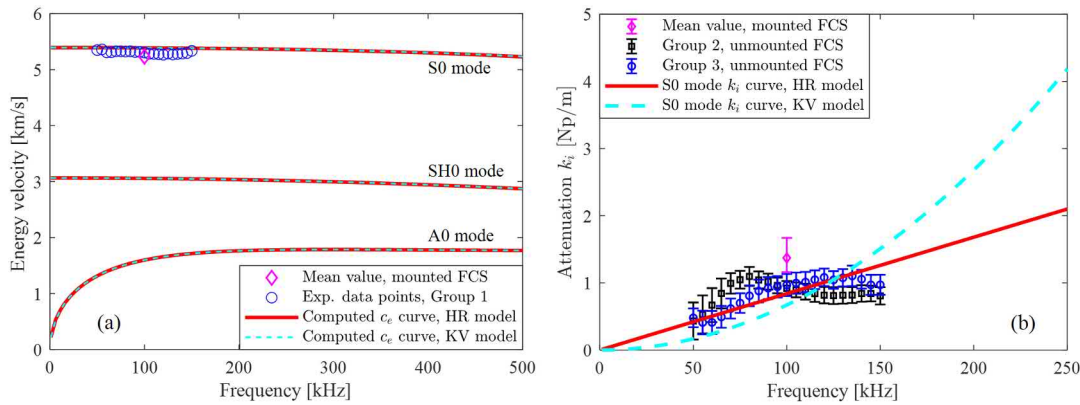


FIGURE II.8 – Comparaison entre les prédictions réalisées par la dGMM (après recalage des grandeurs propagatives dans le cas non-amorti) et les mesures expérimentales réalisées sur le FC dans le cas où il est monté sur un A380 ou démonté ($1 \text{ Np/m} = 8.69 \text{ dB/m}$). Pour le FC monté sur l’Airbus A380, seules des mesures pour $f = 200 \text{ kHz}$ sont disponibles. Au niveau expérimental, seules les ondes de Lamb correspondant au mode S_0 ont pu être étudiées dans cette gamme de fréquence pour le FC. Pour la structure installée au laboratoire, des mesures des fréquences allant de 50 kHz à 150 kHz par pas de 10 kHz sont disponibles. Les annotations “Groupe 1” ou “Groupe 2” correspondent à des groupes d’éléments piézoélectriques différents équipant le FC disponible au laboratoire.

La comparaison entre les prédictions réalisées par la dGMM (après recalage des grandeurs propagatives) et les mesures expérimentales réalisées sur le FC dans le cas où il est monté sur un A380 ou démonté est présentée en Figure II.8. Pour le FC monté sur l’Airbus A380, seules des mesures pour $f = 200 \text{ kHz}$ sont disponibles. Au niveau expérimental, seules les ondes de Lamb correspondant au mode S_0 ont pu être étudiées dans cette gamme de fréquence pour le FC. Pour la structure installée au laboratoire, des mesures des fréquences allant de 50 kHz à 150 kHz par pas de 10 kHz sont disponibles. Les prédictions numériques via la dGMM ont été réalisées dans la gamme allant de 0 Hz à 500 kHz et pour les modèles HR et KV. La figure de gauche représente la vitesse de l’énergie des ondes de Lamb c_e , qui est l’analogie de la vitesse de groupe c_g mais dans le cas amorti [E|Guo21 ; A|GRM22b], en fonction de la fréquence. Sur cette figure, il est possible d’observer que quelque soit le modèle d’amortissement retenu, un excellent accord entre les propriétés propagatives des ondes est obtenu entre la dGMM et les mesures expérimentales, que le FC soit monté ou non. Par ailleurs, le choix du modèle d’amortissement (HR ou KV) n’a quasiment aucun impact pour cette structure sur les propriétés propagatives. Sur la figure de droite sont présentées les prédictions d’atténuation faites par la dGMM pour les modèles HR et KV ainsi que les mesures expérimentales réalisées sur le FC monté ou non. Sur cette figure, il est possible de constater que les prédictions réalisées par la dGMM sont globalement en bon accord avec les mesures expérimentales pour le cas où le FC n’est pas monté, en particulier pour le modèle HR. Enfin, la valeur d’atténuation mesurée sur le FC monté est légèrement supérieure aux mesures effectuées sur le FC non-monté et aux prédictions réalisées par la dGMM.

II.2 Interactions “ondes/dommage”

Pour la surveillance de la santé des structures aéronautiques, il est important de comprendre comment les ondes de Lamb interagissent avec les dommages rencontrés dans les matériaux qui les composent. Ces interactions vont en pratique permettre de suivre l'évolution de l'endommagement dans la structure hôte et peuvent être classées en trois grandes familles : les phénomènes de **diffraction** qui font qu'un dommage pourra être vu comme une source secondaire seront étudiés dans la Section II.2.1, la **conversion de modes** qui explique des transferts d'énergie entre différents types d'ondes sera abordée dans la Section II.2.2, et enfin les **interactions “ondes/dommage” non-linéaires** qui génèrent de nouveaux contenus spectraux seront décrits dans la Section II.2.3. L'objectif de cette section est ainsi de détailler physiquement ces mécanismes d'interaction “ondes/dommage” pour pouvoir les exploiter à des fins de SHM.

II.2.1 Diffraction des ondes de Lamb par un dommage [E|Bri22]

La diffraction peut être vue comme le fait qu'un front d'ondes arrivant sur un dommage va être réfléchi par toutes les discontinuités associées au dommage en fonction de sa géométrie et des ruptures d'impédance mécanique qu'il présente. Ces ondes réfléchies vont ensuite se recombiner et interférer les unes avec les autres pour créer le champ diffracté par le dommage, plus communément appelé “écho” généré par le dommage. En conséquence, **le dommage peut être considéré comme une source secondaire émettrice d'ondes dans la structure hôte considérée**, les sources primaires étant ici les éléments piézoélectriques. Un modèle analytique permettant, sous certaines hypothèses simplificatrices, de prédire cet écho tout en prenant en compte le fait que les ondes sont émises et reçues par des éléments piézoélectriques sera décrit et utilisé pour illustrer la sensibilité des ondes de Lamb à la taille et à la sévérité du dommage.

II.2.1.1 État de l'art concernant la modélisation de la diffraction par un dommage en SHM

Il existe plusieurs approches dans la littérature permettant de modéliser la diffraction d'une onde de Lamb par un dommage : des modèles analytiques de diffraction pour un trou borgne dans une plaque isotrope [R|Gra03], des modèles basés sur la théorie des plaques en utilisant différentes formes de dommages [R|CRV08 ; R|VN97 ; R|Sed+20], des modèles basés sur la théorie de plaque d'ordre supérieur pour les ondes de compression avec un trou traversant [R|MH99 ; R|WC05] ou des modèles basés sur la théorie élastique 3D pour un trou traversant [R|Dil+02 ; R|Mor+11], un trou borgne [R|DL05 ; R|Mor+12] ou des dommages plus réalistes [R|PG16b ; R|PG16a ; R|Hai+20]. Toutes ces approches se sont concentrées sur la modélisation de l'interaction “ondes/dommage” du point de vue de la diffraction mais n'ont pas cherché à l'étudier dans un contexte de SHM.

Il existe également des modèles analytiques d'actionneur piézoélectrique collé sur une structure hôte [R|CD87]. La théorie du “*shear lag*” est basée sur l'hypothèse que l'adhésif ne véhicule que des contraintes de cisaillement et que le transducteur et la plaque ne se déforment qu'axialement [R|Dil02 ; R|Giu05]. Si la couche de colle est suffisamment rigide et mince, il est possible de considérer que l'élément piézoélectrique est idéalement lié à la structure. Dans ce cas limite, l'actionneur ne produit alors une contrainte de cisaillement que sur son périmètre. Ce modèle simplifié est appelé modèle “*pin-force*” et est largement utilisé dans la littérature [R|HSW10 ; R|WH01 ; R|RC07]. Les capteurs piézoélectriques sont plus faciles à modéliser que les actionneurs [R|LMB07]. En effet, la tension de sortie est globalement proportionnelle à la déformation normale de la surface dans le plan. Cependant, il est essentiel de prendre également en compte les conditions limites électriques appliquées aux électrodes du transducteur.

Il n'existe donc pas dans la littérature de modèle analytique complet prédisant le signal reçu après le trajet actionneur-dommage-capteur. Les avantages d'un tel modèle analytique sont pourtant multiples : calcul rapide du signal induit par l'onde diffracté par l'endommagement et étude facile des paramètres influents ce signal. Jusqu'à présent, ce type de résultats ne pouvait être obtenu que par la simulation par éléments finis qui est coûteuse en termes de temps calcul et nécessite une sélection rigoureuse des paramètres de simulation (pas de temps, maillage, ...) pour assurer une bonne convergence.

II.2.1.2 Modèle analytique proposé : mode S_0 diffracté par un dommage cylindrique

Une plaque de matériau composite stratifié sur laquelle sont collés deux éléments piézoélectriques est considérée. L'un de ces transducteurs fonctionne en mode *émission* tandis que l'autre fonctionne en mode *réception*. L'objectif est de déterminer le signal temporel reçu par le capteur après diffraction sur l'endommagement de l'onde générée par l'émetteur. La Figure II.9 illustre la configuration globale du problème.

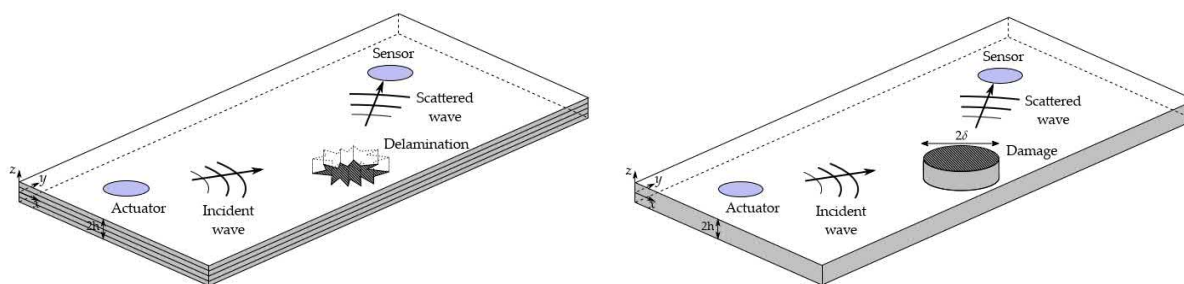


FIGURE II.9 – Problème de diffraction d'une onde de Lamb dans un contexte de SHM : à gauche, le problème réel et à droite, le problème simplifié (d'après [E|Bri22]).

Physiquement, les transducteurs piézoélectriques appliquent une contrainte à la structure hôte lorsqu'ils sont soumis à un signal électrique. Cela provoque la propagation d'ondes de Lamb dans la plaque. L'étude portera ici sur le mode S_0 uniquement car c'est le mode qui se propage le plus rapidement dans les matériaux composites cibles pour cette gamme de fréquences et avec une dispersion quasi nulle. De plus, contrairement au mode A_0 , il présente une faible atténuation spatiale due à l'amortissement du matériau. La plaque est également supposée infinie car seul le paquet d'ondes diffracté par le dommage sera modélisé sans les éventuels paquets d'ondes réfléchis par les bords de la plaque. Le matériau composite stratifié de la plaque est approximé par un matériau isotrope transverse dont le plan d'isotropie est le plan de la plaque. Cela correspond physiquement aux structures dont les empilements sont équilibrés (aussi appelés matériaux quasi-isotropes) pour rendre la plaque isotrope transverse dans son ensemble. Les éléments piézoélectriques seront supposés idéalement collés à la structure, c'est-à-dire avec une couche adhésive infiniment mince et infiniment rigide. De plus, il est supposé que ces éléments piézoélectriques n'interfèrent pas avec la propagation des ondes de Lamb. Enfin, l'endommagement est modélisé par un cylindre sur toute l'épaisseur de la plaque et dont les propriétés matériau sont différentes de celle du reste de la structure. Cette inhomogénéité correspondant au dommage est caractérisée par deux paramètres (en plus de sa position sur la plaque) qui sont son rayon δ et sa sévérité ξ définie comme :

$$\xi = 1 - \frac{E^*}{E} \quad (\text{II.29})$$

où E^* et E sont respectivement le module de Young de l’inhomogénéité correspondant au dommage et le module de Young de la plaque. Ainsi, une sévérité de 0 correspond au cas sain tandis qu’une sévérité de 1 correspond à un trou traversant la plaque. Ce modèle de dommage est très courant dans la littérature et correspond à la perte de rigidité locale dans une plaque composite soumise à un impact [R|DAG16]. Les détails du modèle sont disponibles dans [E|Bri22].

II.2.1.3 Validation du modèle analytique

Ce modèle analytique peut être validé en comparant ses prédictions à une simulation FEM incluant non seulement les phénomènes de diffraction des ondes de Lamb par les dommages mais également l’excitation et la réception par des éléments piézo-électriques. Cette simulation a été réalisée via la *Structural Dynamic Toolbox* [R|Bal19] et dans ce cas les signaux temporels produits par le modèle FEM et par le modèle analytique peuvent être directement comparés. Les signaux temporels correspondant à des mesures des signaux diffractés par un dommage circulaire issus de la simulation FEM et du modèle analytique sont présentés à la Figure II.10 pour deux épaisseurs différentes d’éléments piézoélectriques. Pour une épaisseur de 0.5 mm, les signaux temporels obtenus sont en bon accord en terme d’amplitude malgré un petit décalage temporel. Pour une épaisseur de 0.1 mm, l’accord entre le modèle analytique et la simulation FEM est parfait pour le premier paquet d’onde, correspondant au mode S_0 . Il est important ici de noter qu’aucune correction ni normalisation n’ont été réalisées en termes d’amplitude. Cela illustre donc les capacités du modèle et ses limitations intrinsèques liées aux hypothèses réalisées.

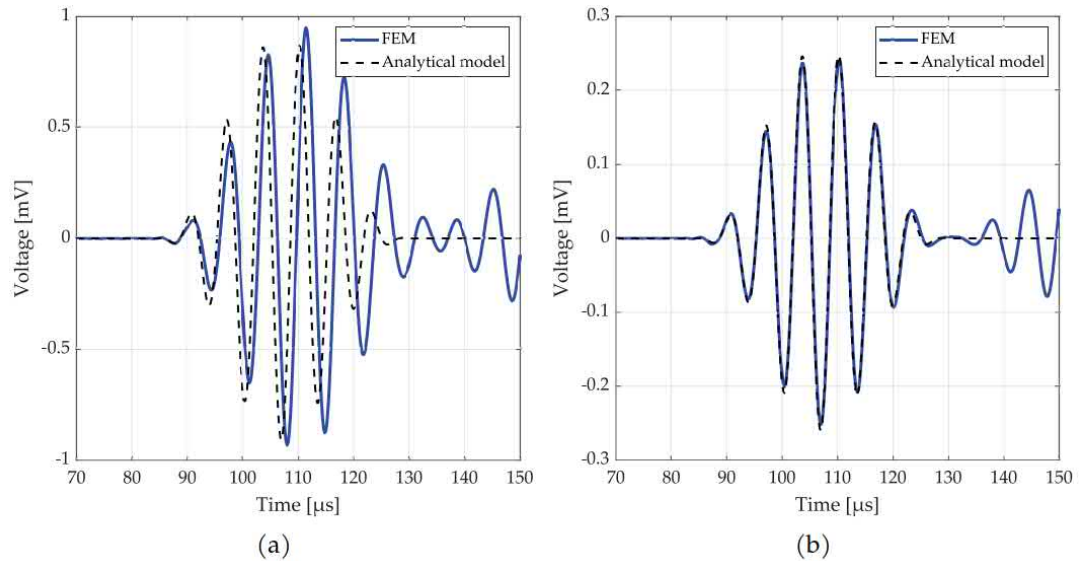


FIGURE II.10 – Comparaison des signaux temporels prédits par le modèle FEM avec ceux prédits par le modèle analytique pour des PZTs d’épaisseur a) 0.5 mm et b) 0.1 mm (d’après [E|Bri22]).

II.2.1.4 Exploitation du modèle analytique

Le modèle étant validé en comparaison avec des résultats issus de la littérature et en bon accord avec des signaux temporels issus de simulations FEM, il est à présent possible de l’exploiter pour discuter de la sensibilité des signaux diffractés aux paramètres d’intérêt du dommage, à savoir à son diamètre δ et à sa sévérité ξ . La Figure II.11 présente l’influence de la sévérité ξ et

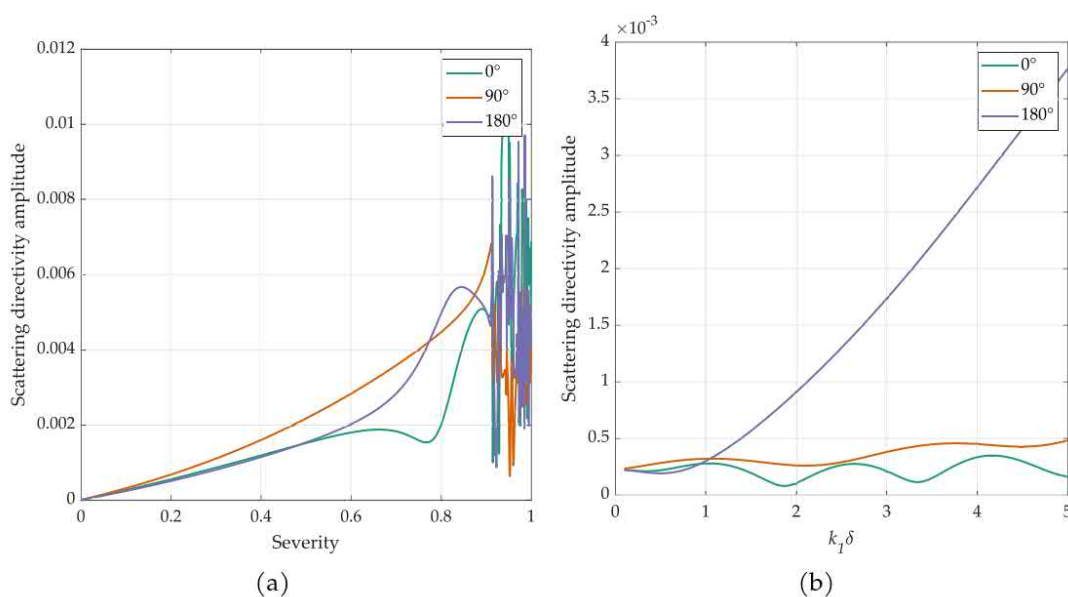


FIGURE II.11 – Influence du diamètre δ et de la sévérité ξ du dommage sur le profil de diffraction (d’après [E|Bri22]).

du diamètre du dommage δ sur l’amplitude reçue pour différentes orientations par rapport au dommage et obtenue en utilisant le modèle analytique. Pour la sévérité, l’axe des abscisses varie en 0 (état sain) et 1 état complètement endommagé. Pour la taille, l’axe des abscisses correspond à $k_1\delta$ où k_1 est le nombre d’ondes associé au mode S_0 étudié ici.

Dans les deux cas, quelque soit la direction considérée, une dépendance de l’onde diffractée avec les paramètres du dommage est observée. Pour des sévérités s’approchant de 1, les courbes de directivité semblent polluées par des problèmes de stabilité numérique. Cela n’est pas gênant car dans un contexte de SHM, ce sont les prémices du dommage qui sont recherchées, donc plutôt le domaine des faibles sévérités. Concernant les variations observées avec l’évolution de la taille du dommage, ces variations sont complexes et dépendent largement de la direction dans laquelle est observée l’onde. Il est souvent indiqué aussi comme règle empirique que pour que l’onde incidente soit sensible au dommage, il est nécessaire que sa longueur d’onde λ soit inférieure au diamètre du dommage 2δ . Traduit en nombre d’onde cela revient à $k_1\delta > \pi/2$. Dans le cas présenté ici, une influence de la taille du dommage sur les signaux diffractés est néanmoins observée même en dessous de cette limite empirique. En conclusion, il est donc possible de dire que les signaux correspondant au modes S_0 , diffractés par un dommage et mesurés par un élément piézo-électrique contiennent des informations associées au diamètre δ et à la sévérité ξ du dommage. Ce modèle analytique, même si sa validité est relativement limitée compte tenu des hypothèses retenues, pourra donc être exploité à des fins de SHM.

II.2.2 Conversion de modes par un dommage [E|Liz19]

Dans la section précédente, il a été supposé que l’interaction entre une onde de Lamb de type S_0 et un dommage ne générerait qu’une onde diffractée également de type S_0 . Or, dans le domaine de fréquences ciblé par les applications de SHM, les modes A_0 et S_0 peuvent tous les deux exister et se propager dans la structure hôte. A cause de la rupture de symétrie créée localement au niveau d’un dommage existant dans la structure hôte, les modes S_0 et A_0 peuvent

se retrouver couplés localement par le dommage et des échanges d’énergie entre ces deux modes sont alors possibles. Ce phénomène dit de **conversion de modes** est l’objet de cette section. Par exemple, le mode S_0 peut être partiellement converti en mode A_0 en traversant un dommage (voir Figure II.12).

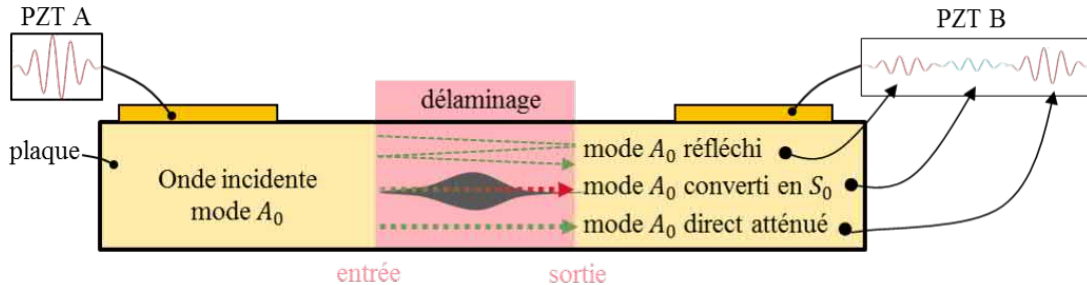


FIGURE II.12 – Illustration des conversions de mode pouvant intervenir dans le cadre de l’interaction entre une onde de Lamb et un dommage de type “*délaminage*” (d’après [E|Liz19]).

II.2.2.1 État de l’art relativement à la conversion de modes

Le mode A_0 a plutôt tendance à générer des déformations hors plan tandis que le mode S_0 se propage majoritairement dans le plan. Ces deux modes vont donc interagir différemment avec un éventuel endommagement, et peuvent ainsi fournir des informations complémentaires relativement à ce dernier [R|SY09; R|Lam+17]. Les premières études dédiées à la détection de délaminage favorisaient le mode S_0 au prétexte qu’il est plus sensible aux variations dans l’épaisseur du matériau [R|SY09]. Cependant, les travaux plus récents tendent à favoriser le mode A_0 , notamment car ce mode permet d’avoir une interaction avec un délaminage pour des fréquences d’excitation moindres [R|Gan+11; R|Hu+10; R|HZL17; R|YSI11a]. En pratique, les deux modes peuvent être utilisés dès lors que la longueur d’onde des modes qui se propagent permet une interaction avec un éventuel endommagement [R|Lam+17].

Les inhomogénéités symétriques ont pour seul effet de réfléchir les modes qui se propagent, et n’engendrent pas de conversion de mode. C’est notamment le cas des extrémités d’une plaque (qui peuvent être assimilées à un large endommagement symétrique), d’un trou débouchant, ou encore d’une fissure traversante perpendiculaire au plan médian de la structure. Pour qu’il y ait une conversion de mode, il faut un endommagement asymétrique par rapport au plan médian de la structure hôte. Le cas le plus simple à mettre en place expérimentalement est un trou borgne : cela réduit localement la rigidité du matériau et l’épaisseur du matériau, ce qui impacte directement les vitesses de propagation des modes de Lamb : A_0 ralentit, S_0 accélère. De façon plus réaliste, les délaminages sont typiquement une catégorie d’endommagement que l’on peut considérer comme asymétrique. Les dommages ne sont pas les seuls éléments à provoquer des conversions de modes : un PZT collé à une structure change localement les propriétés de l’assemblage, ce qui peut être assimilé à une inhomogénéité asymétrique ; un raidisseur (élément ajouté sur une structure pour améliorer localement les propriétés mécaniques) ou des extrémités de structures qui ne sont pas franches peuvent également engendrer de la conversion de mode.

II.2.2.2 Illustration du phénomène de conversion de mode en simulation FEM

La simulation FEM permet de représenter le déplacement des ondes de Lamb dans la structure étudiée en tout point et de découpler numériquement les contributions des modes A_0 et

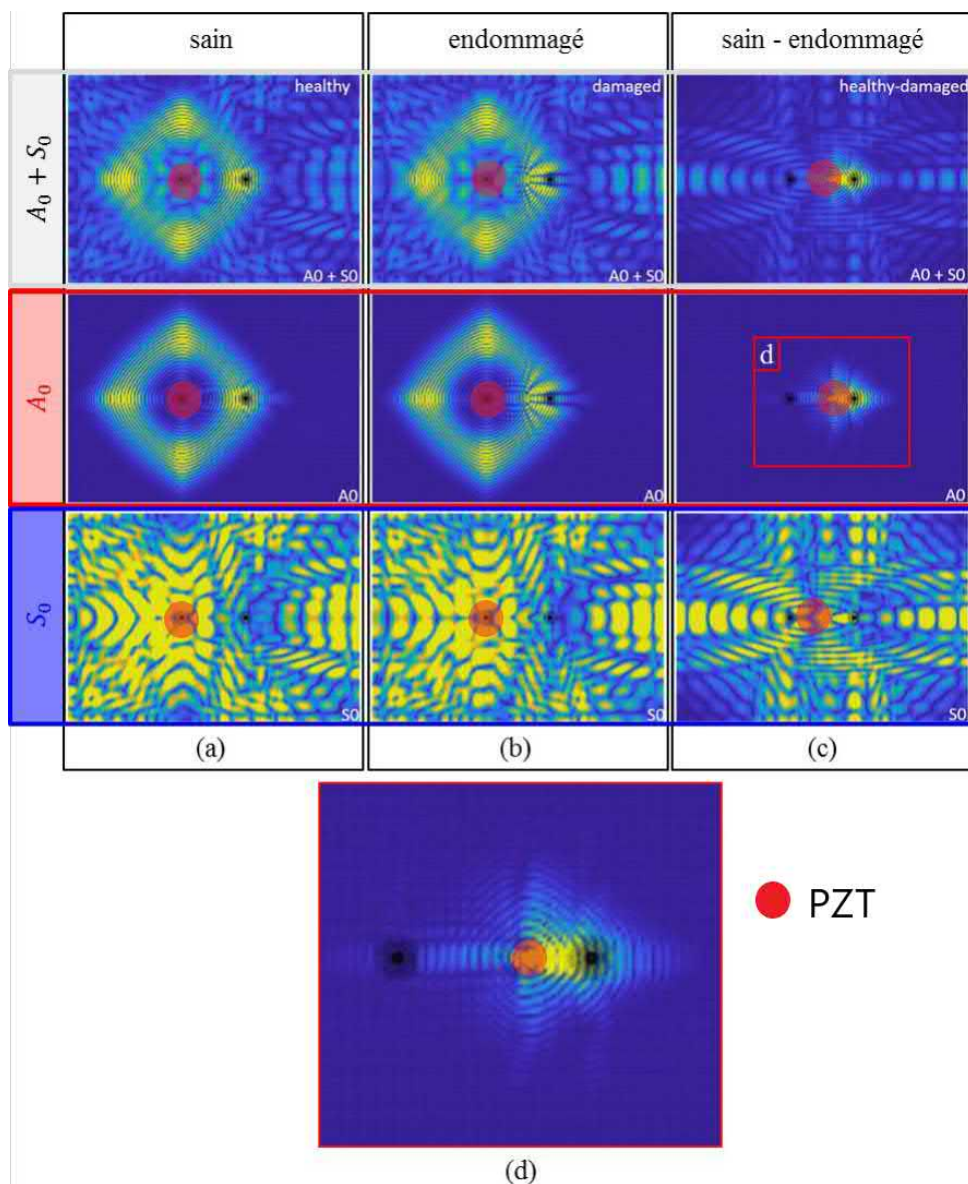


FIGURE II.13 – Exemple de déplacements provoqués par les ondes de Lamb pour une fréquence d’excitation $f_0 = 50$ kHz, à un instant $t = 0,0043$ ms après l’émission. a) Sur une structure saine. b) Sur une structure endommagée. c) Mise en évidence de l’influence de l’endommagement par soustraction des déplacements saine et endommagée. d) Vue en détail de la zone d’endommagement pour le mode A_0 (d’après [E|Liz19]). Le dommage correspond au point noir situé à droite du PZT (rond rouge).

S_0 en se basant sur des arguments de symétrie. C’est un bon moyen d’illustrer l’influence de l’endommagement simulé sur la propagation de chaque mode de Lamb : la soustraction des déplacements obtenus entre un cas sain et endommagé permet de mettre en évidence l’interaction de l’endommagement avec les ondes qui se propagent. Sur la Figure II.13, les lignes correspondent aux différents modes ($A_0 + S_0$ sur la première ligne, A_0 sur la seconde, et S_0 sur la dernière) et les colonnes aux différents états considérés (*sain* pour la première colonne, *endommagé* pour la seconde, et *sain - endommagé* pour la dernière). Sur la dernière colonne, il est

ainsi possible de voir que le dommage diffracte à la fois le mode S_0 et le mode A_0 et que des échanges d’énergie entre les deux au niveau du dommage sont donc possibles. Il est important de noter que ces observations sont propres au cas d’un dommage simulé numériquement et ne sont pas nécessairement transférables à un cas d’un dommage réel. Cependant, elles montrent qu’un endommagement (ici modélisé par un changement local de propriétés de la structure hôte) génère des modifications notables dans la propagation des modes A_0 et S_0 .

II.2.2.3 Les *dual*-PZTs pour la séparation des contributions des différents modes

Mettre en lumière expérimentalement le phénomène de conversion de mode est plus compliqué que de l’observer numériquement. En effet, il faut être capable de séparer expérimentalement les contributions des modes S_0 et A_0 d’un signal reçu par un élément piézo-électrique. Il existe plusieurs méthodes permettant de dissocier ainsi expérimentalement les modes A_0 et S_0 . Cela peut être fait au moment de l’émission (il s’agit alors de génération sélective des modes [R|SYL06]) ou à la réception. Dans le premier cas, il est fait en sorte de n’émettre qu’un seul des deux modes, dans le second, les deux modes se propagent mais leurs contributions sont isolées dans la réponse mesurée.

Les PZTs possède la *capacité à s’accorder* avec les différents modes d’ondes de Lamb qui se propagent dans la structure hôte (“*Lamb wave tuning*” dans la littérature) [R|Giu15; R|ZY11] ce qui permet la génération d’un seul mode pour un fréquence donnée étant donnée la géométrie du PZT et un matériau sur lequel il est fixé. Cette méthode ne nécessite aucun traitement du signal car un seul mode est présent dans la réponse mesurée mais limite l’étude de propagation d’ondes à certaines fréquences d’excitation qui ne sont pas forcément optimales du point de vue de la taille de l’endommagement à surveiller et en fonction du matériau étudié.

Une alternative consiste à utiliser des *PZTs co-localisés*, c’est à dire collés de façon symétrique par rapport au plan médian sur les deux faces de la structure hôte [R|Kim+07; R|SYL06]. Lorsque les deux PZTs sont alimentés en phase, les PZTs génèrent principalement les modes symétriques. Lorsque les deux PZTs sont alimentés en opposition de phase, les PZTs génèrent principalement les modes antisymétriques. De plus la somme des signaux mesurés sur les deux PZTs donne la contribution du mode S_0 , alors que la soustraction de ces deux signaux donne la contribution du mode A_0 . Le principal avantage de cette méthode est qu’elle repose sur un câblage très simple et ne nécessite pas de traitement du signal supplémentaire. L’inconvénient majeur est que cette méthode repose sur le fait que les PZTs sont parfaitement co-localisés. En pratique, il peut être compliqué de coller deux PZTs de façon parfaitement symétrique et identique sur une structure et d’avoir accès aux deux surfaces libres de la structure étudiée.

L’utilisation de *peignes inter-digités* est aussi une solution permettant de sélectionner les modes émis ou reçus [R|Lam+17; R|Glu+10]. Les transducteurs interdigitaux sont constitués de deux électrodes en forme de peigne sur chaque surface du diélectrique dont les polarités sont opposées. L’espacement entre les branches des électrodes correspond à la moitié de la longueur d’onde que l’on souhaite générer, que l’on obtiendra à une fréquence bien définie. Ces transducteurs permettent la propagation du mode désiré dans la direction perpendiculaire aux branches des peignes. Comme pour la méthode par accord du PZT, cette méthode nécessite un bon dimensionnement du transducteur pour une application précise et est limitée à l’utilisation de longueurs d’onde (et donc de fréquences d’excitation) bien précises.

La solution qui a été choisie ici est basée sur l’utilisation de “*dual PZTs*”. Un dual PZT désigne un transducteur piézoélectrique dont l’électrode supérieure est composée de deux parties : le *ring* (anneau) et le *disk* (disque), comme le montre la Figure II.14. Ces transducteurs peuvent être fabriqués sur mesure en s’adressant à des fabricants ou à partir de PZT disques

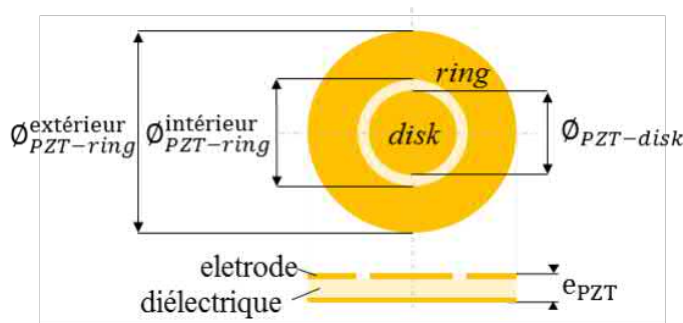


FIGURE II.14 – Schéma d’un dual PZT et dimensions le caractérisant (d’après [E|Liz19]).

classiques, plus faciles à obtenir (par sablage ou gravure laser). Le signal envoyé ou reçu par chacune des électrodes peut être traité de façon simultanée ou indépendante. Les dual PZTs sont intéressants car ils permettent de décomposer les contributions des modes A_0 et S_0 dans les signaux reçus [R|YSI11b]. Ces dual PZTs sont une alternative sérieuse aux méthodes présentées précédemment puisqu’ils sont peu encombrants (ils ne nécessitent pas d’avoir accès aux deux surfaces de la structure), et la séparation des modes n’est pas restreinte à une fréquence d’excitation. Le principal inconvénient de cette approche est qu’elle requiert un traitement du signal plus poussé pour pouvoir extraire chaque contribution.

II.2.2.4 Mise en évidence expérimentale du phénomène de conversion de modes

Grâce à cette approche, l’influence d’un dommage artificiel correspondant à un aimant et d’un dommage réel correspondant à un délaminage sur les signaux mesurés peut être observée expérimentalement. L’ajout d’un aimant augmente localement la masse de la structure et s’applique symétriquement sur la structure. Le délaminage sépare les plis du matériau composite à diverses profondeurs dans l’épaisseur du matériau (voir Figure II.15).

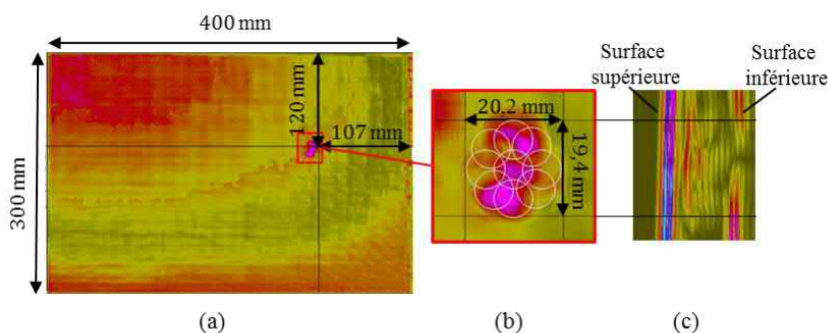


FIGURE II.15 – C-scan de la plaque endommagée par choc laser. a) C-scan global, vue du dessus de la plaque. b) C-scan de la zone endommagée, vue du dessus. Les cercles désignent les zones d’impact successives utilisées pour générer l’endommagement. c) B-scan de la zone endommagée montrant la profondeur de l’endommagement (d’après [E|Liz19]).

La Figure II.16 montre les signaux obtenus sur le chemin traversant l’endommagement. Pour le cas des aimants, l’endommagement atténue fortement la contribution directe du mode A_0 . Cet effet est également constaté pour le délaminage dans une moindre mesure. Dans les deux cas, le mode S_0 est moins impacté : les contributions directes de ce mode dans les deux cas sont très

peu atténuées, et les différences constatées dans le reste des signaux sont dues aux conversions de mode de A_0 vers S_0 .

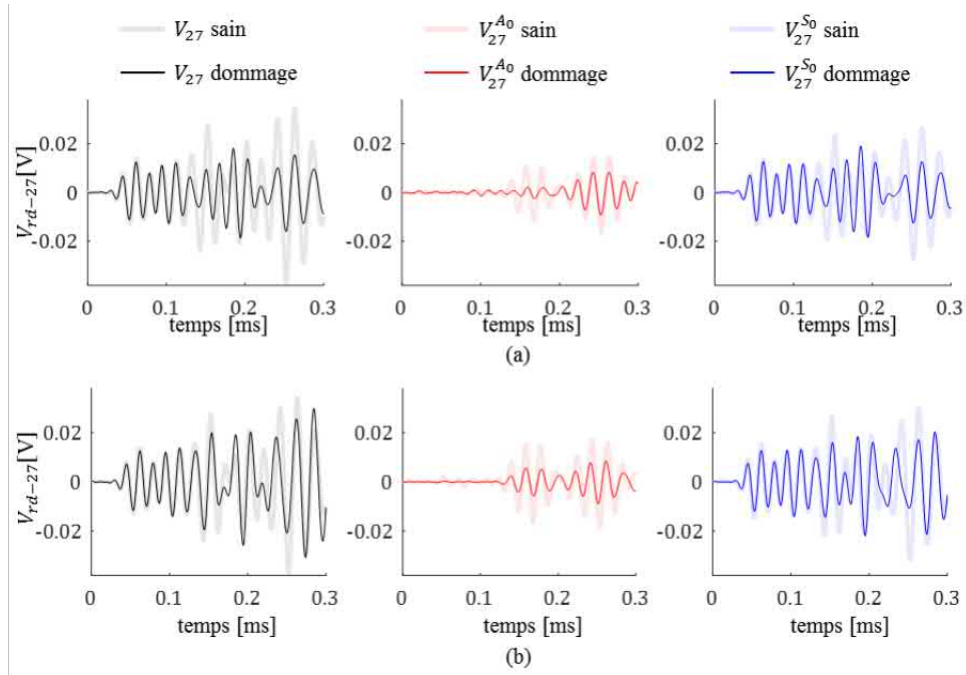


FIGURE II.16 – Influence de l’endommagement sur les signaux mesurés (originaux et modes décomposés) pour le chemin 27 pour un signal émis par le ring à $f_0 = 50$ kHz et mesuré par le *disk*. a) influence d’un aimant, et b) influence du délaminage (d’après [E|Liz19]).

II.2.3 Interactions non-linéaires “ondes/dommage” [E|Ghr16; E|Li21]

L’hypothèse réalisée jusqu’ici est que l’interaction avec le dommage “*filtre*” (au sens d’un filtre linéaire invariant dans le temps) le contenu spectral du champ incident pour produire le champ diffracté. Cela revient à dire que dans le champ diffracté les composantes fréquentielles du signal d’entrée sont uniquement déphasées et amplifiées ou atténuées. Or, il a été expérimentalement observé que les interactions *ondes/dommage* peuvent générer de nouveaux contenus spectraux. L’objet de cette section est donc d’illustrer ces phénomènes non-linéaires⁸ d’interactions *ondes/dommage* qui sont intéressants du point de vue du SHM car potentiellement porteurs d’informations liées au dommage.

II.2.3.1 État de l’art relatif au interactions “ondes/dommage” non-linéaires

Plusieurs états de l’art concernant l’utilisation de méthodes ultrasonores non-linéaires pour la caractérisation d’endommagements ont déjà été réalisés [R|Yun+21; R|Bro+14; R|Jha09; R|CL15]. Il ressort de ces analyses que les méthodes non-linéaires sont avantageuses en regard des

8. Le phénomène de conversion de modes décrit à la section précédente peut aussi être interprété comme un phénomène non-linéaire au sens spatial du terme. En effet un champ d’ondes incident S_0 associé au nombre d’onde k_{S_0} va interagir avec le dommage pour générer un champ d’ondes diffractées contenant les modes S_0 et A_0 et donc associé aux nombres d’ondes k_{S_0} et k_{A_0} . De ce point de vue, une entrée avec un contenu spectral k_{S_0} va être transformée en une sortie avec un contenu spectral spatial k_{S_0} et k_{A_0} . Le phénomène de conversion de mode peut donc être vu au niveau spatial comme non-linéaire.

approches linéaires car elles sont plus sensibles à la présence de dommages à des stades précoces et car les propriétés non-linéaires peuvent être corrélées à des caractéristiques intrinsèques du dommage. Les différents modèles non-linéaires liant les ondes de Lamb et les dommages sont discutés dans la suite.

Non-linéarité élastique : La présence d’une non-linéarité dans les réponses dynamiques obtenues a été en premier lieu expliquée par l’introduction de termes quadratiques dans la loi de Hooke liant la contrainte σ à la déformation ϵ au sein d’un volume macroscopique de matériau :

$$\sigma = E(1 + \beta\epsilon)\epsilon \quad (\text{II.30})$$

Le facteur β décrit les effets non-linéaires quadratiques au sein du matériau et pour les matériaux usuels cette contribution est faible en regard de la contribution linéaire, *i.e.* $|\beta\epsilon| \ll 1$.

Une onde de traction/compression (représentative du mode S_0) se propageant selon x dans un milieu non-linéaire isotrope de ce type est à présent considérée. À $x = 0$ le déplacement selon x , noté $u(0, t) = U_0 \cos(\omega t)$ est imposé. En supposant que la non-linéarité du matériau peut être vue comme la perturbation du cas linéaire, il est possible de déterminer le champ de déplacement $u(x, t)$ au sein du matériau [R|Jha09] :

$$u(x, t) = A_1 \cos(\omega t - kx) - A_2 \cos(2\omega t - 2kx) \quad \text{avec :} \quad A_2 = \frac{\beta A_1^2 k^2 x}{4} \quad (\text{II.31})$$

La relation quadratique contrainte-déformation décrite à l’Eq. (II.30) est un modèle simplifié qui a pour conséquence la génération d’une harmonique de rang 2 proportionnelle au coefficient β . L’amplitude de l’harmonique de rang 2, notée ici A_2 , dépend également de x : il y a donc un effet cumulatif et l’amplitude de cette harmonique croît au fur et à mesure de la propagation dans le matériau. Des lois plus compliquées que celle présentée en Eq. (II.30) (comme des lois polynomiales ou hystérétiques) peuvent aussi être considérées. Le comportement obtenu est globalement similaire à celui observé ici, avec pour résultat la génération d’harmoniques plus élevées dans le spectre [R|Bro+14].

Ces modèles ont été utilisés dans un contexte de SHM pour l’analyse de données expérimentales [R|CL15 ; R|Hon+17 ; R|Yan+18 ; R|Tie+20 ; R|Wan+21 ; R|Che+22]. Une critique de ces approches est que ce modèle à l’échelle mésoscopique décrit la non-linéarité existante dans le matériau hôte, et *partout* dans le matériau. Il est important de rappeler ici que l’effet cumulatif n’est observable que si le matériau est non-linéaire sur tout le chemin de propagation des ondes de Lamb. Or, dans le cas du SHM, le dommage est généralement localisé et donc la seule zone dans laquelle le matériau peut être considéré comme non-linéaire est également localisée (zone endommagée). En conclusion, la théorie développée ci-dessus ne semble pas forcément bien adaptée au cas du SHM même si son utilisation est très répandue dans la littérature.

Non-linéarité acoustique de contact Le modèle de relation contrainte-déformation non-linéaire ne modélise pas réellement l’interaction qui existe au niveau local entre les ondes de Lamb et le dommage. Des modèles ont été proposés pour décrire plus précisément cette interaction. La rigidité bi-linéaire est une théorie simplifiée qui décrit le comportement local de l’interaction *ondes/dommage*. Comme le montre la Figure II.17, avec un chargement externe alterné appliqué à l’éprouvette, la fissure s’ouvre et se ferme, ce qui entraîne un changement de la rigidité globale vue par l’onde. Dans un état de compression, la fissure est fermée et la rigidité ne change pas tandis que dans un état de tension, la fissure est ouverte, ce qui réduit la rigidité locale [R|Yun+21 ; R|Bro+14]. Ce phénomène est appelé non-linéarité acoustique de contact

(CAN pour *Contact Acoustic Nonlinearity*). En conséquence de la propagation des ondes ultrasonores à travers une fissure respirante, des harmoniques d’ordre supérieures apparaissent dans le spectre fréquentiel [R|Yun+21 ; R|Bro+14].

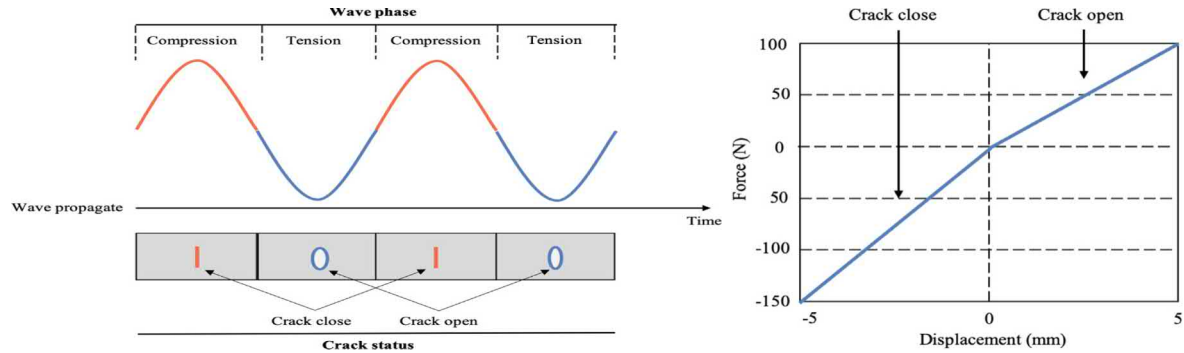


FIGURE II.17 – A gauche, illustration du phénomène d’ouverture et de fermeture d’une fissure au passage d’une onde de Lamb. A droite, relation *force/déplacement* correspondante aussi appelée *raideur bilinéaire* (d’après [R|Yun+21]).

Le modèle bilinéaire fournit une description simplifiée du contact des fissures. Cependant, les surfaces des fissures sont généralement rugueuses, et donc seules certaines parties des surfaces des fissures sont réellement en contact les unes avec les autres ou en contact avec les ondes ultrasonores qui se propagent. Pour rendre le modèle plus proche de la réalité, des modèles plus complexes ont été construits. Par exemple, la théorie de Hertz a été introduite pour établir un modèle de fissure, où une fissure est considérée comme deux demi-espaces élastiques interagissant l’un avec l’autre sans frottement [R|NS97 ; R|SN95]. Johnson et Johnson [R|JJ87] ont utilisé les sinusoides pour approximer la forme des surfaces rugueuses. Greenwood et Williamson [R|GW66] ont divisé la surface de contact en de multiples petits contacts simples de même rayon de courbure et distribués aléatoirement le long de la surface. Bien qu’aucune nouvelle composante du signal n’ait été mise en évidence en utilisant de ces modèles complexes, ils fournissent cependant une représentation plus fidèle des phénomènes non-linéaires relatifs à l’interaction *ondes/dommage*.

Bilan : Il a été expérimentalement observé à de nombreuses occasions que les interactions *ondes/dommage* peuvent générer de nouveaux contenus spectraux qui ne sont pas présents dans le signal initial lorsque des ondes de Lamb interagissent avec des dommages dans les matériaux composites [R|MPZ08 ; R|Yel+16 ; R|YMM17 ; R|Hon+17 ; R|SNW17 ; R|Yan+18 ; R|MB19 ; R|Tie+20 ; R|Wan+21 ; R|SN21 ; R|Che+22]. Cependant, les études théoriques actuelles visant à comprendre les mécanismes non-linéaires d’interaction *ondes/dommage* sont pour l’instant incapables d’englober l’ensemble des phénomènes observés [R|Yun+21] et il reste donc beaucoup à faire dans ce domaine.

II.2.3.2 Génération d’un délaminage et étude des non-linéarités engendrées

L’objet de cette section est de décrire comment un dommage réaliste de type “*délaminage*” a été réalisé au PIMM avec les moyens expérimentaux disponibles au sein de l’équipe LASER, avant de voir comment modéliser la dynamique non-linéaire de ce dommage puis de valider expérimentalement les prédictions numériques non-linéaires obtenues.

Génération de délaminage par choc Laser : Le délaminage est l’un des dommages les plus difficiles à surveiller car il se produit à l’intérieur du matériau composite et donc n’est pas détectable visuellement. Afin de générer des dommages réalistes dont le comportement dynamique peut être étudié, plusieurs solutions ont déjà été proposées par la communauté SHM. Parmi elles, les insertions de Téflon et les impacts conventionnels sont les principales techniques existantes utilisées (voir par exemple [R|Soh+03b ; R|Qua+10 ; R|Qua+11b ; R|Yeu+12]). La principale faiblesse de ces techniques de génération de dommages est qu’elles ne permettent pas un contrôle efficace des dommages induits dans les matériaux composites ou que les dommages induits ne sont pas représentatifs des dommages rencontrés en conditions réelles. En particulier, la calibration de la délamination induite par des impacts conventionnels est assez difficile. En plus des délaminations inter-laminaires, les impacts conventionnels peuvent également induire d’autres types de dommages tels que la rupture de fibre. Quant à la technique des insertions de Téflon, ces dernières restent encore très loin de représenter une délamination réaliste. Le dommage induit dans ces cas n’est qu’une simulation grossière du réel et donc l’interaction *ondes/dommage* simulée peut être très différente de celle existant réellement entre ce même signal d’excitation et un dommage réel. Comme alternative aux techniques conventionnelles de génération de dommages, nous proposons donc d’étudier la technique des ondes de chocs Laser, une méthode prometteuse qui peut être utilisée pour générer des délaminations calibrées en taille et position dans les composites.

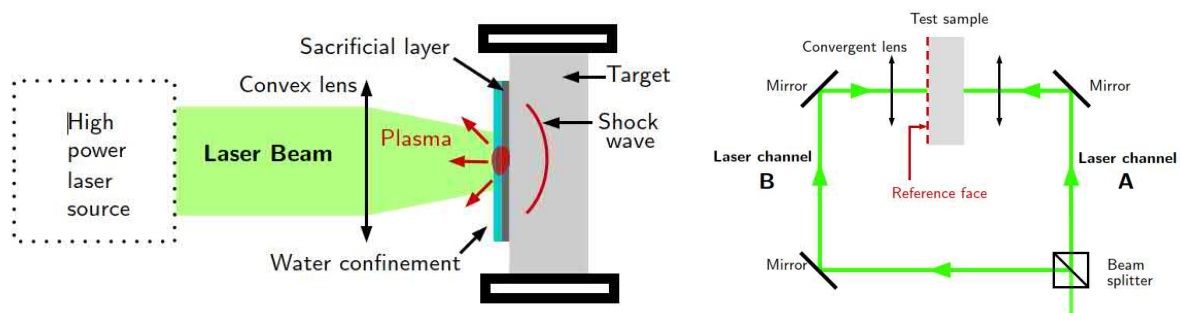


FIGURE II.18 – À gauche, illustration du principe du choc Laser et à droite, schéma représentant le choc Laser symétrique (d’après [A|Ghr+17a]).

Dans le cas d’un choc laser à impulsion frontale (voir Figure II.18 à gauche), l’onde de choc incidente créée par l’expansion du plasma se propage à travers l’épaisseur de la cible. Lorsqu’elle atteint la face arrière de l’échantillon, cette onde est réfléchiée en une onde de libération se propageant vers l’arrière. Pendant ce temps, la face avant du matériau est déchargée à la fin de l’impulsion de pression. Cela génère également une onde de libération se propageant de la face avant vers la face arrière. Ces deux ondes de libération peuvent ensuite se croiser dans l’épaisseur du matériau et conduire à des contraintes de traction locales élevées. Si les contraintes de traction induites sont suffisantes, un dommage peut être créé à l’intérieur du matériau. La durée de l’impulsion de pression est un paramètre crucial car c’est celui qui influence la position du maximum de la contrainte de traction (voir Figure II.19 en haut à droite). De plus, la sévérité des dommages est directement liée au niveau des contraintes de traction induites, lui-même lié à la durée de l’impulsion (voir Figure II.19 en bas à droite).

Dans la configuration symétrique du choc laser, les deux côtés gauche et droit de la cible sont irradiés simultanément (voir Figure II.18 à droite). L’onde de choc incidente créée par l’expansion du plasma qui est générée par l’impulsion gauche, se propage dans l’épaisseur de la

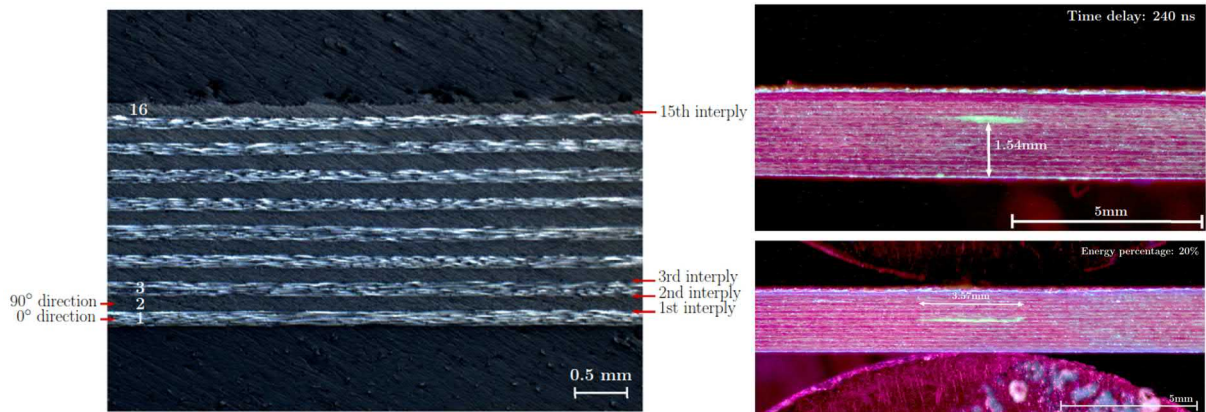


FIGURE II.19 – A gauche, coupe du matériau composite endommagé par choc Laser. A droite, coupes de dommages générés par choc Laser à différentes profondeurs et de différentes tailles (d’après [A|Ghr+17a]).

cible. Lorsqu’elle atteint la face droite de l’échantillon, elle est réfléchiée en une onde de libération. De même, l’onde de choc incidente créée par l’impulsion droite est réfléchiée en une onde de libération lorsqu’elle atteint la face gauche de l’échantillon. Le croisement des deux ondes de libération crée une forte contrainte de traction locale qui, si elle est suffisamment élevée, peut générer un dommage à une profondeur d’épaisseur donnée (voir Figure II.19 en haut à droite). En réglant le délai entre les deux impulsions laser, la position des zones de charge de traction et donc la position de l’endommagement à travers l’épaisseur du matériau irradié peut être ajustée (voir Figure II.19 en bas à droite).

Le choc Laser, disponible au PIMM grâce aux collègues de l’équipe LASER, permet donc d’engendrer dans des matériaux composites multi-couches des dommages réalistes dont la position dans l’épaisseur ainsi que la taille sont contrôlées, ce qui constitue un point fondamental pour le SHM. La taille maximale d’une délamination créée par choc Laser est déterminée par la taille du faisceau qui est de l’ordre de 7 mm. Néanmoins, il est possible de générer des dommages de plus grande taille en réalisant une série d’impacts successifs. Ici, une série de coupons équipés de deux éléments piézo-électriques à la fois sain et impactés une fois (délamination de 7 mm), deux fois (délamination de 14 mm) ou trois fois (délamination de 21 mm) seront considérés.

Modélisation numérique du délaminage : La méthode des éléments finis est employée pour simuler la propagation des ondes de Lamb dans les plaques composite saine et endommagées qui sont disponibles expérimentalement (voir Figure II.20). La plaque composite contenant 16 plis est modélisée en collant deux couches d’éléments *coque* ensemble à l’aide de connexions rigides, sauf pour la région de délamination. Chaque couche contient 8 plis, ce qui implique que la délamination simulée se situe au niveau du plan médian de la plaque composite. Comme le modèle est symétrique par rapport à l’axe x , seule la moitié de la plaque est modélisée et une condition de limite symétrique est appliquée à l’axe longitudinal. Deux patches piézoélectriques (PZT) sont collés à la surface de la plaque pour la génération et la mesure des ondes de Lamb. Le signal d’entrée est un *burst* sinusoïdal de 5 cycles avec une fréquence centrale de 52 kHz.

Dans le but de déterminer un modèle de délamination qui soit le plus proche possible de la réalité expérimentale, plusieurs modèles candidats ont été testés :

- **Réduction locale de la rigidité :** Dans ce modèle la rigidité locale au niveau de la région

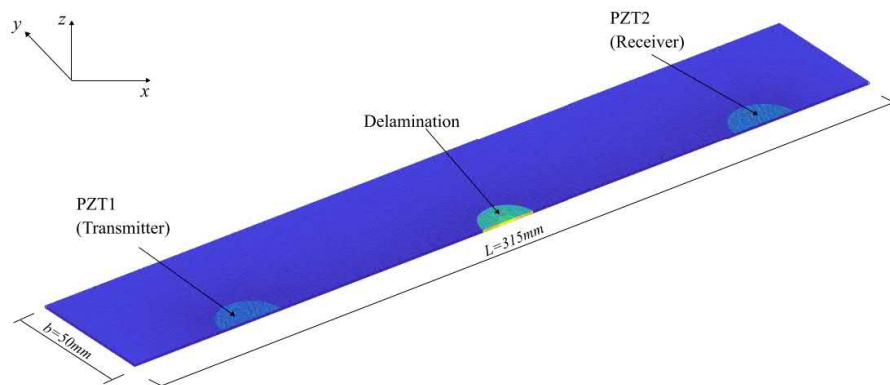


FIGURE II.20 – Modèle éléments finis mis en oeuvre pour la simulation de la délamination (d’après [E|Li21]).

endommagée est réduite afin de simuler les effets du délamination sur la rigidité globale de la structure. Les surfaces supérieure et inférieure de la région correspondant à la délamination sont toujours couplées par des connexions rigides (voir Figure II.21, à gauche).

- **Modèles à ressorts** : Ce modèle consiste en un ensemble de ressorts reliant les nœuds des couches supérieure et inférieure et réparties au niveau de la région de délamination (voir Figure II.21, à droite). Ces ressorts peuvent potentiellement avoir des comportements dynamiques non-linéaires. Dans la direction hors du plan, l’interaction entre les deux surfaces de délamination est modélisée comme un contact “dur”, c’est-à-dire que lorsque les deux surfaces sont en contact, la force normale tend à les séparer pour éviter la pénétration entre deux surfaces, et lorsque les deux surfaces sont séparées, aucune force ne s’exerce sur elles. Dans le plan, le frottement est l’interaction dominante des interfaces de délamination. Pour modéliser ce phénomène, un modèle simple de frottement visqueux modifié est mis en oeuvre.
- **Modèles de *contact/friction*** : Dans le modèle mentionné précédemment, les interactions normales et tangentielles sont calculées séparément et ne s’affectent pas mutuellement. Cependant, dans le processus d’interaction *ondes/dommage*, la distribution de la contrainte sur les surfaces de contact n’est pas uniforme, de sorte que la pression de contact normale est plus importante dans certaines parties, et très faible dans d’autres. Par conséquent, un modèle combiné *contact/friction* est proposé pour mieux simuler le comportement mécanique des interfaces de délamination. Dans ce modèle, les ressorts non linéaires sont toujours utilisés dans la direction hors du plan pour modéliser l’interaction de contact normale entre les interfaces de délamination. Dans la direction tangentielle, le modèle de friction de Coulomb est utilisé. Selon la loi de friction, lorsque le glissement relatif se produit entre les deux surfaces de contact, la force de friction est proportionnelle à la force normale exercée par chaque surface sur l’autre.

Comparaison entre les modèles de simulation et l’expérimental : La plaque saine est d’abord utilisée pour la vérification du modèle éléments-finis en comparant les signaux correspondant aux mesures réalisées par les éléments piézo-électriques avec les résultats expérimentaux, comme le montre la Figure II.22. La partie de gauche montre les signaux dans le domaine temporel et celle de droite montre les caractéristiques dans le domaine fréquentiel des deux signaux. Un bon

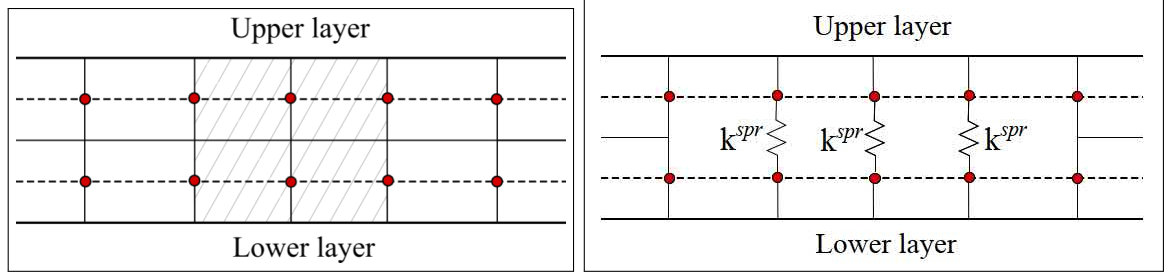


FIGURE II.21 – À gauche, illustration schématique du modèle de réduction de raideur et à droite du modèle à ressorts (d’après [E|Li21]).

accord existe globalement entre la simulation et l’expérience, surtout en basses fréquences.

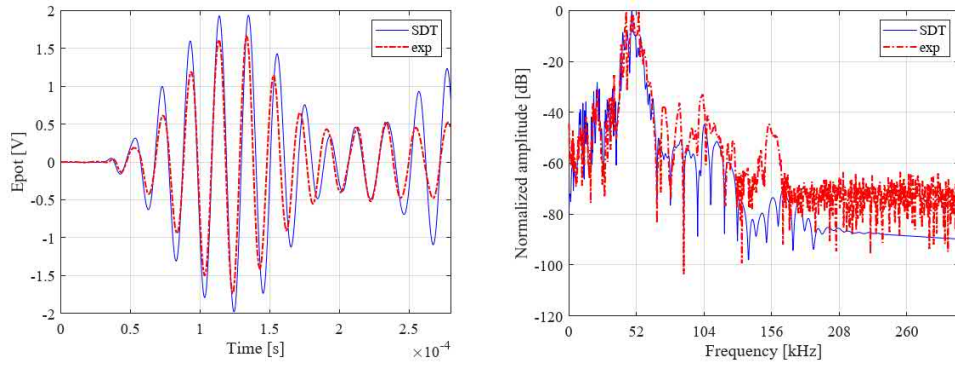


FIGURE II.22 – Comparaison des réponses expérimentales et simulées à l’état sain dans le domaine temporel (à gauche) et fréquentiel (à droite) (d’après [E|Li21]).

De façon à comparer l’influence du dommage sur le signal de sortie mesurée au niveau de l’élément piézoélectrique, une première métrique appelée NRE_2 a été définie de la façon suivante :

$$NRE_2 = \frac{\int_0^T [x(t) - y(t)]^2 dt}{\max \left(\int_0^T x(t)^2 dt, \int_0^T y(t)^2 dt \right)} \quad (\text{II.32})$$

avec $x(t)$ le signal de référence à l’état sain et $y(t)$ le signal à l’état endommagé auquel il est comparé. Cette métrique reflète l’énergie normalisée du signal de différence entre l’état sain et l’état endommagé considéré. Cette métrique ne se focalise pas exclusivement sur les effets non-linéaires mais sur toutes les différences observées qu’elles soient linéaires ou non.

Une seconde métrique basée sur le taux de distorsion harmonique totale normalisé (THD pour *Total Harmonic Distortion* en anglais) a aussi été utilisée pour quantifier les effets non-linéaires induits par le dommage. Cette métrique est définie de la façon suivante :

$$THD_{\text{norm}} = \frac{THD[y(t), 3] - THD[x(t), 3]}{THD[x(t), 3]} \quad \text{avec} \quad THD[u(t), N] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} \quad (\text{II.33})$$

ou U_n désigne l’amplitude de l’harmonique de rang n contenue dans le signal $u(t)$. La métrique $THD_{\text{norm}}[u(t), 3]$ correspond donc à la différence normalisée entre les taux de distorsion

harmonique calculés jusqu’à l’ordre $N = 3$ entre les signaux observés à l’état sain et à l’état endommagé. Cette métrique se focalise donc spécifiquement sur les effets non-linéaires générés dans le dommage.

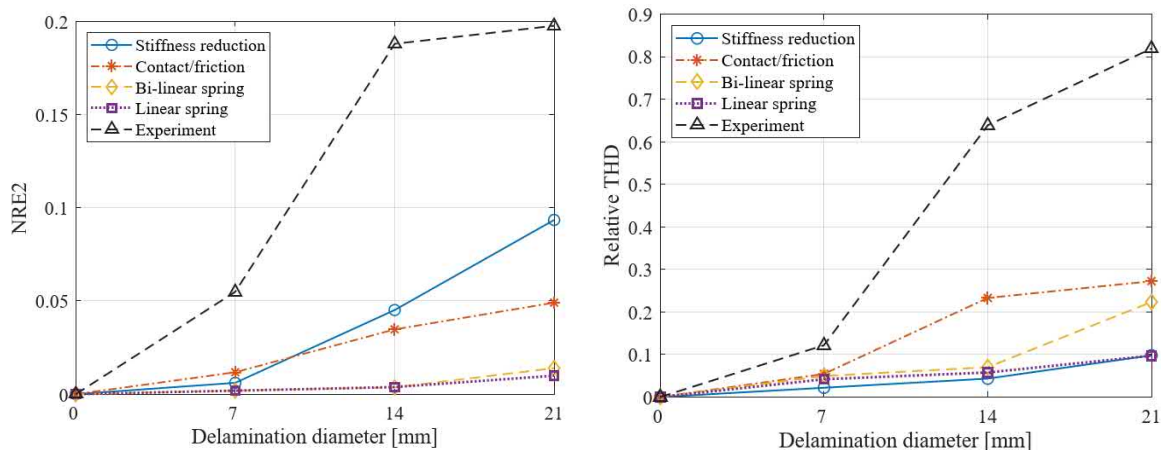


FIGURE II.23 – Comparaison des signaux à l’état sain et à l’état endommagé au sens des métriques proposées par les Eq. (II.32) (à gauche) et (II.33) (à droite) pour les signaux expérimentaux et les signaux issus de simulations avec les différents modèles non-linéaires (d’après [E|Li21]).

Les résultats obtenus en comparant les signaux à l’état endommagé et à l’état sain au sens des métriques proposées par les Eq. (II.32) et (II.33) pour les signaux expérimentaux et les signaux issus de simulations avec les différents modèles non-linéaires sont présentés sur la Figure II.23. Sur ces figures, il est d’abord possible de constater que les deux métriques proposées croissent de façon monotone avec la sévérité de l’endommagement pour les signaux expérimentaux et pour les modèles de simulation, ce qui est une propriété désirable de ces métriques dans un contexte de SHM et plus particulièrement dans une optique de quantification. Par ailleurs, les modèles de simulations produisent de façon générale des différences entre les signaux *sains* et les signaux *endommagés* moins importantes que celles observées expérimentalement. Le modèle de simulation qui s’approche le plus de l’expérimental est le modèle *friction/contact*, mais il reste quand même relativement éloigné de l’expérimental au sens des métriques proposées ici. Cela signifie donc que dans l’état actuel des choses, la compréhension des phénomènes non-linéaires associés aux interactions *ondes/dommage* reste relativement limitée.

Chapitre III

Conception d'un réseau dispersé d'éléments piézo-électriques pour le SHM par ondes de Lamb de structures aéronautiques

Sommaire

III.1 Dimensionnement d'un élément piézo-électrique pour le SHM	50
III.1.1 Matériaux piézo-électriques	50
III.1.2 Modélisation de l'effet piézo-électrique	51
III.1.3 Géométrie des PZTs et accordage avec les ondes de Lamb	53
III.2 État de santé d'un élément piézo-électrique [A Reb+16b]	55
III.2.1 Principe de la procédure de diagnostic	55
III.2.2 Application industrielle sur un Airbus A380 d'essai	57
III.3 Conception d'un réseau de PZTs pour le SHM [E Liz19; A Liz+18b]	58
III.3.1 État de l'art relatif à conception de réseaux pour le SHM	58
III.3.2 Méthodologie de conception d'un réseau de PZT pour le SHM	61

Contexte et objectifs du chapitre

La question qui se pose à présent est de savoir dimensionner un réseau d'éléments piézo-électriques apte à réaliser un processus de SHM par ondes de Lamb en s'appuyant sur la connaissance de la physique vue au Chapitre II. Il faut d'abord être en mesure de dimensionner un élément piézo-électrique au sein d'un réseau (Section III.1), et être capable de s'assurer de son bon fonctionnement après son déploiement in situ au cours des opérations (Section III.2). La question de la conception d'un réseau d'éléments piézo-électriques sera ensuite abordée en Section III.3 (nombre d'éléments, position, etc...). L'objectif de ce chapitre est donc de **proposer une méthodologie complète de conception, de maintenance, et de pilotage d'un réseau d'éléments piézo-électriques dédié à la surveillance d'une structure aéronautique par ondes de Lamb.**

III.1 Dimensionnement d'un élément piézo-électrique pour le SHM

Le dimensionnement de la géométrie d'un élément piézo-électrique au sein d'un réseau nécessite de comprendre les bases de la piézo-électricité (Section III.1.1), le comportement électrique macroscopique d'un élément piézo-électrique (Section III.1.2), ainsi que les interactions existant entre un élément piézo-électrique et les ondes de Lamb se propageant dans la structure hôte sur laquelle il est collé (Section III.1.3).

III.1.1 Matériaux piézo-électriques

L'effet piézo-électrique présent dans certains matériaux génère un couplage au niveau mésoscopique entre les grandeurs duales électriques (champ électrique \mathbf{E} et déplacement électrique \mathbf{D}) et les grandeurs duales mécaniques (champ de contraintes $\boldsymbol{\sigma}$ et champ de déformation $\boldsymbol{\epsilon}$). Ce couplage est réversible dans le sens où une sollicitation mécanique du matériau génère une conséquence électrique (effet *direct*) et qu'une sollicitation électrique du matériau a des conséquences mécaniques (effet *inverse*). Ces effets ont été découverts et mis en évidence par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880 [R|CC81]. Dans un contexte de SHM, la réversibilité est particulièrement intéressante car l'effet direct permet de faire d'un élément piézo-électrique un capteur et l'effet inverse de faire d'un élément piézo-électrique un actionneur. Un unique élément piézo-électrique, nommé *transducteur*, peut donc séquentiellement avoir les rôles de capteur et d'actionneur.

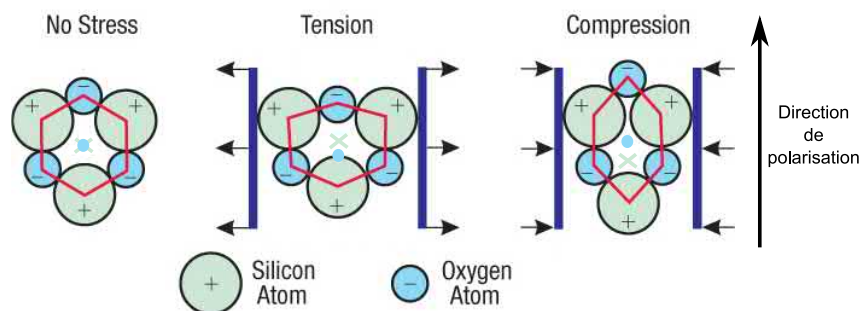


FIGURE III.1 – Illustration de l'origine de l'effet piézo-électrique dans le cas d'une maille élémentaire de Quartz. Le rond bleu et la croix verte désignent les barycentres des charges négatives et positives.

Cet effet est dû à la configuration des mailles cristallines composant les matériaux piézo-électriques. Dans le cas du Quartz (voir Figure III.1), matériau piézoélectrique à l'état naturel, la maille élémentaire est constituée de trois atomes de silicium et de trois atomes d'oxygène. Les atomes de silicium ont un diamètre supérieur à ceux d'oxygène et sont chargés positivement tandis que les atomes d'oxygène sont chargés négativement. Au repos, la géométrie de la maille est hexagonale ce qui a pour conséquence que les barycentres des charges positives et négatives sont confondus. Cependant si cette maille est déformée, du fait de la différence de diamètres existant entre les atomes de silicium et d'oxygène, les barycentres des charges positives et négatives ne sont plus confondus. Il y a donc création d'un dipôle électrique à l'échelle d'une maille élémentaire (voir Figure III.1).

Les matériaux piézo-électriques couramment utilisés aujourd'hui sont des matériaux de synthèse et le plus courant d'entre eux est le PZT qui est un mélange de plomb, de zirconate, et de titanate. Ce matériau se présente sous la forme de poudres frittées pour devenir des céramiques

III.1. Dimensionnement d'un élément piézo-électrique pour le SHM

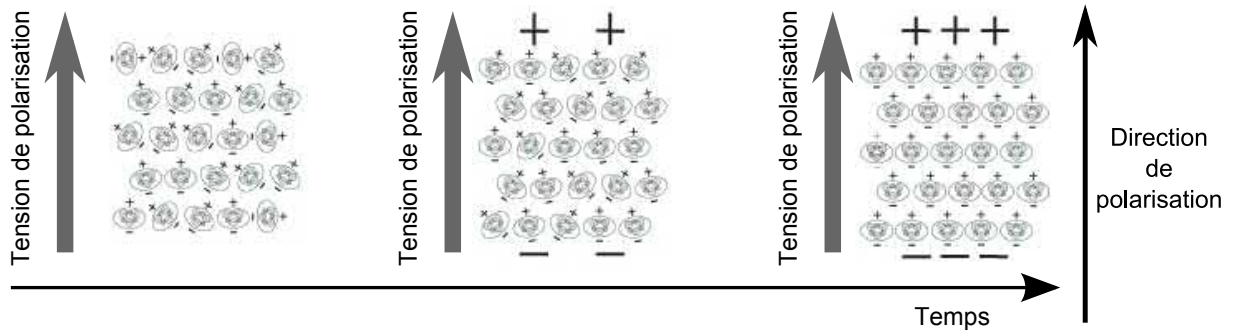


FIGURE III.2 – Processus de polarisation d'un matériau pour le rendre piézo-électrique.

et dont les proportions entre constituants peuvent varier pour obtenir des propriétés piézo-électriques diverses. Comme vu précédemment, l'effet piézo-électrique existe à l'échelle d'une maille élémentaire, mais pas nécessairement à l'échelle macroscopique si les mailles ne sont pas organisées de façon régulière. Dans le cas des PZTs qui sont issus d'un mélange de poudres, les mailles ne sont pas naturellement organisées et une opération de polarisation du matériau est nécessaire pour le rendre piézo-électrique. La polarisation consiste à plonger le matériau dans un champ électrique intense de façon à forcer les mailles élémentaires à s'aligner dans une direction privilégiée appelée direction de polarisation (voir Figure III.2). Si les matériaux piézo-électriques peuvent être polarisés, ils peuvent également être dépolarisés sous l'effet d'un champ électrique inverse intense, d'une déformation mécanique intense ou bien si leur température dépasse une température limite nommée *température de Curie*. L'intérêt des PZTs réside dans le fait que leur géométrie peut être choisie ainsi que leur propriétés dans une certaine mesure.

III.1.2 Modélisation de l'effet piézo-électrique

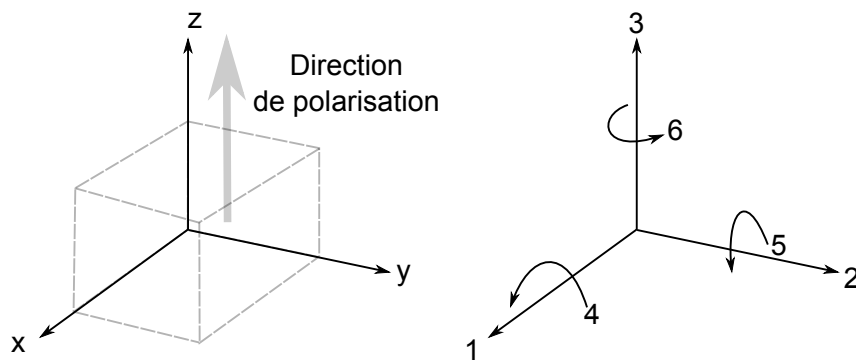


FIGURE III.3 – Conventions utilisées pour la modélisation de l'effet piézo-électrique.

Les conventions de la Figure III.3 sont utilisées pour modéliser l'effet piézo-électrique au niveau mésoscopique⁹. Les notations suivantes seront utilisées dans la suite de la section :

- La direction de polarisation est notée z ou 3

9. Le terme *mésoscopique* désigne ici une échelle spatiale intermédiaire entre une échelle dite *microscopique* et une autre dite *macroscopique*. L'échelle mésoscopique est suffisamment étendue pour inclure un grand nombre de particules (de telle sorte que leurs propriétés statistiques ne fluctuent pas significativement) tout en restant suffisamment fine pour que les grandeurs thermodynamiques (pression, température, etc.) restent locales (ponctuelles à l'échelle macroscopique).

- Les contraintes sont regroupées dans un vecteur noté $\underline{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]$ (en N/m^2)
- Les déformations sont regroupées dans un vecteur noté $\underline{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6]$ (en m/m)
- Les composantes du champ électrique sont notées $\underline{E} = [E_1, E_2, E_3]$ (en V/m)
- Les composantes du déplacement électrique sont notées $\underline{D} = [D_1, D_2, D_3]$ (en C/m^2)

Au niveau mésoscopique, il est possible de décrire le couplage existant entre les grandeurs duales mécaniques et électriques de la façon suivante [R|Jal09] :

$$\begin{cases} \underline{\varepsilon} &= \underline{C} \cdot \underline{\sigma} + \underline{d}^t \cdot \underline{E} \\ \underline{D} &= \underline{\chi} \cdot \underline{E} + \underline{d} \cdot \underline{\sigma} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

avec :

- \underline{C} : matrice de souplesse du matériau.
- $\underline{\chi}$: matrice de permittivité diélectrique du matériau.
- \underline{d} : matrice des constantes piézoélectriques du matériau.

Les deux équations (III.1) présentent un terme de couplage entre le domaine *mécanique* et le domaine *électrique* par l'intermédiaire de la matrice des constantes piézoélectriques du matériau \underline{d} . La première équation peut être interprétée comme décrivant l'effet *direct* (mode *actionneur*) et la seconde équation comme décrivant l'effet *inverse* (mode *capteur*). Il est important de noter ici qu'un choix arbitraire a été réalisé pour écrire les équations (III.1). En effet, il a été choisi d'exprimer les variables de déformation $\underline{\varepsilon}$ et de déplacement électrique \underline{D} en fonction des variables de contrainte $\underline{\sigma}$ et de champ électrique \underline{E} . D'autre choix peuvent être réalisés, ce qui donne lieu à des écritures matricielles différentes [R|Jal09]. Les PZTs sont des matériaux isotropes transverses (voir Section II.1.2), c'est à dire qu'il s'agit de matériaux pour lesquels il existe un axe de rotation selon lequel le problème est invariant. En pratique, il s'agit généralement de la direction de polarisation z ou 3. En conséquence, seuls 10 paramètres de l'Eq. (III.1) ont besoin d'être connus (5 constantes élastiques ($C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}$), 3 constantes piézoélectriques (d_{31}, d_{33}, d_{15}), et 2 constantes diélectriques (χ_{11}, χ_{33})).

Le passage à l'échelle macroscopique peut se faire analytiquement en considérant un parallélépipède de matériau piézo-électrique et en précisant les conditions aux limites mécaniques et électriques. Il est d'usage dans ce contexte de parler de "*mode ij*" où i désigne la direction principale de la sollicitation électrique et j la direction principale de sollicitation mécanique. Par exemple, dans le cas du *mode 32*, le parallélépipède de matériau piézo-électrique sera sollicité électriquement principalement dans la direction 3 (ou z) et mécaniquement principalement dans la direction 2 (ou y) comme l'illustre la Figure III.4.

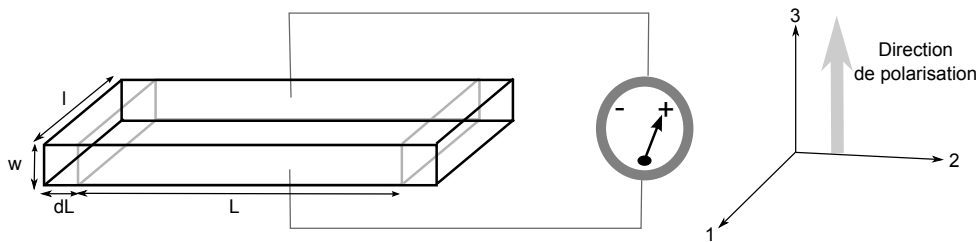


FIGURE III.4 – Illustration d'un parallélépipède piézoélectrique sollicité en mode 32.

Dans ce cas, les conditions aux limites qui sont supposées sont :

- La contrainte mécanique s'exerce uniquement selon l'axe 2 :
 $\sigma_2 \neq 0, \sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$
- Le champ électrique est uniquement appliqué selon l'axe 3 :
 $E_3 \neq 0$ et $E_1 = E_2 = 0$

Sous ces hypothèses, les équations (III.1) se réécrivent donc :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = C_{12}\sigma_2 + d_{31}E_3 \\ \varepsilon_2 = C_{22}\sigma_2 + d_{31}E_3 \\ \varepsilon_3 = C_{13}\sigma_2 + d_{33}E_3 \\ D_3 = \chi_{33}E_3 + d_{31}\sigma_2 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si à présent, le parallélépipède est sollicité de façon harmonique à la pulsation ω , alors il est possible de considérer que $\sigma_2 = \sigma_0 e^{j\omega t}$ et $D_3 = D_0 e^{j\omega t}$. Des liens entre la tension V et le courant I (qui sont des grandeurs macroscopiques) au niveau du parallélépipède et le déplacement électrique D_3 et le champ électrique E_3 supposés uniformes peuvent alors être établis en considérant la géométrie :

$$\begin{cases} V = - \int_0^w E_3 dz = -wE_3 \\ I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(LLD_0 e^{j\omega t})}{dt} = j\omega lLD_3 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

En combinant l'Eq. (III.2) et l'Eq. (III.3), il est alors possible d'écrire que :

$$V = V_p - \frac{1}{j\omega C_p} I \quad (\text{III.4})$$

avec $V_p = \frac{wd_{31}}{\chi_{33}}\sigma_0$ et $C_p = \frac{lL\chi_{33}}{w}$.

Ainsi, la mise en série d'une source de tension V_p (dépendante de la contrainte σ_0) avec une capacité C_p constitue un modèle électrique macroscopique d'un parallélépipède piézoélectrique sollicité en mode 32. L'effet *capteur* se retrouve dans le fait que la source de tension V_p est proportionnelle à la contrainte σ_0 . De plus, la capacité C_p indique qu'un élément piézoélectrique aura globalement un comportement capacitif du point de vue électrique, ce qui sera important pour la suite. Les équations pour le mode *actionneur* peuvent être obtenues de façon similaire. La façon dont le parallélépipède piézoélectrique est relié électriquement à un circuit n'a pas encore été précisée. Enfin, les caractéristiques électriques V_p et C_p dépendent clairement de la géométrie de l'élément piézo-électrique (épaisseur w et surface lL).

III.1.3 Géométrie des PZTs et accordage avec les ondes de Lamb

L'influence de la géométrie du PZT sur sa capacité à émettre ou recevoir des ondes de Lamb, ou encore sa capacité à *s'accorder* avec les ondes de Lamb se propageant dans la structure hôte va être abordée dans cette section ("*Lamb waves tuning*" dans la littérature). Cet effet d'accord permet d'échanger de l'énergie principalement (voire exclusivement) avec l'un des deux modes A_0 ou S_0 présent en basses fréquences dans la structure hôte [R|Giu15; R|ZY11]. Le choix optimal du diamètre d d'un disque piézo-électrique pour échanger de l'énergie avec un mode se propageant à la longueur d'onde λ est obtenu en respectant les critères suivants [R|RC05] :

— En tant qu'**actionneur**, le diamètre optimal du PZT d pour exciter dans la structure hôte une longueur d'onde λ est obtenu pour :

$$d = \lambda \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{III.5})$$

- En tant que **récepteur**, la sensibilité du PZT augmente lorsque sa taille diminue. Pour être sensible à une onde se propageant avec une longueur d'onde λ , il faut donc idéalement respecter :

$$d < \lambda/2 \quad (\text{III.6})$$

L'étude de la variation des amplitudes des modes A_0 et S_0 en fonction de la fréquence d'excitation pour une plaque en matériau composites a été réalisée dans [E|Liz19]. La Figure III.5 montre un exemple d'application de cette méthode pour un PZT de 30 mm de diamètre collé sur une plaque composite. Le graphique montre l'évolution de l'amplitude des déplacements des modes A_0 et S_0 en fonction de la fréquence d'excitation du PZT. Cela permet de déterminer les zones d'accord (en anglais *sweet spot*) pour chaque mode : à 168 kHz, le mode S_0 est très faible par rapport au mode A_0 , cela constitue donc une zone d'accord pour A_0 . La même analyse est effectuée pour les zones d'accord de S_0 à 28, 108 et 240 kHz. Les déplacements obtenus pour les zones d'accord à 108 et 168 kHz sont tracés pour illustrer l'absence de déplacement de l'un des modes dans les deux cas. Ces outils permettent ainsi d'anticiper l'influence de la géométrie du disque piézo-électrique (ici particulièrement de son diamètre) sur sa capacité à interagir avec les ondes de Lamb se propageant dans la structure hôte.

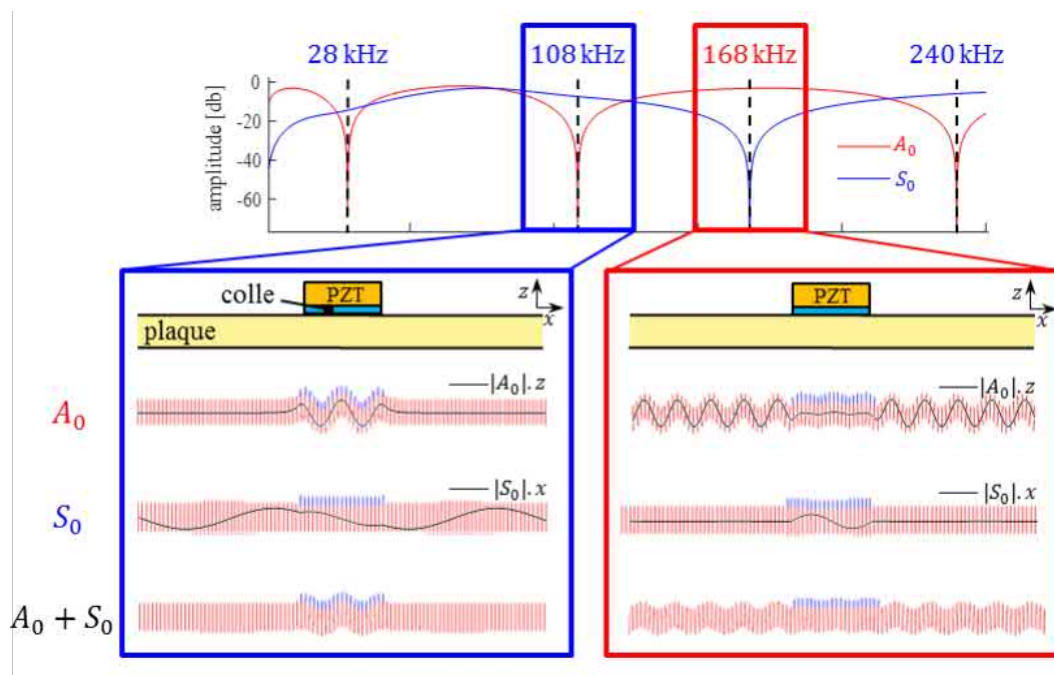


FIGURE III.5 – Illustration des zones d'accord obtenues pour un PZT de 30 mm de diamètre et 0.5 mm d'épaisseur collé sur une plaque de stratifié composite $[0^\circ - 90^\circ]_{16}$ de 2 mm d'épaisseur. Le graphique représente les déplacements maximaux constatés en dehors du PZT en fonction de la fréquence d'excitation. 108 kHz et 168 kHz correspondent à des zones d'accord respectivement pour les modes S_0 et A_0 car dans ces deux cas, un mode se propage de façon préférentielle (d'après [E|Liz19]).

III.2 État de santé d'un élément piézo-électrique [A|Reb+16b]

L'objectif de cette section est à présent de déterminer si les éléments piézo-électriques restent bien collés à leur structure hôte et ne sont pas endommagés suite à des sollicitations thermiques et mécaniques rencontrées en conditions opérationnelles. Il est en effet primordial de garantir le bon fonctionnement des éléments piézo-électriques composant le réseau avant d'entreprendre toute opération de SHM.

III.2.1 Principe de la procédure de diagnostic

La procédure de diagnostic du bon fonctionnement d'un élément piézo-électrique utilisée ici est basée sur le suivi de sa capacité statique, qui peut être estimée à partir de la partie imaginaire de son admittance électrique. Cette procédure a déjà fait ses preuves expérimentalement et s'avère sensible non seulement à des défauts de collage de l'élément piézo-électrique mais aussi à son endommagement, même partiel [R|Par+06a; R|Par+06b; R|Par+09; R|Ove+09; R|GZ02; R|GI10]. Cette procédure a déjà été mise en œuvre dans des contextes aéronautiques et aérospatiaux [R|Tay+13; R|Jal09; R|BC06].

III.2.1.1 Admittance d'un élément piézo-électrique libre et collé

L'admittance électrique d'un élément piézo-électrique $Y(\omega)$ est définie comme l'inverse de son impédance électrique $Z(\omega)$, c'est-à-dire comme le rapport, dans le domaine fréquentiel, du courant $I(\omega)$ sur la tension $V(\omega)$ aux bornes de l'élément considéré. Lorsque l'élément piézo-électrique est libre de vibrer (élément non-collé à une structure hôte), son admittance $Y_l(\omega)$ est donnée par :

$$Y_l(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = \frac{I(\omega)}{V(\omega)} = \frac{j\omega S\chi_{33}}{e} = j\omega C_l \quad (\text{III.7})$$

Où S et e sont la surface et l'épaisseur de l'élément piézo-électrique considéré, et χ_{33} représente la permittivité diélectrique du matériau diélectrique dont est fait l'élément considéré. La capacité statique de l'élément piézo-électrique en régime libre est notée ici C_l .

Si maintenant on considère un élément piézo-électrique collé à une structure mécanique, son admittance $Y_c(\omega)$ est alors, sous certaines hypothèses valides en basses fréquences :

$$Y_c(\omega) = j\omega C_l[1 - \kappa^2] = j\omega C_c \quad (\text{III.8})$$

Ici κ^2 désigne ici le coefficient de couplage électromécanique de l'élément piézo-électrique considéré et est compris entre 0 et 1 et $C_c < C_l$ représente la capacité statique de l'élément piézo-électrique une fois collé.

III.2.1.2 Diagnostic de l'état de santé d'un élément piézo-électrique

Un élément piézo-électrique sain et en bonne interaction avec la structure sur laquelle il est collé aura alors une capacité statique :

$$C_c = \frac{S\chi_{33}(1 - \kappa^2)}{e} < C_l \quad (\text{III.9})$$

En pratique, l'endommagement de l'élément piézo-électrique collé à la structure hôte va se traduire par une réduction de sa surface utile S (l'élément se casse) ou de sa permittivité

diélectrique χ_{33} (claquage électrique de l'élément), dont le produit va passer de $S\chi_{33}$ à $\alpha S\chi_{33}$ avec $0 < \alpha < 1$. Par conséquent, un élément piézo-électrique endommagé présentera une capacité statique :

$$C_c^E = \frac{\alpha S\chi_{33}(1 - \kappa^2)}{e} = \alpha C_c < C_c \quad (\text{III.10})$$

Il s'ensuit que l'endommagement d'un élément piézo-électrique peut être identifié en estimant régulièrement sa capacité statique et en observant si celle-ci baisse. Lorsque l'élément piézo-électrique sera inutilisable, sa capacité sera ainsi notablement réduite.

Lorsqu'un élément piézo-électrique va se détacher de la structure sur laquelle il est placé, c'est son coefficient de couplage électromécanique κ qui va cette fois-ci diminuer et devenir $\beta\kappa$ avec $0 < \beta < 1$. La capacité d'un élément piézo-électrique partiellement détaché sera donc :

$$C_c^D = \frac{S\chi_{33} [1 - (\beta\kappa)^2]}{e} > C_c \quad (\text{III.11})$$

Ainsi le détachement d'un élément piézo-électrique peut être identifié en estimant régulièrement sa capacité et en observant si celle-ci augmente. Lorsque l'élément piézo-électrique sera complètement détaché de la structure hôte, sa capacité aura augmenté et sera égale à sa capacité lorsqu'il était libre, i.e. C_l , voir Eq. (III.7).

L'endommagement ou le détachement d'un élément piézo-électrique se traduisent tous les deux par des variations de la capacité statique de l'élément piézo-électrique. Une variation de la capacité statique supérieure à un certain seuil sera donc le signe que l'élément piézo-électrique étudié a subi soit un endommagement, soit un détachement suite à une sollicitation environnementale en fonction du sens de la variation observée.

III.2.1.3 Importance de la mise sous pression lors du collage

À titre d'illustration de la méthode de diagnostic décrite précédemment, elle est appliquée pour évaluer l'importance de la mise sous pression lors du collage. Pour ce faire, deux PZTs de diamètre 25 mm ont été collés sur deux coupons du même matériau que le FC. Pour l'un des coupons le collage a été réalisé sans mettre le coupon sous pression. Pour l'autre coupon, le collage a été réalisé en mettant le coupon sous pression. L'impédance du PZT de diamètre 25 mm a ensuite été mesurée pour différentes conditions :

1. à nu (condition libre),
2. sur l'éprouvette qui n'a pas été mise sous pression (condition mal collé),
3. sur l'éprouvette qui a été mise sous pression (condition bien collé).

À partir de l'impédance mesurée, l'admittance a ensuite été calculée ainsi que la capacité statique du PZT de diamètre 25 mm dans les différentes conditions étudiées. La Figure III.6 représente les courbes d'admittance entre 15 kHz et 40 kHz ainsi que les capacités statiques estimées à partir des admittances pour les différentes conditions étudiées. Il est possible de noter d'abord que l'admittance évolue bien de façon linéaire avec la fréquence, ce qui valide le modèle proposé par l'Eq. (III.7) dans cette plage de fréquence. De plus, lorsque le collage est effectué sous pression, la pente de l'admittance ainsi que la capacité statique du PZT sont bien inférieures d'une part à la condition où le PZT est libre et d'autre part à la condition où le collage n'est pas effectué sous pression. Cela signifie donc que le coefficient de couplage κ^2 entre le PZT et la structure est plus important dans le cas où le collage est effectué sous pression que lorsque ça n'est pas le cas.

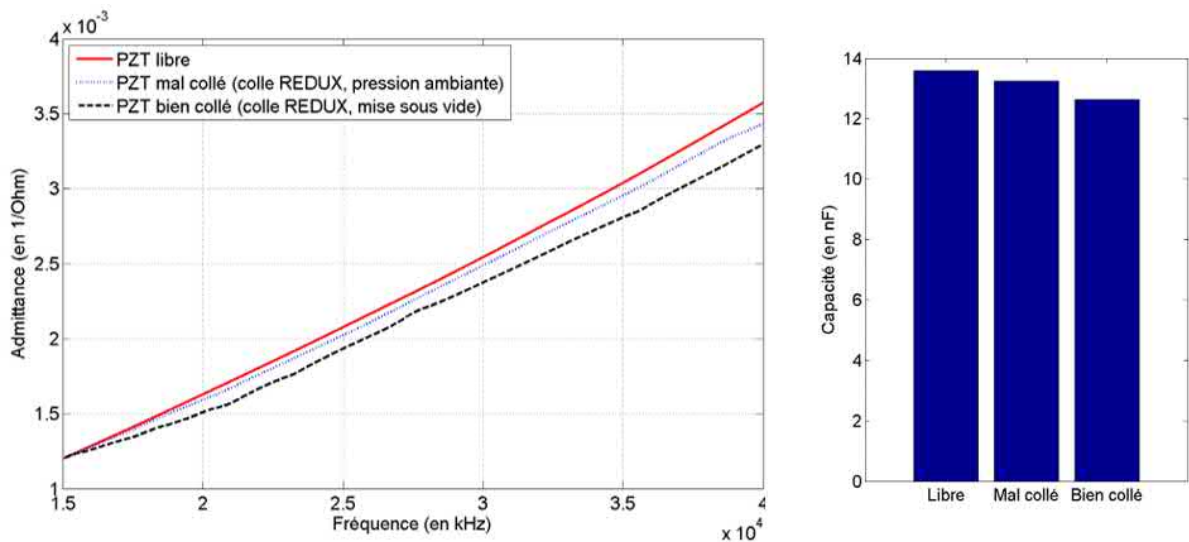


FIGURE III.6 – À gauche, les courbes d'admittance mesurées et à droite les capacités statiques correspondantes pour le PZT de diamètre 25 mm dans les différentes conditions étudiées.

III.2.2 Application industrielle sur un Airbus A380 d'essai

Afin de démontrer la faisabilité d'une telle approche pour le suivi de l'état de santé d'éléments piézo-électriques dans une application industrielle, elle a été appliquée lors des essais sur l'Airbus A380 mis à disposition en 2015 dans le cadre du projet CORALIE. L'avion d'essai a réalisé plusieurs vols d'essais et suite à chacun de ces vols, les capacités statiques des éléments piézo-électriques ont été estimées ainsi que leurs variations. Les résultats sont donnés pour le FC équipé de 43 PZTs à la Figure III.7. Les essais ont été réalisés à Toulouse au cours du mois d'Octobre 2015 et les variations de températures sont assez minimes (au maximum de 2°). Les PZTs présentant une variation de plus de 5 % par rapport à la valeur attendue sont encadrés en rouge.

Sur cette figure, il est possible de constater que 36 des 43 PZTs ont présenté une capacité statique stable suite aux différents vols qu'ils ont enduré. Pour les 7 PZTs identifiés comme défaillants, c'est plutôt un comportement intermittent qui est observé avec une capacité statique nulle à un instant donné, puis une capacité statique normale ensuite (pour les 10 et 13 par exemple). Cela laisse supposer que c'est plutôt un problème de câblage qui est responsable des variations observées ici et non un décollement ou un endommagement des PZTs concernés.

Il est ici possible de conclure que la méthode de surveillance des éléments piézo-électriques proposée ici peut être développée à grande échelle sur un avion réel et donner lieu à des résultats cohérents et interprétables. Par ailleurs, ces essais démontrent que les PZTs utilisés ainsi que la procédure de collage associée sont capables d'endurer les variations de températures, chargements statiques et vibrations, rencontrés en pratique au cours d'un vol. Enfin, le point de fragilité relevé suite à ces essais semble être non pas les PZTs et la procédure de collage associée, mais plutôt les fils et les connectiques. Des procédures de validation des câblages seront donc à envisager pour le passage de la technologie aux TRLs supérieurs. Enfin, une dernière remarque est que cette méthode de surveillance ne nécessite pas de câblage supplémentaires, mais simplement une mesure d'impédance qui est peu onéreuse.

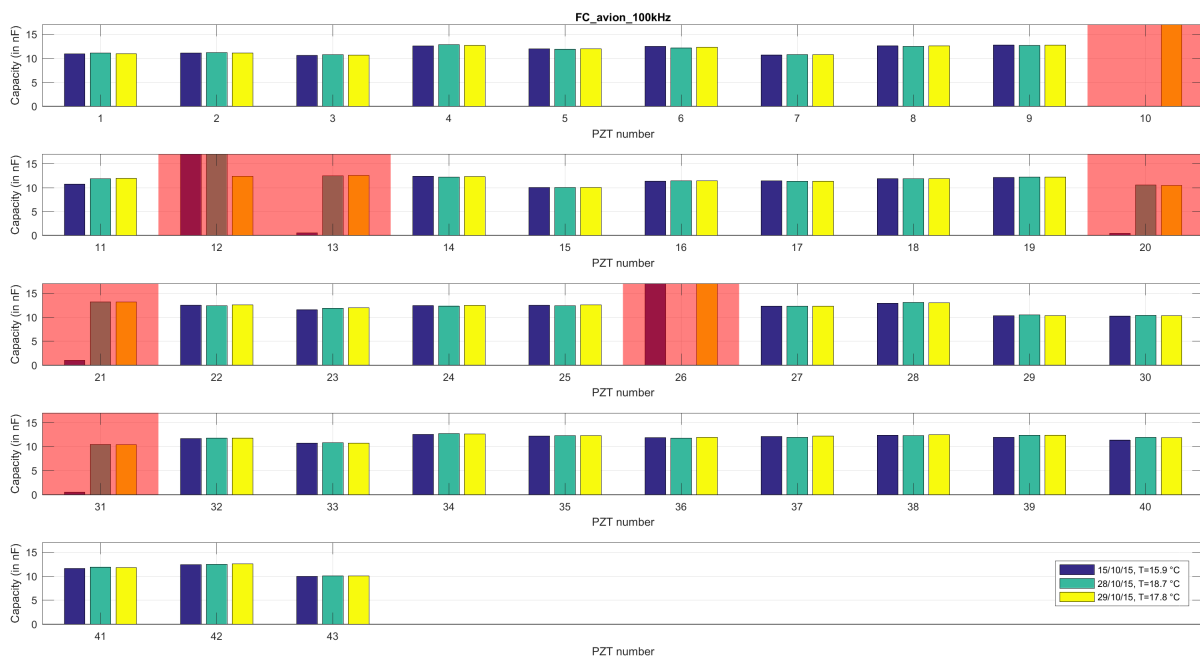


FIGURE III.7 – Évolution des capacités statiques pour les PZTs montés sur le FC de l'A380 d'essai.

III.3 Conception d'un réseau de PZTs pour le SHM [E|Liz19 ; A|Liz+18b]

Il est à présent possible de réaliser le passage à l'échelle et d'envisager le dimensionnement d'un réseau d'éléments piézo-électriques complet. Il faut en préambule préciser qu'il existe deux types de réseaux d'éléments piézo-électriques pouvant être déployés dans un contexte de SHM [R|Qua+11a] : les réseaux dit *concentrés* et ceux dits *dispersés* (voir Figure III.8). Les réseaux *concentrés* vont mettre côte à côte un nombre important d'éléments piézo-électriques et vont ensuite utiliser des stratégies de traitement du signal (formation de voies par exemple) pour interroger la structure cible. L'avantage de ces méthodes est qu'un contrôle fin de la direction d'émission ou de réception des ondes de Lamb est possible et son principal inconvénient réside dans le fait qu'à cause de l'atténuation des ondes de Lamb (voir Section II.1.3) certaines zones de la structure seront difficiles à surveiller. Les réseaux *dispersés* vont chercher à disposer les éléments piézo-électriques le plus largement possible sur la structure de façon à garantir que chaque point de la structure à surveiller soit à proximité d'un ou plusieurs éléments piézo-électriques. Le principal avantage de cette approche réside dans le fait que toute la structure peut être interrogée de façon fiable, l'inconvénient est que les structures à interroger sont de géométries complexes (courbure, raidisseurs, trous) et donc que l'interprétation de la propagation entre deux éléments piézo-électriques distants peut s'avérer complexe. Ici, **le choix est fait de se concentrer uniquement sur les réseaux dispersés**, leurs avantages et inconvénients étant connus, car cette architecture apparaît comme étant adaptée à des applications industrielles comme nous le verrons par la suite.

III.3.1 État de l'art relatif à conception de réseaux pour le SHM

La question du positionnement des capteurs et des actionneurs dans un contexte de SHM est une problématique qui a donné lieu à de nombreux travaux académiques [R|OSM19 ; R|Mus+21].

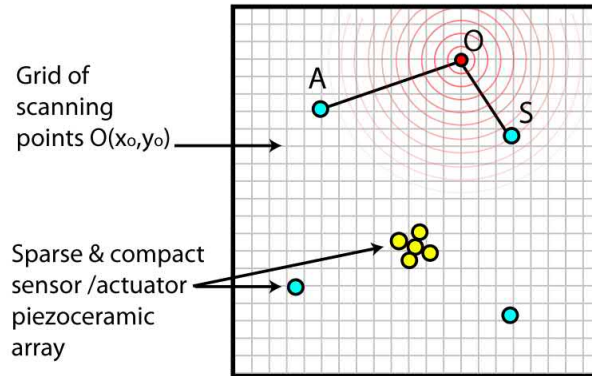


FIGURE III.8 – Exemple de réseaux d'éléments piézo-électriques *concentré* (ronds jaunes) et *dispersé* (ronds bleus) (d'après [R|Qua+11a]).

Ici, c'est plus précisément le choix du nombre et de la position d'éléments piézo-électriques constituant un réseau dispersé pour le SHM de structures aéronautiques en matériaux composites qui vont être discutés. Il est important de noter que le problème est double : il faut déterminer **combien** d'éléments piézo-électriques mettre sur la structure à surveiller et **où** les mettre. En effet, il semble assez logique que plus il y aura d'éléments piézo-électriques disposés sur la structure, plus il sera facile de surveiller les dommages potentiels pouvant apparaître. La contrepartie est que plus il y aura d'éléments piézo-électriques sur la structure, plus les conséquences en terme d'installation, de poids embarqué et de maintenance seront importantes. Il s'agit donc de trouver comme compromis une solution optimale garantissant au moindre coût une surveillance qui soit la meilleure possible. Les principales publications relatives au placement d'éléments piézoélectriques pour le SHM par ondes de Lamb de structures aéronautiques sont regroupées dans le Tableau III.1 et catégorisées en fonction de différents critères d'intérêt discutés dans la suite.

Réf.	Coût	Zones	Modèle	Matériau	SHM	Optim.	Proba.
[R TKA16]	Couverture	Toutes	v et att.	Anisotrope	Ellipse	Génétique	Non
[R Saa+22]	Couverture	Toutes	Atténuation	Isotrope	-	Génétique	Non
[R SM19]	Couverture	Toutes	Analytique	Isotrope	-	Génétique	Non
[R Som+19]	Couverture	Toutes	Analytique	Isotrope	-	Génétique	Non
[R GND22]	Couverture	Probables	FE	Isotrope	-	Exhaustive	Non
[R Ism+20]	Couverture	Toutes	Atténuation	Anisotrope	-	Génétique	Non
[R Tar+18]	Couverture	Toutes	Atténuation	Anisotrope	-	Génétique	Non
[R EGB18]	Énergie	Sensible	FE	Isotrope	-	Exhaustive	Non
[R EGB21]	Énergie	Probables	v et att.	Isotrope	-	Génétique	Non
[R HA21]	Détection	Probables	Analytique	Isotrope	Détection	Génétique	Oui
[R MAN20]	Localisation	Probables	FE	Isotrope	Ellipse	Génétique	Non
[R Can+20b]	Information	Probables	v	Anisotrope	Ellipse	Exhaustive	Oui
[R Can+20a]	Information	Probables	v	Anisotrope	Ellipse	Standard	Oui

TABLE III.1 – Principales publications relatives à la conception d'un réseau dispersé d'éléments piézoélectriques pour le SHM par ondes de Lamb de structures aéronautiques.

La première question à aborder face à un problème d'optimisation tel que celui qui est ren-

contré ici est celle de la **fonction coût à choisir** et qui sera optimisée. Il y a ici plusieurs choix possibles. Un premier choix consiste à chercher à maximiser la *couverture* de la structure à surveiller par les éléments piézo-électriques qui y seront collés. Cela signifie que l'algorithme d'optimisation cherchera à s'assurer que suffisamment d'éléments piézo-électriques seront à proximité de chacun des points de la structure hôte et donc seront capables de les surveiller en y envoyant des ondes de Lamb. Une stratégie similaire consiste à s'assurer que les ondes de Lamb se propageant dans la structure hôte vont atteindre les zones à surveiller avec suffisamment d'*énergie*. Enfin d'autres approches vont prendre en compte également les algorithmes de SHM qui seront utilisés pour analyser les données mesurées et donc chercher à maximiser les capacités de *détection*, de *localisation*, ou plus généralement la notion d'*information* (au sens de la théorie de Shannon) pour les différentes configurations d'éléments piézo-électriques testées. L'approche par *couverture* est indépendante de l'algorithme choisi et donc facile à mettre en œuvre et transposable à des structures complexes ou de grande taille. Les approches reposant sur des algorithmes de SHM n'auront quant à elles pas cet avantage mais garantiront certaines performances en terme de surveillance ; ce qui ne sera pas *a priori* le cas pour les approches par *couverture* mais qui pourra être vérifié *a posteriori*.

Une seconde question à considérer est liée aux **positions attendues ou non des dommages sur la structure** à surveiller. Dans un contexte industriel, des zones sont en général identifiées comme étant à risque sur les structures aéronautiques. Ce sont les zones qui subissent le maximum de contraintes ou qui sont très exposées ou très vulnérables. Il y a donc des zones *sensibles* qui devront être surveillées. Par ailleurs les structures à surveiller sont également sujettes aux aléas des opérations et des dommages peuvent potentiellement apparaître partout sur la structure de façon aléatoire (impacts d'oiseaux, chute d'outils, défaut de fabrication, ...). En plus des zones sensibles à surveiller, il peut donc être intéressant de surveiller de façon plus globale les zones *propables* d'occurrence de dommages ou bien *toutes* les parties de la structure. Là encore, l'optimisation d'un réseau pour les zones *sensibles* sera assez différente de l'optimisation d'un réseau pour surveiller les zones *propables* ou *toutes* les zones de la structure. Dans un cas l'algorithme d'optimisation sera dépendant du type de dommage à surveiller et de sa position d'occurrence probable alors que dans l'autre cas, il sera indépendant de ces informations.

Une troisième question d'intérêt est liée au **modèle physique qui sera associé à l'algorithme d'optimisation**. En effet, pour calculer la fonction *coût*, l'algorithme d'optimisation aura besoin d'évaluer la propagation des ondes de Lamb pour les différentes configurations envisagées. Plusieurs modèles physiques peuvent être utilisés à cet effet. Les plus simples ne s'appuient que sur la vitesse v et l'atténuation des ondes de Lamb (algorithmes de lancer de rayon par exemple). Des modèles plus évolués, dit *analytiques*, incorporent plus d'informations physiques comme une modélisation de l'anisotropie ou bien de la diffraction des ondes de Lamb par les dommages. Enfin, les modèles les plus complets simulent la propagation des ondes de Lamb au plus près de la physique en se basant sur les éléments-finis par exemple, au prix d'un coût de calcul élevé.

Le dernier point à considérer est relatif à **l'algorithme d'optimisation qui sera effectivement utilisé**. L'approche naïve consiste à évaluer de façon *exhaustive* toutes les combinaisons et à choisir *a posteriori* celle qui optimise la fonction coût. Cette approche n'est évidemment pas réalisable en pratique pour des raisons de coûts de calculs. Une autre approche consiste à s'appuyer sur des algorithmes *standards* d'optimisation, mais implique d'être capable de formuler une fonction coût qui soit convexe, ce qui est en pratique assez compliqué. Enfin, les approches par algorithmes *génétiques*, qui représentent la majorité des travaux cités, permettent de réaliser des optimisations dans un cadre plus large mais avec le risque de converger vers des minima locaux, voir même de ne pas converger du tout.

La question du nombre et de la position des éléments piézo-électriques pour concevoir un

réseau de transducteurs pour le SHM de structures aéronautiques en utilisant des ondes de Lamb reste donc une question ouverte pour laquelle de nombreuses options sont possibles et discutées dans la littérature. Une critique globale de ces différentes méthodes est qu'elles aboutissent en général *in fine* à des pavages plus ou moins réguliers et intuitifs des structures à surveiller sans nécessairement engendrer de solutions réellement innovantes. Une autre critique réside dans les algorithmes d'optimisation utilisés qui, compte tenu de la difficulté du problème à résoudre s'avèrent très gourmands en temps de calcul. Les axes de progression liés à cette problématique résident donc dans la façon de formuler une fonction *coût* convexe qui permette de s'appuyer sur des algorithmes d'optimisation standard et sur l'utilisation de méta-modèles ou de modèles réduits qui permettent de capturer toute la physique du problème à moindre coût. Un exemple de solution à ce problème est proposé dans la suite de cette section.

III.3.2 Méthodologie de conception d'un réseau de PZT pour le SHM

Cette section présente une méthodologie générale visant à dimensionner un réseau de transducteurs de PZTs dispersé pour le SHM de structures aéronautiques en matériaux composites tirée de [E|Liz19] et de [A|Liz+18b]. Le matériau considéré pour illustrer cette méthodologie est un composite CFRP représentatif des matériaux utilisés dans le FC et sera déployée sur la partie supérieure du FC qui présente une complexité géométrique sous la forme d'un trou. La méthode proposée permet de répondre en pratique aux questions suivantes :

1. Quel diamètre de PZT faut-il sélectionner ?
2. Quelles fréquences d'excitation peut-on utiliser et quels seront les modes de Lamb excités ?
3. Combien de PZTs placer sur la structure hôte et où les placer ?

Pour y répondre, un processus en trois étapes illustrées en Figure III.9 est développé :

1. Les propriétés mécaniques de la structure sont utilisées pour calculer les courbes de dispersion des ondes de Lamb dans le matériau étudié. Les courbes de dispersion et la taille minimale des endommagements à surveiller permettent de dimensionner les PZTs et de déterminer les fréquences d'excitation à utiliser dans le contexte visé.
2. Un modèle éléments-finis local (une plaque correspondant à une petite partie de la structure surveillée équipée de deux PZTs) est utilisé. Ce modèle permet d'estimer l'atténuation des ondes de Lamb avec la distance r , l'orientation θ , pour différentes fréquences d'excitation f_0 . Les outils analytiques présentés en Section II.1.3 peuvent également être utilisés à cet effet. Cela permet d'obtenir les paramètres optimaux $(\hat{f}_0, \hat{\theta}, \hat{r})$ pour des PZTs voisins dans le réseau envisagé.
3. Un solveur de réseau itératif applique les paramètres optimaux $(\hat{f}_0, \hat{\theta}, \hat{r})$ obtenus dans l'étape précédente à la structure réelle pour proposer une configuration PZTs qui convienne.

Contrairement aux algorithmes proposés dans la littérature, cet algorithme ne repose pas sur une procédure d'optimisation mais est un algorithme itératif. Cela signifie en pratique que lorsqu'une solution acceptable a été trouvée, cela ne signifie pas qu'elle est la solution optimale. Un moyen de contourner ce problème peut être d'effectuer plusieurs fois le calcul de positionnement avec cet algorithme et de comparer entre elles les différentes solutions obtenues pour choisir la meilleure au sens d'une certaine fonction coût à définir. Du point de vue de la position du dommage, cet algorithme couvre l'intégralité de la structure et ne se focalise pas sur certaines zones *probables* ou *sensibles* du point de vue des dommages. Concernant le modèle utilisé par l'algorithme, il peut s'appuyer sur un modèle éléments-finis local mais un modèle analytique peut également être utilisé. L'intérêt est surtout ici d'utiliser des modèles de complexité réduite de

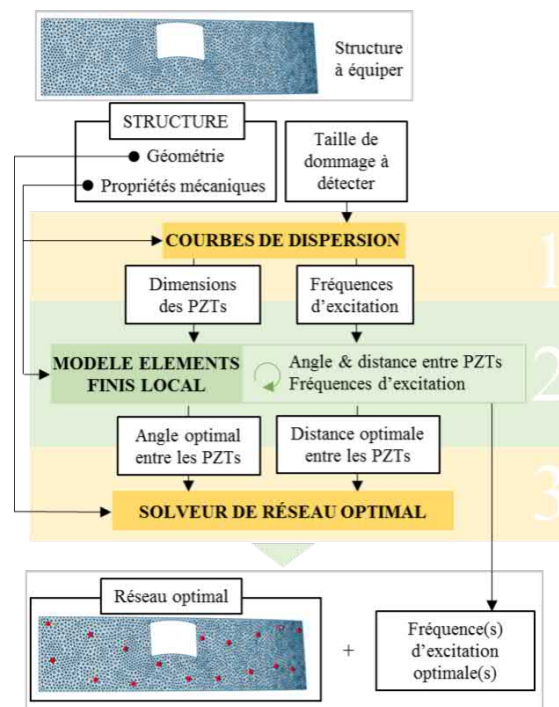


FIGURE III.9 – Vue d'ensemble des trois étapes proposées pour le processus de dimensionnement d'un réseau de PZT pour le SHM de structures aéronautiques en matériaux composites (d'après [E|Liz19]).

façon à limiter les temps de calculs. Enfin, car cet algorithme n'est pas basé sur un algorithme de traitement du signal, il ne présente pas *a priori* des garanties de performances mais ces dernières peuvent être vérifiées *a posteriori*. En conclusion, c'est un algorithme simple, efficace et robuste qui permet de répondre rapidement à un besoin pratique en SHM : quels PZTs choisir, combien en commander, et où les installer sur une structure de géométrie arbitrairement complexe.

Chapitre IV

Algorithmes robustes pour le SHM de pièces aéronautiques

Sommaire

IV.1 Données d'entrée pour les algorithmes de SHM	64
IV.1.1 Signaux d'excitation utilisés en SHM	64
IV.1.2 Bases de données disponibles	65
IV.1.3 La boîte à outils <i>SHM@PIMM</i>	68
IV.2 Détection de dommages [A Réb+18 ; E Liz19]	71
IV.2.1 Principe de fonctionnement des algorithmes de détection	71
IV.2.2 Seuil de détection basé sur la théorie des valeurs extrêmes [A Réb+18] .	75
IV.2.3 Stratégies de détection “sans référence” [E Liz19]	78
IV.3 Localisation d'un dommage [A Fen+16a ; A RM20]	82
IV.3.1 Principe de fonctionnement des algorithmes de localisation	84
IV.3.2 État de l'art relatif aux méthodes de localisation	87
IV.3.3 Une approche Bayésienne de localisation en milieu anisotrope [A Fen+16a]	88
IV.3.4 Une approche tensorielle de la localisation [A RM20]	90
IV.4 Classification de dommages [A Rah+21]	95
IV.4.1 SHM, apprentissage automatique, et réduction de dimension	95
IV.4.2 Classification non-supervisée via t-SNE et UMAP	96
IV.5 Quantification de la taille des dommages [A Bri+21 ; E Bri22]	101
IV.5.1 État de l'art relatif aux méthodes de quantification	101
IV.5.2 Approche par traitement a posteriori de résultats de localisation [A Bri+21]	102
IV.5.3 Approche basée sur un modèle d'interaction “ondes/dommage” [E Bri22]	107
IV.6 Compensation de l'influence de la température [A Fen+16b]	111
IV.6.1 État de l'art	111
IV.6.2 Compensation du déphasage et de l'atténuation du premier paquet . . .	112

Contexte et objectifs du chapitre

L'idée est à présent de proposer des algorithmes permettant de réaliser le SHM par ondes de Lamb dans des situations d'exploitation se rapprochant des conditions réelles. L'objectif de ce chapitre est ainsi de **proposer des algorithmes robustes de SHM pour la détection, la localisation,**

la classification et la quantification des dommages dans les matériaux composites en se basant sur une compréhension physique des interactions *ondes/dommage* acquise au Chapitre II et sur la conception un réseau d'éléments piézoélectriques dispersé définie au Chapitre III. Ces algorithmes s'appuieront principalement sur les résultats exposés dans les Sections II.2.1 et II.2.2 décrivant la diffraction des ondes de Lamb et la conversion de modes. Les algorithmes s'appuyant plus spécifiquement sur les effets non-linéaires décrits en Section II.2.3 seront étudiés en détail dans le Chapitre V.

Dans cette optique, la Section IV.1 présentera d'abord succinctement les différents jeux de données simulées et expérimentales disponibles afin de mettre au point et valider les algorithmes de SHM. Des algorithmes développés au PIMM pour la détection (Section IV.2), la localisation (Section IV.3), la classification (Section IV.4), et la quantification (Section IV.5) des dommages seront ensuite présentés. Par ailleurs, une solution permettant la compensation des effets de la température sur la propagation des ondes de Lamb sera présentée en Section IV.6. La boîte à outils Matlab *SHM@PIMM* intégrant tous ces algorithmes et permettant de les tester et de les comparer sur de nombreux cas de figures sera également introduite en Section IV.1.3.

IV.1 Données d'entrée pour les algorithmes de SHM

IV.1.1 Signaux d'excitation utilisés en SHM

Le choix des signaux à utiliser pour réaliser le SHM de structures composites est important. Comme cela a été mentionné précédemment, les éléments piézo-électriques ne vont pas exciter un seul mode de Lamb, mais probablement deux modes simultanément avec des efficacités et des vitesses de propagation différentes dépendant de la fréquence. Un signal d'excitation pour le SHM doit ainsi respecter les contraintes suivantes [R|AC92 ; R|WLC01 ; R|Wil03] :

- Être **temporellement court** pour faciliter la séparation et l'interprétation des signaux en termes de *paquets* reçus qu'il sera possible d'associer aux modes A_0 ou S_0 .
- Être à **support fréquentiel borné** pour limiter les effets associés à la dispersion et ainsi faciliter l'analyse des signaux reçus.

Ces deux contraintes sont antagonistes et ne peuvent pas être satisfaites simultanément. Le signal le plus court temporellement, l'impulsion de Dirac, possède en effet un support fréquentiel infini tandis que le signal possédant le plus petit support fréquentiel, le sinus, est infini dans le temps. Pour le SHM, le compromis a été trouvé dans les signaux de type "*burst*" $s(t)$ correspondant à un nombre N_c de périodes d'un signal sinusoïdal d'amplitude S et de fréquence f_0 fenêtré par une fenêtre temporelle généralement choisie comme étant $w(t, N_c) = \sin(\pi f_0 t / N_c)$ ¹⁰ :

$$s(t) = S \times \sin(\pi f_0 t / N_c) \times \sin(2\pi f_0 t) \quad (\text{IV.1})$$

Ce signal possède donc l'énergie $S^2 N_c / 2$ qui est fréquentiellement distribuée autour de la fréquence centrale f_0 et temporellement possède un support de longueur N_c / f_0 (voir Figure IV.1). Le paramètre établissant l'équilibre entre l'étendue spectrale et la taille du support temporel est ainsi le nombre de cycles N_c . Plus ce paramètre sera petit, plus le support temporel sera court et plus le support fréquentiel sera étendu. A l'inverse, l'augmentation du nombre de cycle N_c permettra de limiter le support fréquentiel mais augmentera la durée du signal d'excitation. L'énergie du signal étant proportionnelle à N_c , plus le signal sera long et plus il sera également énergétique ce qui est pratique d'un point de vue expérimental en présence de bruit. En général,

10. D'autres choix de fenêtres sont évidemment possibles : fenêtre gaussienne, etc ...

$N_c = 5$ est le compromis habituellement réalisé en SHM de structures aéronautiques composites par ondes de Lamb.

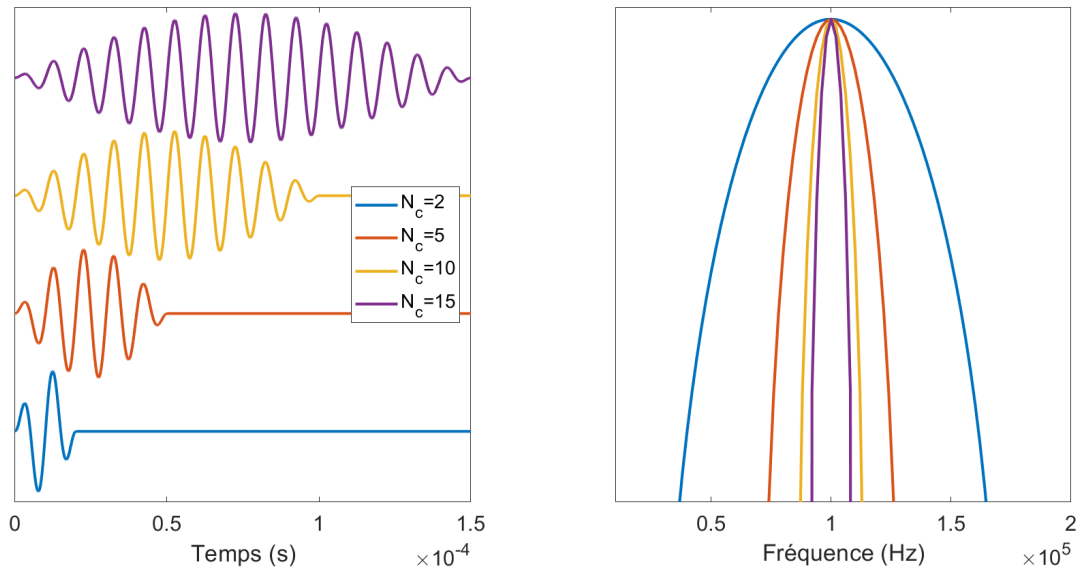


FIGURE IV.1 – Signaux de type “burst” utilisés en SHM pour différents nombres de cycles N_c et pour $f_0 = 100$ kHz. À gauche, dans le domaine temporel (avec un décalage vertical pour pouvoir visualiser les différents signaux) et à droite dans le domaine fréquentiel (amplitudes normalisées).

IV.1.2 Bases de données disponibles

Des bases de données simulées et expérimentales ont été créées pour soutenir la conception d’algorithmes de SHM et sont brièvement présentées ici afin de donner un aperçu des avantages et inconvénients des différents cas d’études considérés en pratique.

IV.1.2.1 Simulations numériques via SDTools

Des bases de données numériques sont généralement considérées en premier lieu pour tester et valider les algorithmes de SHM. L’enjeu est ici d’être capable de modéliser correctement les éléments piézo-électriques, la propagation des ondes de Lamb dans les matériaux composites, leurs interactions avec des dommages et l’influence des conditions opérationnelles (bruit ambiant, température et chargement mécanique). De telles bases de données ont ainsi été générées grâce au logiciel SDTools [R|Bal19] développé localement ainsi disponible en interne au PIMM et capable de répondre en partie aux besoins évoqués précédemment.

Un modèle élément-fini typique correspondant à une plaque en matériau composite équipée d’éléments piézo-électriques de diamètre de 20 mm est présenté à la Figure IV.2. L’intérêt des approches numériques est qu’elles permettent de garantir une excellente répétabilité, une bonne représentativité de la physique considérée, un excellent contrôle des paramètres d’endommagement, et la simulation partielle des conditions opérationnelles (chargement mécanique et effet approximatif de la température). Leur inconvénient majeur est qu’il est difficile de représenter de façon réaliste les dommages numériquement : à titre d’exemple la réduction de la raideur des éléments correspondants à la position du dommage reste une pratique courante pour modéliser un dommage même si elle est très éloignée de la réalité. Par ailleurs, en raison des problèmes de

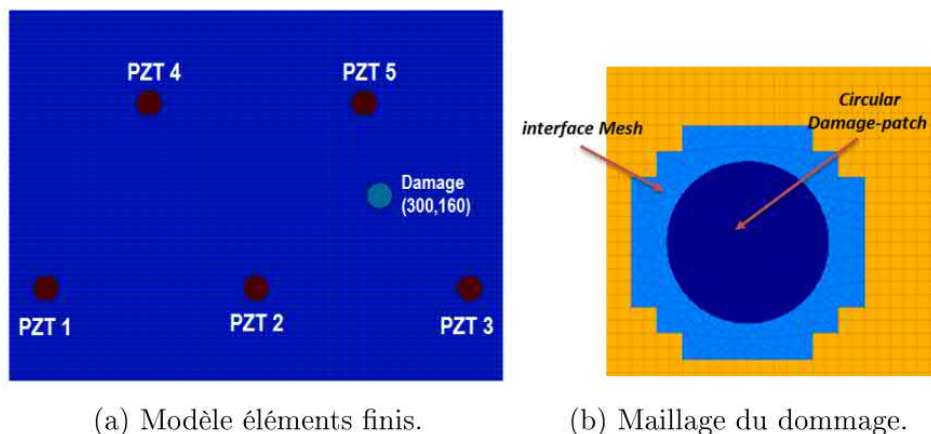


FIGURE IV.2 – Exemple de modèle éléments-finis pour le SHM (d’après [E|Fen15]).

taille de modèle et de coût de calcul, il reste très difficile de travailler sur des modèles éléments-finis complets de pièces aéronautiques complexes telles que le FC. Enfin, la prise en compte des variations de température nécessite de connaître finement les évolutions des propriétés des matériaux composites avec la température, ce qui n’est pas le cas en pratique et donc conduit à des approximations. Il en va de même pour le bruit ambiant qui ne peut qu’être approximé et qui est en général représenté par un bruit blanc Gaussien. Les approches numériques constituent une première étape de validation indispensable mais ne permettent pas de se passer de bases de données expérimentales.

IV.1.2.2 Approche expérimentale hiérarchique

Certaines bases de données expérimentales sont bâties selon une approche hiérarchique, ce qui signifie que les pièces testées au cours de la campagne expérimentale sont faites du même matériau mais sont de complexité géométrique croissante. Par exemple, une base de données hiérarchique a été réalisée dans le cadre du projet européen REMAP. Le matériau composite considéré est toujours le même, mais plus l’on s’élève dans le triangle et plus les pièces sont complexes : à la base du triangle les coupons testés sont plans et ne comportent qu’un raidisseur ; au milieu du triangle des coupons toujours plans mais plus grands et comportant plusieurs raidisseurs sont testés ; et enfin en haut du triangle des coupons courbes et équipés de raidisseurs sont testés. Ces approches hiérarchiques permettent donc d’introduire de la complexité de façon graduelle dans les étapes de validation et de voir comment se comportent les algorithmes de SHM en augmentant le degré de complexité.

En suivant cette philosophie, différentes bases de données expérimentales ont été créées au fil des projets auxquels nous avons contribué (CORALIE, MONARQUE, REMAP, ou MORPHO, voir Section B.2). Au cours de ces campagnes expérimentales, des pièces aéronautiques ont été instrumentées avec des éléments piézo-électriques, puis des mesures d’ondes de Lamb ont été réalisées pour un état sain de référence puis pour différents états d’endommagement. Les endommagements étaient réalisés soit via des impacts sur les structures, des délaminations artificielles, la création de trous, le placement d’aimants, ou encore des délaminations induites par choc LASER (voir Section II.2.3.2). Des bases de données publiques bâties sur ce principe sont également disponibles comme la base de données *Open Guided Waves*¹¹ ou bien la base de

11. <http://openguidedwaves.de/>

donnée issue du projet *SARITSU*¹².

Ces bases de données expérimentales permettent de valider expérimentalement des algorithmes de SHM dédiés à la détection, à la localisation, à la classification et à la quantification des dommages sur des pièces réelles, en présence d'un certain bruit expérimental et éventuellement sous chargement mécanique ou thermique. Le principal inconvénient de ces bases de données est qu'elles considèrent des états discrets des structures qui sont surveillées et ne représentent pas une progression continue et réaliste d'un endommagement comme cela peut être le cas en pratique au cours de la durée de vie d'un avion. De plus, les endommagements réalisés dans le cadre de ces bases de données sont toujours artificiels et ne sont donc pas nécessairement réalistes, même si le choc LASER permet toutefois de mieux approximer la réalité que les aimants ou les délaminages artificiels.

IV.1.2.3 Essais expérimentaux de fatigue

Pour pallier les limites des bases de données expérimentales hiérarchiques décrites précédemment, des expérimentations plus ambitieuses ont été conduites. Ces expériences consistaient à réaliser l'endommagement de coupons de matériau composite in-situ par l'application de cycles de fatigue sur des machines de traction et à surveiller l'évolution de cet endommagement de façon régulière via des ondes de Lamb et via des méthodes de contrôle non-destructif conventionnelles pour disposer d'une information de référence. À titre d'exemple, le montage expérimental déployé dans le cadre du projet Européen REMAP pour construire une telle base de donnée est montré à la Figure IV.3. La base de donnée créée dans le cadre du projet REMAP a été rendue publique¹³, tout comme une base de donnée réalisée par la NASA¹⁴.

Le principal avantage de ces bases de données est que l'endommagement ainsi induit est réaliste dans le sens où il correspond à ce qui a effectivement lieu en pratique lors du cycle de vie d'un matériau composite : c'est en effet le phénomène de fatigue qui est à l'origine des délaminages et la reproduction en laboratoire de ce phénomène permet d'obtenir des délaminages réalistes et donc d'observer ce que sont réellement les interactions des ondes de Lamb avec ces délaminages. Par contre ces bases de données ne sont pas exemptes de limitations. En premier lieu, elles sont extrêmement lourdes à mettre en place expérimentalement et nécessitent des moyens importants. De plus, l'utilisation d'une machine de traction limite intrinsèquement la géométrie des pièces testées et il reste encore impossible de réaliser de telles expériences sur des pièces aéronautiques complètes. Il est en général difficile de contrôler la localisation du dommage dans ces expériences. Enfin, du point de vue des conditions opérationnelles, il est facile dans ce contexte d'étudier l'effet du chargement mécanique et éventuellement de la température. En conséquence, ces bases de données expérimentales en fatigue sont complémentaires des bases de données expérimentales hiérarchiques pour la validation d'algorithmes de SHM et sont surtout intéressantes pour la validation de l'étape de quantification de la taille du dommage et d'estimation de la durée de vie restante.

IV.1.2.4 Instrumentation d'avions

Pour pouvoir valider réellement les algorithmes de SHM, des bases de données réelles regroupant des données collectées sur des avions en service sont nécessaires. Or, à l'heure actuelle, il existe très peu de ce genre de bases de données et quand leur existence est rendue publique, elle

12. <http://shm.ing.unibo.it/>

13. https://dataverse.nl/dataverse/ReMAP_H2020_SHM_data_repository

14. <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/pcoe/prognostic-data-repository/>

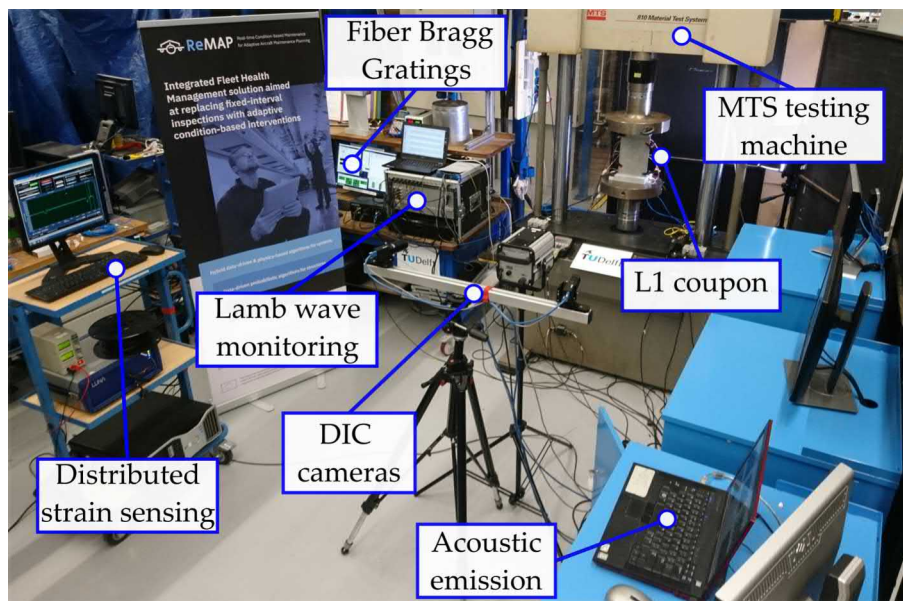


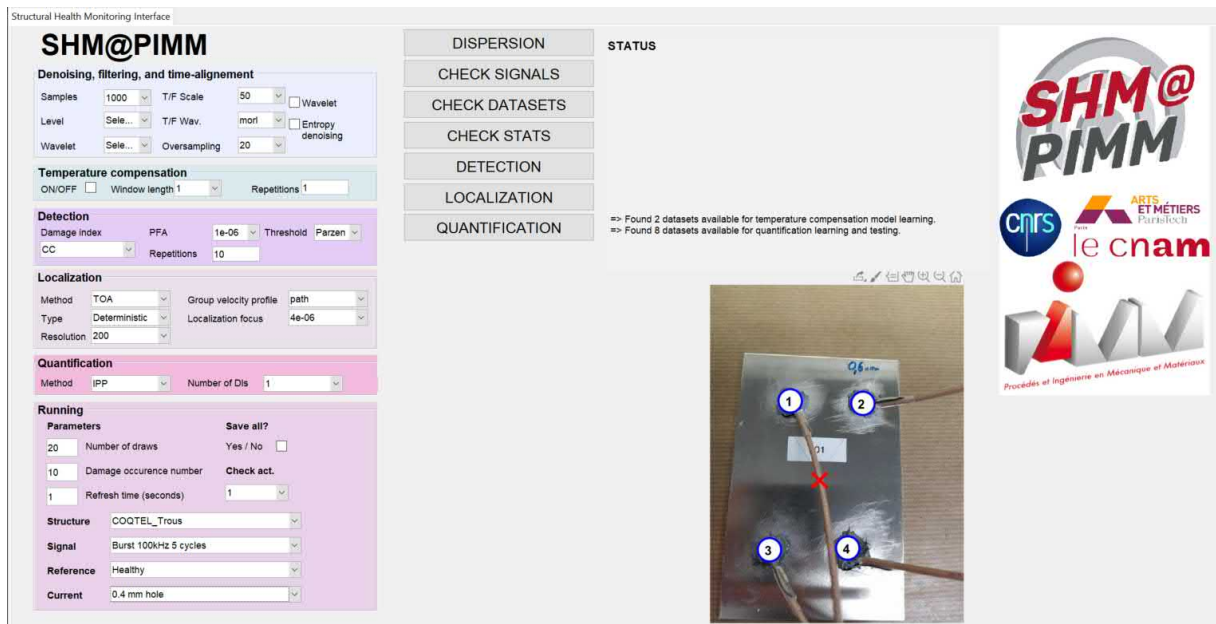
FIGURE IV.3 – Expérience de suivi de la fatigue de coupons en matériau composites réalisée dans le cadre du projet Européen REMAP.

ne sont pas nécessairement partagées au sein de la communauté scientifique. Au cours du projet CORALIE nous avons eu la chance d'instrumenter un A380 d'essai et de pouvoir réaliser des mesures d'impédance et d'ondes de Lamb à plusieurs reprises au sol sur le FC et l'IFS de cet appareil (voir les Sections II.1.3.3 ou III.2.2 où ces données sont exploitées). Les données collectées dans ces conditions sont réalistes dans le sens où les conditions opérationnelles sont celles qui existent sur un aéronef (température, chargement mécanique, bruit ambiant sur le tarmac, ...) mais leur principal inconvénient est qu'il est impossible de contrôler cet environnement. Par ailleurs, au cours de ces campagnes d'essais nous n'avons pas pu observer d'endommagement et bien évidemment, il n'a pas non plus été question d'endommager volontairement l'A380 d'essai pour valider les algorithmes de SHM. La difficulté majeure associée à ces bases de données est donc d'être en mesure d'avoir des bases de données avec des informations relatives à des états endommagés. Elles sont cependant complémentaires des autres bases de données en ce qui concerne les conditions opérationnelles et sont donc très intéressantes de ce point de vue.

IV.1.3 La boîte à outils *SHM@PIMM*

Pour être en mesure de tester de façon systématique des algorithmes donnés sur différentes bases des données ou bien pour comparer entre eux différents algorithmes sur diverses bases de données, une boîte à outils nommée *SHM@PIMM* a été développée en interne sous Matlab. Cette boîte à outil s'appuie sur un format de données commun pour toutes les bases de données de SHM, sur un prétraitement permettant de préparer les données, et sur un processus de gestion des flux *entrée/sortie* des différents algorithmes (détection, localisation, classification, quantification) standardisé qui permettent, mis bout à bout, de répondre à ces objectifs.

Une interface graphique permettant d'accéder facilement à l'outil a été développée (voir Figure IV.4) et une documentation permettant aux utilisateurs de manipuler l'outil via cette interface graphique ou via des scripts Matlab a été rédigée. L'outil est mis à disposition librement sur demande aux partenaires académiques intéressés.

FIGURE IV.4 – Interface graphique de la boîte à outils *SHM@PIMM*.

IV.1.3.1 Format de donnée basé sur le standard HDF5

La première difficulté à surmonter est liée au format des données d'entrée nécessaire pour le SHM par ondes de Lamb. Il n'existe pas de standard et chaque laboratoire, voir même chaque chercheur, a créé son propre format de données. Néanmoins, les données issues d'essais de SHM par ondes de Lamb sont toutes plus ou moins similaires : des répétitions de signaux de types "burst" émis et reçus par un certain nombre d'éléments piézo-électriques disposés sur une structure composite à différents moments de son cycle de vie. Une standardisation du format des données d'entrée de SHM a été proposée en se basant sur le format HDF5 ce qui permet à des acteurs variés (académiques, industriels, étudiants, ...) de l'utiliser.

Le format HDF5 : Le format générique ciblé ici est appelé HDF5, et correspond à la 5^{ème} version du format de données hiérarchiques (HDF pour "Hierarchical Data Format") qui est brièvement décrit ici (voir HDF Group pour plus de détails). Les formats HDF correspondent à un ensemble de formats de fichiers (HDF4, HDF5) conçus pour stocker et organiser de grandes quantités de données. Développés à l'origine au *National Center for Supercomputing Applications*, ils sont soutenus par le *HDF Group*.

Le format HDF5 prend en charge de nombreux types de données différents, notamment des tableaux multidimensionnels, des images matricielles et des tables. La structure des fichiers a été simplifiée pour n'inclure que deux types d'objets principaux : les "Datasets" qui sont des tableaux multidimensionnels d'un type homogène, et les "Groups" qui sont des structures conteneurs pouvant contenir des datasets et d'autres groupes. Il en résulte un format de données hiérarchique, semblable à un système de fichiers. Il est ainsi possible d'accéder directement aux ressources d'un fichier HDF5 en utilisant la syntaxe de type `"/path/to/resource"`. Les métadonnées sont stockées sous la forme d'attributs nommés définis par l'utilisateur et attachés aux groupes et aux ensembles de données. Le format HDF5 est ainsi auto-descriptif, ce qui permet à une application d'interpréter la structure et le contenu d'un fichier sans aucune information extérieure. Un fichier HDF5 peut donc contenir un ensemble d'objets connexes auxquels il est

possible d'accéder en tant que groupe ou en tant qu'objets individuels.

Le format HDF5 est un format libre d'accès et de droits. En conséquence, une communauté nombreuse gravite autour de ce format et de nombreux outils sont mis librement à disposition des utilisateurs. Parmi ces outils, il est possible de citer :

- **HDFView** : Cet outil permet de visualiser et d'éditer de manière interactive ce qui est contenu dans un fichier HDF5. Il est interactif dans le sens où il permet à l'utilisateur d'ajouter, de modifier, ou de supprimer des paramètres, et de visualiser graphiquement les données contenues dans un fichier HDF5. Cet outil peut être téléchargé [ici](#)
- **Ressources MATLAB** : MATLAB offre nativement une boîte à outils permettant de lire, modifier ou écrire des fichiers HDF5. La documentation associée à cette boîte à outils est disponible [ici](#). De plus, la communauté HDF5 a fourni de nombreux exemples utiles sur la façon de gérer les fichiers HDF5 à l'aide de MATLAB.
- **Ressources PYTHON** : Deux bibliothèques peuvent être utilisées pour gérer les fichiers HDF5 à l'aide de PYTHON. La bibliothèque H5PY et la bibliothèque PYHDF.

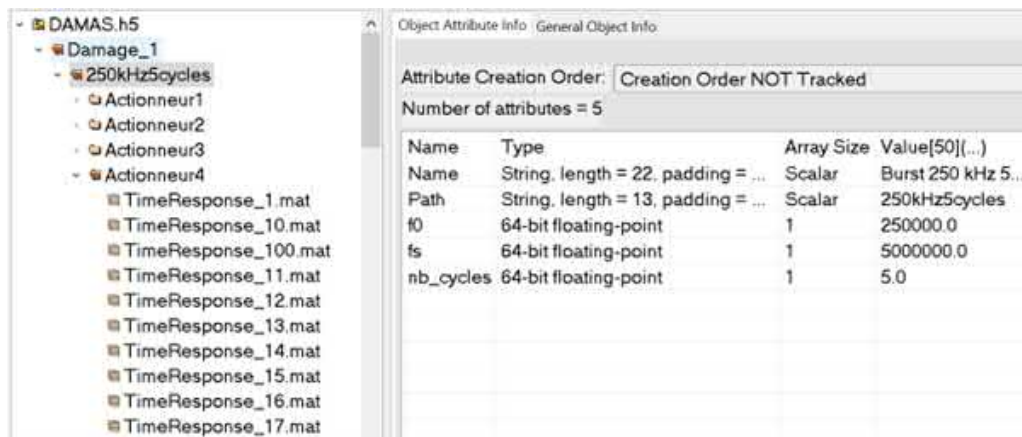


FIGURE IV.5 – Exemple de l'organisation d'un fichier HDF5 au sein de la boîte à outils SHM@PIMM. L'organisation par cas d'étude, fréquence d'excitation et actionneur est visible. Au niveau du groupe correspondant au signal d'excitation des métadonnées telles que la fréquence centrale ou la fréquence d'échantillonnage sont également stockées.

Standard proposé pour les données de SHM par ondes de Lamb : Dans un fichier HDF5, les données de la boîte à outils SHM@PIMM sont organisées de façon standard comme représenté à la Figure IV.5. Le *dataset* correspondant à une répétition contient une matrice de données appelée "Time_response". Un ensemble de métadonnées permettant de stocker les différentes informations relatives à la structure étudiée (propriétés de matériaux, géométrie, etc...), au réseau dispersé d'éléments piézo-électriques (positions, géométrie des éléments, etc ...), et aux signaux d'excitation (fréquence centrale, nombre de cycles, fréquence d'échantillonnage) est associé aux différents groupes présents dans le fichier HDF5 de façon à fournir toutes les informations nécessaires pour le traitement ultérieur de ces données.

IV.1.3.2 Prétraitement des données

L'étape de débruitage est la première à être réalisée après l'acquisition des signaux d'ondes Lamb et constitue une étape de pré-traitement des données qui est capitale pour la suite. Cette

étape peut être réalisée en utilisant l'interface SHM@PIMM par trois moyens différents décrits ci-dessous :

- L'étape de prétraitement la plus simple consiste uniquement en une opération de filtrage *temps/fréquence* effectuée sur les signaux bruts associée à une opération de recalage temporel entre les signaux acquis à l'état sain et à l'état endommagé qui peuvent être légèrement décalés dans le temps (décalage plus petit qu'un échantillon en général).
- La seconde étape de prétraitement disponible combine l'opération précédente de filtrage temps/fréquence avec une opération de débruitage par ondelettes. Cette opération consiste à décomposer le signal à analyser sur une base d'ondelettes donnée et à ne retenir qu'un certain nombre de coefficients de cette décomposition.
- La troisième étape de prétraitement disponible combine la première opération de filtrage temps/fréquence avec une opération de débruitage en ondelettes optimisée. Cette opération consiste à décomposer le signal à analyser sur une base d'ondelettes donnée et à ne retenir qu'un certain nombre de coefficients de cette décomposition. L'étape d'optimisation consiste à rechercher la meilleure famille d'ondelettes et le meilleur niveau de décomposition selon un critère basé sur l'entropie.

Des algorithmes de compensation des effets de la température (voir Section IV.6) peuvent également être mis en oeuvre à cette étape.

IV.1.3.3 Standardisation des différentes étapes de SHM

Une fois les signaux débruités, les différentes étapes du processus de SHM peuvent leur être appliquées. La boîte à outils SHM@PIMM propose ainsi l'application d'algorithmes de détection, localisation, classification et quantification tels qu'ils sont décrits dans les Sections IV.2, IV.3, IV.4, et IV.5. Les algorithmes peuvent être exécutés via l'interface graphique ou de façon automatisée par un script MATLAB. Il est de plus possible de calculer les courbes de dispersion pour la structure étudiée en se basant sur les algorithmes de la Section II.1.2. Cet outil constitue donc un outil relativement complet permettant d'être en mesure de tester de façon systématique des algorithmes donnés sur différentes bases des données ou bien pour comparer entre eux différents algorithmes sur diverses bases de données.

IV.2 Détection de dommages [A|Réb+18; E|Liz19]

La détection d'un dommage est la première étape du processus de SHM et sera discutée ici. Dans un premier temps le principe de base des méthodes de détection de dommages basées sur des indicateurs d'endommagements (*DI* pour "*Damage Index*" en anglais) sera abordé en Section IV.2.1. Puis une approche de la détection basée sur la théorie des valeurs extrêmes (issue de [A|Réb+18]) et une approche de détection sans référence ("*baseline-free*" en anglais, issue de [E|Liz19]) seront ensuite détaillées dans les Sections IV.2.2 et IV.2.3 pour illustrer les problématiques associées à cette étape.

IV.2.1 Principe de fonctionnement des algorithmes de détection

IV.2.1.1 Démarche de détection

L'approche de détection d'un endommagement sur la base d'ondes de Lamb la plus couramment utilisée est relativement intuitive : un dommage présent dans une structure à surveiller va générer un écho supplémentaire dans les ondes de Lamb reçues par les différents éléments

piézo-électriques constitués en réseau (voir Section II.2). L'idée est alors de chercher à détecter cet écho, cette *signature du dommage*, dans les signaux reçus en comparaison avec un état de référence supposé sain. Les échos recherchés étant d'amplitude relativement faible et les signaux mesurés étant possiblement bruités, ces mesures sont en général répétées N fois. La démarche suivie pour la détection de dommages est ainsi la suivante :

1. **Acquisitions pour un état de référence, considéré comme sain.** Pour chaque élément piézo-électrique du réseau et pour N répétitions :
 - (a) Émission d'ondes de Lamb avec l'élément considéré.
 - (b) Réception des ondes de Lamb résultantes avec les autres éléments piézo-électriques.
2. **Acquisitions pour un état inconnu, potentiellement endommagé.** Pour chaque élément piézo-électrique du réseau et pour N répétitions :
 - (a) Émission d'ondes de Lamb avec l'élément considéré.
 - (b) Réception des ondes de Lamb résultantes avec les autres éléments piézo-électriques.
3. **Comparaison entre l'état sain et l'état inconnu**
 - (a) Pour chaque chemin "*actionneur-capteur*", comparaison entre les signaux collectés à l'état *sain* et à l'état *inconnu*.
 - (b) Prise d'une décision relativement à l'état d'endommagement de l'état *inconnu* suite à l'analyse de ces comparaisons.

La Figure IV.6 présente des exemples de signaux mesurés en SHM par ondes de Lamb. Dans ce cas, un écho dû à la présence d'un dommage est visible clairement dans les signaux de différence. C'est cet écho qui est recherché par les algorithmes de détection de dommages.

Pour mener à bien cette démarche de détection de dommage, deux outils sont donc nécessaires :

- Des **métriques** appelées indices d'endommagements (ou DIs pour "*Damage Indexes*" en anglais) qui permettent de comparer pour un chemin "*actionneur-capteur*" un signal à l'état *sain* et un signal à l'état *inconnu*.
- Des **outils statistiques** permettant de décider s'il existe une différence entre les $N(N-1)/2$ DIs calculés en comparant entre elles les N répétitions à l'état *sain* et les N^2 DIs calculés en comparant les N répétitions à l'état *sain* et les N répétitions à l'état *inconnu*.

IV.2.1.2 Métriques pour la comparaison de signaux à l'état *sain* et *inconnu*

Quelque soit le chemin "*actionneur-capteur*" pour lequel deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ doivent être comparés (ces signaux peuvent être deux répétitions différentes à l'état *sain* ou bien une répétition à l'état *sain* et une répétition à l'état *inconnu*), un indice d'endommagement (ou *DI* pour "*Damage Index*" en anglais) est défini mathématiquement de la façon suivante :

$$\forall \{x(t), y(t)\}_{t \in [0, T]} \quad DI[x(t), y(t)] = \mathcal{F}[x(t), y(t)] \in \mathbb{R}^+ \quad \text{avec} \quad DI[x(t), x(t)] = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Un DI est donc une fonction à valeurs réelles positives calculée à partir des signaux temporels $x(t)$ et $y(t)$ définis sur un intervalle $[0, T]$. Ce DI peut être vu comme :

- un indicateur synthétique permettant la comparaison entre les signaux $x(t)$ et $y(t)$,
- un outil de réduction de dimension permettant de passer de $[0, T]$ à un réel positif,
- une distance calculée entre les signaux $x(t)$ et $y(t)$ définis sur $[0, T]$.

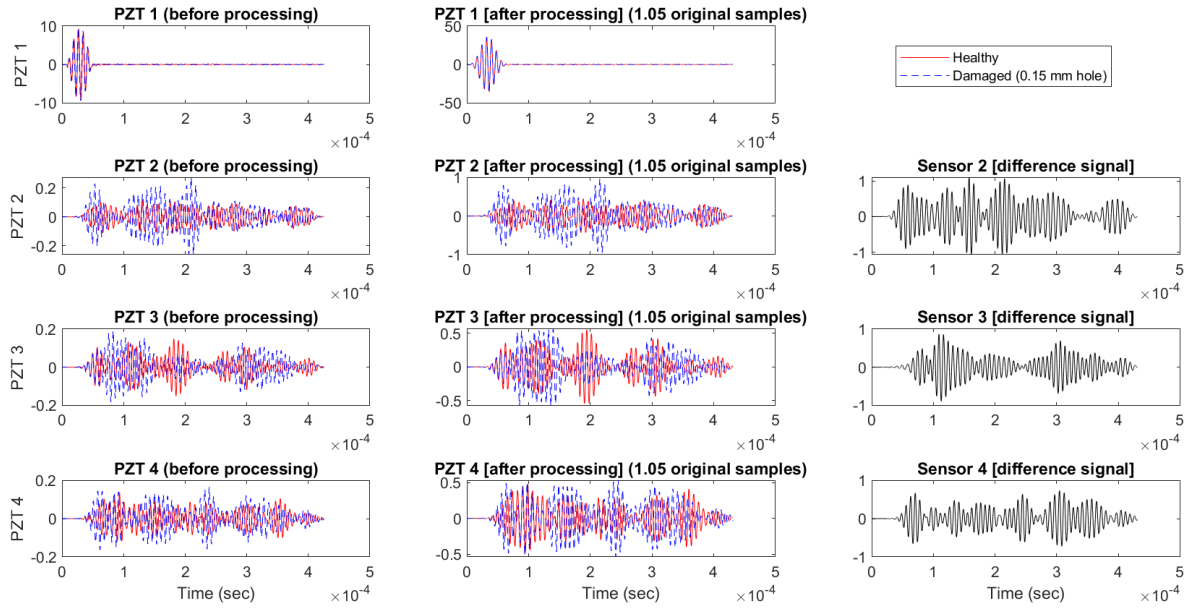


FIGURE IV.6 – Exemples de signaux mesurés en SHM par ondes de Lamb : l’élément piézo-électrique 1 émet un signal qui est ensuite reçu par les éléments piézo-électriques 2, 3 et 4 à un état *sain* et à un état *endommagé* correspondant à un trou hémisphérique non-traversant d’un diamètre de $150\ \mu\text{m}$. La colonne de gauche présente les signaux bruts, celle du milieu les signaux débruités et alignés temporellement et sur celle de droite figurent les différences entre les signaux à l’état sain et à l’état inconnu. Dans ce cas, un écho du à un dommage est visible clairement dans les signaux de différence.

Certains de ces DIs peuvent être bornés et normalisés entre 0 et 1 mais cela n’est pas une nécessité. En tant que distance, les DIs sont forcément à valeurs positives et la distance entre deux signaux identiques doit être nulle. Il existe de nombreuses définitions possibles de DIs basées sur différents outils mathématiques (différence entre signaux, corrélation, variance, etc ...) et un certain nombre sont implémentés dans la boîte à outil *SHM@PIMM* (voir [A|Rah+21] par exemple). Ces DIs sont établis sur la base d’expressions mathématiques arbitraires et n’ont qu’une interprétation physique limitée. C’est l’une des limites principales à l’utilisation des DIs en pratique. Leur avantage est par ailleurs le fait qu’ils synthétisent en une seule et unique valeur la comparaison entre deux signaux temporels $x(t)$ et $y(t)$ ce qui simplifie beaucoup les choses du point de vue des ressources informatiques à mettre en œuvre pour la détection de dommages. Ce point est néanmoins à nuancer car le calcul effectif des DIs est en lui-même une opération qui peut s’avérer chronophage si elle est réalisée avec de nombreuses répétitions.

IV.2.1.3 Outils statistiques pour la détection de dommages

Une fois les DIs calculés, une décision doit être prise quand à l’état d’endommagement de l’état *inconnu*. Si des signaux mesurés pour un état sain H et pour un état endommagé D sont disponibles, les entrées de ce détecteur sont l’ensemble $\{D_H\}$ des $N(N-1)/2$ DIs calculés en comparant deux à deux les répétitions correspondant à l’état *sain*, et l’ensemble $\{D_D\}$ des N^2 DIs obtenus en comparant les répétitions à l’état *sain* et à l’état *endommagé*. Sur la base des ensembles $\{D_H\}$ et $\{D_D\}$, les densités de probabilités associées à l’état *sain*, $p_H(DI)$, et à l’état

endommagé, $p_D(DI)$, pour un DI donné, peuvent être estimées comme illustré en Figure IV.7. Il est ensuite possible de déterminer un seuil T_{DI} correspondant à la valeur de DI à partir de laquelle l'état *inconnu* sera considéré comme *endommagé*.

Le choix d'un seuil aura deux conséquences pratiques importantes (voir Figure IV.7) :

- de potentielles **fausses-alarmes** : la densité de probabilité à l'état *sain* $p_H(DI)$ n'étant pas nécessairement à support fini, il existera toujours des chances qu'à l'état *sain*, un DI prenne une valeur supérieure au seuil. Cela générera une fausse alarme dans le sens où le détecteur estimera que l'état est *endommagé* alors qu'il est *sain*. La probabilité d'occurrence de ces fausses-alarmes PFA peut être calculée comme :

$$\text{PFA} = \int_{T_{DI}}^{+\infty} p_H(x) dx \quad (\text{IV.3})$$

- de potentielles **non-détections** : la densité de probabilité à l'état *endommagé* $p_D(DI)$ n'étant pas non plus nécessairement à support fini, il existera également des chances qu'à l'état *endommagé*, le DI prenne une valeur inférieure au seuil. Cela générera un phénomène de non-détection dans le sens où le détecteur estimera que l'état est *sain* alors qu'il est *endommagé*. La probabilité qu'un dommage puisse être détecté peut être calculée comme :

$$\text{PoD} = \int_{T_{DI}}^{+\infty} p_D(x) dx \quad (\text{IV.4})$$

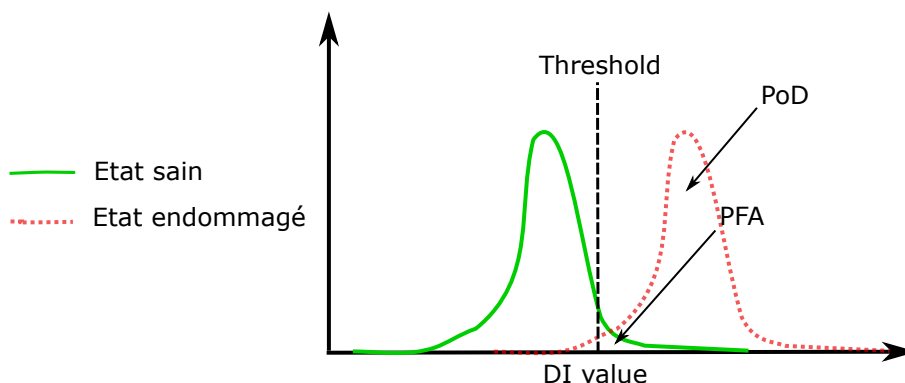


FIGURE IV.7 – Densités de probabilités associées à l'état *sain* $p_H(DI)$ et à l'état *endommagé* $p_D(DI)$ pour un DI donné. Le choix du seuil va déterminer les probabilités de fausses alarmes (PFA) et de détection (POD)

Les équations (IV.3) et (IV.4) indiquent donc que les probabilités de détection et de fausses alarmes dépendent du choix du seuil. Un détecteur idéal assurera que $\text{PoD} = 1$ et $\text{PFA} = 0$, mais en pratique cela n'est pas nécessairement le cas s'il existe un recouvrement entre les densités de probabilités $p_H(DI)$ et $p_D(DI)$ ou si leurs supports sont étendus. Le choix du seuil T_{DI} résulte donc d'un compromis entre la PoD et la PFA.

Cependant, en pratique les données à l'état *endommagé* sont rarement disponibles et seule la densité de probabilité à l'état *sain* $p_H(DI)$ est généralement connue. Dans ce cas, le seuil T_{DI} est choisi de façon à garantir une certaine valeur cible de la PFA :

$$\int_{T_{DI}}^{+\infty} p_H(x) dx = \text{PFA} \quad (\text{IV.5})$$

Le choix d'un seuil dans le cadre de la détection de dommages est donc assujéti à la connaissance préalable de la densité de probabilité conditionnant la répartition des DI à l'état sain. Cette densité de probabilité n'a en réalité pas besoin d'être connue sur l'ensemble des valeurs de DI, mais seulement sur sa partie extrême car c'est ici que les décisions devront être prises. Le second commentaire relatif à cette stratégie de détection est qu'elle est basée sur la comparaison avec une référence et donc suppose que des signaux de référence sont disponibles pour évaluer la déviation des signaux actuels vis à vis de cet état. En pratique, cela impose une mesure de référence qui n'est pas nécessairement ni disponible, ni facile à réaliser. Le coût associé à cet état de référence est un point d'attention des industriels intéressés par le SHM.

IV.2.2 Seuil de détection basé sur la théorie des valeurs extrêmes [A|Réb+18]

La conception d'un détecteur de dommage efficace nécessite la détermination d'un seuil de décision fiable à l'aide des indices de dommage disponibles à l'état sain et déterminé en fonction d'un compromis entre deux probabilités : la POD et la PFA. Ce sont en particulier les valeurs extrêmes de ces DI qui vont permettre de déterminer un seuil fiable et bien souvent seuls les DI à l'état sain sont disponibles.

IV.2.2.1 La théorie des valeurs extrêmes pour le SHM

En général, en raison du haut niveau de sécurité, l'exigence de la PFA se situe typiquement entre 10^{-4} et 10^{-9} , ce qui est très faible. Afin de déterminer le seuil de décision sous une telle contrainte, une première approche consiste à estimer la densité de probabilité des DI à l'état sain et à travailler avec cette estimation. Dans ce cas, des méthodes paramétriques et non paramétriques d'estimation de la densité comme la méthode de Parzen peuvent être utilisées [R|HJ96; R|Hma+13]. Une deuxième approche consiste à modéliser uniquement la queue de la densité de probabilité des DI en utilisant la théorie des valeurs extrêmes ("*Extreme Values Theory*", EVT) [R|BD74; R|Col+01; R|Pic75]. Cette approche est intéressante car il n'est pas nécessaire de connaître toute la distribution de la statistique de décision pour développer un détecteur. Cependant, il est nécessaire de disposer de très grandes bases de données afin d'avoir suffisamment d'échantillons extrêmes permettant d'estimer avec précision le seuil de décision. Afin d'estimer les queues de distribution, deux approches, toutes deux largement utilisées dans la modélisation des événements rares, ont été proposées. La première est la méthode des maxima par blocs ("*Block Maxima*", BM) qui modélise la distribution des maxima par la distribution des valeurs extrêmes généralisées ("*Generalized Extreme Values*", GEV) [R|Gum12; R|HW87]. La seconde est la méthode des excès ("*Peaks Over Threshold*", POT) qui modélise la distribution des excès au-delà d'un seuil d'apprentissage par la distribution de Pareto généralisée ("*Generalized Pareto Distribution*", GPD) [R|DF07; R|DHS12; R|Pic75]. Pour les applications industrielles, la modélisation des queues de distribution est généralement effectuée en utilisant la méthode POT car elle présente plusieurs avantages par rapport à la méthode BM [R|Hma+12; R|HW87; R|RT97]. Tout d'abord, la méthode POT est assez flexible et réaliste pour les besoins du SHM par rapport à la méthode BM. En effet, la méthode BM est plus axée sur l'analyse des données financières car elles peuvent être segmentées par mois, trimestre, année, etc... ce qui n'est pas le cas en SHM. De plus, la méthode BM ne prend pas en compte "toutes" les valeurs qui pourraient être extrêmes. En effet, cette dernière n'extrait que le maximum de chaque bloc prédéfini. Elle peut donc perdre certaines valeurs extrêmes qui peuvent se produire autour du maximum d'un des blocs, alors que pour le bloc donné, le maximum peut être relativement faible. Au contraire, la méthode POT évite ce problème car elle extrait les maxima au-dessus d'un seuil fixé à l'avance.

Pour ces raisons, la méthode POT est plus adaptée aux applications SHM que la méthode BM.

L'étude de la littérature révèle que l'établissement d'un modèle statistique pour la surveillance de la santé structurelle basé sur la théorie des valeurs extrêmes a déjà été démontré [R|Soh+05; R|Wor+05]. L'approche de la théorie des valeurs extrêmes a ensuite été appliquée à la surveillance de la santé des structures [R|Soh+05; R|Wor+05; R|LZ14; R|PS06]. Cependant, ces études passées présentent plusieurs limitations. Tout d'abord, aucune d'entre elles n'étudie le potentiel de la méthode POT pour estimer les paramètres du modèle statistique de queue de distribution. Plus particulièrement, l'effet des paramètres de conception tels que le nombre total d'échantillons N ou le pourcentage d'échantillons supérieurs retenus pour l'apprentissage au dessus d'un seuil u n'a pas été étudié. De plus, les études mentionnées précédemment se sont concentrées sur des valeurs relativement élevées de PFA (typiquement 1% ou 10%) qui ne sont pas du tout représentatives d'une PFA industrielle qui se situe généralement entre 10^{-4} et 10^{-9} . Enfin, les études précédentes n'ont fourni aucune mesure permettant d'évaluer la validité de la méthodologie de conception de seuil proposée par rapport à la PFA souhaitée.

IV.2.2.2 Mise en œuvre sur le FC

Nous proposons ainsi dans [A|Réb+18] de modéliser la queue de la statistique de décision (définie ici comme la distribution de DI) en utilisant la méthode POT afin de déterminer le seuil de décision correspondant à une PFA donnée. Cette méthodologie a été appliquée dans le contexte d'une nacelle d'avion composite pour différentes configurations de la taille de l'échantillon d'apprentissage N , du seuil u à partir duquel l'apprentissage est réalisé, et de la PFA et comparée à une méthode plus classique qui consiste à modéliser la distribution entière au moyen de fenêtres de Parzen. La qualité des seuils obtenus à l'aide des deux méthodes a été évaluée objectivement en comparant la PFA effective obtenue à l'aide de ces méthodes avec la PFA souhaitée fournie en entrée de l'algorithme.

Trois types de dommages ont été investigués ici (un dommage réalisé avec un aimant de 45 mm, un dommage par la superposition d'un aimant de 45 mm et d'un aimant de 40 mm et un trou de 6 mm réalisé avec une perceuse à travers la structure). Pour toutes les configurations étudiées, entre 100 et 1000 répétitions des mesures ont été réalisées de façon à disposer de suffisamment de DI pour pouvoir appliquer l'EVT. L'indice d'endommagement choisi pour cette étude est défini comme l'énergie de l'enveloppe du signal d'écho a été utilisé ici. En utilisant tous les signaux mesurés à l'état sain comparés à ceux mesurés à un état inconnu (sain ou endommagé), d'importantes bases de données de DI sont obtenues. Celle obtenue en comparant l'ensemble sain à lui-même est très intéressante car elle permet de caractériser le comportement sain de la structure d'un point de vue statistique et de calculer les seuils de décision.

IV.2.2.3 Comparaison des seuils obtenus via les deux méthodes

Les deux seuils de décision $S_{PAR}(N, PFA)$ et $S_{POT}(N, u, PFA)$ correspondant aux deux méthodes testées (méthode de Parzen et méthode POT) sont déterminés. Ils correspondent théoriquement à une PFA donnée, pour une taille d'échantillon d'apprentissage N donnée, et pour un seuil d'apprentissage u donné à partir duquel la queue de distribution est considérée (uniquement dans le cas de S_{POT}). Comme la conception du seuil de détection basé sur les fenêtres de Parzen est plus habituelle, elle sera considérée ici comme une référence. Mais cela ne signifie pas que les seuils obtenus par cette approche constituent la vérité terrain qui est totalement inconnue ici. Afin de comparer les deux seuils, la différence relative de seuil, $\Delta(N, u, PFA)$ exprimée en %, définie comme dans l'Eq. (IV.6) sera utilisée.

$$\Delta(N, u, PFA) = 100 \times \frac{S_{POT}(N, u, PFA) - S_{PAR}(N, PFA)}{S_{PAR}(N, PFA)} \quad (IV.6)$$

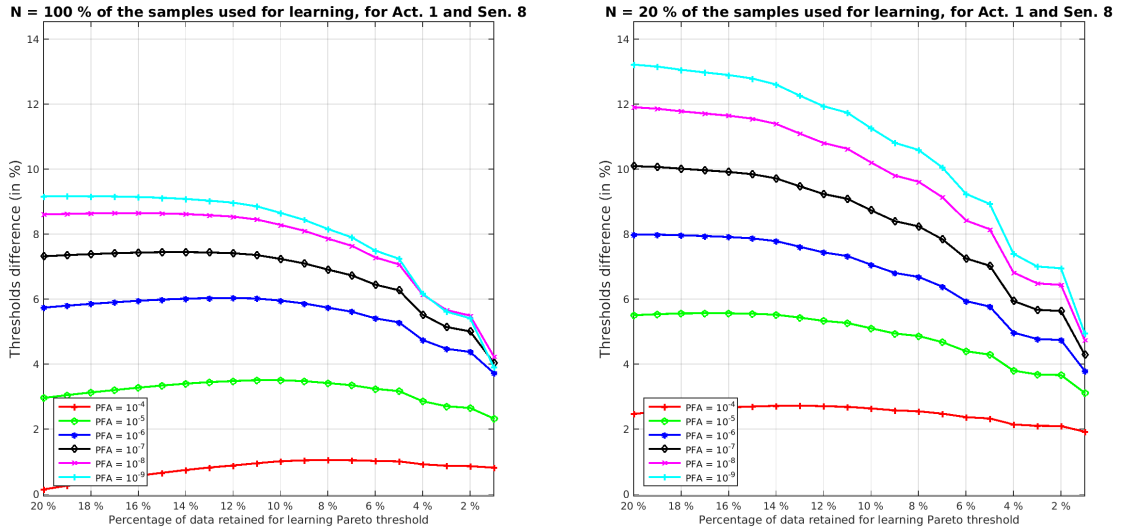


FIGURE IV.8 – Différence relative de seuils en fonction du pourcentage de donnée et de la PFA retenus pour un chemin *actionneur-capteur* donné. La figure de gauche correspond au cas où toutes les données sont utilisées et la figure de droite au cas où seule 20 % des données sont utilisées.

La différence relative de seuil $\Delta(N, u, PFA)$ en fonction du pourcentage de données retenues pour l'apprentissage (dépendant de u) pour plusieurs PFA et en utilisant tous les $N = 100\%$ des échantillons disponibles ou seulement $N = 20\%$ des échantillons disponibles est tracée à la Figure IV.8 pour différentes PFA souhaitées allant de 10^{-4} à 10^{-9} . Sur cette figure, on peut voir que pour de grandes valeurs de la PFA souhaitée, la différence relative des seuils est plutôt faible ($\simeq 1 - 2\%$), ce qui signifie que les seuils fournis par les deux méthodologies sont assez similaires. Cependant, ce n'est pas du tout le cas pour les plus petites valeurs de la PFA pour lesquelles la différence relative de seuil peut atteindre jusqu'à $\simeq 12\%$. Ceci est dû au fait qu'avec la POT, un modèle plus précis, et donc différent de celui obtenu avec les fenêtres de Parzen, de la queue de la distribution est estimé. La différence entre la partie gauche et la partie droite de la Figure IV.8 réside dans le fait que le nombre d'échantillons qui a été utilisé pour l'estimation du seuil est différent : $N = 100\%$ des échantillons pour la partie gauche et $N = 20\%$ des échantillons pour la partie droite. En comparant ces deux figures, on constate que la forme générale des courbes est similaire mais que l'échelle verticale n'est pas la même (maximum autour de 8% à gauche et autour de 12% à droite). En effet, lorsqu'un plus petit nombre d'échantillons est disponible, la différence entre les deux seuils estimés devient plus importante. La raison en est qu'avec moins d'échantillons, la méthode de détermination du seuil basée sur la POT se retrouve avec moins d'échantillons au-dessus du seuil d'apprentissage u et donc avec une estimation moins précise du modèle de queue de distribution, surtout lorsque de très faibles PFA sont souhaitées. En résumé, des différences allant jusqu'à 10% peuvent exister entre les seuils estimés par les deux méthodes. Ces différences se réduisent cependant de manière significative (jusqu'à 1%) si la PFA est suffisamment grande ou si le nombre d'échantillons N retenus pour apprendre est

suffisamment petit (ou de manière équivalente si le seuil u est suffisamment élevé). Le nombre d'échantillons N semble être un paramètre beaucoup moins influent que la PFA.

IV.2.2.4 Détermination de la PFA effective

Cependant, il n'est toujours pas possible d'évaluer lequel des deux seuils peut être considéré comme plus fiable que l'autre. L'objectif est d'y parvenir en tenant compte du fait que les seules données de conception d'entrée qui sont fournies aux deux méthodologies sont une PFA *souhaitée*. Comme ici, de nombreuses données expérimentales sont disponibles, il est donc possible de calculer la PFA *effective* (c'est-à-dire la PFA qui est obtenue en utilisant les DI expérimentaux avec un seuil donné) et de la comparer à la PFA *souhaitée*. Il sera alors possible d'évaluer quel seuil est le meilleur en fonction de ce critère objectif. La PFA effective pour le chemin *Actionneur 1 - Capteur 8* en fonction du pourcentage de données retenues pour l'apprentissage pour plusieurs proportions des échantillons disponibles N est tracée pour une PFA souhaitée de 10^{-4} sur la Figure IV.9. Les lignes pleines sont obtenues en utilisant les seuils S_{POT} et les lignes pointillées en utilisant les seuils S_{PAR} . En outre, la PFA souhaitée est également indiquée au moyen d'une ligne noire plus épaisse. Ces figures montrent tout d'abord que les seuils estimés à l'aide de fenêtres de Parzen fournissent toujours des PFA effectives inférieures aux PFA souhaitées. En ce sens, la méthodologie de conception peut être qualifiée de *conservatrice*. Ceci est dû au fait que la méthodologie basée sur les fenêtres de Parzen utilise toutes les données disponibles et donc que les données qui n'appartiennent pas à la queue ont plus de poids que les données qui appartiennent à la queue (qui malheureusement transmettent les informations les plus intéressantes). Ceci n'est pas vrai pour les seuils conçus à l'aide de l'approche POT. Pour ces seuils, la PFA effective peut être supérieure ou inférieure à la PFA souhaitée. De plus, pour les seuils basés sur l'approche POT, on peut remarquer que leur PFA effective converge vers la PFA désirée lorsque le seuil d'apprentissage u devient plus élevé. Ceci est cohérent avec le fait que lorsque le seuil d'apprentissage devient plus élevé, l'hypothèse de GPD devient plus valide et donc le modèle ajusté décrit mieux les DI expérimentaux. Enfin, on peut remarquer que le nombre d'échantillons N ne semble pas ici avoir une grande influence.

IV.2.3 Stratégies de détection “sans référence” [E|Liz19]

L'autre difficulté associée à l'approche de détection des dommages décrite à la Section IV.2.1 réside dans le besoin d'avoir accès à une base de données de *référence* à laquelle seront comparés les signaux obtenus dans un état *inconnu*. Cela impose en pratique de réaliser des mesures sur les structures à surveiller dès leur mise en service, suite à chaque *montage/démontage* ou chaque réparation, puis de stocker les données correspondant à ces mesures pour qu'elles servent de référence par la suite. De plus, cette base de données de référence n'est pas forcément fiable car les variations de température ou de chargement mécanique risquent de modifier la façon dont les ondes se propagent dans un état *inconnu* et peuvent donc la rendre caduque si les conditions environnementales et opérationnelles changent (ce point sera discuté plus en détail dans la Section IV.6 ainsi que des solutions alternatives). En conséquence, des méthodes dites “*baseline-free*” ou encore “*sans référence*” en français ont été développées et font l'objet de cette section. Il est important ici de noter que ces méthodes *sans référence*, même si elles ne se basent pas sur des mesures réalisées précédemment dans un état de *référence*, se fondent inévitablement sur des hypothèses physiques (linéarité, conversion de mode, invariance entre chemins, etc...) qui poseront forcément des problèmes lors de leur mise en œuvre en pratique si elles sont difficiles à valider sur le terrain.

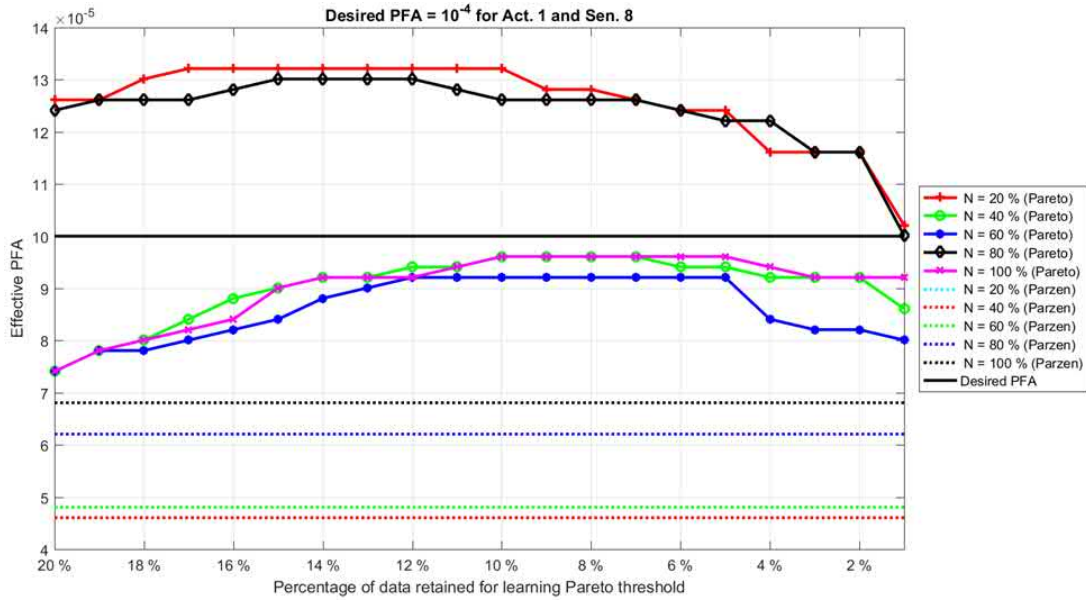


FIGURE IV.9 – PFA effective pour le chemin *Actionneur 1 - Capteur 8* en fonction du pourcentage de données retenues pour l'apprentissage pour plusieurs proportions des échantillons disponibles N et pour une PFA souhaitée de 10^{-4} . Les lignes pleines sont obtenues en utilisant les seuils S_{POT} et les lignes pointillées en utilisant les seuils S_{PAR} .

IV.2.3.1 Principales méthodes sans référence

Les principales méthodes sans référence de la littérature sont brièvement introduites ici pour être ensuite comparées.

Baseline instantanée (BI) : La méthode dite de “*baseline instantanée*” [R|AIP09] propose de s'affranchir des mesures de référence en s'appuyant sur des spécificités du réseau de transducteurs déployé. L'idée directrice de cette méthode est que la disposition des transducteurs doit permettre d'avoir des chemins identiques et comparables entre les PZTs (même distance, orientation, éventuels raidisseurs). À partir de l'état courant de la structure, les signaux issus des chemins identiques sont comparés entre eux via le calcul d'un DI, permettant de mettre en évidence un chemin qui serait endommagé, relativement aux autres chemins sains. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est applicable à différents types d'endommagements et de matériaux car elle ne s'appuie pas sur une hypothèse physique forte, mais elle présente quelques inconvénients qui la rendent finalement difficile à mettre en œuvre :

- Les transducteurs doivent être placés de façon rigoureuse : le moindre millimètre de décalage rend la démarche difficilement applicable.
- Les transducteurs doivent être collés à l'identique et avoir les mêmes états de santé.
- La définition d'un seuil de détection peut malgré tout nécessiter des tests sur une structure saine, ou repose sur le postulat que la majorité des chemins n'est pas endommagée.

Retournement temporel (RT) : Le procédé de retournement temporel désigne le fait d'inverser le temps d'une action [R|JLB11]. Un signal de type “*burst*” est d'abord émis par le PZT_A et mesuré par le PZT_B. Le signal reçu par le PZT_B est ensuite retourné temporellement et réémis par ce même PZT. Dans un monde linéaire idéal, le PZT_A devrait alors recevoir le signal de type

“burst” initialement émis par le PZT_A. Mais en présence de non-linéarités ou bien de conversion de mode, cela n’est plus vrai et le signal reçu par le PZT_A sera différent de celui qui avait été émis et des DI pourront être calculés sur la base de ces signaux. Cette méthode s’applique donc sur des structures que l’on peut considérer comme linéaires et qui deviennent non-linéaires ou pour lesquelles de la conversion de mode se produit en présence d’un dommage. Les contraintes associées à l’utilisation de cette méthode sont les suivantes :

- Les modes A_0 et S_0 se propagent de façon plus ou moins dispersive dans la structure. Cela pose problème lorsque le signal est retourné temporellement. Il faut donc choisir avec soin le mode qui est le plus sensible au type d’endommagement visé et s’assurer d’être capable de limiter ou de maîtriser les phénomènes de dispersion.
- L’endommagement à détecter doit provoquer de la conversion de mode et/ou ajouter des non-linéarités dissociables des autres phénomènes ayant lieu dans la structure saine.
- Comme pour la méthode précédente, définir un seuil de détection d’endommagement peut également nécessiter de réaliser au préalable des tests sur une structure saine.

Rupture de réciprocité (RR) : Cette méthode est très proche de celle du retournement temporel [R|Ach06]. Elle se base sur le même constat, à savoir que l’apparition d’un endommagement doit engendrer des non-linéarités ou bien un phénomène de conversion de modes dans la structure étudiée qui va briser le principe de réciprocité. Ainsi, dans le cas *sain*, que le signal aille du PZT_A vers le PZT_B ou bien l’inverse, les mesures réalisées au niveau des PZT récepteurs seront en tout point identiques pour des raisons de symétrie du système aussi appelé *principe de réciprocité*. Cette réciprocité est par contre perdue si un dommage apparaît sur le chemin de propagation des ondes. En comparaison avec la méthode RT, cette méthode ne repose cependant que sur la comparaison directe des signaux obtenus dans les deux sens de propagation possibles d’un chemin allant d’un PZT_A à un PZT_B via le calcul d’un DI et sans étape supplémentaire de traitement du signal. Les contraintes liées à l’application pratique de la méthode RR sont :

- Les PZTs utilisés doivent être collés de façon identique pour garantir que la réponse obtenue sur la structure à l’état sain dans les deux sens soit identique.
- Un endommagement situé au centre du chemin n’est pas détectable en observant le principe de réciprocité car les ondes se propageant dans les deux sens sont modifiées de façon identique. Il faut toutefois noter qu’il est en pratique très peu probable qu’un endommagement ait une forme parfaitement symétrique et soit placé exactement au centre d’un chemin entre deux transducteurs.
- Un endommagement situé en dehors de la trajectoire directe entre les PZTs peut être difficile à détecter et donc l’application de cette méthode peut nécessiter l’utilisation d’un réseau de PZTs assez dense.

Méthodes basées sur les *dual* PZTs (VA et AM) : Les deux électrodes qui composent les dual-PZT (voir Section II.2.2.3) offrent l’avantage de pouvoir isoler la contribution des modes A_0 et S_0 . Il est alors imaginable d’être capable d’identifier les conversions de modes générées par les endommagements grâce aux propriétés des *dual PZTs* (méthode AM : amplitude modale) ou bien de quantifier les variations de l’amplitude d’un mode donné (méthode VA : variation d’amplitude) [R|KS08]. L’avantage principal de cette méthode par rapport aux méthodes *sans référence* présentées précédemment est qu’elle ne nécessite pas de précision géométrique associée à des chemins identiques ou à des collages de PZTs identiques pour pouvoir être exploitée. Elle nécessite cependant l’utilisation de dual-PZTs qui sont plus chers que les PZTs et nécessitent un câble supplémentaire.

IV.2.3.2 Evaluation systématique des performances des méthodes sans référence

Les performances des méthodes *sans-référence* ont été évaluées sur une plaque de stratifié composite typique des applications aéronautiques équipée de 7 dual-PZTs. Les endommagements étudiés ici sont un aimant et un délaminage provoqué par choc laser d'un diamètre de 20 mm qui a été créé en accumulant les endommagements générés par plusieurs impacts LASER contigus. Le délaminage est situé au même endroit que pour le cas de l'aimant afin d'obtenir des résultats comparables qui ne dépendent pas de l'emplacement des endommagements, mais seulement de leurs natures. Expérimentalement, les structures en matériau composite ont été testées à différentes températures, et interrogées avec différentes fréquences (voir [E|Liz19] pour les détails du protocole expérimental).

Intégration spatiale des DI : Pour décider de la présence ou non d'un dommage sur une structure possédant 7 PZTs comme celle présentée Figure IV.10, une stratégie d'intégration spatiale des DI calculés pour chaque chemin doit être définie. Quatre approches ont été proposées dans [E|Liz19] et évaluées dans un contexte de détection de dommage *sans référence* :

- L'approche par "chemin" : cette approche est la plus intuitive et est basée sur l'analyse directe des DI calculés pour chacun des chemins existant sur la structure à surveiller. Ainsi un chemin sera identifié comme *endommagé* si le DI lui correspondant dépasse un certain seuil de détection et comme *sain* dans le cas contraire.
- L'approche par "PZT" : cette approche consiste à créer un DI qui corresponde à la moyenne de tous les DI obtenus pour des chemins partant de ce PZT. De cette façon, c'est le voisinage d'un ou plusieurs PZT qui est identifié comme *sain* ou *endommagé*.
- L'approche par "pixel" : Dans cette approche, la structure étudiée est quadrillée selon des dimensions arbitrairement choisies par l'expérimentateur. Un pixel désigne une des sections ainsi créées par ce maillage. Un DI est créé pour chaque pixel en considérant la moyenne des DI issus des chemins qui traversent le pixel considéré. Les pixels pour lesquels le DI dépassera un certain seuil seront considérés comme *endommagés*.
- L'approche par "cluster" : Un cluster désigne une région délimitée par au moins 3 PZTs. Un DI est créé pour chaque cluster en considérant la moyenne des DI obtenus à partir de tous les chemins dont les PZTs sont contenus dans le cluster considéré.

Résultats obtenus : Les différentes méthodes *sans référence* introduites précédemment (RR, BI, VA et AM) sont testées expérimentalement sur les deux exemples décrits précédemment. La Figure IV.11 présente le pourcentage de diagnostic correctement réalisé pour une combinaison d'approche et de méthode *sans référence* pour les différents jeux de paramètres (DI et fréquence) testés. L'analyse de cette figure permet de conclure que :

- Le placement des transducteurs n'est pas parfait, leurs positions peuvent être décalées de quelques millimètres par rapport aux positions idéales et les collages ne sont pas rigoureusement identiques. Ces petites différences induisent des erreurs lorsque les signaux correspondant à des chemins censés être identiques sont analysés. Cela pénalise certainement les méthodes BI et RT.
- La méthode VA ne semble pas adaptée pour les cas d'étude présentés ici.
- Les méthodes les plus efficaces varient en fonction de l'endommagement étudié : la méthode AM semble plus appropriée pour l'étude de l'endommagement réalisé via un aimant, alors que la méthode BI semble plus appropriée pour le suivi du délaminage. Cela peut s'expliquer par le fait que les aimants ont plus d'influence sur la propagation du mode A_0 que le délaminage. La méthode AM est logiquement plus efficace dans ce cas.

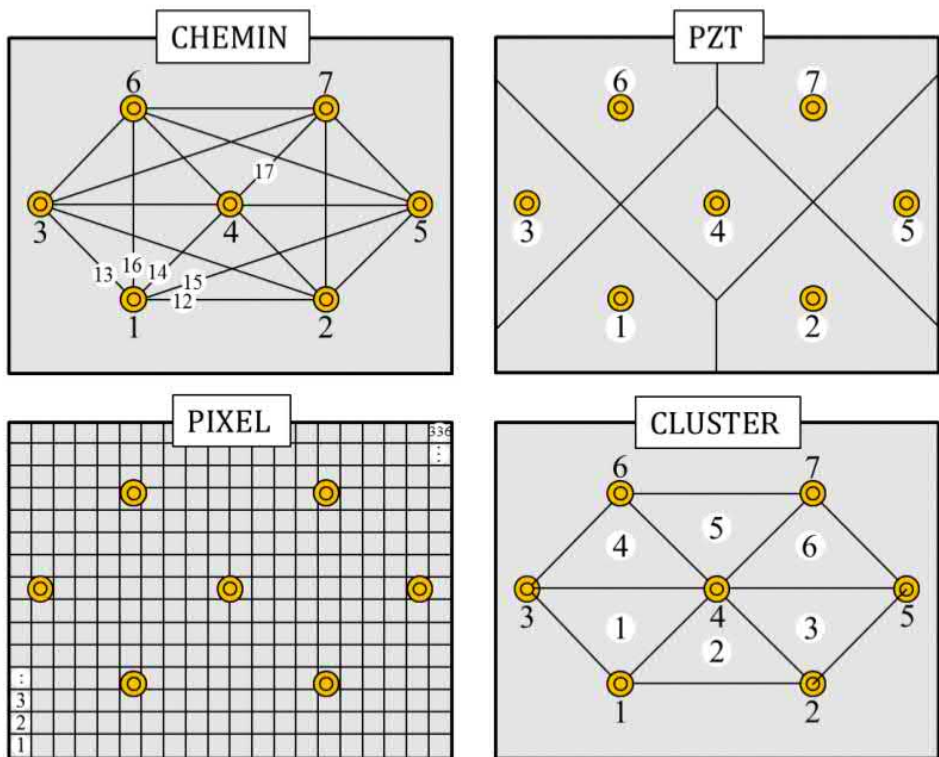


FIGURE IV.10 – Quatre approches adoptées pour la comparaison de DIs (d’après [E|Liz19]).

- Pour les différentes températures dans le cas du délaminage, les diagnostics corrects ne sont pas forcément obtenus pour les mêmes combinaisons mais les résultats restent globalement homogènes.
- Toutes méthodes confondues, les approches “cluster” et “PZT” sont moins efficaces que les approches “chemin” et “pixel”.

Bilan : En conclusion, cette étude permet de dire que des méthodes *sans référence* peuvent être implémentées avec succès pour permettre de se passer d’une base de données de référence tout en étant par la même occasion relativement robuste à la température. Les méthodes BI et AM, où les DIs sont intégrés spatialement par les approches par “chemin” ou par “pixels” semblent particulièrement prometteuses à cet égard. Ce bilan est à nuancer par les potentielles difficultés de mise en œuvre associées à ces méthodes : la méthode BI exige des chemins rigoureusement identiques tandis que la méthode AM impose l’utilisation de dual-PZT. Par ailleurs cette étude a permis de montrer que de nombreux paramètres entrent en ligne de compte dans la conception d’un algorithme de détection de dommages, comme la fréquence d’excitation ou les DIs utilisés, et que leur choix a priori n’est pas une tâche aisée.

IV.3 Localisation d’un dommage [A|Fen+16a; A|RM20]

Dans cette Section, le principe de base sous-jacent à la localisation des dommages dans des structures composites pour l’aéronautique via un réseau d’éléments piézo-électriques dispersé sera présenté en Section IV.3.1 avant de dresser un état de l’art mettant en lumière les ver-

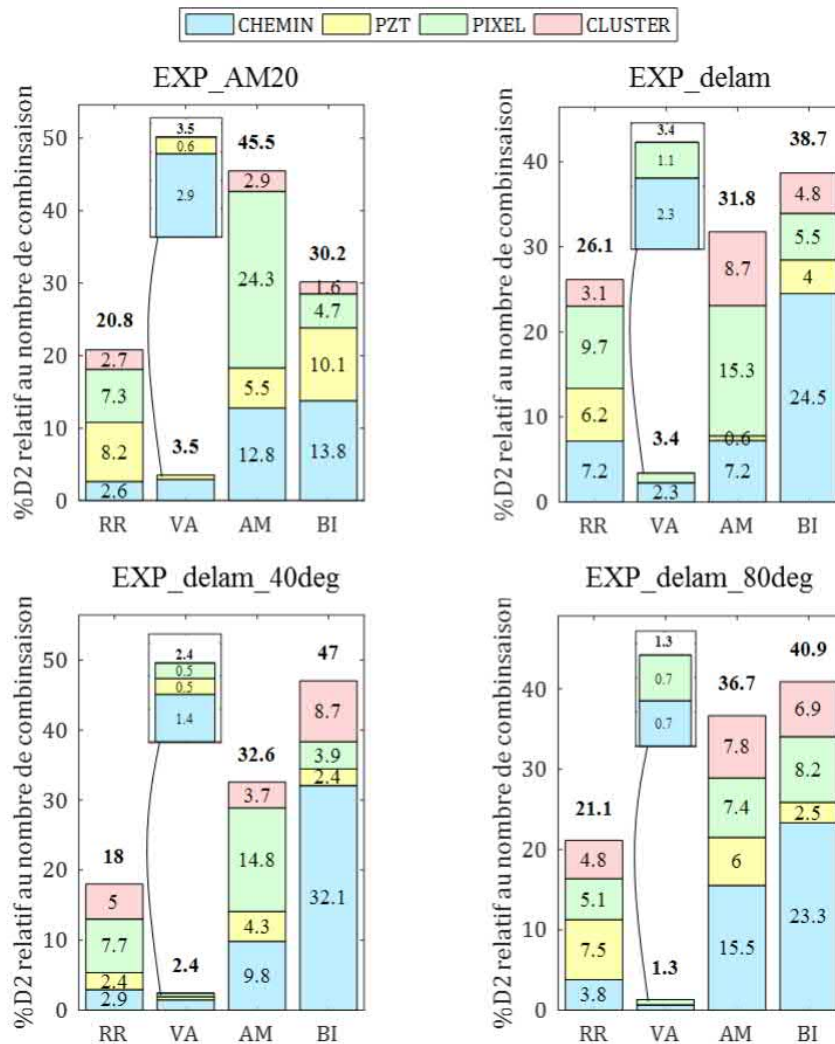


FIGURE IV.11 – Pourcentage de diagnostic correctement réalisé pour une combinaison d’approche et de méthode *sans référence* pour les différents jeux de paramètres (DIs et fréquence) testés. Le terme D_2 désigne les cas où ces combinaisons ont détecté un dommage sur une structure qui correspondait effectivement à un état endommagé. La figure en haut à gauche intitulée *EXP_AM20* correspond au cas d’endommagement par aimant. Les trois autres figures *EXP_delam*, *EXP_delam_40deg* et *EXP_delam_80deg* correspondent à l’endommagement par choc LASER à température ambiante, à 40°C et à 80°C. Les différentes couleurs correspondent aux différentes approches d’intégration spatiale testées (d’après [E|Liz19]).

rous actuels concernant ce sujet à la Section IV.3.2. Des travaux relatifs à la prise en compte du caractère probabiliste de la localisation dû aux approximations intrinsèques réalisées, à la variabilité des structures, et au caractère expérimental de l’approche (voir [A|Fen+16a]) seront ensuite présentés en Section IV.3.3. Enfin, une méthodologie plus amont visant à considérer mathématiquement intrinsèquement le réseau dispersé d’éléments PZT dans son ensemble plutôt que de le voir comme une agglomération arbitraire de chemins “actionneurs-capteurs” comme détaillée dans [A|RM20] sera présentée en Section IV.3.4.

IV.3.1 Principe de fonctionnement des algorithmes de localisation

IV.3.1.1 Démarche générale de localisation

L'idée des algorithmes de localisation de dommage est qu'un dommage présent dans une structure composite aéronautique va engendrer à l'état endommagé un écho supplémentaire dans les réponses mesurées. Les signaux utilisés pour localiser un dommage sont en général les mêmes que ceux utilisés pour réaliser leur détection (voir Section IV.2.1). L'objectif est alors de chercher à localiser la provenance de cet écho dans les signaux reçus en comparaison avec un état de référence supposé sain. Toutes les réflexions dues aux complexités géométriques de la structure à surveiller et au caractère multimodal de la propagation sont retirées du signal à l'état endommagé par soustraction et donc en théorie seul subsiste l'écho dû au dommage se propageant dans la structure. Les échos recherchés étant toujours d'amplitude relativement faible et les signaux mesurés étant possiblement bruités, ces mesures sont en général répétées N fois. La démarche suivie pour la localisation de dommages est ainsi la suivante :

1. **Acquisitions pour un état de référence, considéré comme sain.** Pour chaque élément piézo-électrique du réseau et pour N répétitions :
 - (a) Émission d'ondes de Lamb avec l'élément considéré.
 - (b) Réception des ondes de Lamb résultantes avec les autres éléments piézo-électriques.
 - (c) Estimation de la vitesse des ondes de Lamb sur les chemins considérés au départ de cet actionneur.
2. **Acquisitions pour un état endommagé.** Pour chaque élément piézo-électrique du réseau et pour N répétitions :
 - (a) Émission d'ondes de Lamb avec l'élément considéré.
 - (b) Réception des ondes de Lamb résultantes avec les autres éléments piézo-électriques.
3. **Comparaison entre l'état sain et l'état endommagé.**
 - (a) Pour chaque chemin "*actionneur-capteur*", isolation de l'écho d'intérêt en utilisant les signaux collectés à l'état *sain* et à l'état *inconnu*.
 - (b) Prise d'une décision relativement à la localisation d'un dommage suite à l'analyse de cet écho isolé.

Les difficultés de la localisation d'un dommage se situent donc dans l'étape consistant à isoler l'écho du dommage dans les signaux mesurés étant donné le caractère multimodal de la propagation des ondes de Lamb et dans l'étape consistant à inférer une position de dommage fiable sur la base de ces échos estimés.

IV.3.1.2 L'approche par *triangulation* dans un milieu infini, isotrope, et non-dispersif

Principe : L'approche dite par *triangulation* est la plus intuitive pour illustrer les difficultés inhérentes à la localisation d'un dommage dans des structures composites aéronautiques. Dans ce contexte, les hypothèses suivantes sont supposées :

1. Les éléments piézo-électriques émetteurs et récepteurs sont supposés ponctuels.
2. Le dommage est supposé ponctuel et parfaitement réfléchissant. C'est à dire qu'il génère un seul écho ayant la même forme temporelle que le signal de type "*burst*" originalement émis mais atténuée d'un coefficient de réflexion α .
3. Le milieu de propagation est supposé infini isotrope et non-dispersif et la vitesse de propagation v des ondes en son sein ainsi que son coefficient d'atténuation β sont connus.

Si un signal de type “burst” $s(t)$ est émis par un PZT_A, le signal reçu $s_S^S(t)$ par un PZT_S à l'état sain peut s'écrire :

$$s_S^S(t) = s \left[t - \frac{d_{AS}}{v} \right] e^{-\beta d_{AS}} \quad (\text{IV.7})$$

Il s'agit donc du signal émis par le PZT_A mais retardé d'un temps $\frac{d_{AS}}{v}$ et atténué d'un facteur $e^{-\beta d_{AS}}$ à cause de sa propagation dans le milieu hôte. La distance d_{AS} représente la distance entre les deux éléments piézo-électriques. En présence d'un dommage situé à la position D , le signal $s_S^D(t)$ reçu au niveau du PZT_S s'écrira alors :

$$s_S^D(t) = s \left[t - \frac{d_{AS}}{v} \right] e^{-\beta d_{AS}} + \alpha \times s \left[t - \frac{(d_{AD} + d_{DS})}{v} \right] e^{-\beta(d_{AD} + d_{DS})} \quad (\text{IV.8})$$

Le signal *direct* émis par le PZT_A est toujours présent, et à ce signal se superpose à présent le signal *écho* qui va servir de base au diagnostic du dommage. Ce signal écho correspond au signal émis par le PZT_A mais retardé d'un temps $\frac{(d_{AD} + d_{DS})}{v}$ et atténué d'un facteur $\alpha \times e^{-\beta(d_{AD} + d_{DS})}$ à cause de sa propagation dans le milieu hôte et de sa réflexion sur le dommage. Les distances d_{AD} et d_{DS} représentent les distances entre le PZT_A et le dommage, et entre le PZT_B et le dommage. En retranchant le signal à l'état *endommagé* au signal à l'état *sain*, la différence de signal $\Delta s(t)$ suivante et correspondant à l'écho généré par le dommage dans la structure hôte est obtenue :

$$\Delta s(t) = s_S^D(t) - s_S^S(t) = \alpha \times s \left[t - \frac{(d_{AD} + d_{DS})}{v} \right] e^{-\beta(d_{AD} + d_{DS})} \quad (\text{IV.9})$$

Le temps d'émission du signal $s(t)$ par le PZT_A étant connu, il est donc possible d'estimer le temps d'arrivée de l'écho, aussi appelé ToA pour “*Time of Arrival*”, qui est donné par :

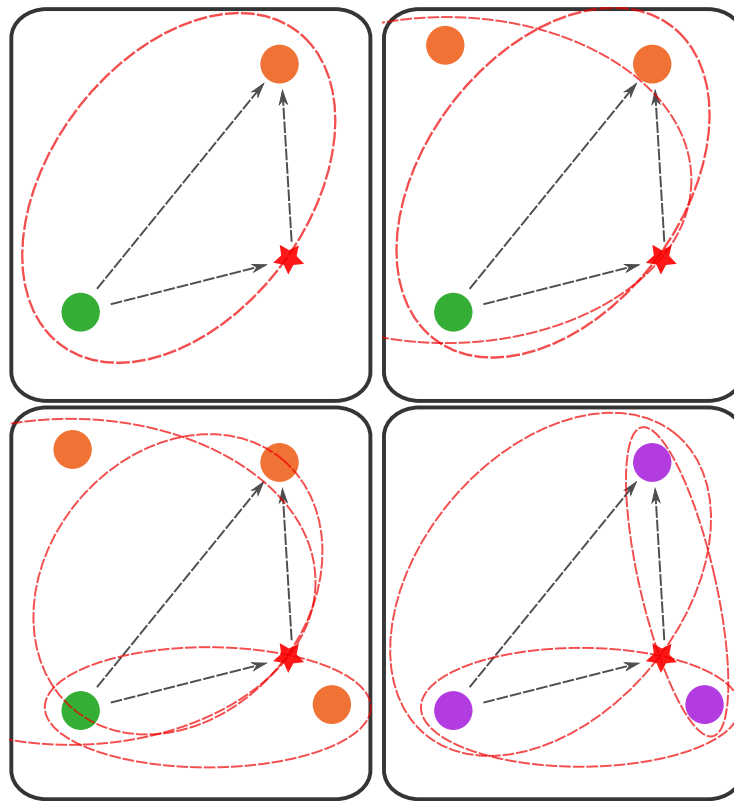
$$\text{ToA} = \frac{(d_{AD} + d_{DS})}{v} \quad (\text{IV.10})$$

En utilisant les coordonnées cartésiennes (x_A, y_A) , (x_S, y_S) et (x_D, y_D) de l'émetteur A , du récepteur S , et du dommage D , cette équation peut se réécrire de la façon suivante :

$$v \times \text{ToA} = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2} + \sqrt{(x_S - x_D)^2 + (y_S - y_D)^2} \quad (\text{IV.11})$$

Dans cette équation, les grandeurs $v \times \text{ToA}$, (x_A, y_A) et (x_S, y_S) sont connues. Les seules grandeurs inconnues sont (x_D, y_D) . L'Eq. (IV.11) définit donc le lieu des positions possibles des dommages, et ce lieu forme une ellipse dont les PZT_A et PZT_S sont les foyers (voir Figure IV.12).

Sur la Figure IV.12, il est possible de voir en haut à gauche, que les positions possibles du dommage forment une ellipse lorsqu'un seul ToA est connu ce qui n'est pas suffisant pour le localiser. En haut à droite, lorsque deux ToA sont connus grâce à l'utilisation de trois éléments piézo-électriques formant deux chemins, les deux ellipses se croisent en 4 points ou se trouve potentiellement le dommage. En bas à droite, si un quatrième élément piézoélectrique est ajouté, une troisième ellipse vient lever l'ambiguïté et ne laisser qu'une seule position de dommage possible. Enfin, les éléments piézo-électriques étant réversibles, il est en réalité possible de n'utiliser que 3 éléments piézo-électriques pour obtenir 3 ToAs et ainsi localiser un dommage à l'intersection de 3 ellipses.

FIGURE IV.12 – Illustration du principe de localisation par *triangulation*.

Limites : La méthode de localisation de dommages par *triangulation* est donc conceptuellement simple mais repose sur un certain nombre d'hypothèses plus ou moins valides en pratique :

1. **Les éléments piézo-électriques émetteurs et récepteurs sont supposés ponctuels.** Pour que cette hypothèse soit valide, il faut que la longueur d'onde des ondes émises ou reçues par ces éléments piézo-électriques soit très grande devant leurs dimensions. En pratique, les ondes émises et reçues ont des longueurs d'ondes de l'ordre de quelques centimètres, qui sont assez comparables aux dimensions des éléments piézo-électriques utilisés. Cette hypothèse n'est pas vérifiée et donc l'émission et la réception des ondes de Lamb dans la structure hôte ne se passeront pas exactement comme si les éléments piézo-électriques étaient ponctuels.
2. **Le dommage est ponctuel.** Encore une fois, c'est la longueur d'onde des ondes utilisées pour sonder la structure qui va permettre de juger de la pertinence pratique de cette hypothèse. Les ondes de Lamb utilisées étant plutôt de l'ordre du centimètre et les dommages à surveiller plutôt de l'ordre du millimètre, cette hypothèse est acceptable.
3. **Le milieu de propagation est infini, isotrope et non-dispersif.** Cette hypothèse n'est évidemment pas réaliste en pratique, mais si l'attention est portée sur le premier paquet d'onde et que celui-ci est suffisamment court, il est en pratique possible de l'isoler des réflexions et des autres modes et donc de considérer cette hypothèse comme valide. Le mode S_0 étant celui qui se propage généralement le plus vite dans les matériaux composites étudiés, il constituera le premier paquet. L'analyse des courbes de dispersion pour ce mode dans les gammes de fréquences utilisées en SHM révèle de plus qu'il est plutôt non-dispersif. Concernant le milieu de propagation, la vitesse de propagation v et l'atté-

uation des ondes de Lamb β sont également connues. Cela est possible grâce au modèle analytique présenté en Section II.1.3 si les propriétés matériau des différents plis sont connues ou bien en pratique en exploitant les mesures à l'état *sain* qui peuvent permettre d'estimer v à partir de la connaissance des positions géométriques des éléments piézo-électriques. Ceci est vrai pour le cas isotrope et constitue une approximation dans le cas anisotrope.

En conséquence, cette méthode de localisation conceptuellement simple est assez délicate à mettre en œuvre et peut s'avérer imprécise car elle repose sur un certain nombre d'hypothèses (certaines n'étant pas forcément valides *a priori*) et sur l'estimation d'un certain nombre de grandeurs (les ToAs et la vitesse v). Il est donc important de considérer avec précaution les résultats de localisation issus de cette approche.

IV.3.2 État de l'art relatif aux méthodes de localisation

Les méthodes de localisation de dommage dans les structures aéronautiques composites reposant sur les ondes de Lamb peuvent être divisées en plusieurs catégories. La première classe de méthodes de localisation, les méthodes dites "*temporelles*", utilise uniquement les informations temporelles liées au signal d'écho pour une position donnée du capteur et de l'actionneur afin de tracer des ellipses ou des hyperboles qui doivent se croiser à la position du dommage [R|LB01; R|TQW04; R|Mol+10; R|ZSC11; R|Li+13; R|Yan13]. La méthode par *triangulation* détaillée précédemment fait partie de cette famille. Certaines tentatives d'utilisation de l'amplitude des signaux d'écho issus des dommages ont également été rapportées dans la littérature [R|MM07a; R|WY07a], ce qui a donné naissance à la classe de méthodes nommée "*amplitude*". Une autre classe de méthodes, appelée "*retard et somme*" (en anglais "*delay and sum*", DAS), additionne sur tous les chemins possibles le signal d'écho retardé comme s'il provenait d'une position donnée afin de déduire la probabilité que le dommage soit présent à cette position [R|WRC04; R|MM07b; R|NV09; R|Hal+11; R|SA14; R|HT15]. En prolongeant cette idée, les méthodes dites de "*corrélation*" s'appuient sur des modèles physiques de propagation des ondes. À l'aide de ces modèles, les signaux d'écho sont calculés pour chaque trajet et pour différentes positions de dommages potentiels. La position à laquelle la corrélation entre le modèle et les signaux d'écho expérimentaux est maximale indique alors la position de dommage la plus probable [R|YG08; R|Qua+11a; R|QOM14; R|Ost+14; R|EDS16; R|OQM17]. Plus récemment, certaines méthodes dites "*parcimonieuses*" (en anglais "*sparse*") tentent de déduire d'un modèle physique la structure de la matrice de différence globale contenant tous les signaux d'écho et de résoudre un problème d'optimisation afin d'estimer la localisation des dommages à partir des signaux issus de tous les chemins à la fois [R|LM14; R|Gol+17].

Les méthodes classiques de localisation des dommages par ondes de Lamb dans les plaques composites (respectivement "*temporelle*", "*amplitude*", "*retard et somme*" et "*corrélation*") sont donc basées sur une analyse des données chemin par chemin et traitent chaque chemin indépendamment, puis intègrent empiriquement toutes les informations ensemble pour former une carte de localisation à partir de laquelle la localisation du dommage est inférée. De plus, parmi les méthodes citées précédemment, un certain nombre sont *déterministes* alors que d'autres sont dites *probabilistes*. La différence entre les deux types de méthodes réside dans le fait que les méthodes *probabilistes* vont prendre en compte intrinsèquement le fait qu'il existe du bruit expérimentalement, des erreurs de modélisation entre la réalité et les modèles utilisés, une certaine variabilité intrinsèque aux matériaux composites utilisés, et donc vont chercher la localisation la plus probable au sens d'un certain critère pour un modèle donné et un jeu de données expérimentales.

Les deux grands verrous concernant la localisation de dommage par ondes de Lamb dans les structures en matériaux composites sont donc d’être **capable d’intégrer tous les chemins** dans une approche commune tout en étant capable de **prendre en compte le caractère probabiliste** de la tâche de localisation étant donné le bruit expérimental, les erreurs de modélisation et d’estimation des divers paramètres, et la variabilité intrinsèque aux matériaux composites.

IV.3.3 Une approche Bayésienne de localisation en milieu anisotrope [A|Fen+16a]

L’objectif est ici de lever l’hypothèse d’isotropie du matériau énoncée précédemment et en se plaçant dans un contexte probabiliste prenant naturellement en compte les diverses incertitudes associées à cette tâche (bruit expérimentaux, erreurs de modélisations, variabilité présente dans les matériaux composites ...). La méthode de localisation utilisée ici est la méthode par *triangulation* (aussi appelée *ToA*, voir Section IV.3.1) qui consiste à tracer des ellipses associées à chaque chemin *actionneur*→*capteur*.

IV.3.3.1 Modèle paramétrique en ellipse du profil anisotrope de vitesse

La première difficulté à relever est liée au fait que dans l’Eq. (IV.11), le milieu est supposé isotrope et donc que la vitesse de propagation des ondes de Lamb étudiée ne varie pas avec leur angle de propagation, ce qui est le cas en pratique (voir Section II.1.2). Afin d’approcher le profil de vitesse de groupe mesuré expérimentalement ou prédit numériquement pour le mode S_0 sur les différents chemins disponibles, des ellipses paramétriques peuvent être ajustées en première approche en utilisant l’équation suivante :

$$V_g(\alpha) = \sqrt{[a \cos(\alpha)]^2 + [b \sin(\alpha)]^2} \quad (\text{IV.12})$$

où α varie de 0 à 360° et paramètre la direction de propagation de l’onde considérée. Dans l’expression ci-dessus, les deux paramètres a et b peuvent être estimés en utilisant les valeurs minimales et maximales des données expérimentales de vitesse de groupe. Il est aussi possible d’utiliser les outils numériques prédictifs présentés à la Section II.1.2 pour obtenir numériquement ces profils de vitesse si les propriétés matériau des différentes couches sont connues. L’avantage d’utiliser ce modèle est de réduire à deux seulement le nombre de paramètres intervenant dans le profil de vitesse de groupe, quel que soit le nombre de capteurs considérés. Les vitesses prédites par ce modèle peuvent ensuite être réinjectées dans l’Eq. (IV.11) de façon à tracer des ellipses prenant en compte le fait que la vitesse de propagation des ondes S_0 varie avec leur direction de propagation.

IV.3.3.2 Un cadre probabiliste pour la localisation des dommages

L’utilisation d’un cadre probabiliste pour la localisation des dommages est à présent considérée afin de prendre en compte à la fois les incertitudes de mesure, les erreurs de modélisation, et les variabilités du matériau qui ont été ignorées jusqu’à présent. Plutôt qu’une localisation unique des dommages, l’approche bayésienne fournira une densité de probabilités associée aux paramètres inconnus (qui incluent la localisation des dommages), avec une moyenne et un intervalle de confiance [R|YS12] correspondant à la qualité d’estimation de ces paramètres. Dans le problème de localisation des dommages actuellement considéré, le vecteur de paramètres à estimer est, compte tenu de la forme elliptique paramétrique du profil de vitesse de groupe, $\theta = [x_d, y_d, a, b]$.

Il est supposé que les incertitudes de mesure, de modèle, et de variabilité des matériaux soient décrites par ϵ , une unique variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle avec une variance de σ_ϵ^2 et venant perturber les ToA mesurés. La fonction de vraisemblance $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)$ est une probabilité relative à la distribution des ToAs mesurés $\mathbf{D} = [\text{ToA}_m^{i-1}, \dots, \text{ToA}_m^{i-N_p}]$, étant donné les valeurs prédites de ToA fournies par le vecteur de paramètres $\boldsymbol{\theta}$. N_p est le nombre total de chemins actionneur-capteur dans le réseau de transducteurs. En supposant l'indépendance conditionnelle des mesures de temps de vol pour chaque trajectoire d'actionneur-capteur, la fonction de vraisemblance totale peut être exprimée comme le produit des vraisemblances individuelles associées à chaque ToA.

L'analyse bayésienne s'appuie sur le théorème de Bayes, qui relie la fonction de densité de probabilité (PDF pour "Probability Density Function" en anglais) du paramètre antérieur conjoint $p_\pi(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)$ et la fonction de vraisemblance $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)$ à la distribution postérieure commune $p(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2|\mathbf{D})$ via :

$$p(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2|\mathbf{D}) = \frac{p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)p_\pi(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)}{p(\mathbf{D})} \quad (\text{IV.13})$$

La distribution postérieure conjointe des paramètres contient la distribution marginale souhaitée de chacun de paramètres d'intérêt. La distribution marginale d'un paramètre θ_k ($k = 1, 2, 3$ ou 4), faisant partie de $\boldsymbol{\theta}$, peut être calculée en effectuant une intégration de l'Eq. (IV.13) par rapport à la variance σ_ϵ^2 et par rapport à tous les autres paramètres autres que θ_k :

$$p(\theta_k|\mathbf{D}) \propto \int p(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2|\mathbf{D})p_\pi(\boldsymbol{\theta}, \sigma_\epsilon^2)d\boldsymbol{\theta}_{-k}d\sigma_\epsilon^2 \quad (\text{IV.14})$$

La notation $\int d\boldsymbol{\theta}_{-k}d\sigma_\epsilon^2$ désigne l'intégrale multidimensionnelle sur tous les paramètres autres que θ_k . La résolution de l'équation (IV.14) conduit ainsi à une estimation directe de la distribution postérieure de la position du dommage et de la vitesse de groupe dépendant de l'angle. Malheureusement, il est généralement difficile d'obtenir une solution analytique de l'équation (IV.14) en raison de l'expression très compliquée de la fonction de vraisemblance et de l'intégrale de grande dimension impliquée. Il existe cependant des approches numériques pratiques pour l'échantillonnage de telles distributions à partir des distributions des paramètres marginaux. Les méthodes de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) ont été utilisées ici pour estimer les distributions postérieures des paramètres d'intérêt.

IV.3.3.3 Application à la structure FC

Cet algorithme a été utilisé dans la thèse de C. Fendzi [E|Fen15] pour localiser un dommage artificiel sur la structure FC. Le dommage est ici constitué de deux aimants de 40 mm situés de part et d'autres du FC. La structure est toujours interrogée par des signaux de type "burst" émis à $f_0 = 200$ kHz comme précédemment. Les résultats de localisation obtenus via les versions déterministes et probabilistes de la méthode ToA sont illustrés sur la Figure IV.13. Sur cette figure, il est possible de constater que dans sa version déterministe, la méthode ToA donne une bonne indication de la zone dans laquelle se situe le dommage, mais que la localisation précise estimée est relativement éloignée de la localisation réelle du dommage. A l'inverse, la version probabiliste de la méthode ToA donne ici un résultat de localisation beaucoup plus précis et beaucoup plus centré sur la position réelle du dommage. En conclusion, la prise en compte des incertitudes de mesure, de modèle et dues à la variabilité intrinsèque des matériaux composite permet d'aboutir à des résultats de localisation de meilleure qualité, même sur des pièces industrielles réelles comme la structure FC ce qui confirme l'intérêt pour ce type d'approches.

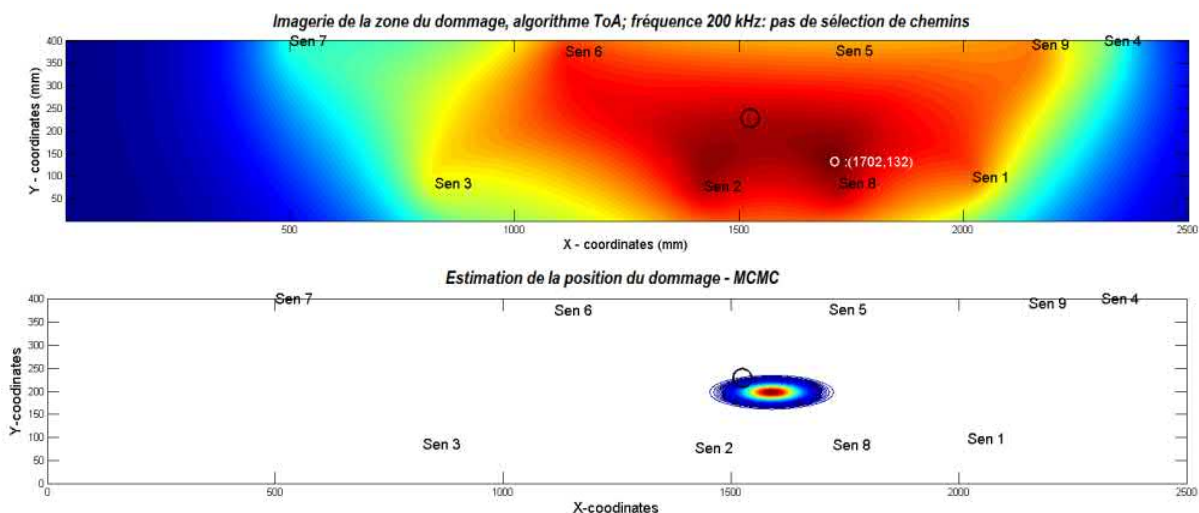


FIGURE IV.13 – Résultats de localisation du dommage sur la partie latérale supérieure du FC. En haut les résultats obtenus en appliquant la méthode ToA déterministe et en bas ceux obtenus en appliquant sa version probabiliste (d’après la thèse de C. Fendzi [E|Fen15]).

IV.3.4 Une approche tensorielle de la localisation [A|RM20]

Une seconde problématique liée à la localisation des dommages par ondes de Lamb est associée au fait que les algorithmes de localisation sont principalement basés sur une approche “*par chemin*” et que les informations de localisation apportées par chaque chemin sont agrégées *a posteriori* et de façon artificielle sans nécessairement tenir compte de leur qualité ni de leur intérêt dans le problème de localisation. Dans la lignée des approches dites “*parcimonieuses*” [R|LM14; R|Gol+17] (en anglais “*sparse*”) l’approche proposée ici et issue de [A|RM20] tente de déduire d’un modèle physique la structure de la matrice de différence globale contenant tous les signaux d’écho et de résoudre un problème d’optimisation afin d’estimer la localisation des dommages à partir des signaux issus de tous les chemins à la fois.

IV.3.4.1 Vision tensorielle du problème de SHM

En considérant une structure intelligente équipée de N éléments piézoélectriques et dont les acquisitions sont effectuées sur K échantillons, une matrice $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times N \times K}$ est naturellement obtenue à la fin d’un processus SHM. Pour surveiller l’apparition éventuelle de dommages, des mesures sont d’abord effectuées dans un état de référence afin d’obtenir une matrice de référence \mathbf{R} . Ensuite, au cours du cycle de vie de la structure, des mesures à des états inconnus sont effectuées et fournissent la matrice \mathbf{U} . La matrice δ qui correspond à la différence entre \mathbf{R} et \mathbf{U} est la base des étapes de détection, localisation, classification et quantification du SHM. Lors de l’interrogation d’une structure intelligente équipée d’un réseau piézoélectrique dispersé, la matrice de différence résultante $\delta \in \mathbb{R}^{N \times N \times K}$ s’étend ainsi sur trois dimensions (à savoir les dimensions de l’actionneur, du capteur et du temps) et peut donc être interprétée comme un tenseur à trois dimensions [R|KB09; R|Sid+17; R|FG16]. Même si, au cours de la dernière décennie, les tenseurs ont été largement appliqués à des fins de traitement du signal, ils ont trouvé relativement peu d’applications dans le domaine du contrôle de la santé des structures et les applications rapportées se sont principalement concentrées sur l’étape de détection. Par exemple : détection de dommages basée sur des tenseurs dans un contexte de génie civil [R|Che+16;

R|Pra+12], détection de dommages basée sur des tenseurs pour l'évaluation non destructive de structures composites utilisant des ultrasons [R|YYS17], ou application de tenseurs à des fins de débruitage dans des plaques composites contrôlées par des ondes ultrasonores [R|Zhe+15]. Ainsi le potentiel des tenseurs pour la localisation des dommages au moyen d'ondes de Lamb dans les plaques composites n'a jamais été étudié.

IV.3.4.2 Écriture tensorielle des signaux de différence dans le domaine fréquentiel

Le point de départ de l'approche proposée ici est l'Eq (IV.9) qui modélise le signal d'écho généré dans une plaque composite sous certaines hypothèses par un dommage D suite à l'émission d'un signal par l'actionneur n et sa réception par le capteur m . Il est ensuite possible de déterminer la transformée de Fourier discrète de l'Eq. (IV.9) et la fonction de transfert $H_{nm}(k)$ liant le signal "burst" émis $S(k)$ et l'écho $\Delta_{nm}(k)$ pour le chemin $n \rightarrow m$. Le $k^{\text{ième}}$ coefficient de la transformée de Fourier discrète de la fonction de transfert liant l'écho reçu sur le chemin $n \rightarrow m$ avec le signal d'excitation est noté H_{nmk} . Ce coefficient étant un nombre complexe, il est possible de calculer sa phase Φ_{nmk} et son module logarithmique A_{nmk} :

$$\Phi_{nmk} = \phi [H_{nmk}] = -i2\pi f_s k \frac{(d_{nD} + d_{Dm})}{Kv} \quad (\text{IV.15})$$

$$A_{nmk} = \log [|H_{nmk}|] = \log(\alpha) - \kappa(d_{nD} + d_{Dm}) \quad (\text{IV.16})$$

Les matrices $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times N \times K}$ contenant les coefficients Φ_{nmk} , et $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times N \times K}$ contenant les coefficients A_{nmk} peuvent ainsi être naturellement interprétées comme des tenseurs de dimension 3 [R|KB09 ; R|Sid+17 ; R|FG16].

IV.3.4.3 Décompositions polyadiques canoniques des tenseurs de phase et d'amplitude

L'idée est à présent de réussir à faire ressortir la structure physique sous-jacente des tenseurs Φ et \mathbf{A} définis par les Eq. (IV.15) et (IV.16). D'après la littérature sur les tenseurs, il est connu qu'ils peuvent être décomposés sous la forme d'une décomposition polyadique canonique (CPD pour "Canonical Polyadic Decomposition" en anglais) jusqu'au rang R [R|KB09 ; R|Sid+17 ; R|FG16]. Une telle décomposition consiste à trouver le triplet $(\mathbf{a} \in \mathbb{R}^{N \times R}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^{M \times R}, \mathbf{c} \in \mathbb{R}^{K \times R})$ qui permet une représentation compacte du tenseur considéré comme illustré sur la Figure IV.14.

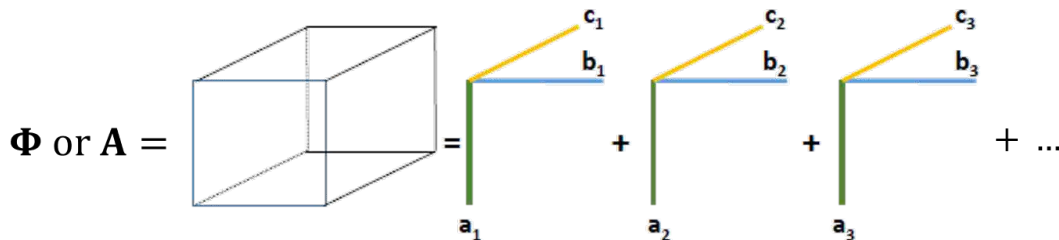


FIGURE IV.14 – Illustration schématique du principe de la CPD d'un tenseur (d'après [A|RM20]).

Ce qui est particulièrement intéressant est qu'en analysant l'Eq (IV.15), le tenseur Φ peut

être exactement représenté par une CPD de rang 2 en choisissant :

$$\mathbf{a}^\Phi = \begin{bmatrix} d_{1D} & 1 \\ \dots & \dots \\ d_{ND} & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}^\Phi = \begin{bmatrix} 1 & d_{1D} \\ \dots & \dots \\ 1 & d_{ND} \end{bmatrix} \quad \mathbf{c}^\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ (k_M - k_0) & (k_M - k_0) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.17})$$

Après retranchement d'une constante, le tenseur $\tilde{\mathbf{A}}$ peut également s'écrire exactement par une CPD de rang 2 en choisissant :

$$\mathbf{a}^A = \begin{bmatrix} d_{1D} & 1 \\ \dots & \dots \\ d_{ND} & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}^A = \begin{bmatrix} 1 & d_{1D} \\ \dots & \dots \\ 1 & d_{ND} \end{bmatrix} \quad \mathbf{c}^A = -\kappa \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \dots & \dots \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.18})$$

En regardant plus en détail ces décompositions tensorielles, il est particulièrement frappant de constater que \mathbf{a}^Φ , \mathbf{a}^A , \mathbf{b}^Φ et \mathbf{b}^A donnent tous un accès direct à $d_{iD}i \in [1, N]$ qui sont les distances entre chaque élément piézoélectrique du réseau dispersé et la position du dommage. Via la connaissance de ces distances, la localisation des dommages est donc théoriquement possible. Par ailleurs, \mathbf{c}^Φ est paramétré par v la vitesse de l'onde dans le matériau et par les paramètres de traitement du signal f_s et K , et \mathbf{c}^A est paramétré uniquement par κ le coefficient d'atténuation, tous ces paramètres étant disponibles ou relativement faciles à estimer en pratique¹⁵. En résumé, il est démontré ici que les CPDs de rang $R = 2$ de la phase et des amplitudes des signaux de différence entre un état sain et un état endommagé fournissent potentiellement un accès direct à toutes les distances entre les éléments piézoélectriques et le dommage, ce qui pourrait permettre la localisation des dommages.

IV.3.4.4 Algorithme de localisation de dommages

La dernière étape de l'algorithme de localisation des dommages consiste à dessiner une carte capable de mettre en évidence la localisation la plus probable des dommages à partir de tout ou partie des quatre ensembles de distances $\{d_{iD}^{\Phi_a}\}_{i \in [1, N]}$, $\{d_{iD}^{\Phi_b}\}_{i \in [1, N]}$, $\{d_{iD}^{A_a}\}_{i \in [1, N]}$ et $\{d_{iD}^{A_b}\}_{i \in [1, N]}$ estimés précédemment à partir des vecteurs \mathbf{a}^Φ , \mathbf{b}^Φ , \mathbf{a}^A ou \mathbf{b}^A . Par conséquent, cela conduit à la définition de trois cartes intuitives de localisation des dommages reposant sur les distances estimées à partir du tenseur de phase $P(M)$, du tenseur d'amplitude $A(M)$, ou des deux tenseurs $PA(M)$.

Il est primordial de noter ici qu'aucun paramètre de réglage ni aucune étape de prétraitement spécifique n'est nécessaire pour que cet algorithme fonctionne. Les données d'entrée sont directement transmises à l'algorithme qui les traite sans qu'aucun paramètre externe ou algorithme de sélection de chemin ne soit nécessaire. En outre, le coefficient d'atténuation κ et la vitesse de l'onde v peuvent être estimés en pratique à l'aide des données de l'état sain. Pour une trajectoire donnée à l'état sain, le temps d'arrivée du premier paquet d'ondes et la connaissance de la distance entre l'actionneur et le capteur peuvent fournir une estimation de la vitesse de l'onde v . Pour deux trajets donnés avec le même actionneur à l'état sain, les amplitudes maximales des deux paquets d'ondes ainsi que les distances entre l'actionneur et les capteurs, sous

¹⁵. Malheureusement, même si des outils numériques très efficaces sont disponibles pour calculer une CPD pour un tenseur donné [R|Ver+16], une telle décomposition n'est pas unique. Le problème est qu'ici on ne cherche pas seulement à obtenir une décomposition, mais une décomposition qui peut être interprétée physiquement selon les Eq. (IV.17) et (IV.18). Par conséquent, il faut trouver en pratique un moyen de décomposer les CPD obtenues numériquement ou d'en obtenir une unique qui ait un sens physique. Cela est heureusement possible grâce à l'estimation de la vitesse des ondes de Lamb v et de leur coefficient d'atténuation κ . Ce point est discuté en détail dans [A|RM20].

l'hypothèse d'une décroissance spatiale exponentielle et d'une isotropie du matériau, peuvent permettre d'estimer le coefficient d'atténuation κ .

IV.3.4.5 Validation expérimentale de l'algorithme proposé

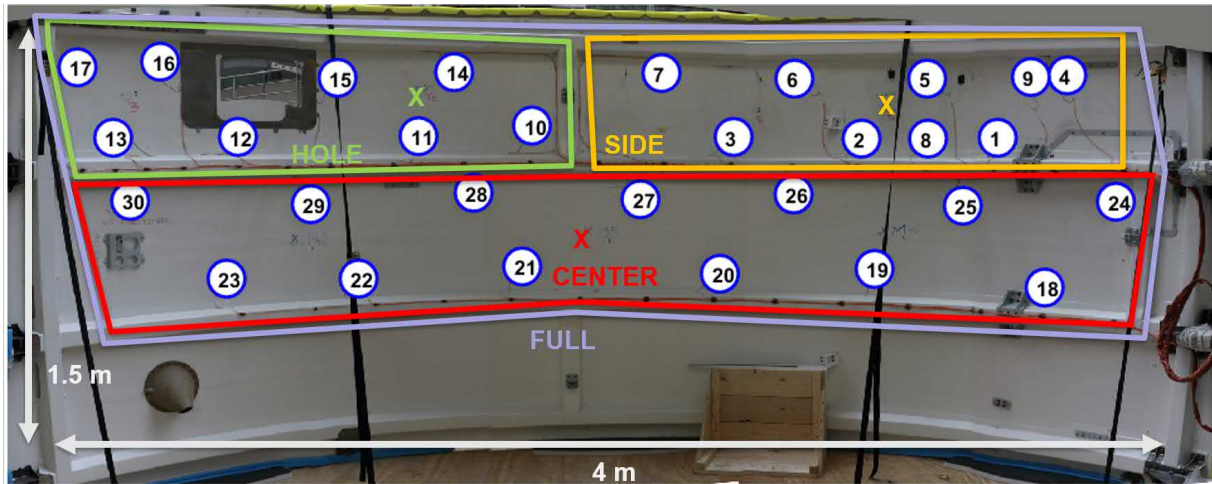


FIGURE IV.15 – Structure FC utilisée pour valider l'algorithme de localisation de dommage basé sur la CPD (d'après [A|RM20]).

Pour illustrer l'algorithme de localisation basé sur le tenseur, le FC a été divisé en quatre sous-parties délimitées par les raidisseurs sur lesquelles les performances de l'algorithme de localisation seront évaluées :

- **HOLE** : cette sous-partie est représentée en vert sur la Figure IV.15 et a été sélectionnée car il y a un trou entre les éléments piézoélectriques 12, 15 et 16. Cette configuration géométrique complexe est un défi pour tout algorithme de localisation des dommages. Sur cette structure, l'endommagement a été simulé à l'aide de deux aimants en néodyme de 35 mm placés sur les deux faces de la structure à la position indiquée par le "x" vert. Une fréquence d'excitation de $f_0 = 200$ kHz a été utilisée pour cette sous-partie.
- **SIDE** : cette sous-partie est représentée en jaune sur la Figure IV.15 et a été sélectionnée car elle est proche d'un cas académique sans spécificité réelle. L'influence de la fréquence d'excitation sera étudiée dans cette zone d'excitation avec des fréquences de $f_0 = 150$ kHz et $f_0 = 200$ kHz. L'endommagement est à nouveau simulé à l'aide de deux aimants en néodyme de 35 mm placés sur les deux faces de la structure à la position indiquée par le "x" jaune.
- **CENTER** : cette sous-partie est représentée en rouge sur la Figure IV.15. Cette sous-partie est plus grande que les autres (4 m de long) et présente un rapport d'aspect très important. Elle constitue aussi un cas difficile pour l'algorithme de localisation. L'endommagement est simulé à l'aide de deux aimants en néodyme de 35 mm placés sur les deux faces de la structure à la position indiquée par le "x" rouge. Une fréquence d'excitation de $f_0 = 200$ kHz a été utilisée dans cette sous-partie.
- **FULL** : cette appellation regroupe l'ensemble des sous-parties définies précédemment. Cette partie contient les 30 éléments piézoélectriques et est particulièrement difficile car elle contient plusieurs raidisseurs. L'endommagement est simulé à l'aide de deux aimants au néodyme de 35 mm placés sur les deux faces de la structure à la position indiquée par

le “×” jaune, comme dans le cas “**SIDE**”. Une fréquence d’excitation de $f_0 = 200$ kHz a été utilisée dans cette sous-partie.

Afin de souligner l’originalité de l’approche proposée, nous la comparons ici à d’autres approches classiques de la littérature. Afin de comparer uniquement les méthodes aveugles (c’est-à-dire les méthodes qui ne nécessitent pas d’information préalable sur les propriétés mécaniques des structures étudiées) les approches retenues pour la comparaison des performances sont l’algorithme de reconstruction pour l’inspection probabiliste des défauts (RAPID, voir [R|Zha+07] pour les détails de mise en œuvre), la méthode standard de retard et somme (DAS, voir [R|OQM17] pour les détails de mise en œuvre), la méthode du temps d’arrivée ou de l’ellipse (TOA, voir [A|Fen+16a] pour les détails de mise en œuvre) et la méthode de la différence du temps d’arrivée ou de l’hyperbole (DTOA, voir [A|Fen+16a] pour les détails de mise en œuvre). Un résumé des résultats de la localisation pour chaque cas étudié et pour chaque méthode de localisation des dommages mentionnée ci-dessus est fourni dans la Figure IV.16. Dans cette figure, chaque sous-figure correspond à un cas donné, comme décrit dans la Figure IV.15, et la dernière sous-figure regroupe les erreurs de localisation regroupées pour tous les cas étudiés. Pour chaque cas, un résumé statistique des 100 répétitions de localisation obtenu grâce à 10 mesures réalisées à l’état *sain* et 10 mesures réalisées à l’état *endommagé* est présenté en termes d’erreur de localisation, c’est-à-dire en termes de distance entre le maximum de l’indice de localisation des dommages estimés et la position réelle des dommages.

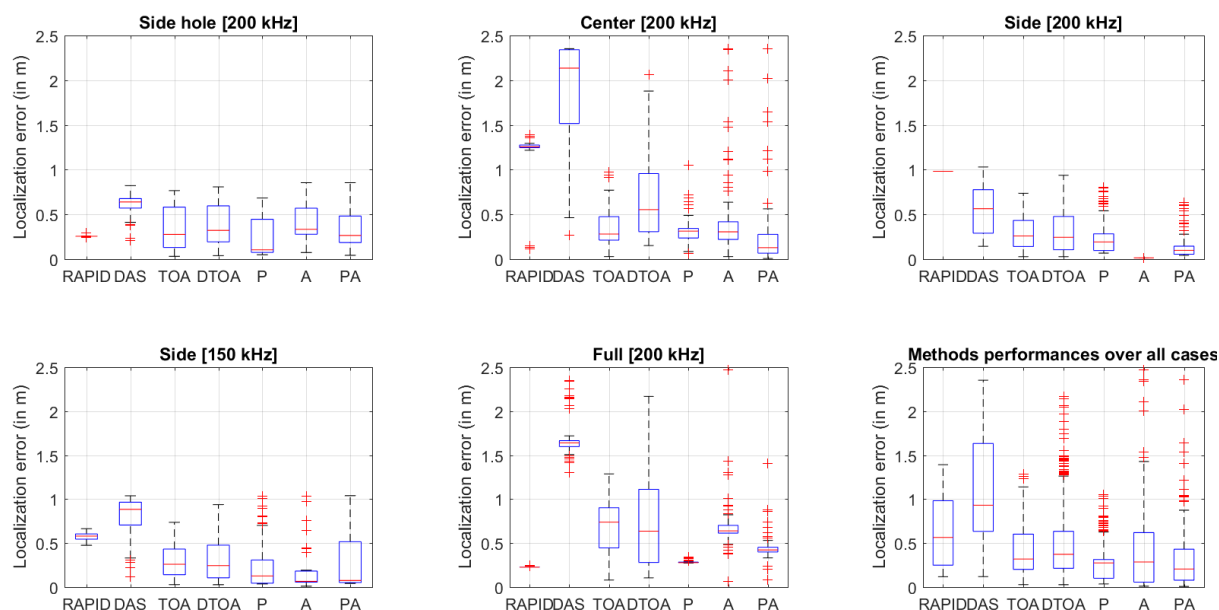


FIGURE IV.16 – Comparaison des performances de l’algorithme de localisation basé sur la CPD avec les méthodes de localisation de la littérature sur 100 essais de localisation et pour les différents cas étudiés. RAPID : Algorithme de reconstruction pour l’inspection probabiliste des défauts [R|Zha+07]. DAS : Méthode du retard et de la somme [R|OQM17]. ToA : Temps d’arrivée ou méthode de l’ellipse [A|Fen+16a]. DTOA : Différence de temps d’arrivée ou méthode de l’hyperbole [A|Fen+16a]. Les lignes rouges indiquent les valeurs médianes, les cases bleues les intervalles interquartiles supérieurs et inférieurs (d’après [A|RM20]). Les intitulés P, A, et PA correspondent aux différentes variantes de l’algorithme basé sur la CPD et utilisant les informations de phase (P), d’amplitude (A), ou bien les deux (PA).

Cette figure montre tout d’abord que la méthode du retard et somme fournit des erreurs de localisation qui sont significativement plus grandes que les erreurs rapportées pour les autres méthodes. Ainsi, même si elle fournit des résultats précis pour les cas académiques, cette méthode ne semble pas être robuste face à une structure géométriquement complexe, du moins dans son implémentation la plus simple. En examinant les performances des méthodes de l’ellipse et de l’hyperbole, quel que soit le cas d’utilisation considéré, leur erreur médiane reste acceptable. Cependant, en regardant la dispersion autour de cette erreur médiane, les résultats de localisation sont étendus sur une large gamme de valeurs ce qui limite l’utilisation de ces méthodes pour ces structures complexes même si là encore ces méthodes fournissent des résultats satisfaisants dans les cas académiques. Enfin, l’analyse des résultats fournis par l’algorithme RAPID montre une très faible dispersion des résultats mais avec parfois une erreur de localisation médiane qui peut atteindre des niveaux assez élevés. En conclusion, en comparaison avec les méthodes de localisation sélectionnées, l’algorithme de localisation basé sur la CPD (P, A, et PA) fournit des résultats qui sont à la fois plus précis (l’erreur médiane est la plus basse) et moins variables (l’écart interquartile est le plus petit) de toutes les méthodes testées, au moins pour les cas étudiés ici. Ces résultats peuvent sans doute être encore améliorés en enrichissant le modèle sur lequel repose l’approche proposée ici ou en considérant l’aspect probabiliste du problème de localisation comme cela a pu être évoqué précédemment.

IV.4 Classification de dommages [A|Rah+21]

Les étapes de détection et de localisation ont fait l’objet de nombreuses études et des méthodes variées sont disponibles pour permettre leur implémentation même si la question de leur robustesse reste encore ouverte. La tâche de *classification* des dommages, qui consiste à déterminer quel est le type de dommage présent dans la structure une fois qu’il est détecté et localisé, reste encore assez exploratoire. Cela est principalement dû au fait qu’il n’existe pas, ou très peu, de bases de données expérimentales proposant différents types de dommages (voir Section IV.1). Compte-tenu de ces difficultés, il est choisi ici d’aborder le problème de classification sous l’angle de l’apprentissage automatique non-supervisé, c’est à dire en considérant que seules des données à l’état *sain* sont disponibles, ce qui est vrai dans la majorité des cas rencontrés en pratique.

IV.4.1 SHM, apprentissage automatique, et réduction de dimension

Le SHM des structures composites aéronautiques a déjà été abordé dans la littérature par le biais d’approches d’apprentissage automatique basées sur les données. Les étapes de localisation et de quantification des dommages ont par exemple été réalisées en décomposant les signaux d’ondes de Lamb à l’aide d’un algorithme de PGD (pour “*Proper Generalized Decomposition*” en anglais) qui est ensuite utilisé pour entraîner des réseaux neuronaux [R|BWW20]. Les données d’ondes de Lamb ont également été traitées à l’aide d’ondelettes et il a été démontré que les caractéristiques extraites peuvent être extrêmement pertinentes à des fins de SHM [R|MH14; R|HM20]. Des techniques de post-traitement des signaux axées sur l’application d’algorithmes non supervisés de réduction de dimension (PCA pour “*Principal components Analysis*”, NLPCA pour “*Non Linear PCA*”, ICA pour “*Independent Component analysis*”, ...) et sur leur corrélation ultérieure avec l’état des dommages sont également rapportées [R|PTD10; R|PWS16; R|Poz+16; R|Tib+13; R|TT15; R|Tor+14].

Lorsque l’on aborde le SHM comme un problème d’apprentissage automatique, les techniques de réduction de la dimension (DR pour “*Dimension Reduction*”) en plus des méthodes d’extraction de DIs apparaissent donc comme très intéressantes car elles permettent de réduire

drastiquement le temps d'exécution et les besoins en ressources. Les données provenant des DI's extraits pour un état de santé structurel donné peuvent être projetées vers un espace de dimension inférieure (contenant idéalement deux ou trois dimensions à des fins évidentes de visualisation) où la surveillance peut être effectuée [R|GMR15 ; R|Tor52 ; R|HR03]. Ces dernières années, divers algorithmes de DR de ce type ont été proposés, tels que UMAP (pour “*Uniform Manifold Approximation and Projection*”) [R|MHM18] ou t-SNE (pour “*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*”) [R|MH08] et ses dérivés [R|Van14 ; R|Pez+16]. Contrairement aux algorithmes de DR plus standards précédemment utilisés dans la littérature SHM, ces algorithmes reposent sur une définition probabiliste de la distance entre les échantillons et tentent de préserver autant que possible les distances à courte échelle plutôt que celles à longue échelle dans l'espace de haute et de basse dimension. Cependant, ces techniques présentent des inconvénients, notamment un temps d'exécution lent sur de grands ensembles de données, des hyper-paramètres difficiles à régler et l'incapacité de cartographier toute nouvelle donnée entrante. Pour remédier à ce dernier problème, il est possible d'ajouter des capacités inductives à ces méthodes en associant leurs bases de projection à des réseaux neuronaux profonds (DNN pour “*Deep Neural Network*”). Les DNNs résultants sont alors capables de catégoriser toute nouvelle donnée inconnue entrante [R|RM19b ; R|EHT19].

IV.4.2 Classification non-supervisée via t-SNE et UMAP

Les motivations sont ici d'évaluer les performances des algorithmes t-SNE et UMAP à des fins de SHM et de quantifier l'intérêt du calcul des DI's compte tenu des outils d'apprentissage automatiques devenus de plus en plus performants. Plus précisément, les objectifs sont les suivants :

1. *Évaluation comparative d'algorithmes de DR sur des données SHM* : de nombreuses techniques de DR applicables au SHM, de la PCA aux algorithmes de pointe (t-SNE, UMAP), sont comparées sur une tâche de classification non supervisée des dommages dans des structures composites aéronautiques complexes surveillées par ondes de Lamb.
2. *Évaluation de l'utilité des DI's* : Les techniques de DR sont testées de deux manières différentes afin d'évaluer si le calcul des DI's est utile ou non à des fins de classification compte tenu des outils modernes d'apprentissage automatique.
 - *Approche I* : une technique de DR non supervisée est utilisée afin de projeter les données de l'espace des DI's conçus empiriquement vers des cartes \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 .
 - *Approche II* : une technique de DR non supervisée est utilisée à la fois comme extracteur de DI's et comme outil de réduction de dimension alimenté directement par les signaux bruts d'ondes de Lamb et projette les données vers une carte \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 .

IV.4.2.1 Méthodologie

Algorithmes de DR utilisés pour l'évaluation comparative :

- *Analyse en Composantes Principales (PCA)* [R|Pea01] : l'une des techniques les plus courantes et en particulier en SHM [R|TMR13 ; R|MWA03].
- *t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE)* [R|MH08] et *Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP)* [R|MHM18] : les méthodes de DR les plus récentes.
- *L'analyse discriminante linéaire (LDA)* [R|Tha+17] : cette technique supervisée de DR servira de référence en termes de performances.

Bases de données utilisées : Les bases de données utilisées pour cette étude consistent en une base de données simulée avec différents niveaux de bruit (SNR0, SNR10 et SNR20, avec SNR pour “Signal to Noise Ratio”) et deux bases de données expérimentales issues de l’IFS et du FC. La base de données simulée est considérée comme un jeu de données académique sur lequel les algorithmes de réduction de dimension peuvent être évalués en ce qui concerne le niveau de bruit. Les ensembles de données expérimentales correspondent au FC et à l’IFS qui sont considérés comme des contextes difficiles pour le SHM. Pour chacune des bases de données des mesures à l’état sain ainsi qu’à différents états endommagés sont disponibles. L’objectif est ici de voir comment les algorithmes proposés sont capables de classifier de façon non-supervisée ces différents états de la structure.

IV.4.2.2 Approche I : Projection des DI vers une carte 2D ou 3D

Les techniques de réduction de dimension sont ici appliquées aux bases de données simulées et expérimentales X_{DI} selon l’approche I où les techniques de réduction de dimension non supervisées sont utilisées pour projeter les données de l’espace des indices d’endommagement empiriques vers des cartes \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 .

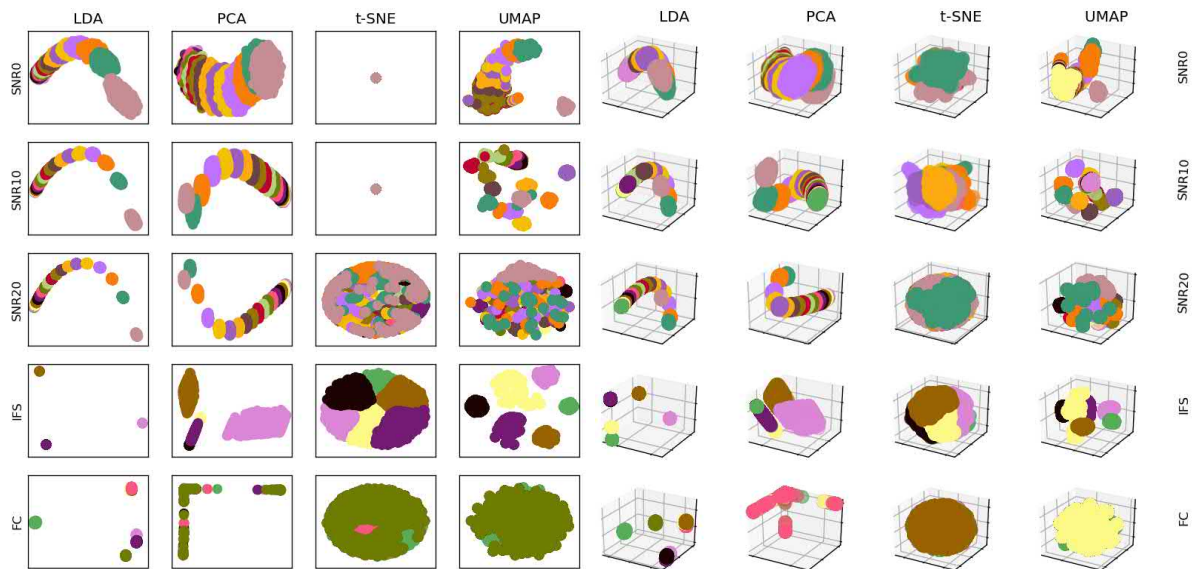


FIGURE IV.17 – Résultat de l’approche I où les techniques non supervisées de DR sont utilisées pour projeter les données de l’espace des DI X_{DI} vers des cartes \mathbb{R}^2 [Gauche] ou \mathbb{R}^3 [Droite] pour tous les ensembles de données considérés (d’après [A|Rah+21]). Chaque couleur représente un état de santé différent.

La Fig. IV.17 montre que, comme prévu en tant qu’algorithme supervisé de référence, la LDA fournit des résultats de classification adéquats, avec des classes denses et bien séparées. On peut noter que les résultats fournis par la LDA ne sont pas encore parfaits. Pour le cas SNR0, la LDA est capable d’apprendre une sorte de relation pour séparer les données mais il y a toujours un grand chevauchement entre les classes. Pour le cas FC, plusieurs classes sont bien distinctes alors que d’autres restent totalement mélangées. Étant donné les échecs partiels d’un algorithme supervisé dans ces cas, on peut difficilement s’attendre à ce que les algorithmes non supervisés soient performants sur ces exemples. La PCA fournit des résultats acceptables en comparaison avec la LDA pour SNR0, SNR10 et SNR20. Cependant, pour les cas expérimentaux, les résultats

fournis par la PCA ne sont pas vraiment exploitables car aucune structure claire ne ressort de l'espace de faible dimension résultant. t-SNE montre un comportement instable pour SNR0 et SNR10 fournissant des classes mixtes et centrées autour de l'origine. En ce qui concerne les cas SNR20 et IFS, des résultats acceptables sont fournis par t-SNE. UMAP montre toujours des résultats très appropriés et sépare bien les classes, même pour SNR0 et SNR10. Pour les jeux de données IFS, il est intéressant de noter que la PCA et même la LDA échouent, mais que t-SNE et UMAP fonctionnent bien et détectent adéquatement les classes. Enfin, pour le cas FC, tous les algorithmes ont échoué, y compris LDA. Cela pourrait être dû à des DIIs mal choisis qui éliminent trop d'informations pertinentes des signaux mesurés.

IV.4.2.3 Approche II : Projection des signaux bruts vers une carte 2D ou 3D

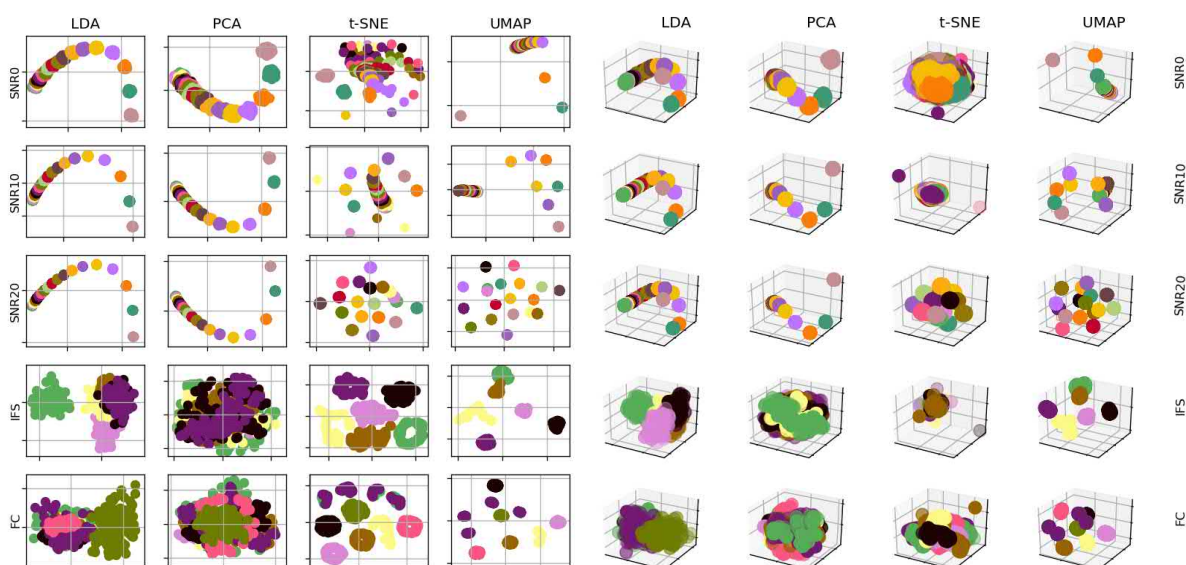


FIGURE IV.18 – Résultats de l'approche II où les techniques de DR non supervisées sont utilisées à la fois comme extracteur de DIIs et comme outil de réduction de la dimension alimenté directement par les signaux bruts X_{RAW} et projettent finalement les données vers des cartes \mathbb{R}^2 [Gauche] ou \mathbb{R}^3 [Droite] pour tous les ensembles de données considérés (d'après [A|Rah+21]). Chaque couleur représente un état de santé différent.

Pour cette partie, les techniques de DR sont appliquées aux bases de données simulées et expérimentales X_{RAW} selon l'approche II où les techniques de DR non supervisées sont utilisées à la fois comme extracteur de DIIs et comme outil de réduction de dimension alimenté directement par les signaux bruts et projettent finalement les données vers une carte \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 . Il faut également mentionner que l'approche II ignore le calcul des DIIs et économise ainsi beaucoup de temps de calcul et de ressources par rapport à l'approche I.

La Fig. IV.18 montre que, encore une fois et comme prévu, la LDA fournit des résultats de classification plutôt adéquats, avec des classes denses et bien séparés. On peut noter que les résultats fournis par la LDA ne sont pas encore parfaits. Pour le cas SNR0, la LDA est maintenant capable d'apprendre mieux qu'en se basant sur les DIIs. De plus, les performances de la LDA pour les cas expérimentaux IFS et FC se dégradent sévèrement. Les classes ne sont pas bien séparées et sont parfois mélangées. Étant donné ces échecs partiels d'un algorithme supervisé dans ces cas, on peut à nouveau difficilement s'attendre à ce que les algorithmes non supervisés

soient performants sur ces exemples. L'ACP fournit des résultats comparables à la LDA pour SNR0, SNR10 et SNR20. Cependant, pour les cas expérimentaux, les résultats fournis par l'ACP ne sont pas exploitables car aucune structure claire ne ressort de l'espace de faible dimension qui en résulte. t-SNE montre de bien meilleurs résultats que précédemment pour SNR0 et SNR10 en fournissant des clusters similaires à la LDA et à l'ACP. En ce qui concerne les cas SNR20, IFS et FC, des résultats extrêmement encourageants sont fournis par t-SNE. UMAP montre toujours des résultats très appropriés et sépare bien les classes quel que soit le cas considéré. Pour les jeux de données IFS et FC, il est intéressant de noter que la PCA et même la LDA échouent, mais que t-SNE et UMAP fonctionnent bien et détectent adéquatement les différentes classes. Enfin, pour le cas FC, t-SNE et UMAP, qui échouaient auparavant, sont maintenant capables de regrouper correctement les données et dépassent même la LDA en termes de performances. Cela pourrait être dû à l'incapacité de LDA à gérer un trop grand nombre de caractéristiques et à la capacité intrinsèque de t-SNE et UMAP à détecter les dimensions pertinentes cachées dans les ensembles de données.

IV.4.2.4 Comparaison quantitative entre l'approche I et l'approche II

Des critères quantitatifs sont par ailleurs nécessaires pour évaluer les performances de classification des différents algorithmes afin d'effectuer une comparaison juste entre les approches proposées. Le score de Calinski-Harabasz [R|CH74], le scores de silhouette [R|Rou87] et le temps de calcul sont ici retenus comme indices de performance.

Le score de Calinski-Harabasz (CH) est un critère de rapport de variance défini comme *“le rapport entre la dispersion inter-classes et la dispersion intra-classe”*. Il est calculé selon l'équation (IV.19) où B se réfère à la matrice de variance inter-classes, W se réfère à la matrice de variance intra-classes, N est le nombre total d'échantillons et K le nombre de classes. Une valeur élevée du score CH illustre des classes denses et bien ségréguées.

$$CH = \frac{tr(B)}{tr(W)} \times \frac{N - K}{K - 1} \quad (IV.19)$$

Le score de silhouette (S) est la moyenne de tous les coefficients de silhouette associés à chaque point i . Il correspond à la différence entre la distance moyenne avec les points appartenant à la même classe ($a(i)$, cohésion) et la distance moyenne avec les points des classes voisines ($b(i)$, séparation). Un score négatif indique que le point est en moyenne plus proche d'une classe voisine que de sa propre classe. Un score positif indique que le point est en moyenne plus proche de sa propre classe que de tout autre classe voisine. Sa valeur est normalisée entre -1 et 1 . Ce score est mathématiquement calculé selon l'Eq. (IV.20).

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{b(i) - a(i)}{\max\{b(i), a(i)\}} \quad (IV.20)$$

Le temps de calcul est le dernier indice de performance retenu pour la comparaison des algorithmes de DR. Afin de l'évaluer, les algorithmes de DR testés sont implémentés via `sklearn`. La version originale de UMAP implémentée en Python a été utilisée. Le réseau neuronal fourni par `Keras`, qui est l'une des puissantes distributions de `TensorFlow`, a été utilisé. Les calculs ont été effectués sur une station de calcul équipée de 128 Go de mémoire vive et de 2 processeurs Intel Xeon ES 2630 cadencés à 2.6 GHz, chacun avec 6 cœurs et 15 MB de mémoire cache.

Les scores obtenus au moyen des approches I et II peuvent être comparés pour conclure quant à l'utilité du calcul des DIs. Comme la dimension de l'espace de projection semble avoir

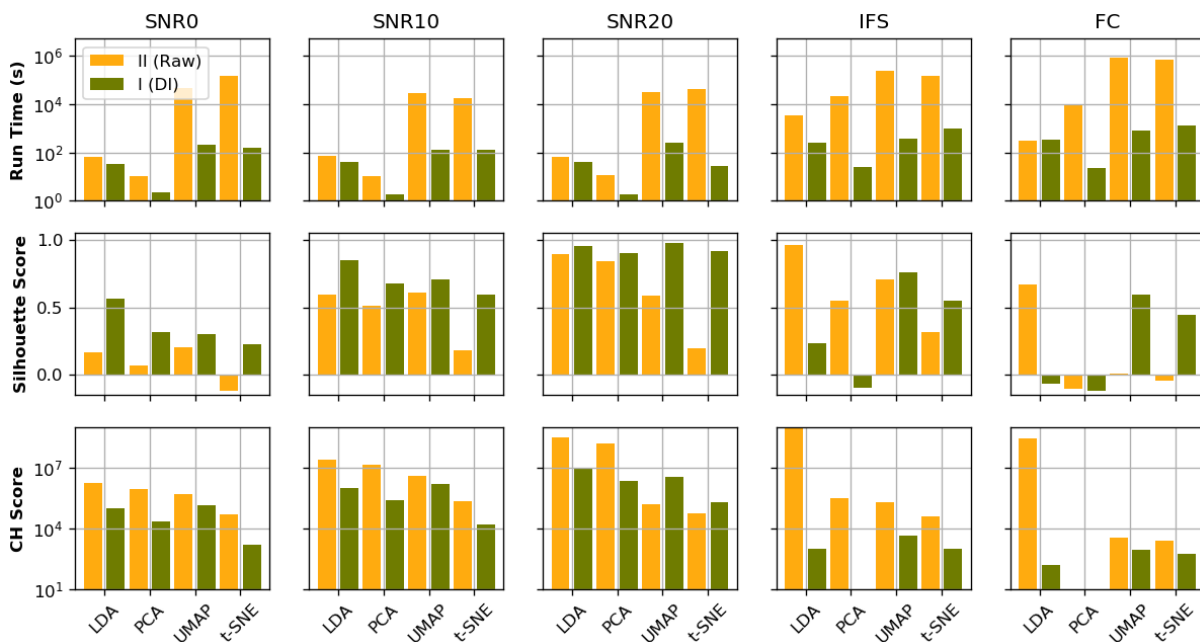


FIGURE IV.19 – Scores des approches I et II pour les projections des données vers les cartes \mathbb{R}^2 pour tous les ensembles de données considérés (d’après [A|Rah+21]).

un effet mineur sur les scores, le choix a été fait de comparer les résultats des deux approches lorsque les données sont projetées vers \mathbb{R}^2 . Les scores des approches I et II pour les projections des données vers les cartes \mathbb{R}^2 pour tous les ensembles de données considérés sont présentés dans la Fig. IV.19. On peut constater que le temps de calcul est plus important pour l’approche I que pour l’approche II. Cela est dû au fait que dans l’approche I, les signaux de répétition de chaque cas sont comparés aux signaux de répétition du cas de référence, ce qui entraîne un nombre d’échantillons à regrouper beaucoup plus élevé que pour l’approche II. Cependant, ceci doit être contrebalancé par le fait que les échantillons de l’approche II contiennent beaucoup plus de caractéristiques que ceux de l’approche I. Si le temps de calcul associé au calcul de l’indice de dommages est également pris en compte, on peut conclure que l’approche II est très intéressante par rapport à l’approche I. En ce qui concerne le score de silhouette, on peut affirmer que quel que soit le jeu de données ou l’algorithme considéré, l’approche II conduit à de meilleurs scores que l’approche I. Ceci signifie que l’approche II est également intéressante en ce qui concerne ce critère. Enfin, les scores CH associés à l’approche I sont en général plus importants que ceux obtenus avec l’approche II, la différence entre les deux approches étant relativement faible. Il faut cependant faire attention au score CH car, considéré seul, il n’est pas vraiment indicatif des performances de classification. Par exemple, UMAP obtient un score CH correct pour le cas FC en utilisant l’approche I alors que son score de silhouette est proche de 0, ce qui signifie qu’il est en fait incapable de classifier correctement. En conclusion, on peut dire que ce critère est globalement équivalent entre les deux approches mais qu’il est moins important que le score de silhouette. Il est ainsi possible de conclure que les algorithmes proposés sont capables de réaliser la classification des différents états d’endommagement correctement sans avoir besoin au préalable de passer par le calcul des DI.

IV.5 Quantification de la taille des dommages [A|Bri+21 ; E|Bri22]

La tâche de *quantification* des dommages, qui consiste à déterminer quelle est la taille ou la sévérité d'un dommage présent dans la structure une fois qu'il est détecté, localisé, et classifié, est l'objet de cette section. Comme la tâche de *classification*, cette étape du processus de SHM a été le sujet de beaucoup moins d'études que les étapes de détection et de localisation et reste ainsi un sujet assez exploratoire.

Une solution très actuelle permettant de traiter le problème de *quantification* consiste à s'appuyer sur des algorithmes d'intelligence artificielle pour apprendre indirectement les liens existants entre les signaux mesurés et la taille du dommage. Cependant, cette approche empêche de facto toute interprétation physique et toute compréhension fine des phénomènes d'interaction "*ondes/ dommage*" et donc n'a pas été privilégiée ici. Ainsi après une rapide étude bibliographique, cette section présentera une méthode de quantification des dommages basée sur la réutilisation de cartes de localisation permettant le transfert d'apprentissage [A|Bri+21] puis une méthode plus amont capable de déterminer la taille et la sévérité d'un dommage dans un matériau composite sans base de données expérimentales de référence en se basant uniquement sur un modèle analytique d'interaction "*ondes/ dommage*" [E|Bri22].

IV.5.1 État de l'art relatif aux méthodes de quantification

Il existe une certaine variabilité dans la littérature relativement à la grandeur qui doit être *quantifiée* au cours de la tâche de *quantification*. Une première approche consiste à dire que le dommage est uniforme et que c'est son étendue spatiale, donc sa taille, qui devra être quantifiée [A|Bri+21]. Une deuxième approche est basée sur le fait que le dommage va être spatialement stable mais que les propriétés mécaniques de la structure vont diminuer en son sein. L'objectif sera alors de quantifier, pour une taille de dommage donnée, sa sévérité [E|Bri22] (réduction locale d'épaisseur ou du module d'Young par exemple). Enfin, une dernière façon de voir les choses consiste à dire que du point de vue de l'ingénieur, c'est la capacité de la structure à supporter une charge qui importe, et donc sa rigidité globale. Dans ce contexte, l'objectif est alors de quantifier la réduction de la rigidité globale de la structure [A|Yue+22].

Pour réaliser la tâche de quantification, deux approches majeures se distinguent. La première approche est inspirée de la tâche de *détection* et va chercher des DIs variant de façon monotone avec la taille du dommage à quantifier. La seconde approche est inspirée de la tâche de *localisation* et va chercher à extraire des cartes de localisation des informations permettant de quantifier la taille du dommage.

Différentes études ont cherché comment définir un DI évoluant de façon monotone avec la taille du dommage [C|RM19a ; R|DK20 ; R|Liu+12 ; R|Gir+10 ; R|SY05 ; R|Yan+16 ; R|Pen+13 ; A|Ghr+19b]. L'idée directrice sous-jacente à ces différentes approches basées sur les DIs reste que l'information permettant la quantification est contenue dans les signaux temporels bruts et qu'elle peut être extraite soit empiriquement par le biais de DIs ou soit automatiquement via des algorithmes d'apprentissage automatiques. Néanmoins ces approches s'avèrent assez peu robustes en pratique car les DIs efficaces dans un cas de figure ne sont pas forcément ceux qui sont efficaces pour d'autres structures testées.

En suivant une philosophie différente, certaines tentatives ont aussi été effectuées pour post-traiter des résultats de localisation de dommages basés sur les ondes de Lamb de façon à quantifier la taille des dommages. L'idée directrice est que l'image de localisation renvoyée par un algorithme de localisation va refléter des informations relatives également à la taille du dommage et donc va indirectement permettre sa quantification [R|SD17a ; R|SD17b ; R|MBG19 ;

R[Kul19 ; R|Qua+11a]. Ces méthodes plus proches de la physique que les méthodes précédentes sont intéressantes. Néanmoins, étant donnée la grande variété d’algorithmes de localisation et leurs limites intrinsèques, la question de leur robustesse se pose également.

Une des difficultés principales associées à l’évaluation des performances des algorithmes de quantification réside dans le fait que les bases de données permettant de valider les algorithmes de quantification supposent d’avoir des structures identiques présentant des degrés d’endommagement différents, ce qui est le cas principalement avec les campagnes expérimentales réalisées en fatigue comme cela a été discuté en Section IV.1. Une autre difficulté associée à la construction de ces bases de données est que pour valider les algorithmes de quantification, la “*vérité terrain*” a besoin d’être connue. Cela suppose d’utiliser en plus des ondes de Lamb des méthodes plus classiques de contrôle non-destructif (ultra-sons manuels ou rayons X par exemple) qui doivent compléter les mesures réalisées par ondes de Lamb. Ainsi des solutions alternatives permettant d’entraîner un algorithme de quantification sur des données simulées ou expérimentales et de transférer cet apprentissage vers d’autres structures similaires sont particulièrement intéressantes. Il est possible par exemple d’apprendre en simulation et de valider ensuite sur des données expérimentales [R|Kul19], ou bien d’apprendre sur un cas expérimental donné et de transférer cet apprentissage sur d’autres cas expérimentaux similaires [A|Bri+21], ou enfin de ne pas apprendre mais de se baser uniquement sur un modèle analytique de l’interaction “*ondes/dommage*” et de prédire sur des données expérimentales [E|Bri22].

Du point de vue de la quantification, les verrous à lever sont donc relatifs i) à **la définition de la grandeur à quantifier** ii) à **la conception d’une méthodologie de quantification efficace** (basée sur les DIs ou sur des algorithmes de localisation par exemple) et iii) au **déploiement de méthodes permettant de limiter les données d’apprentissages** expérimentales nécessaires ou bien de s’en passer complètement en se basant sur la simulation numérique ou sur des modèles analytiques.

IV.5.2 Approche par traitement a posteriori de résultats de localisation [A|Bri+21]

Les travaux présentés ici illustrent comment il est possible de post-traiter des résultats de localisation de dommages basés sur les ondes de Lamb de façon à quantifier la taille des dommages et comment le transfert d’apprentissage peut être réalisé expérimentalement entre des structures similaires. L’idée directrice est ici que l’image de localisation renvoyée par différents algorithmes de localisation va refléter des informations relatives également à la taille du dommage et donc va indirectement permettre sa quantification par l’intermédiaire d’un modèle préalablement appris et qui va être directement transférable à une structure similaire.

IV.5.2.1 Méthodes de localisation utilisées à des fins de quantification

Les résultats produits par les algorithmes de localisation sont la position estimée du dommage accompagnée d’une carte de la structure où chaque pixel est associé à une valeur d’indice de localisation des dommages (DLI pour “*Damage Localization Index*” en anglais). Plus cette valeur est élevée, plus il est probable que le dommage soit localisé à cet endroit, et inversement, plus elle est faible moins c’est probable. Le point de la structure avec le DLI ayant une valeur maximale est ainsi considéré comme la position estimée du dommage. La façon dont les méthodes de localisation des dommages sont utilisées pour produire des cartes de localisation destinées à la quantification est brièvement décrite ici.

Temps d'arrivée (ToA) : La méthode du temps d'arrivée (ToA) est une technique de triangulation largement utilisée pour la localisation de dommages comme cela a été déjà discuté en Section IV.3.1. Considérant un actionneur, un capteur, et un dommage de coordonnées inconnues, la méthode consiste à calculer la différence entre le temps de vol du paquet d'ondes du chemin direct (actionneur-capteur) et celui du chemin secondaire (actionneur-capteur-dommage). Les positions possibles des dommages à l'origine du signal d'écho se situent alors sur une ellipse. L'implémentation de cet algorithme décrite dans [A|Fen+16a] est utilisée pour calculer le DLI.

Différence de temps d'arrivée (TDoA) : La méthode de la différence de temps d'arrivée (TDoA) est basée sur le même principe que la méthode ToA. La seule différence est que dans cette méthode, un groupe de trois éléments piézoélectriques est considéré : un actionneur i et deux capteurs j et k . Pour chaque point (x, y) , la différence théorique du ToA au niveau de chaque capteur est calculée et comparée à la différence extraite du signal d'écho expérimental. Les lieux possibles des dommages sont ici des hyperboles et non plus des ellipses. L'implémentation de cet algorithme décrite dans [A|Fen+16a] est également utilisée ici.

Retard et somme (DAS) : Dans la méthode *retard et somme* (DAS) [R|MM07a] pour chaque point (x, y) de la structure étudiée, le temps d'arrivée $t_{ij}(x, y)$ des ondes de Lamb est estimé pour le chemin secondaire actionneur i vers (x, y) et (x, y) vers capteur j . On calcule ensuite le résidu de ce signal $r_{ij}(t)$, c'est-à-dire la différence de grandeur entre le signal de référence et celui qui est testé. Chaque résidu $r_{ij}(t)$ est ensuite décalé de $t_{ij}(x, y)$, puis l'ensemble de ces signaux sont sommés pour obtenir le signal $s(t; x, y)$. Pour chaque point testé, la différence de signal résultante est moyennée sur chaque trajet *actionneur-capteur*. Le DLI est ensuite calculé en intégrant le carré de ce signal sur une fenêtre de temps $K\Delta t$. K est un nombre entier indiquant le nombre de pas de temps Δt sur lequel l'échantillonnage temporel est effectué.

Algorithme de reconstruction pour l'inspection probabiliste des dommages (RAPID) : L'algorithme de reconstruction pour l'inspection probabiliste des dommages (RAPID) [R|Zha+07] consiste à calculer la probabilité d'apparition d'un dommage en utilisant l'amplitude relative de la variation du signal sur chaque trajet *actionneur-capteur*. Cette probabilité P_{ij} est calculée en utilisant le coefficient de différence de signal $A_{ij} = 1 - \rho_{ij}$ (avec ρ_{ij} le coefficient de corrélation entre l'actionneur i et le capteur j) et un rapport représentant la distance du point par rapport au chemin direct. Pour chaque chemin *actionneur-capteur*, une fonction de distribution est choisie pour représenter cette propriété. Ici, une distribution elliptique est utilisée et son étendue est contrôlée par un paramètre scalaire β . Le DLI au sein du réseau de capteurs est alors exprimé comme une somme linéaire des valeurs P_{ij} de chaque paire.

IV.5.2.2 Algorithme de quantification de la taille du dommage

Afin d'estimer la taille d'un dommage inconnu, un modèle basé sur les cartes de localisation est construit. Le processus suivi pour déduire et valider un tel modèle est divisé en trois étapes. La première étape consiste à calculer un indice lié à la taille du dommage à partir des cartes de localisation. La seconde étape est ensuite l'étape d'apprentissage : elle consiste à apprendre de manière supervisée un modèle basé sur les données à partir d'un ensemble d'apprentissage, c'est-à-dire une collection de signaux correspondant à différents états de dommages pour lesquels la taille correspondante du dommage est connue. Dans l'étape de prédiction, la taille d'un dommage inconnu et plus important est prédite avec le modèle préalablement appris afin de valider ses performances d'extrapolation.

Calcul du HDLI (“High Damage Localization Index area”) : Toutes les méthodes de localisation des dommages présentées précédemment fournissent ainsi une carte de DLI associée à la structure étudiée qui sera traitée en vue de la quantification de la taille du dommage. Pour chaque méthode de localisation des dommages décrite précédemment, ces cartes sont normalisées par la valeur de DLI la plus élevée de l’ensemble de l’apprentissage. L’hypothèse faite ici est que l’aire de la région autour du DLI maximum est directement proportionnelle à la taille réelle du dommage considéré. Cette surface est divisée par la surface totale A_{tot} de la structure étudiée afin d’obtenir un indice de dommage sans dimension qui sera appelé HDLI (“High Damage Localization Index area”) dans la suite.

Étape d’entraînement : Supposons à présent que l’on dispose d’un ensemble d’apprentissage de N cas de dommages étiquetés avec la taille de dommage associée $\{(S_1, s_1), \dots, (S_N, s_N)\}$. S_i est l’ensemble des signaux provenant des transducteurs pour le $i^{\text{ème}}$ cas de dommage et s_i est la taille correspondante du dommage. Cet ensemble de données est traité par une méthode donnée de localisation des dommages. On obtient alors un nouveau jeu de données $\{(I_1, s_1), \dots, (I_N, s_N)\}$ où I_i est l’image renvoyée par l’algorithme de localisation des dommages. Une fois le HDLI de chaque exemple d’apprentissage calculé, l’ensemble d’apprentissage $\mathbf{X} = \{(h_0, s_0), \dots, (h_N, s_N)\}$ est disponible. h_i est le HDLI décrit précédemment calculé à partir de l’image i . Dans ce qui suit, le symbole $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^N$ et $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^N$ désignent respectivement le vecteur des caractéristiques HDLI et le vecteur des tailles de dommages de tous les N échantillons d’apprentissage.

Pour prédire la taille future des dommages étudiés, il est nécessaire de construire un modèle qui s’adapte bien aux données de l’ensemble d’apprentissage et qui peut être extrapolé. Comme le HDLI ne varie pas forcément linéairement avec la taille du dommage, une régression linéaire classique ne peut être utilisée. Pour des raisons de simplicité, une régression polynomiale est choisie. Cette méthode a l’avantage de bien s’ajuster aux données et de ne pas occulter la physique du modèle comme d’autres approches d’apprentissage automatique supervisé. Ses coefficients sont obtenus en minimisant l’écart entre les prédictions réalisées par le modèles et les données utilisées pour l’entraînement [A|Bri+21].

Étape de prédiction : Le modèle basé sur les données construit précédemment est ensuite utilisé pour prédire la taille d’un dommage inconnu et plus important. La première étape consiste à traiter le signal avec la méthode de localisation des dommages pour obtenir une image DLI de la structure. Ensuite, le HDLI h_{test} est calculé à partir de cette image. La taille correspondante s_{test} est enfin estimée à l’aide du modèle de quantification de la taille précédemment construit.

Vue d’ensemble de l’algorithme de quantification proposé : Les étapes de la méthode proposée sont les suivantes :

- [Étape 1] Obtenir les signaux expérimentaux pour chaque élément piézo-électrique de la structure à surveiller.
- [Étape 2] Traiter les signaux correspondant au $i^{\text{ème}}$ cas avec l’un des algorithmes de localisation des dommages décrits précédemment. Le résultat est une image représentant les DLIs sur la structure.
- [Étape 3] Calculer le HDLI associé à l’image i .
- [Étape 4] Répétez les étapes 2 et 3 pour chaque $i \in [1; N]$.
- [Étape 5] Apprendre le modèle de régression polynomiale en utilisant l’ensemble d’apprentissage des HDLIs précédemment calculé et les tailles de dommage connues correspondantes.

[Étape 6] Calculer la valeur HDLI d'un cas de dommage inconnu.

[Étape 7] Utiliser le modèle de régression pour estimer la taille du dommage inconnu.

IV.5.2.3 Structures expérimentales testées

Application à des données expérimentales issues d'essais de fatigue : La méthodologie de quantification proposée ici a été appliquée à des données expérimentales provenant d'essais de fatigue réalisés sur des spécimens en CFRP conjointement par la NASA et l'université de Stanford [R|Sax+11]. Les spécimens étudiés sont des plaques composites en forme d'os de chien avec une encoche à mi-longueur et dont les dimensions géométriques sont indiquées sur la Fig. IV.20. Chaque spécimen est équipé de 12 éléments piézoélectriques collés sur sa surface en haut et en bas du coupon. Les transducteurs placés en haut du coupon sont utilisés comme actionneurs tandis que les éléments piézoélectriques du bas sont exclusivement utilisés comme capteurs. Deux types d'empilement de matériaux composites ont été testés et sont notés dans la suite L1 et L2. Différents coupons ont été testés et sont indexés par leur numéro de la façon suivante : S11, S12, S18, S19, etc ... Le protocole expérimental consiste à réaliser un essai de fatigue cyclique en traction-traction. La présence de l'entaille induit une concentration de contraintes qui crée un délaminage croissant avec le nombre de cycles. Les essais ont été régulièrement interrompus pour effectuer l'acquisition des ondes de Lamb. Une image par rayons X est également prise à chaque interruption pour visualiser la taille de la délamination Fig.IV.20(c). Il est alors possible de visualiser la délamination qui croît progressivement avec le nombre de cycles. L'ensemble des données disponibles est divisé en un ensemble d'apprentissage (70 % des premiers cas endommagés) et un ensemble de test (30 % des autres cas endommagés).

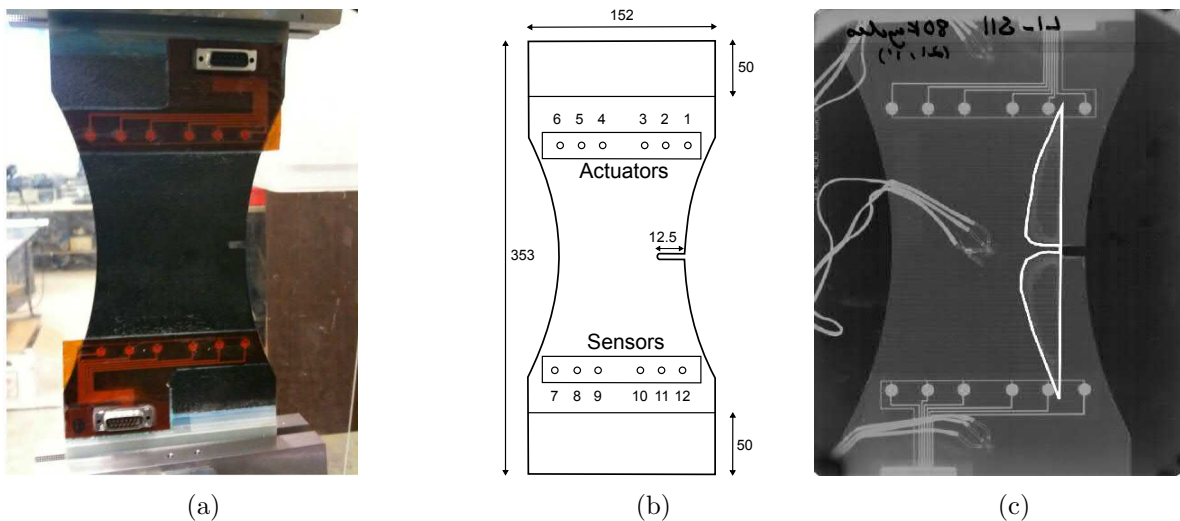


FIGURE IV.20 – Coupons CFRP utilisés par la NASA dans le cadre d'une campagne d'essais en fatigue. Les dimensions sont indiquées en mm (d'après [R|Sax+11]).

Application à des délaminations générées par choc LASER : L'approche proposée ici est également appliquée expérimentalement à des délaminations générées par des chocs laser symétriques (voir Section II.2.3.2). Un échantillon sain est utilisé comme état de référence tandis que 3 autres plaques sont endommagées avec des niveaux d'énergie différents, ce qui entraîne l'apparition de délaminations de tailles différentes. Un contrôle non destructif par ultrasons révèle que les tailles

de ces dommages sont de 7 mm, 14 mm et 21 mm. Les deux premiers cas de dommages sont utilisés pour l'apprentissage et le dernier est considéré comme un cas test pour la prédiction de la taille du dommage.

IV.5.2.4 Résultats de quantification obtenus avec la méthode proposée

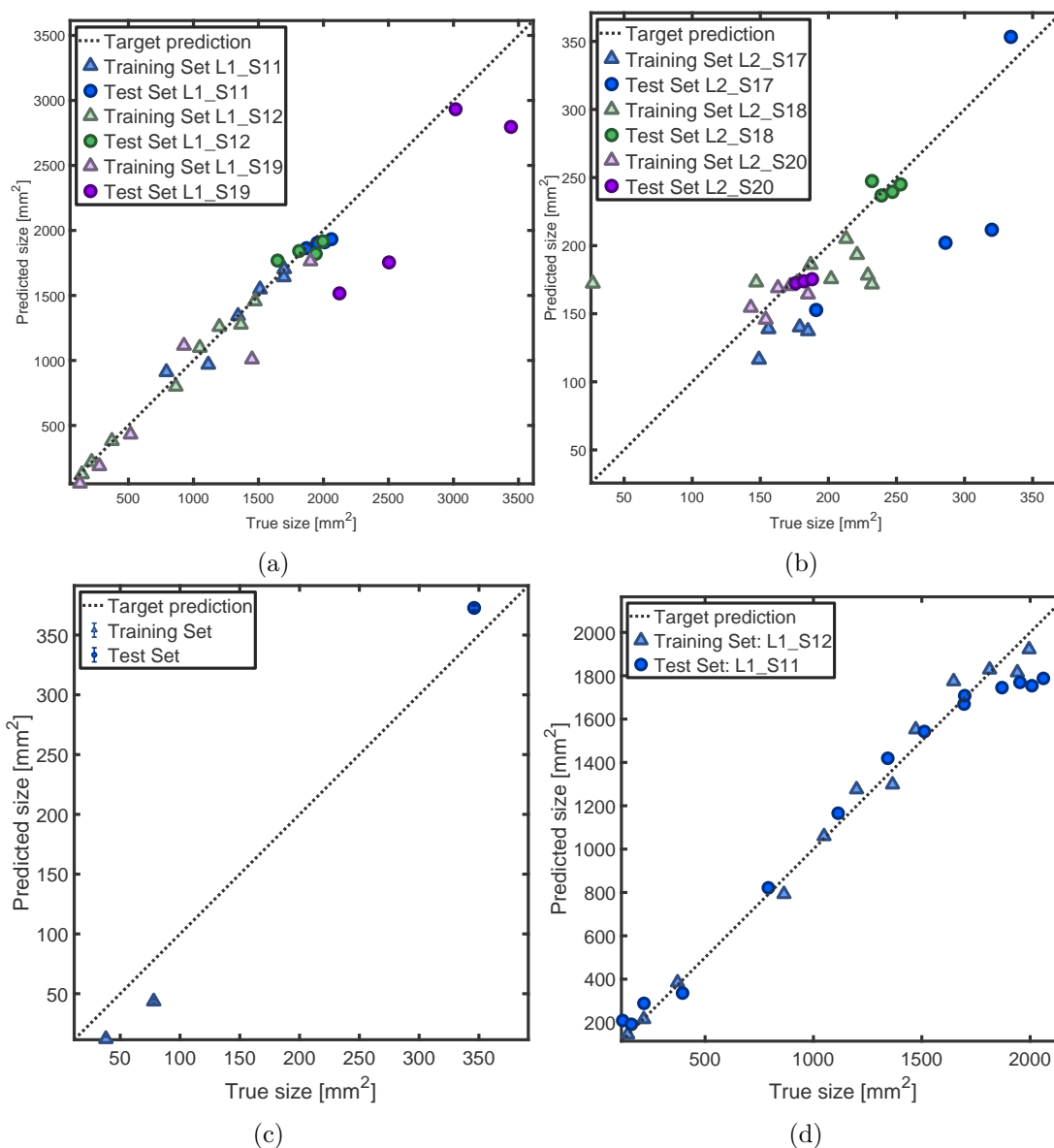


FIGURE IV.21 – Performances de quantification en utilisant la méthode RAPID sur la base de données de la NASA et sur les coupons impactés par choc LASER. Coupons L1 (a), coupons L2 (b), et coupons impactés par choc LASER (c). (d) Transfert d'apprentissage appliqué aux coupons L1 : l'apprentissage est réalisé sur le coupon L1[S12] et le test est réalisé sur le coupon L1[S11]. La ligne diagonale $y = x$ correspond à une prédiction parfaite, sans erreur (d'après [A|Bri+21]).

Influence de la méthode de localisation utilisée : Pour chaque structure considérée et chaque méthode de localisation des dommages, les performances de l'algorithme de quantification des dommages proposé sont évaluées en traçant un graphique où l'axe x est la taille réelle de la zone délaminée et l'axe y correspond à la taille prédite par l'algorithme de quantification des dommages. La ligne $y = x$ représente donc une prédiction sans erreur. Les méthodes ToA et TDoA présentent des résultats médiocres sur les ensembles de données d'apprentissage et de test. La méthode DAS obtient de bons résultats sur l'ensemble d'apprentissage, mais la prédiction sur l'ensemble de test est éloignée de la taille réelle. L'algorithme RAPID fournit les meilleurs résultats qui sont montrés sur la Figure IV.21, à la fois sur l'ensemble d'apprentissage et sur l'ensemble de test, car les valeurs prédites sont très proches de la ligne $y = x$.

Transfert d'apprentissage : Jusqu'à présent, dans cette section, seul le cas où l'étape d'apprentissage était effectuée sur la même structure que la prédiction a été évalué. Cependant, même si cette approche permet d'apprendre un modèle de quantification donnant de bons résultats sur l'ensemble de test, une autre façon de prédire la taille d'un dommage inconnu est d'effectuer l'étape d'apprentissage du modèle sur l'ensemble des données issues d'un premier coupon et d'utiliser ensuite ce modèle pour prédire l'état d'endommagement d'un autre coupon similaire, c'est à dire avec des paramètres semblables (géométrie, matériau, positions des PZTs). Avec cette technique de transfert d'apprentissage, la prédiction n'est pas faite en extrapolant le modèle sur des données inconnues mais en évaluant le modèle sur des valeurs de HDLI similaires aux données d'apprentissage. Cette approche est plus proche du contexte industriel puisqu'elle ne nécessite pas de disposer d'un jeu de données d'entraînement pour chaque coupon à tester. Cette approche a été testée sur les coupons L1[S11], L1[S12] et L1[S19] du jeu de données de la NASA. Pour chacun des 3 coupons, l'étape d'apprentissage a été réalisée sur le spécimen en question. Un exemple de ces résultats est montré dans la Fig. IV.21. Pour cet ensemble de coupons, de bons résultats sont obtenus pour certaines combinaisons, ce qui montre que cette méthode est encourageante. Cependant, dans certains cas la méthode donne de moins bons résultats, ce qui peut être dû au manque de variété dans les données.

IV.5.3 Approche basée sur un modèle d'interaction "ondes/dommage" [E|Bri22]

Dans cette section, une stratégie de quantification simultanée de la taille et de la sévérité des dommages qui ne nécessite aucune étape d'apprentissage et donc aucun entraînement sur des données correspondant à l'état endommagé est présentée. Pour atteindre cet objectif, le modèle analytique présenté dans la Section II.2.1 est utilisé. L'approche proposée ici consiste à comparer l'amplitude du mode S_0 du signal mesuré expérimentalement ou obtenu par simulation à celle du signal prédit par le modèle analytique. Cette approche peut être considérée comme une extension au problème de quantification de l'algorithme de localisation "Excitelet" [R|Qua+11a]. En ajustant la taille et la sévérité de l'endommagement dans le modèle analytique, les couples de valeurs (taille, sévérité) qui fournissent la meilleure correspondance sont ainsi obtenus pour chaque fréquence testée. Les résultats obtenus pour chaque fréquence sont ensuite combinés pour donner une seule estimation de taille et de sévérité. Comme présenté dans cette section, cette méthode est appliquée avec succès à des données de simulation réalisées sur une plaque quasi-isotrope comprenant des dommages de taille et de sévérité différentes et à des données expérimentales correspondant à des dommages générés par choc LASER.

IV.5.3.1 Algorithme de quantification de la taille et de la sévérité proposé

Idée générale : À la Section II.2.1, un modèle analytique a été développé permettant de prédire la tension mesurée par un élément piézoélectrique au passage d'une onde de Lamb correspondant au mode S_0 générée par un actionneur piézoélectrique et diffractée par un dommage. Pour cela, un système composé de deux éléments piézoélectriques idéalement collés sur une plaque composite quasi-isotrope comportant un endommagement a été étudié. La taille δ et la sévérité ξ d'un dommage sont définies de la même façon que dans la Section II.2.1. L'idée générale de l'approche proposée ici est de comparer un signal de différence inconnu (c'est-à-dire un signal correspondant à la différence des signaux à l'état endommagé et à l'état sain pour la même paire d'éléments piézo-électriques) avec le signal issu du modèle analytique. En faisant varier δ et ξ , soit respectivement le rayon et la sévérité de l'endommagement, il est possible d'obtenir un signal qui se rapproche le plus possible du signal cible. En effet, ces deux paramètres ont une grande influence sur l'amplitude de l'onde diffractée par le dommage et donc sur le signal mesuré par l'élément piézoélectrique.

Cependant, la sévérité et la taille du dommage ont des effets analogues sur l'amplitude du signal reçu. Une augmentation de la sévérité (c'est-à-dire une diminution de ξ) tend à augmenter l'amplitude et une augmentation de la taille du dommage δ induit un effet similaire. En d'autres termes, il n'existe pas de solution unique au problème inverse. Néanmoins, puisque l'endommagement diffracte l'onde incidence avec une certaine directivité dépendant de la fréquence d'excitation, il est possible de réduire les valeurs admissibles pour ξ et δ en combinant différents résultats obtenus pour différentes fréquences. La méthode de quantification développée ici consiste ainsi à résoudre un problème inverse en estimant les caractéristiques du dommage à partir des signaux disponibles pour lesquels la sévérité et la taille sont inconnues. Cette méthode présente ainsi deux avantages par rapport à l'approche présentée précédemment :

- Elle ne se base pas sur une base de donnée préalable pour l'apprentissage et donc peut être considérée comme une méthode *sans-référence*. Cela est à nuancer légèrement en pratique car des données à l'état *sain* sont quand même nécessaires pour recalibrer les paramètres du modèle analytique (propriétés matériaux et atténuation).
- Elle permet d'estimer à la fois la taille et la sévérité du dommage, qui sont deux paramètres différents décrivant le dommage et faisant partie des grandeurs d'intérêt associées à la tâche de quantification. Les méthodes de quantification ne ciblent en effet en général qu'un seul paramètre descriptif de l'endommagement de la structure.

Procédé de fusion d'images : Des cartes d'amplitude $A_{TH}(\delta, \xi)$ sont calculées pour une gamme de valeurs de δ et de ξ candidates pour chaque fréquence d'excitation considérée. Cette étape de calcul est assez gourmande en ressources informatiques mais n'a besoin d'être effectuée qu'une seule fois pour chaque structure. La comparaison entre les cartes précalculées et les signaux expérimentaux est ensuite peu coûteuse en terme de temps de calcul.

L'étape suivante consiste à récupérer l'amplitude A_{XP} du premier paquet d'ondes diffracté à partir du signal expérimental ou de simulation. Ensuite, la carte d'amplitude $A_{TH}(\delta, \xi)$ pour une gamme de taille et de sévérité des dommages est étudiée pour la fréquence d'excitation correspondante. Afin d'évaluer quel couple (δ, ξ) correspond le mieux aux résultats expérimentaux, chaque couple se voit attribuer un score $P(\delta, \xi)$ compris entre 0 et 1 calculé à l'aide de la valeur absolue d'une fonction gaussienne de moyenne égale à l'amplitude du signal expérimental A_{XP} et d'écart-type σ . La valeur de σ peut être choisie par l'utilisateur pour avoir une comparaison plus ou moins permissive. Dans la suite une valeur telle que $3\sigma = 0.3A_{XP}$ est choisie. De cette façon, nous nous assurons que 99,73 % des valeurs se situent à ± 30 % de A_{XP} .

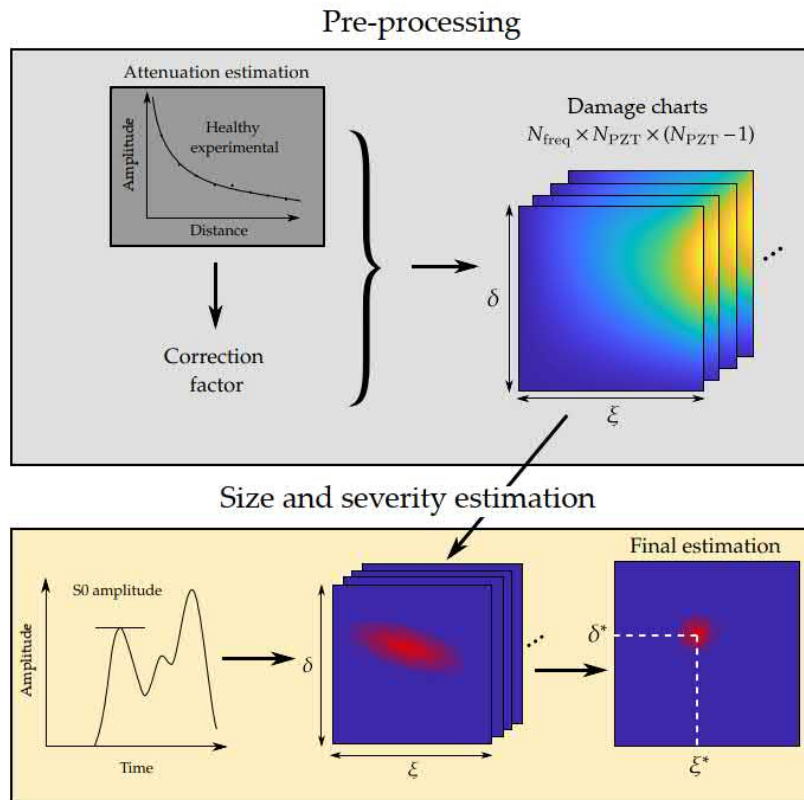


FIGURE IV.22 – Vue d’ensemble de la procédure de quantification proposée (d’après [E|Bri22]).

Une fois ce processus effectué pour chaque élément piézo-électrique et chaque fréquence, les images produites sont additionnées en une seule image $\hat{P}(\delta, \xi)$ de façon à réduire les valeurs admissibles de (δ, ξ) . Les valeurs estimées $(\hat{\delta}, \hat{\xi})$ sont alors calculées comme étant celles associées au score maximal. Une vue d’ensemble de la procédure de quantification de la taille et de la sévérité d’un dommage basée sur un modèle analytique est présentée en Figure IV.22.

IV.5.3.2 Résultats de quantification obtenus

Structure étudiée : Pour évaluer les performances de l’approche proposée, elle a été appliquée à des données issues de simulations éléments-finis ainsi qu’à des données expérimentales. Dans les deux cas, la structure étudiée est une plaque composite de 600 mm par 600 mm et de 2.4 mm d’épaisseur et équipée de 5 éléments piézo-électriques étudiée dans le cadre du projet MONARQUE (voir [E|Pos22] pour plus de détails). Au niveau de la simulation, un modèle éléments-finis de cette structure a été réalisé. Au niveau expérimental, deux coupons identiques où des dommages sont générés par choc LASER sont considérés. La Figure IV.23 (gauche) donne un aperçu de la structure étudiée et du réseau d’éléments piézo-électriques et les figures du milieu et de droite illustrent les dommages générés par choc LASER. Il s’agit de chocs successifs générant à chaque fois un délaminage de 5 mm. Dans le premier cas, un dommage se voulant circulaire est ainsi créé et dans le second cas, il s’agit d’un dommage globalement linéaire. Les structures sont systématiquement interrogées par ondes de Lamb entre deux tirs LASER successifs. Les fréquences d’excitation considérées vont de 50 kHz à 300 kHz avec un pas de 10 kHz pour les cas numériques et expérimentaux.

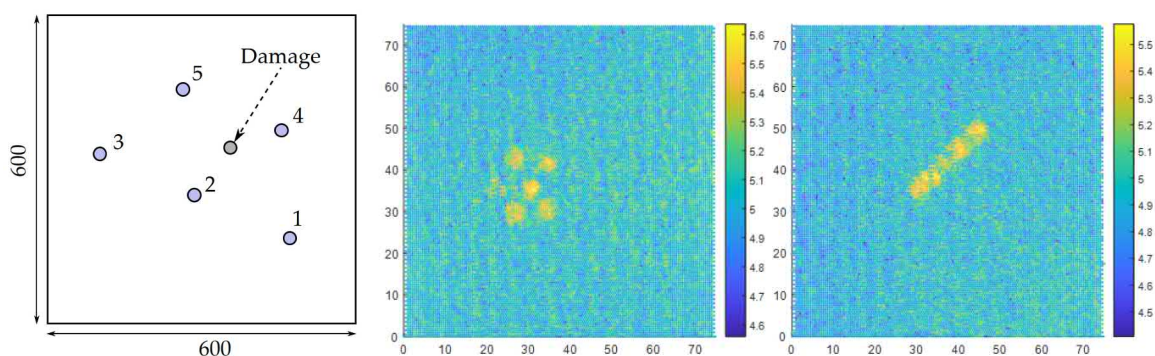


FIGURE IV.23 – À gauche, la structure étudiée pour la validation de l’approche de quantification proposée et au milieu et à droite les résultats de CND par ultrasons pour les deux coupons endommagés par choc LASER (d’après [E|Bri22] et [E|Pos22]).

Application à des données de simulation éléments-finis La méthode proposée est d’abord appliquée aux données provenant de simulations éléments-finis de la structure où l’endommagement est modélisé comme une diminution localement cylindrique de la rigidité. Plusieurs tailles et sévérités de dommages sont étudiées. Les prédictions réalisées par l’approche proposée sont présentées à la Figure IV.24 où chaque caractéristique de dommage estimée (taille ou sévérité) est tracée en fonction de sa valeur réelle. Il est possible de remarquer que pour toutes les sévérités considérées, les tailles prédites sont très proches des valeurs de référence. Pour la prédiction de la sévérité, des prédictions relativement bonnes sont également obtenues. Il est ici important également de préciser que le modèle éléments-finis diffère notablement du modèle analytique dans le sens où il permet de simuler toutes les ondes de Lamb se propageant dans la plaque étudiée ainsi que leurs réflexions sur les bords (voir Section II.2.1).

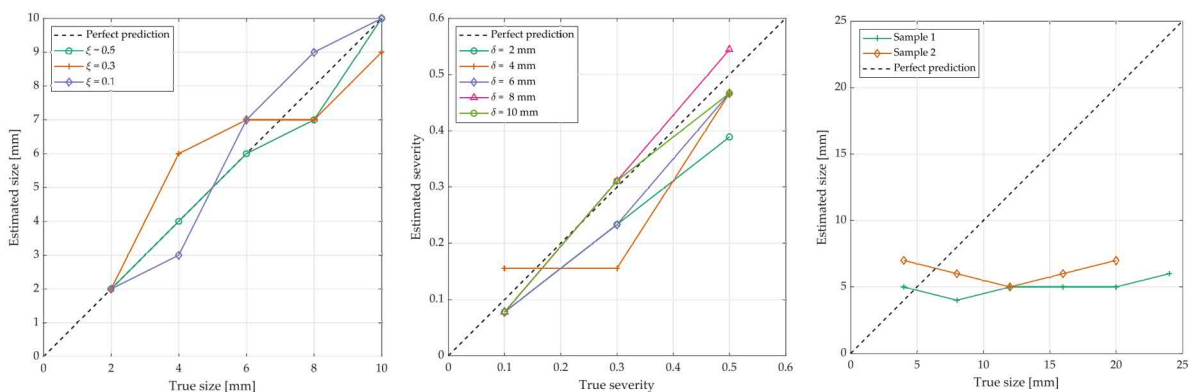


FIGURE IV.24 – Pour les données obtenues par simulation, résultats de quantification de la taille (gauche) et de la sévérité (centre) d’un dommage sur des données simulées générées par éléments-finis. A droite, résultats de quantification de la taille sur les données expérimentales générées par choc LASER (d’après [E|Bri22]).

Application à des données expérimentales La méthode est maintenant appliquée aux données expérimentales issues des deux coupons impactés par choc LASER. Pour les deux coupons qui ont été testés, les tailles de dommages estimées sont présentées à la Figure IV.24 (à droite). La

taille de dommage estimée après le premier impact est très proche de la vérité pour les deux coupons testés (taille autour de 5 mm qui correspond à la taille du faisceau LASER et donc à la taille de la délamination engendrée en pratique). Un écart important entre prédictions et réalité existe cependant pour les dommages ultérieurs, quelque-soit le coupon considéré. Cela peut s'expliquer par la forme des dommages créés puisqu'il ne s'agit plus d'une délamination unique mais d'un assemblage de petits dommages cylindriques qui ne correspond plus du tout à l'hypothèse cylindrique réalisée dans le cadre du modèle analytique. Il est quand même important de noter que quand cette hypothèse est vraie, c'est à dire suite au premier choc LASER, les résultats de prédiction obtenus pour les deux coupons considérés sont extrêmement encourageants. Une sévérité équivalente a également été estimée pour chaque coupon : $\xi = 0.6$ pour le premier coupon et $\xi = 0,4$ pour l'autre. Cela illustre concrètement les opportunités et les limites associées à cette méthode de quantification plus exploratoire.

IV.6 Compensation de l'influence de la température [A|Fen+16b]

Le dernier point à traiter pour pouvoir déployer efficacement ces algorithmes de SHM est lié aux variations environnementales et opérationnelles vécues par les structures à surveiller (EOC pour “*Environmental and Operational Conditions*”). En effet, des structures comme le FC ou l'IFS vont évoluer dans un environnement où la température ainsi que le chargement mécanique vont varier significativement en fonction de la géographie ou des étapes du vol. Ces variations vont alors impacter la façon dont les ondes de Lamb se propagent dans la structure hôte en modifiant par exemple leur vitesse de propagation ou bien leur atténuation. Cela pose donc un problème en pratique pour pouvoir appliquer les algorithmes de SHM présentés précédemment.

Cette section présente ainsi une méthode de compensation des effets de la température dédiée au SHM par ondes de Lamb. L'approche proposée considère une représentation du signal reçu par un élément piézo-électrique via sa transformée de Hilbert qui permet d'extraire les facteurs d'atténuation et le déphasage causés par les changements de température. La connaissance de ces paramètres permet ensuite d'utiliser des relations linéaires reconstruisant les signaux d'un élément piézo-électrique à n'importe quelle température. L'approche proposée est validée expérimentalement pour une plaque composite à différentes températures allant de 16°C à 85°C. Cette approche est intéressante car elle ne nécessite qu'un ensemble limité de signaux reçus par les éléments piézo-électriques à différentes températures pour l'apprentissage du modèle et autorise la compensation de la température à n'importe quelle température. Les résultats de la localisation des dommages après compensation de la température démontrent sa robustesse et son efficacité.

IV.6.1 État de l'art

La surveillance des dommages par ondes de Lamb est effectuée en comparant les signaux mesurés dans un état *sain* à ceux mesurés dans un état *inconnu*. Cette technique simple mais efficace peut devenir une tâche difficile lorsque les EOC changent [R|And+08 ; R|Lee+11]. Parmi les EOC, les changements de température représentent la cause dominante affectant la robustesse d'un système de SHM par ondes de Lamb. En effet, les changements de température entraînent souvent des modifications de l'amplitude instantanée et de la phase instantanée d'un signal [R|Lee+11 ; R|Kij+13 ; R|KDW06 ; R|LM05].

Les techniques utilisées pour compenser les effets de la température sur les ondes de Lamb peuvent être classées en deux catégories : la sélection optimale de référence (OBS pour “*Optimal Baseline Selection*”) et l'étirement du signal de référence (BSS pour “*Baseline Signal Stretching*”).

La technique OBS est une approche basée sur les données consistant à soustraire au signal *inconnu* à une température connue le signal de *référence* ayant la température la plus proche disponible dans la base de données de référence. Cette technique de compensation nécessite ainsi un très grand nombre de signaux de référence ainsi qu'une bonne résolution en température dans l'acquisition des signaux pour obtenir un niveau de bruit post-soustraction suffisamment faible. Ces exigences ne sont pas nécessairement satisfaites en pratique. Contrairement à la méthode OBS, les techniques BSS cherchent à construire un modèle prédisant des effets du changement de température sur les signaux reçus par les éléments piézo-électriques de façon à pouvoir reconstruire de façon adéquate le signal de référence adapté à n'importe quelle température [R|HM12; R|MM05]. L'avantage de cette technique est qu'elle nécessite peu de signaux de référence une fois qu'un modèle adapté a été identifié [R|MM05; R|CSC10; R|Roy+14; R|Wan+14].

La problématique de la compensation des effets de la température sur les ondes de Lamb reste donc une question assez ouverte. Du point de vue fondamental, il n'est pas évident de définir et d'identifier un modèle adapté permettant de prédire l'effet des variations de température sur les signaux issus d'ondes de Lamb pour une large gamme de températures. Cela limite en pratique le déploiement de la méthode BSS. A l'opposé, la méthode OBS n'est pas viable car elle nécessite la réalisation de trop de mesures à l'état *sain*. Un compromis est donc à trouver entre OBS et BSS via un modèle suffisamment fiable pour pouvoir appliquer une correction sur un certain intervalle de température et une base de données comportant des mesures à quelques températures servant de points de référence.

IV.6.2 Compensation du déphasage et de l'atténuation du premier paquet

Les effets de la température affectant les performances des systèmes de SHM basés sur les ondes de Lamb sont généralement liés à la dépendance en température des performances des transducteurs piézo-électriques ainsi qu'aux propriétés mécaniques de la structure étudiée [R|RC08]. Ces effets sont généralement une variation de l'amplitude et de la phase instantanées du signal, entraînant une variation de l'énergie du signal ainsi qu'une variation de la vitesse de l'onde et du temps de parcours. À titre d'exemple, la Figure IV.25 illustre l'effet de la température sur un signal d'ondes de Lamb mesuré par un élément piézo-électrique collé sur une plaque en matériau composite. Une atténuation et un déphasage entre ces deux signaux peuvent clairement être observés. L'objectif de l'approche présentée ici est de corriger cette atténuation et ce déphasage pour le premier paquet d'ondes de façon à compenser l'influence de la température.

IV.6.2.1 Modélisation de l'influence de la température sur les ondes de Lamb

Sur la base de ces observations, il est possible de supposer que l'effet de la température sur un signal d'ondes de Lamb $x(t)$ peut être représenté comme suit :

$$x(t) \xrightarrow{\text{Effet de la température}} A(t, T)x[t - t_r(t, T)] \quad (\text{IV.21})$$

où $A(t, T)$ est un facteur d'atténuation instantanée à la température T , et $t_r(t, T)$ est un temps de parcours modifié vu comme un retard. En supposant des valeurs constantes pour $t_r(t, T)$ et $A(t, T)$ dans une fenêtre temporelle spécifique, l'effet du retard temporel provoque un déphasage global du signal fenêtré. Par conséquent, le retard temporel peut être écrit comme suit :

$$t_r(t, T) = (1 - \alpha(T)) t \quad (\text{IV.22})$$

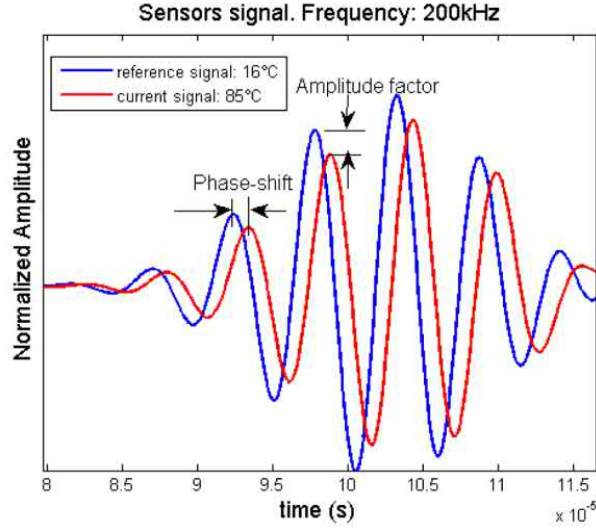


FIGURE IV.25 – Illustration des effets de la température sur un signal mesuré par un élément piézo-électrique (d'après [A|Fen+16b]).

où $\alpha(T)$ est un coefficient d'étirement temporel. Sur la base de ces hypothèses, l'effet de la température dans le signal peut être simplifié de la façon suivante :

$$x(t) \xrightarrow{\text{Effet de la température}} A(T)x[\alpha(T)t] \quad (\text{IV.23})$$

IV.6.2.2 Utilisation de la transformée de Hilbert pour extraire un modèle

Pour tout signal réel $x(t)$, le signal analytique (complexe) correspondant $z(t)$ est obtenu par :

$$z(t) = x(t) + i\mathcal{H}x(t) = \hat{x}(t) \exp[i\phi(t)] \quad (\text{IV.24})$$

où $\mathcal{H}x(t)$ est la transformée de Hilbert du signal réel $x(t)$, $\hat{x}(t)$ et $\phi(t)$ désignent son enveloppe et sa phase instantanées.

En considérant deux signaux $x_r(t)$ (signal de référence) et $x_u(t)$ (signal à l'état inconnu) à des températures différentes T_r et T , si la relation (IV.23) est satisfaite pour ces deux signaux, l'effet de la température peut être compensé en appliquant un facteur d'amplitude et un déphasage au signal courant. La représentation analytique $z_u(t)$ du signal à l'état inconnu est alors liée à celle $z_r(t)$ du signal de référence de la façon suivante :

$$z_u(t) = A(T)z_r(t) \exp[i(\phi_r(t) - \phi_u(t))] \quad (\text{IV.25})$$

En supposant que les phases instantanées à la température de référence $\phi_r(t)$ et à toute température $\phi_u(t)$ sont constantes dans une fenêtre temporelle prédéfinie de longueur fixe, l'Eq. (IV.25) peut être simplifiée de la façon suivante :

$$z_u(t) = A(T)z_r(t) \exp[i\phi(T)] \quad (\text{IV.26})$$

où $\phi(T) = \phi_r - \phi_u$. Après correction de l'amplitude et alignement de phase à partir de l'Eq. (IV.26), le signal réel $x_u(t)$ peut être reconstruit à partir de sa forme analytique comme suit (\mathcal{R} désigne la partie réelle) :

$$x_u(t) = \mathcal{R}[z_u(t)] \quad (\text{IV.27})$$

Les paramètres de ce modèle à identifier pour être en mesure de compenser les effets de la température sur les ondes de Lamb sont donc $A(T)$ et $\phi(T)$. Ici des modèles linéaires sont choisis et leurs paramètres sont estimés en se basant sur une procédure de moindres carrés ordinaires.

IV.6.2.3 Algorithme de compensation de l'effet de la température

Le processus global de compensation de la température est décrit par les 6 étapes suivantes :

- **Étape 1** : Collecter un ensemble de signaux de référence $\{S_{\text{ref}}, S_1, \dots, S_M\}$ à $M + 1$ températures de références différentes $\{T_{\text{ref}}, T_1, \dots, T_M\}$ sur la structure étudiée. La valeur de M est choisie en fonction de la plage de température considérée.
- **Étape 2** : En partant du signal de référence S_{ref} et d'un signal courant S_q ($q \in [1, M]$) à la température T_q , isoler le premier paquet d'ondes en utilisant une fenêtre de temps appropriée.
- **Étape 3** : Estimer le facteur d'atténuation $A(T_q)$ et de déphasage $\phi(T_q)$ entre ces deux signaux.
- **Étape 4** : Répéter les étapes 2 et 3 pour les M couples de signaux de référence contenus dans la base de données.
- **Étape 5** : Trouver un modèle de régression linéaire par rapport à la température pour le facteur d'atténuation $A(T)$ et le déphasage $\phi(T)$ en utilisant les estimations réalisées pour chaque valeur de température.
- **Étape 6** : Reconstruire un signal à la température T en utilisant le modèle de régression linéaire trouvé à l'étape 5 (pour estimer $A(T)$ et $\phi(T)$) et le signal de référence $x_r(t)$, via le modèle donné par l'Eq. (IV.26).

Afin de comparer la similarité de deux signaux dans le domaine temporel, et donc de quantifier les performances de l'algorithme proposé, l'amplitude résiduelle maximale normalisée ϵ est calculée en utilisant le signal résiduel après correction de la température de la façon suivante :

$$\epsilon(T) = 20 \log \left[\frac{\max |x_{\text{reconstruit}}(t, T) - x_{\text{mesuré}}(t, T)|}{\max |x_{\text{mesuré}}(t, T)|} \right] \quad (\text{IV.28})$$

où $x_{\text{reconstruit}}(t, T)$ et $x_{\text{mesuré}}(t, T)$ sont le signal reconstruit et le signal mesuré expérimentalement à la température T . De faibles valeurs de ϵ indiquent ainsi une bonne concordance entre les signaux expérimentaux et reconstruits. La procédure de compensation de température décrite ci-dessus suppose que tous les M signaux enregistrés satisfont au modèle de compensation donnée par l'Eq. (IV.26) entre deux mesures de températures consécutives. Si ce n'est pas le cas, l'incrément de température doit être ajusté et la procédure doit être répétée jusqu'à ce qu'une erreur de compensation ϵ acceptable soit atteinte. Il convient de noter que la méthodologie ci-dessus pour la compensation de la température suppose que le champ de température est uniforme le long de chaque trajet actionneur-capteur.

IV.6.2.4 Validation expérimentale de l'approche de compensation proposée

Structure testée expérimentalement : La structure sur laquelle est validée expérimentalement cet algorithme est une plaque en matériau composite CFRP correspondant au FC. Un ensemble de $N = 5$ éléments piézoélectriques est collé sur la surface de la plaque composite. Les signaux correspondant aux ondes de Lamb se propageant dans la structure ont d'abord été mesurés à la température ambiante ($T_{\text{ref}} = 16^\circ\text{C}$), prise comme référence. Après avoir enregistré les signaux

à température ambiante, la plaque composite a été placée dans un four et les mêmes signaux ont été enregistrés à quatre ($M = 4$) températures différentes (38°C, 53°C, 69°C, 85°C). Un thermocouple placé sur un spécimen qui possède les mêmes propriétés mécaniques que la plaque composite pour mesurer précisément la température sans perturber la propagation des ondes de Lamb.

Estimation d'un modèle linéaire pour $A(T)$ et $\phi(T)$: Afin de pouvoir négliger les réflexions dues aux bords de la structure, la stratégie de compensation de la température décrite dans cette étude n'est appliquée qu'au premier paquet d'ondes, dont la durée est approximativement égale à celle du signal d'excitation, sur laquelle il est supposé que l'atténuation et le déphasage instantanés sont constants. La procédure décrite précédemment est réalisée pour estimer $A(T)$ et $\phi(T)$ pour chaque chemin "actionneur-capteur".

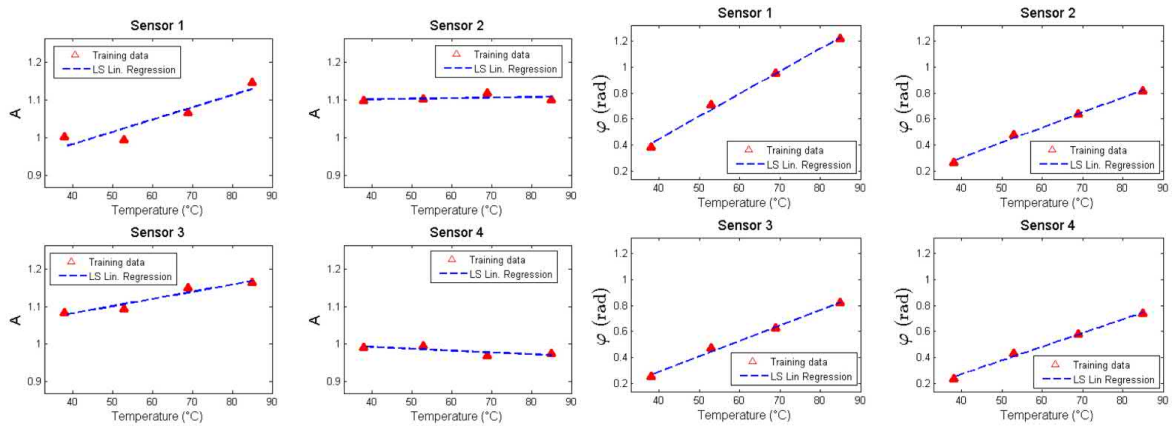


FIGURE IV.26 – Variation du facteur d'amplitude $A(T)$ et du déphasage $\phi(T)$ en fonction de la température pour les éléments piézo-électriques 1, 2, 3 et 4 lorsque l'élément piézo-électrique 5 est utilisé comme actionneur et régressions linéaires associées (d'après [A|Fen+16b]).

La Figure IV.26 montre les variations du facteur d'amplitude $A(T)$ et du déphasage $\phi(T)$ en fonction de la température pour les éléments piézo-électriques 1, 2, 3 et 4 lorsque l'élément piézo-électrique 5 est utilisé comme actionneur. D'après ces figures, des tendances linéaires avec la température pour le facteur d'amplitude et le déphasage peuvent effectivement être observées. Sur cette figure, il est possible d'observer une excellente concordance entre les points d'entraînement et les régressions linéaires associées. Le facteur d'amplitude $A(T)$ a une tendance presque linéaire avec la température, et le déphasage $\phi(T)$ augmente systématiquement avec la température. Cette tendance peut s'expliquer grossièrement par le fait que, lorsque la température augmente, les modules d'Young et de cisaillement diminuent, ce qui conduit à un matériau moins rigide. En conséquence, la vitesse des ondes de Lamb diminue, ce qui équivaut à une augmentation du déphasage. De plus, l'influence de la température sur le comportement des céramiques piézoélectriques affecte également la propagation des ondes de Lamb mais cela est plus délicat à décrire qualitativement [R|Roy+14]. Après avoir obtenu le modèle de régression à partir des données d'apprentissage, il est possible de reconstruire un signal à n'importe quelle température de la plage de fonctionnement, en utilisant uniquement le signal de référence et le modèle de compensation donnée par l'Eq. (IV.26).

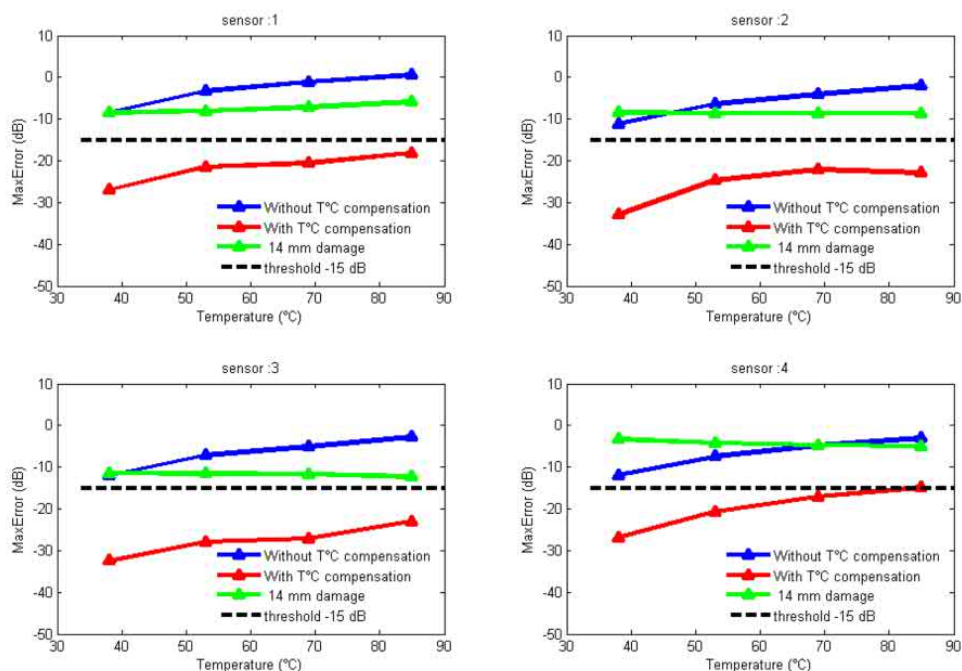


FIGURE IV.27 – Erreurs de reconstruction du signal en termes d’amplitude résiduelle maximale normalisée (ϵ , voir Eq. (IV.28)) pour différentes valeurs de température (d’après [A|Fen+16b]).

Compensation de l’effet de la température : La Figure IV.27 montre les erreurs de reconstruction du signal en termes d’amplitude résiduelle maximale normalisée (notée ϵ , voir Eq. (IV.28)) pour différentes valeurs de température. L’application du modèle de compensation aux signaux reçus par les éléments piézo-électriques réduit clairement l’amplitude résiduelle maximale. De plus, d’après les faibles valeurs de l’erreur normalisée obtenues après compensation, il est possible de conclure que le modèle de compensation est capable de reconstruire n’importe quel signal avec une précision raisonnable pour différentes températures contenues dans la plage de fonctionnement. La précision de reconstruction est jugée comme raisonnable ici car elle est largement en dessous des niveaux de variations engendrés par l’apparitions d’un dommage dans la structure (ici un impact de 14 mm). Des résultats similaires sont observés lorsque les autres PZTs sont utilisés comme actionneurs.

Application à la localisation d’un dommage : L’approche de compensation de température proposée est ensuite validée pour la localisation des dommages sur une plaque composite dans un environnement à température variable. Un dommage d’impact de 14 mm est considéré ici. Avant d’introduire tout dommage, les signaux de référence sont d’abord enregistrés à partir de la structure sans dommage et pour différentes températures (16°C, 38°C, 53°C, 69°C, 58°) et la température de 16°C est considéré comme la température de référence. Après avoir créé un dommage par impact sur la plaque composite, les signaux sont de nouveau mesurés aux mêmes températures que dans le cas sain.

L’algorithme de localisation des dommages utilisé ici est l’algorithme par retard et somme (DAS) [R|MM07a] qui utilise le temps de vol des signaux diffractés par les dommages, qui sont eux-mêmes obtenus à partir de la différence entre les signaux mesurés dans un état *sain* et les signaux mesurés dans l’état *endommagé* (à la même température). Les signaux correspondant à l’état *sain* (à une température donnée) sont donc préalablement reconstruits en utilisant le

signal de référence (à l'état *sain*) à 16°C. Ensuite, la procédure de de localisation des dommages est mise en œuvre (voir la Section IV.3 pour plus de détails).

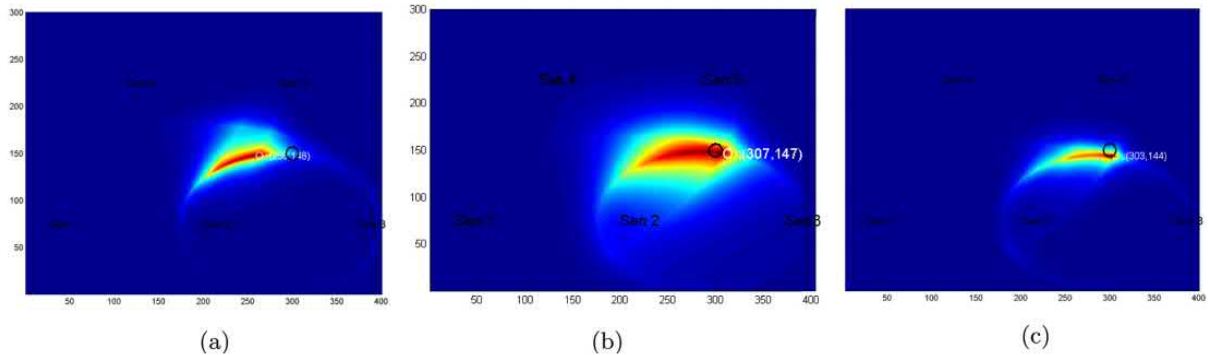


FIGURE IV.28 – Localisation de l'endommagement dans la plaque en matériau composite à la température de 38°C. Le cercle noir représente l'emplacement réel de l'endommagement. Les valeurs d'intensité varient de 0 (bleu) à 1 (rouge). L'emplacement du dommage est donné par la valeur la plus élevée (la zone la plus rouge). (a) Sans compensation de température. Signal de référence à 16°C. Signal endommagé à 38°C. (b) Avec compensation de température. Signal de référence à 16° reconstruit à 38°C. Signal endommagé à 38°C. (c) Signal de référence à 38°C. Signal endommagé à 38°C (d'après [A|Fen+16b]).

La Figure IV.28 montre les résultats de localisation de dommages avant et après l'application de la procédure de compensation à 38°C. Il est possible d'observer clairement que l'utilisation du modèle de compensation de température conduit à une estimation améliorée et précise de la position du dommage. Sans compensation, l'erreur de localisation devient élevée avec un résultat ambigu pour la position du dommage. Il est également possible d'observer que l'erreur de localisation augmente avec la température. Cette tendance est la conséquence du fait que l'erreur résiduelle maximale augmente également avec la température, ce qui est un résultat sans surprise. Ces résultats démontrent ainsi l'efficacité et l'applicabilité du schéma de compensation de température proposé ici pour la localisation des dommages.

Chapitre V

Exploration d’approches non-linéaires

Sommaire

V.1	Des outils taillés sur mesure pour accéder aux non-linéarités	119
V.1.1	Qu’est-ce qu’une non-linéarité invariante dans le temps?	120
V.1.2	Des modèles non-linéaires à temps invariant	121
V.1.3	Estimation de MHPs [A Réb+11b; A Reb+16a; A RS18]	124
V.2	Vers l’exploitation des non-linéarités en SHM	128
V.2.1	État de l’art de l’utilisation des non-linéarités pour le SHM	128
V.2.2	Simulation des interactions “ <i>ondes/dommage</i> ” non-linéaires [A Bou+23]	129
V.2.3	Applications des MHPs à l’aéronautique [A RHM14; A Ghr+19b]	130
V.2.4	Application des MHPs au génie civil [C Reb+14a; C BRM15]	134

Contexte et objectifs du chapitre

La majorité des approches retenues pour la mise en oeuvre du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb sont basées sur la considération de phénomènes *linéaires* ayant lieu lors de l’interaction “*ondes/dommage*”. Cependant, ces interactions sont aussi le siège de phénomènes *non-linéaires* qui sont potentiellement exploitables à des fins de SHM (voir Section II.2.3). Ce point est d’autant plus intéressant que ces non-linéarités se manifestent dès les prémices de l’endommagement. L’une des difficultés associées à l’exploitation des non-linéarités pour le SHM est que les outils de traitement du signal existants sont quasiment exclusivement linéaires et ne sont en conséquence pas adaptés au contexte de la SHM. La problématique étudiée ici concerne donc le **développement d’outils de traitement du signal dédiés à l’étude des non-linéarités et leur utilisation à des fins de SHM** de structures aéronautiques réalisées en matériau composite ou dans d’autres contextes. Ces outils *taillés sur mesure* pour accéder aux non-linéarités seront d’abord détaillés dans la Section V.1, puis leur *exploitation* à des fins de SHM sera discutée en Section V.2, dans un cadre un peu plus large que celui des matériaux composites pour l’aéronautique.

V.1 Des outils taillés sur mesure pour accéder aux non-linéarités

Les dommages qui apparaissent sur les structures (tels que les fissures, les impacts ou les délaminations) génèrent des réponses dynamiques non linéaires qui peuvent être utilisées pour

la surveillance automatisée des dommages [R|Far+07 ; R|Wor+08] (voir aussi la Section II.2.3). En outre, les structures complexes présentent souvent un comportement non linéaire, même lorsqu'elles sont saines. Les limites des méthodes existantes de SHM basées sur les non-linéarités ont été identifiées [R|Far+07] et le premier problème méthodologique à résoudre est que “*le comportement non linéaire ne se généralise pas*”. Cela implique que les modèles non linéaires déjà utilisés n'englobent pas toutes les structures rencontrées dans la vie réelle. Le deuxième problème méthodologique est que “*les approches non linéaires sont lourdes en termes de calcul, coûteuses, et nécessitent la définition d'un trop grand nombre de paramètres*” [R|Far+07]. Même s'ils sont très prometteurs, **les modèles non linéaires actuellement développés ne sont donc pas adaptés au SHM car ils ne sont pas assez généraux ou trop complexes et lourds à identifier**. Cette section s'intéresse plus particulièrement aux Modèles de Hammerstein en Parallèle (MHP) qui sont des modèles non-linéaires à temps invariants très généraux et pour lesquels des procédures d'estimation légères, et donc attractives à des fins de SHM, ont été développées.

V.1.1 Qu'est-ce qu'une non-linéarité invariante dans le temps ?

Il est en préambule nécessaire de préciser ce qui est entendu par “*non-linéarité invariante dans le temps*” ici, et donc de commencer par rappeler comment est définie la notion de “*linéarité invariante dans le temps*”.

Une vue linéaire et invariante dans le temps du problème de SHM : Dans un contexte de SHM, le signal émis par un élément piézo-électrique est noté $x(t)$ et celui reçu par un autre élément piézo-électrique utilisé en réception est noté $y(t)$. Dans le cadre des systèmes linéaires invariants dans le temps (LTI), la relation liant le signal d'entrée $x(t)$ au signal de sortie $y(t)$ est supposée être une convolution donnée dans le domaine temporel par :

$$y(t) = (h * x)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (\text{V.1})$$

Tout ce qui se passe au cours de la propagation des ondes de Lamb depuis leur émission, jusqu'à leur réception est modélisé par $h(t)$ aussi appelée réponse impulsionnelle. Cette équation peut également être écrite dans le domaine fréquentiel avec $X(f)$ et $Y(f)$ les transformées de Fourier des signaux $x(t)$ et $y(t)$ et $H(f)$ la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle :

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (\text{V.2})$$

L'hypothèse d'*invariance dans le temps* stipule que quelque soit l'instant où ces mesures vont être effectuées, le même résultat sera obtenu. Cela peut être formalisé par :

$$\forall \delta_t \in \mathbb{R} \quad y(t + \delta_t) = (h * x)(t + \delta_t) \quad (\text{V.3})$$

Un tel système est dit *linéaire et invariant dans le temps* et respecte un certain nombre de propriétés qui sont des conséquences directes des équations précédentes :

— **Les fréquences contenues dans le signal d'entrée et de sortie sont les mêmes.**

Si l'on considère un signal d'entrée $x_1(t) = X_0 \sin(2\pi f_0 t)$ alors le signal de sortie correspondant sera $y_1(t) = X_0 |H(f_0)| \sin(2\pi f_0 t + \text{Arg}[H(f_0)])$.

— **Il existe une relation de proportionnalité entre les signaux d'entrée et de sortie.**

Si un signal d'entrée $x_2(t) = \alpha x_1(t)$ est à présent considéré alors le signal de sortie correspondant sera donné par $y_2(t) = \alpha y_1(t)$.

— **Il est possible d'appliquer le principe de superposition à ce système.**

Si le signal d'entrée est à présent $x_3(t) = x_1(t) + x_2(t)$, alors le signal de sortie correspondant sera $y_3(t) = y_1(t) + y_2(t)$.

Une vue non-linéaire, toujours à temps-invariant, du problème de SHM : Le contexte de SHM peut être considéré comme stationnaire à un état d'endommagement donné, à savoir qu'un élément piézoélectrique émet un signal $x(t)$ qui se propage et interagit avec un dommage avant d'être capté par un autre élément piézo-électrique pour obtenir le signal $y(t)$. La différence est que maintenant, l'interaction avec le dommage est considérée comme *non-linéaire* tout en conservant l'aspect *invariant dans le temps*.

La relation de convolution donnée par l'Eq. (V.1) n'est maintenant plus valide et la relation liant l'entrée $x(t)$ et la sortie $y(t)$ est donnée de façon générale par :

$$y(t) = h[x(t)] \quad (\text{V.4})$$

où $h[\cdot]$ est un opérateur différentiel non-linéaire agissant sur le signal d'entrée $x(t)$. En conséquence, l'Eq. (V.2) n'est plus valide et il n'existe plus de relation simple liant les transformées de Fourier $X(f)$ et $Y(f)$. Cependant, l'hypothèse d'invariance dans le temps étant conservée, il est toujours possible d'écrire :

$$\forall \delta_t \in \mathbb{R} \quad y(t + \delta_t) = h[x(t + \delta_t)] \quad (\text{V.5})$$

Une autre conséquence de la perte de linéarité est que de façon générale, pour ce type de relation non-linéaire, les fréquences contenues dans le signal $y(t)$ ne sont plus les mêmes que celles contenues dans $x(t)$, les relations de proportionnalité ne s'appliquent plus, et enfin le principe de superposition n'est plus valide.

V.1.2 Des modèles non-linéaires à temps invariant

Différentes approches sont disponibles pour modéliser la dynamique d'une structure dans un contexte non-linéaire à temps invariant. Certaines approches sont basées sur une modélisation physique complète de la structure, tandis que d'autres fonctionnent sans aucune hypothèse physique. Parmi ces approches dites "*boîte noire*", certaines s'appuient sur un modèle de traitement du signal paramétrique, tandis que d'autres sont totalement non-paramétriques. Les modèles non-linéaires non-paramétriques sont les plus généraux et seront donc retenus ici. Un aperçu synthétique de cette classe de modèles est donnée dans cette section. Par souci de clarté, seul le cadre causal à entrée/sortie unique (SISO pour "*Single Input Single Output*") sera considéré ici.

V.1.2.1 Séries de Volterra

Les séries de Volterra [R|Has99] sont un outil mathématique qui permet d'exprimer la relation entre l'entrée $e(t)$ et la sortie $s(t)$ d'un système non linéaire sous la forme d'une série d'intégrales de convolution multiples :

$$s(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} v_n(\tau_1, \dots, \tau_n) e(t - \tau_1) \dots e(t - \tau_n) d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (\text{V.6})$$

Les fonctions $\{v_n(t_1, \dots, t_n)\}_{n \in \mathbb{N}^*}$ sont appelées noyaux de Volterra et caractérisent complètement le système étudié. Les modèles de Volterra peuvent être considérés comme une généralisation de l'opérateur de convolution utilisé pour les systèmes linéaires. Il a été démontré que

ces modèles représentent exactement n'importe quel système non linéaire "analytique" [R|Pal79] et approximativement n'importe quel système non linéaire avec une "mémoire évanescence" [R|BC85].

Malgré sa généralité, le principal inconvénient d'une représentation en série de Volterra d'un système non linéaire est que ses noyaux sont multidimensionnels. Par conséquent, les méthodes de mesure existantes ne peuvent estimer en pratique que les deux ou trois premiers termes de la série de Volterra [R|BTC83 ; R|BCS02 ; R|PK04 ; R|KE05]. Enfin, l'interprétation physique difficile des différents termes de la série de Volterra limite son utilisation [R|Voi+04].

V.1.2.2 Modèles "Sandwich"

Une autre approche pour la modélisation des systèmes non linéaires consiste à supposer que les systèmes étudiés ont une structure en blocs donnée. Suivant l'approche "sandwich" [R|Che95], un système non-linéaire peut être représenté par N branches parallèles composées de trois éléments en série : une partie non linéaire statique $P_n(\cdot)$ prise en sandwich entre deux parties linéaires $l_n^l(t)$ et $l_n^r(t)$. Il est possible de démontrer que tout système non linéaire "analytique" peut être approximé par un tel modèle [R|Pal79].

Pour estimer ces modèles, il faut faire des hypothèses relatives à la forme de la partie non linéaire statique et les deux parties linéaires inconnues peuvent être estimées à partir de mesures effectuées à différentes fréquences et amplitudes d'excitation [R|BR75]. Cela ne conduit qu'à une connaissance discrète de $L_n^l(f)$ et $L_n^r(f)$ dans le domaine fréquentiel et reste une tâche expérimentale de longue haleine [R|AB06]. Le principal inconvénient associé à cette classe de modèles est qu'il n'existe encore aucun moyen fiable de les estimer dans la pratique.

V.1.2.3 Modèles autorégressifs non-linéaires avec entrées exogènes

Un modèle NARX ("Nonlinear Auto-Regressive with exogenous inputs") d'une structure non-linéaire est basé sur sa représentation à temps discret, qui met en correspondance des données d'entrée échantillonnées e_i avec des données de sortie échantillonnées s_i . La forme fonctionnelle de ce modèle est donnée par [R|LB85b ; R|LB85a ; R|CB89] :

$$s_i = F(s_{i-1}, \dots, s_{i-n_s}, e_i, \dots, e_{i-n_e}) \quad (\text{V.7})$$

Le nom de cette classe de modèles vient du fait que la sortie actuelle s_i est régressée sur les dernières valeurs n_s de la sortie et sur les dernières valeurs n_e de l'entrée exogène e_i . La fonction $F(\cdot)$ peut en général être choisie arbitrairement. Il a été prouvé, sous des hypothèses très modérées, que tout processus d'entrée-sortie est représentable par un modèle NARX [R|LB85b ; R|LB85a]. Cette classe de modèles est donc très générale et englobe un large éventail de systèmes dynamiques non-linéaires.

Cependant, un choix pratique pour $F(\cdot)$ est de la considérer polynomial dans les variables d'intérêt, ce qui en fait un modèle paramétrique. Le principal inconvénient d'une représentation NARX d'un système non-linéaire est donc qu'elle doit être paramétrée pour être estimée en pratique, et qu'elle perd ainsi de sa généralité. De plus, son interprétation n'est pas simple car les différents coefficients apparaissant dans la fonction $F(\cdot)$ de l'Eq. (V.7) n'ont pas nécessairement de signification physique forte.

V.1.2.4 Modèles de Hammerstein en Parallèle (MHP)

Dans un MHP [R|Che95], chaque branche est composée d'un élément polynomial statique non linéaire suivi d'un élément linéaire $h_n(t)$ comme le montre la Fig. V.1. La relation entre

l'entrée $e(t)$ et la sortie $s(t)$ d'un tel système est alors donnée par Eq. (V.8) où “(*)” désigne l'opérateur de convolution.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N (h_n * e^n)(t) \quad (\text{V.8})$$

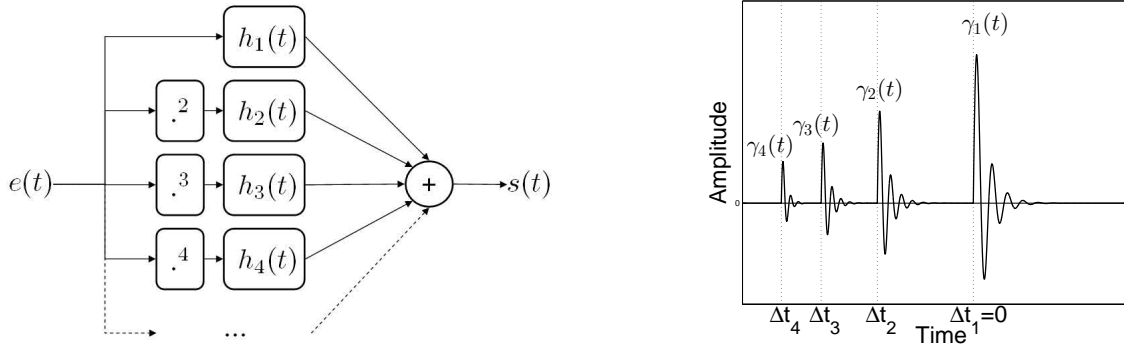


FIGURE V.1 – MHP (à gauche) et séparation temporelle après déconvolution (à droite, d’après [A|Réb+11b]).

Ainsi, tout MHP est entièrement représenté par ses noyaux $\{h_n(t)\}_{n \in \{1 \dots N\}}$, qui ne sont qu’un ensemble de filtres linéaires. Ce modèle est donc à la fois non paramétrique et facile à interpréter physiquement car chacun de ses noyaux est mono-dimensionnel et représente la manière dont la puissance n du signal d’entrée est filtrée, comme une extension de la notion d’harmoniques. Même si le modèle présenté dans la Fig. V.1 n’implique que des non-linéarités monomiales, il a été démontré qu’il possédait un bon degré de généralité et pouvait représenter une large classe de systèmes non-linéaires [R|Pea99].

Liens avec les séries de Volterra : Il est possible de montrer à partir des équations (V.6) et (V.8) que les MHPs correspondent à des modèles de Volterra ayant des noyaux diagonaux dans le domaine temporel, comme dans l’équation (V.9), où $\delta(t)$ représente la distribution de Dirac.

$$\forall n \in [1, N] \quad \forall (\tau_1, \dots, \tau_n) \in \mathbb{R}^n \quad v_n(\tau_1, \dots, \tau_n) = h_n(\tau_1) \delta(\tau_2 - \tau_1) \dots \delta(\tau_n - \tau_1) \quad (\text{V.9})$$

Ce modèle non linéaire est donc désigné dans la littérature également comme un modèle diagonal de Volterra [R|FBA01], mais aussi comme un modèle de Uryson [R|Gal75].

Lien avec les modèles “Sandwich” : Le lien avec les modèles “Sandwich” est direct. En effet, les MHP sont par construction une version simplifiée des modèles “Sandwich” avec :

$$\forall n \in [1, N] \quad l_n^l(t) = 1 \quad P_n(x) = x^n \quad \text{et} \quad l_n^r(t) = h_n(t) \quad (\text{V.10})$$

Les MHPs sont donc une sous-classe des modèles “Sandwich” avec seulement le filtre linéaire droit, et des non-linéarités statiques qui sont des élévations à la puissance n .

Lien avec les modèles NARX : En réécrivant l'Eq. (V.8) dans un cadre à temps discret avec $e(t_i) = e_i$, $s(t_i) = s_i$, et $h_n(t_i) = h_{n,i}$, et en restreignant la convolution à seulement $M + 1$ échantillons, l'Eq. (V.11) est obtenue.

$$s_i = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^M h_{n,m} e_{i-m}^n = F(e_{i-1}, \dots, e_{i-M}) \quad (\text{V.11})$$

Cette équation indique donc que les MHPs peuvent être interprétés comme une sous-classe des modèles NARX avec la fonction $F(\cdot)$ ayant une forme polynomiale prescrite.

V.1.3 Estimation de MHPs [A|Réb+11b ; A|Reb+16a ; A|RS18]

V.1.3.1 Estimation basée sur un sinus exponentiel glissant [A|Réb+11b]

L'estimation de chaque noyau $h_n(t)$ d'un MHP n'est pas une tâche aisée a priori. Une méthode d'estimation simple, découverte empiriquement par Farina [R|FBA01] et formalisée plus tard [A|Réb+11b ; R|Nov+10 ; R|NLS15], existe pourtant et est brièvement rappelée ici. Cette méthode basée sur un sinus exponentiel glissant est appelée ESS pour "*Exponential Sine Sweep*".

Sinus balayés exponentiels : Pour couvrir expérimentalement la gamme de fréquences sur laquelle le système étudié doit être identifié, des sinus dont la fréquence varie dans le temps sont couramment utilisés. Lorsque la fréquence instantanée du signal d'entrée $e(t) = \cos[\Phi(t)]$ augmente de façon exponentielle de f_1 à f_2 dans un intervalle de temps T , ce signal est appelé un sinus balayé exponentiel. Il est possible de montrer qu'en choisissant $T = (2m - \frac{1}{2}) \frac{\ln(f_2/f_1)}{2f_1}$ avec $m \in \mathbb{N}^*$, on obtient :

$$\forall k \in \mathbb{N}^* \quad \cos[k\phi(t)] = \cos[\phi(t + \Delta t_k)] \quad \text{avec} \quad \Delta t_k = \frac{T \ln(k)}{\ln(f_2/f_1)} \quad (\text{V.12})$$

L'équation (V.12) indique que pour tout balayage sinusoïdal exponentiel d'une durée T , la multiplication de la phase par un facteur k produit le même signal, avancé dans le temps de Δt_k . Si nous présentons ce signal à l'entrée d'un MHP, la sortie du bloc non linéaire de la n^{ime} branche sera réécrite à l'aide de polynômes de Chebyshev comme suit :

$$\forall n \in \{1, N\} \quad e^n(t) = \cos^n[\Phi(t)] = K + \sum_{k=1}^n c_{n,k} e(t + \Delta t_k) \quad (\text{V.13})$$

où $K \in \mathbb{R}$ est une constante et $c_{n,k}$ les coefficients des polynômes de Chebyshev.

Recouvrement des noyaux dans le domaine temporel : Nous obtenons alors en combinant Eq. (V.13) et Eq. (V.8) la relation suivante :

$$s(t) = \sum_{n=1}^N (\gamma_n * e)(t + \Delta t_n) \quad \text{avec} \quad \gamma_n(t) = \sum_{k=1}^n c_{k,n} h_k(t) \quad (\text{V.14})$$

où $\gamma_n(t)$ correspond à la contribution des différents noyaux à l'harmonique n . Afin d'identifier séparément chaque noyau $h_n(t)$ du MHP, un signal $y(t)$ fonctionnant comme l'inverse du signal d'entrée $e(t)$ dans le sens de la convolution peut alors être construit comme indiqué dans [A|Réb+11b]. Après avoir convolué la sortie du MHP $s(t)$ donnée dans l'Eq. (V.14) avec $y(t)$, on obtient l'Eq. (V.15) également illustré par la Fig. (V.1) :

$$\gamma(t) = (y * s)(t) = \sum_{n=1}^N \gamma_n(t + \Delta t_n) \quad (\text{V.15})$$

Étant donné que $\Delta t_n \propto \ln(n)$ et $f_2 > f_1$, plus l'ordre de non-linéarité n est élevé, plus le $\gamma_n(t)$ correspondant est avancé. Ainsi, si T est choisi suffisamment long, les différents $\gamma_n(t)$ ne se chevauchent pas dans le temps et peuvent être séparés en les fenêtrant simplement dans le domaine temporel. En utilisant l'équation (V.16), la famille $\{h_n(t)\}_{n \in [1, N]}$ des noyaux du MHP étudié peut alors être entièrement extraite (les détails du calcul de la matrice \mathbf{C} sont fournis dans [A|Réb+11b]) :

$$[h_1(t) \dots h_N(t)]^T = \mathbf{C} [\gamma_1(t) \dots \gamma_N(t)]^T \quad (\text{V.16})$$

V.1.3.2 Estimation par moindres carrés régularisés [A|RS18]

Une façon alternative et peut être plus intuitive permettant d'estimer les MHP repose sur le fait que ce problème d'estimation est linéaire dans les paramètres recherchés et donc que les algorithmes classiques d'estimation par les moindres carrés (LS pour “*Least-Squares*”) peuvent être utilisés [R|GSM07; R|Sch+10; R|SPR11].

Formulation linéaire des moindres carrés : Le problème de l'identification d'un MHP peut être formulé comme un problème linéaire dans les paramètres lorsque des représentations FIR, ou d'autres représentations LTI, sont utilisées pour modéliser les filtres linéaires $\{h_n[k]\}_{n \in \{1 \dots N\}}$ [R|GSM07]. En effet, lorsque l'on développe à temps discret l'Eq. (V.14), on obtient :

$$y[k] = h_0 + \sum_{n=1}^N \sum_{\tau=0}^{n_h} h_n[\tau] u^n[k - \tau], \quad (\text{V.17})$$

où n_h est la longueur de la réponse impulsionnelle du système testé. L'équation (V.17) peut être écrite en notation matricielle comme suit :

$$y = K\theta, \quad (\text{V.18})$$

où y est le vecteur contenant toutes les instances temporelles mesurées de $y[k]$, K est la matrice du régresseur dépendant du signal d'entrée appliqué, et θ est le vecteur de paramètres contenant les réponses impulsionnelles à estimer. L'estimation par les moindres carrés des paramètres $\hat{\theta}_{ls}$ peut être alors obtenue par :

$$\hat{\theta}_{ls} = (K^T K)^{-1} K^T y. \quad (\text{V.19})$$

Introduction de connaissances préalables grâce à la régularisation : L'approche précédente ne prend pas en compte les connaissances préalables disponibles sur le système. Par exemple, on sait dans de nombreux cas que la réponse impulsionnelle du système est à décroissance exponentielle et qu'elle est relativement lisse. Ce type de connaissances préalables peut être imposé à l'aide d'une approche linéaire régularisée des moindres carrés. Cette approche a été développée et appliquée avec succès dans le cas LTI [R|Pil+14; R|MSS17], et a déjà été étendue à l'identification des systèmes de Hammerstein [R|RBH15]. L'approche des moindres carrés régularisés introduit un terme supplémentaire dans la fonction de coût qui pénalise les paramètres de manière à

obtenir un lissage et une décroissance exponentielle. La fonction de coût régularisée est donnée par :

$$V_r = \|y - K\theta\|^2 + \theta^T R\theta. \quad (\text{V.20})$$

La matrice de régularisation R est implémentée ici comme une matrice bloc diagonale à noyau [R|Pil+14; R|MSS17]. Cette approche de régularisation repose sur deux hyper-paramètres qui ajustent respectivement le lissage et la décroissance, ainsi que l'importance de la connaissance préalable dans la fonction de coût. Les paramètres estimés $\hat{\theta}_{reg}$ sont maintenant obtenus comme suit :

$$\hat{\theta}_{reg} = (K^T K + R)^{-1} K^T y. \quad (\text{V.21})$$

Comparaison entre les méthodes ESS et LS : Ces deux catégories de méthodes (LS et ESS) reposent sur des fondements mathématiques radicalement différents, mais ont été développées pour résoudre le même problème, à savoir l'estimation de MHPs. Une méthodologie a donc été proposée pour les comparer en ce qui concerne leur précision, leur coût de calcul, et leur robustesse au bruit. Elle permet de conclure que :

1. Les méthodes ESS sont beaucoup moins exigeantes que les LS en termes de ressources informatiques et nécessitent moins de paramètres à régler que les méthodes LS.
2. Les méthodes LS fournissent des résultats de meilleure qualité, semblent plus robustes au bruit, et sont moins restrictives en termes de signaux d'entrée que celles ESS.

V.1.3.3 Utilisation de sinus balayés arbitraires [C|RRC17]

Un problème général lors de l'estimation d'un modèle est lié au rejet des incertitudes causées par la présence de bruit. Une façon classique de limiter le bruit consiste à répéter plusieurs fois le même ESS et à réaliser ensuite une moyenne temporelle [A|Reb+16a]. Une façon alternative d'éliminer le bruit consiste, indépendamment du signal d'entrée, à segmenter le signal de sortie en plusieurs *tranches* sur lesquelles le bruit de sortie est supposé être distribué de manière indépendante, comme dans la méthode classique de Welch [R|Wel67]. Cette méthode fournit une estimation de la densité spectrale de puissance croisée de deux signaux par le biais d'un estimateur sans biais qui appartient à la classe des périodogrammes modifiés. Supposons que les signaux $x[n]$ et $y[n]$ soient des réalisations de longueur N d'un processus ergodique et stationnaire. La densité spectrale de puissance croisée (CPSD pour "*Cross Power Spectral Density*") de ces signaux peut être estimée en tirant parti de l'ergodicité et de la stationnarité et en se basant sur une moyenne temporelle. L'idée est de diviser les signaux x et y en P segments de longueur M et d'estimer la CPSD de chaque segment par le biais du périodogramme avant d'en faire la moyenne [R|Wel67; R|Akc12]. Le principal avantage de cette approche est que l'erreur commise sera relative à la puissance du bruit considérée étant de longueur M au lieu d'être de longueur N . Cependant, une certaine précision spectrale sera nécessairement perdue en utilisant des fenêtres plus courtes que le signal entier.

Considérons un MHP défini par l'Eq. (V.8) et un signal d'entrée $\sin[\phi(t)]$ défini comme étant un sinus balayé arbitraire (ASS pour "*Arbitrary Sinusoidal Sweep*") avec ϕ une fonction strictement croissante du temps. A chaque instant, une seule fréquence est jouée par l'entrée, impliquant une sortie composée d'un ensemble discret de fréquences harmoniques. Ceci est illustré par la Fig. V.2 qui montre, pour une fréquence donnée de l'entrée, les fréquences contenues dans la sortie du MHP lorsqu'un ASS constitué d'un sinus balayé linéaire est considéré comme une entrée.

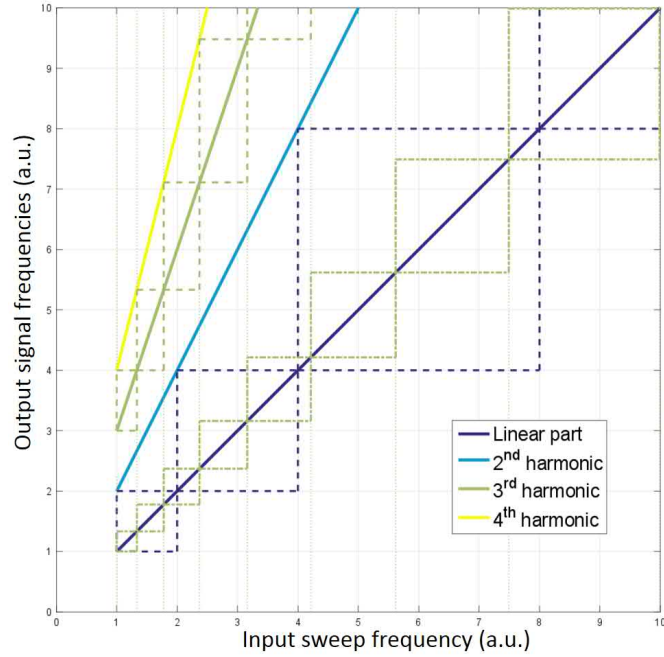


FIGURE V.2 – Fréquence de sortie en fonction des fréquences d’entrée pour un MHP d’ordre 4 et exemples de choix de fenêtrage (sans chevauchement) : partie linéaire [optimale] (lignes pointillées bleues), troisième harmonique [optimale] (lignes pointillées vertes), partie linéaire [sous-optimale] (ligne pointillée verte) (d’après [C|RRC17]).

L’idée sous-jacente à la méthode proposée ici est de pouvoir estimer les noyaux du MHP en se libérant de toutes les contraintes sur le balayage *exponentiel* imposé par la méthode ESS. Il est alors nécessaire de se concentrer sur les différentes harmoniques une par une et d’essayer d’obtenir des informations les concernant, et exclusivement les concernant, dans une fenêtre temporelle donnée. Si l’harmonique étudiée est l’harmonique n , et si les fenêtres sélectionnées commencent avec une fréquence f_{start} , alors le moment où cette fenêtre temporelle doit s’arrêter pour ne contenir que des informations relatives à l’harmonique n entre nf_{start} et nf_{stop} est le moment où la fréquence d’entrée est telle que $f_{\text{stop}} = (n + 1)/n \times f_{\text{start}}$. Ce processus est illustré à la Fig. V.2 qui montre deux exemples de choix optimal de fenêtrage lorsque l’on se concentre sur la partie linéaire (lignes pointillées bleues) et lorsque l’on se concentre sur la troisième harmonique (lignes pointillées vertes). Il est également montré comment ce choix de fenêtrage temporel optimal lorsque l’on se concentre sur la troisième harmonique peut être appliqué à la partie linéaire dans la ligne pointillée verte et devenir ainsi sous-optimal par rapport à la partie linéaire. Plusieurs fenêtres peuvent être construites de cette façon pour une harmonique n donnée. La fonction $G_n(f)$ correspondante peut donc être directement estimée en utilisant la méthode de Welch sur les fenêtres temporelles sélectionnées et en utilisant l’harmonique n comme entrée (variant entre nf_{start} et nf_{stop} durant ce laps de temps) au lieu de l’entrée réelle. Il est enfin possible de récupérer les noyaux $H_n(f)$ du MHP en inversant la combinaison linéaire comme dans l’équation (V.16). La seule condition à satisfaire ici est liée à la fonction $\phi(t)$ intervenant dans l’ASS qui doit être connue explicitement afin de déterminer la largeur de bande de fréquence de chaque segment et donc les longueurs de fenêtres qui conviennent. En utilisant cette approche toutes les autres contraintes sur le balayage sont ainsi relâchées.

V.1.3.4 Détermination automatique du nombre de noyaux à extraire [A|Reb+16a]

Une procédure autonome a de plus été proposée pour déterminer le nombre effectif de noyaux qui peuvent en pratique être distingués du bruit [A|Reb+16a]. Considérons $\gamma[k]$, une version discrète de $\gamma(t)$ tel que défini dans l'équation (V.15) dans un court intervalle de temps \mathcal{I}_n centré autour de l'occurrence attendue de la n -ième contribution harmonique, c'est-à-dire $k \in \mathcal{I}_n = [k_{n,1}, \dots, k_{n,2}]$ avec $\Delta_n \leq k_{n,1}$ et $k_{n,2} < \Delta_{n-1}$. Considérons $n[k]$ comme un enregistrement de bruit dans un court intervalle de temps qui peut pratiquement être extrait de $\gamma[k]$. La question est de savoir si $\gamma[k]$ dépasse de manière significative le bruit de fond $n[k]$ dans cet intervalle – et provient donc d'une n -ième non-linéarité – ou s'il s'agit principalement de bruit. Cela correspond à deux hypothèses alternatives :

- H0 : $\gamma[k], t \in \mathcal{I}_n$ est uniquement du bruit
- H1 : $\gamma[k], t \in \mathcal{I}_n$ contient une contribution harmonique d'ordre n^{th} qui est $\gamma_n[k]$.

Une estimation de la variance dans l'intervalle \mathcal{I}_n sous H0 est retournée par :

$$\hat{\sigma}_{\mathcal{I}_n|H0}^2 = \frac{1}{k_{n,2} - k_{n,1} + 1} \sum_{k=k_{n,1}}^{k_{n,2}} n^2[k] \quad (\text{V.22})$$

Par conséquent, l'hypothèse H0 doit être rejetée si la "variance" actuelle :

$$\hat{\sigma}_{\mathcal{I}_n}^2 = \frac{1}{k_{n,2} - k_{n,1} + 1} \sum_{k=k_{n,1}}^{k_{n,2}} \gamma^2[k] \quad (\text{V.23})$$

est statistiquement supérieur à $\hat{\sigma}_{\mathcal{I}_n|H0}^2$. Ceci peut être facilement formalisé par un F -test pour l'égalité de deux variances : H0 est rejeté si le rapport $\hat{\sigma}_{\mathcal{I}_n}^2 / \hat{\sigma}_{\mathcal{I}_n|H0}^2$ est supérieur à $F(\alpha)_{K-1, K-1}$, la valeur critique de la distribution F avec un niveau de signification de α . K est ici défini comme le nombre d'échantillons contenus dans l'intervalle de temps $\mathcal{I}_n = [k_{n,1}, \dots, k_{n,2}]$. La contribution harmonique d'ordre le plus élevé $\gamma_N[k]$ jugée significative à l'issue de cette procédure fournit alors l'ordre du modèle N . Il est important de noter que l'on suppose ici des distributions gaussiennes, ce qui peut ne pas être exactement le cas dans la pratique.

V.2 Vers l'exploitation des non-linéarités en SHM

Les MHPs constituent donc un outil pratique répondant potentiellement aux exigences du SHM basé sur des approches non-linéaires. Cette Section présente ainsi, après un bref état de l'art relatif à l'utilisation des non-linéarités dans le SHM présenté en Section V.2.1, un cadre assez général basé sur les séries de Green Volterra, permettant la simulation rapide de la dynamique non-linéaire de structures endommagées en Section V.2.2. Enfin, la façon dont ils ont été exploités dans des contextes aéronautiques et de génie civil est décrite dans les Sections V.2.3 et V.2.4.

V.2.1 État de l'art de l'utilisation des non-linéarités pour le SHM

Dans l'hypothèse où, dans de nombreux cas, les dommages provoquent une réponse dynamique non linéaire de la structure considérée [R|Ker+06 ; R|NK17] et où le processus SHM peut être considérablement amélioré si l'on tire parti de ces effets non linéaires, plusieurs stratégies de surveillance des dommages ont été proposées dans la littérature [R|Far+07 ; R|Wor+08 ; R|NT09]. En partant d'un cadre linéaire, certains auteurs [R|JA02 ; R|HA07 ; R|Yan+19] ont montré qu'un dommage non linéaire aura un impact sur les fonctions de transmissibilité (*i.e.*

le rapport dans le domaine des fréquences entre deux sorties différentes du système) et ils ont utilisé ces informations pour détecter et localiser le dommage. En étendant la notion de fonctions de transmissibilité aux systèmes non linéaires qui peuvent être décrits par des séries de Volterra, Lang et. al [R|LP08 ; R|Lan+11] ont été en mesure de quantifier la diminution de la linéarité générée par un dommage non linéaire et donc de le détecter et de le localiser efficacement. Cependant, comme ces approches se concentrent sur la perte de linéarité, elles ne semblent pas pouvoir traiter les systèmes qui sont non linéaires dans leur état sain, un fait qui est assez courant dans la vie réelle. Pour pallier cet inconvénient, plusieurs auteurs ont tenté d'adapter un modèle non linéaire (tel que la série de Volterra [R|Che+17]) à la structure non linéaire étudiée et de comparer les sorties réelles et prédites, ou directement les coefficients du modèle, dans différentes conditions d'endommagement [R|AF02a ; R|AF02b ; R|Bor+09 ; R|BFP10 ; R|SLD13 ; R|Che+15 ; R|SST17 ; A|RHM14 ; A|Ghr+19b]. Alors, ils ont pu détecter numériquement et expérimentalement un dommage non linéaire même dans une structure initialement non linéaire, mais sans tenir compte de la variabilité intrinsèque causée par l'environnement et le bruit expérimental. Pour résoudre ce problème, des versions stochastiques [R|VDC19 ; R|Vil+19 ; R|Vil+20] et adaptatives [R|PR18 ; R|PR19] des séries de Volterra ont été proposées à des fins de surveillance des dommages.

En conclusion, il n'existe pas encore d'approche de SHM basée sur une approche non-linéaire qui soit réellement convaincante et qui ait fait ses preuves. Il est donc intéressant dans ce contexte d'explorer des méthodologies alternatives basées sur les MHPs permettant de mieux appréhender les opportunités offertes par les non-linéarités dans le contexte du SHM, en particulier en ce qui concerne les tâches de classification et de quantification.

V.2.2 Simulation des interactions “ondes/ dommage” non-linéaires [A|Bou+23]

Les méthodes mentionnées précédemment sont très encourageantes, mais elles sont toutes basées sur une approche à domaine unique (temps ou fréquence) du problème de surveillance des dommages non linéaires et ne prennent pas en compte sa dimension spatiale. L'ajout de la dimension spatiale aux approches mentionnées ci-dessus, et plus précisément aux séries de Volterra, pourrait cependant permettre de :

1. Distinguer naturellement les non-linéarités dues à la propagation spatiale des ondes (non-linéarités matérielles ou géométriques) de celles liées au dommage,
2. Faire face facilement à la complexité de calcul associée aux modèles non-linéaires spatio-temporels,
3. Établir un lien physique plus étroit entre les signaux enregistrés par les ondes de Lamb et l'état réel d'endommagement.

L'idée est donc ici de fournir un cadre spatio-temporel avec une représentation semi-analytique plus riche des dommages non linéaires et de la propagation non linéaire appliquée à la propagation des ondes de Lamb dans les structures complexes aéronautiques composites ou en aluminium. Pour prendre correctement en compte la dépendance spatiale du problème étudié, les séries de Green-Volterra [R|LQY09 ; R|RH14], qui sont une extension du formalisme de Volterra incorporant la notion de fonction de Green, seront utilisées. En outre, la méthode présentée dans [R|RH14] qui permet de calculer facilement les noyaux de Green-Volterra pour une équation aux dérivées partielles non linéaire inhomogène où les non-linéarités sont mises sous une forme polynomiale générale est utilisée. En plus du travail original sur ce sujet [R|LQY09 ; R|RH14], l'inclusion de conditions aux limites non linéaires et la dérivation de solutions sous forme d'ondes se propageant ont été réalisées pour atteindre cet objectif.

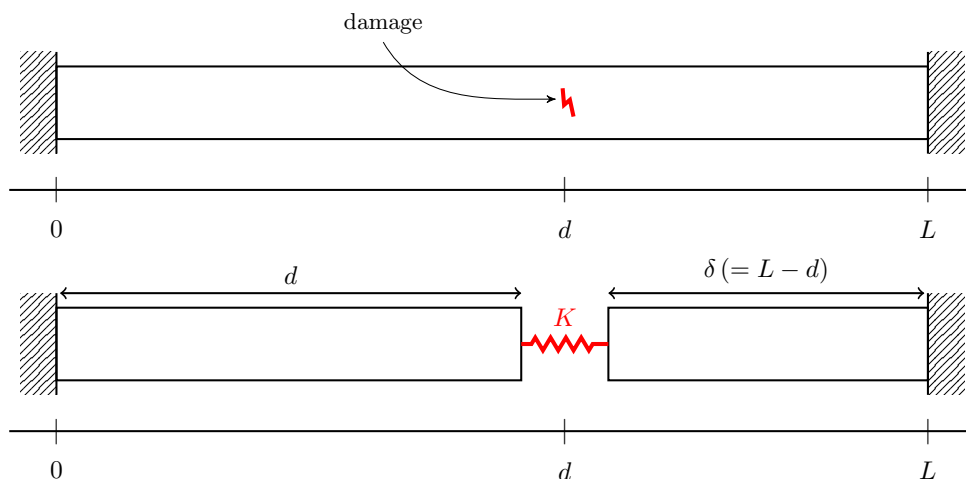


FIGURE V.3 – Modèle de poutre considéré ici : en haut une poutre endommagée, en bas, la modélisation simplifiée retenue.

Le formalisme de Green-Volterra a donc été utilisé pour trouver des solutions semi-analytiques spatio-temporelles décrivant la propagation non linéaire des ondes longitudinales et l'interaction non linéaire des dommages dans une poutre endommagée comme l'illustre la Figure V.3. Tout d'abord, le modèle de propagation des ondes longitudinales utilisé pour la poutre endommagée est représenté via le formalisme de Green-Volterra. Puis, deux solutions spatio-temporelles pour le problème de la poutre endommagée, l'une semi-analytique et l'autre utilisant une décomposition modale, sont proposées. Des simulations sont ensuite réalisées, et l'approche proposée est comparée à une méthode basée sur des éléments finis. Les résultats présentés en Figure V.4 montrent que les solutions proposées sont aussi précises que les simulations par éléments finis dans le cas considéré tout en étant bien moins gourmande en ressources de calcul. Il découle également de cette approche, une méthode d'estimation de la caractéristique de rigidité des dommages, qui correspond à la fois à la classification des dommages mais aussi aux étapes de quantification de la taille des dommages du processus SHM. Ce formalisme constitue ainsi une base intéressante pour la simulation efficace de nombreux scénarii de validation d'algorithmes de SHM exploitant les non-linéarités dynamiques.

V.2.3 Applications des MHPs à l'aéronautique [A|RHM14 ; A|Ghr+19b]

Les MHPs ont été mis en œuvre à des fins de SHM sur des structures aéronautiques réalisées en matériaux composites. Cette section présente un exemple de détection de dommage ainsi qu'un exemple de classification de dommages basée sur les MHPs dans ce contexte.

V.2.3.1 Détection de dommages basée sur les MHPs [A|RHM14]

L'application concerne ici des panneaux composites utilisés pour construire le FC. La procédure SHM proposée repose sur l'idée que dans une structure composite donnée, à mesure que les dommages deviennent plus graves, ils devraient contribuer de plus en plus à la partie non-linéaire de la réponse dynamique de la structure étudiée [A|RHM14]. En reformulant l'Eq. (V.8) qui exprime la sortie du MHP $s(t)$ en tant que fonction du signal d'entrée $e(t)$ et des noyaux $\{h_n(t)\}_{n \in [1, N]}$, il est possible de décomposer la sortie du MHP comme suit :

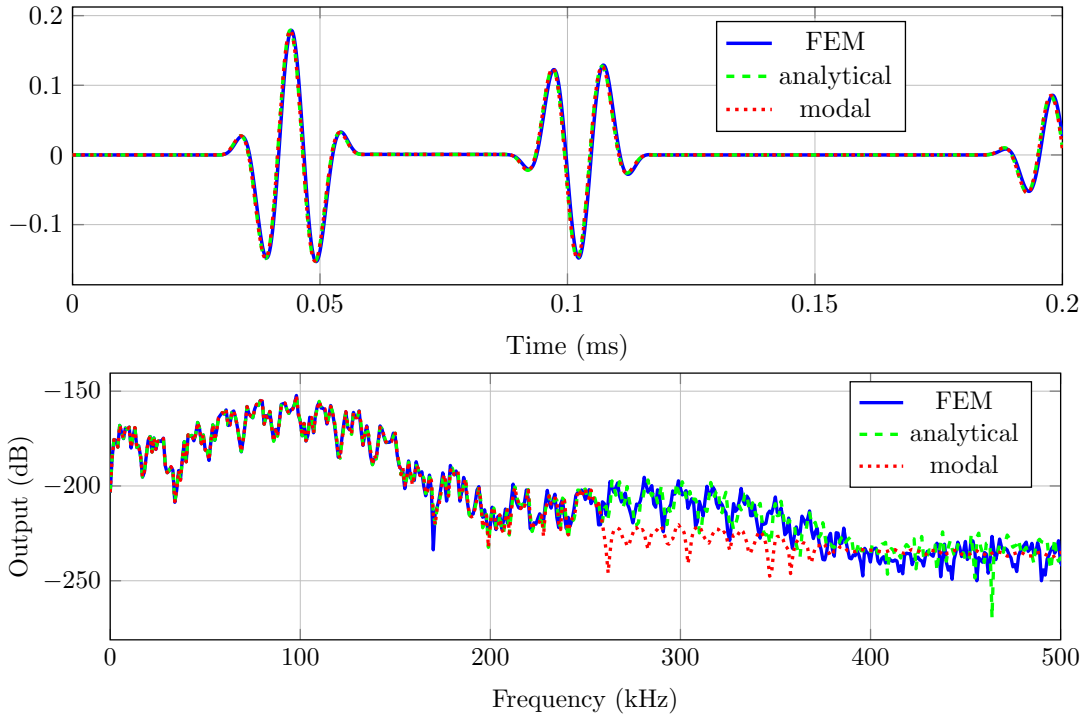


FIGURE V.4 – Comparaison entre les résultats obtenus par éléments finis et ceux produits par les séries de Green Volterra (approches analytiques et modales).

$$s(t) = (h_1 * e)(t) + \sum_{n=2}^N (h_n * e^n)(t) = s^L(t) + s^{NL}(t) \quad (\text{V.24})$$

où $s^L(t) = (h_1 * e)(t)$ représente la partie linéaire et $s^{NL}(t) = \sum_{n=2}^N (h_n * e^n)(t)$ la partie non-linéaire du signal de sortie $s(t)$.

Comme le signal d'entrée $e(t)$ est connu et que les noyaux $\{h_n(t)\}_{n \in [1, N]}$ ont été estimés précédemment, ces parties linéaires et non linéaires du signal de sortie sont alors facilement évaluées et peuvent être utilisées pour construire des indices d'endommagement (DI). En désignant par $S^L(f)$ et $S^{NL}(f)$ la transformée de Fourier de $s^L(t)$ et $s^{NL}(t)$, nous proposons un indice d'endommagement défini comme suit :

$$\text{DI}_1 = \frac{\int_{f_1}^{f_2} |S^{NL}(f)|^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} |S^L(f)|^2 df} \quad (\text{V.25})$$

où f_1 et f_2 correspondent aux fréquences de départ et d'arrêt du balayage sinusoïdal exponentiel. Dans une structure composite donnée, à mesure que le dommage non linéaire (impact, délaminage ou fissure) s'aggrave, on s'attend à ce qu'il contribue de plus en plus à la partie non linéaire de la sortie $s^{NL}(t)$. Par conséquent, DI_1 devrait être sensible à la présence du dommage et à son étendue.

Les deux plaques composites utilisées sont équipées de dix plaques piézo-électriques (voir Fig. V.5 à gauche). Dans une plaque en tout point similaire, un dommage d'impact calibré d'un

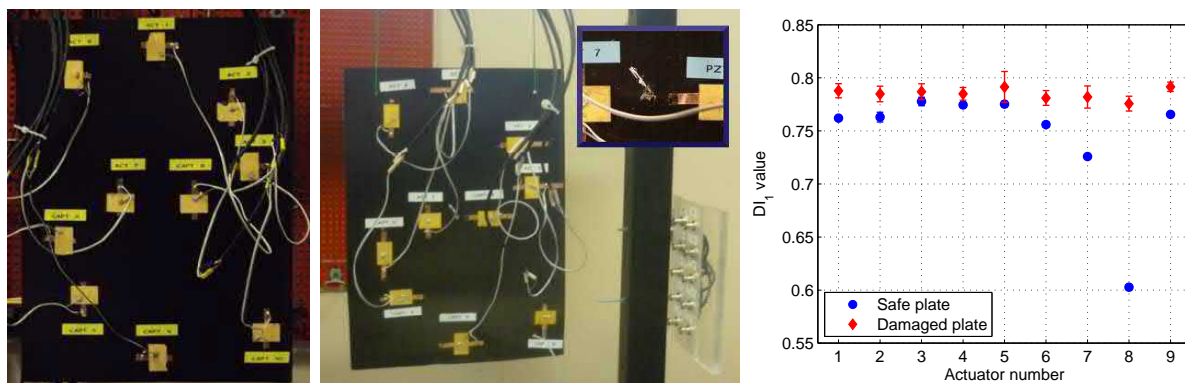


FIGURE V.5 – Plaques composites saines (à gauche) et plaques composites endommagées avec un zoom sur l’endommagement dû à l’impact (au milieu). Moyennes et écarts types des valeurs DI_1 pour les différents actionneurs (à droite).

diamètre de 5 mm a été produit en projetant au centre de la plaque une bille d’acier à une vitesse élevée et contrôlée. Cette plaque composite sera utilisée comme exemple de plaque endommagée. Une base de données a été construite en collectant dans chaque état (sain ou endommagé) les signaux pour les $9 \times 8 = 72$ chemins existant entre toutes les paires d’éléments PZT. Les noyaux ont été estimés pour chaque chemin jusqu’à un ordre de non-linéarité $N = 8$.

Les valeurs DI_1 ont été calculées pour chacune des 72 trajectoires mesurées sur les plaques saines et endommagées. Par souci de concision, les valeurs DI_1 sont présentées ici de manière synthétique, actionneur par actionneur. La Figure V.5 (à droite) représente la moyenne et l’écart type des valeurs DI_1 calculées pour toutes les trajectoires à partir de chacun des neuf éléments PZT utilisés comme actionneurs pour les états sain et endommagé. Cette figure montre clairement que l’endommagement introduit dans la plaque génère des non-linéarités et que le DI_1 tel que défini dans l’Eq. (V.25) est sensible à la présence de cet endommagement. En effet, pour tous les actionneurs, les valeurs moyennes de DI_1 calculées pour toutes les trajectoires partant d’un actionneur donné, sont plus élevées pour l’état endommagé que pour l’état sain. Cette méthode basée sur une vision non-linéaire du SHM permet donc de réaliser la tâche de détection sur cet exemple aéronautique.

V.2.3.2 Classification et quantification de dommages basées sur les MHPs [A|Ghr+19b]

L’application suivante s’intéresse plus spécifiquement à la classification et à la quantification de dommages par l’intermédiaire de MHPs identifiés sur des structures aéronautiques réalisées en matériaux composites. L’idée est ici d’aborder la classification des types de dommages et la quantification de leur gravité comme des problèmes de classification (au sens de l’apprentissage machine) où chaque classe correspond à un type de dommage donné ou à une certaine étendue de dommages. Une machine à vecteurs de support (SVM pour “*Support Vector Machine*”) est utilisée pour effectuer une tâche de classification multi-classes. Classiquement, des caractéristiques basées sur le signal (SBF pour “*Signal Based Features*”, correspondant aussi aux indicateurs d’endommagements ou DI) sont utilisées pour l’apprentissage des SVM lorsque l’on aborde le SHM du point de vue de l’apprentissage automatique (voir en Section IV.4 par exemple). Ici, en partant de l’hypothèse qu’une structure endommagée présente une réponse non linéaire, on étudie si l’utilisation de caractéristiques basées sur un modèle non linéaire (NMBF

pour “*Nonlinear Model Based Features*”) augmente les performances des tâches d'intérêt. Les NMBFs sont calculées sur la base de MHPs qui sont identifiés à l'aide d'un signal ESS. Une étude de la sensibilité des performances de classification au bruit contenu dans les signaux de sortie est également réalisée. La réduction des dimensions du vecteur de caractéristiques à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP) est également effectuée afin de déterminer si elle permet de renforcer le processus de classification/quantification proposé. Le processus de SHM proposé ici est schématisé à la Figure V.6

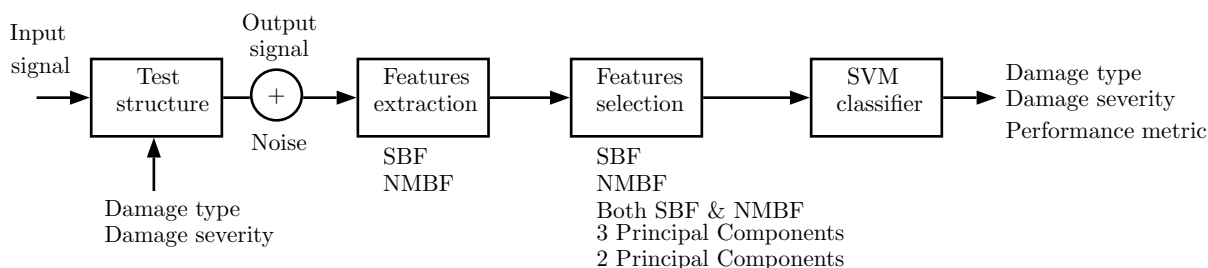


FIGURE V.6 – Vue d'ensemble du processus de SHM basé sur les MHPs proposé.

Les structures testées sont des plaques de matériaux composites en CFRP équipées d'éléments piézoélectriques et présentant différents degrés de délamination. Les dommages sont introduits dans les échantillons d'une manière calibrée par choc laser symétrique (voir Section II.2.3.2). Quatre coupons d'essai en sont pris en compte. Le premier est conservé dans un état sain. Le second a été soumis à un impact laser symétrique avec un délai de 0 ns et à 100% de l'énergie maximale des deux faisceaux laser [A|Ghr+17a]. Cela a entraîné une délamination d'environ 7 mm de diamètre qui s'est produite à une profondeur de 1,1 mm. Le troisième coupon a été soumis à deux impacts laser symétriques et contigus qui ont entraîné une délamination de 14 mm de diamètre, tandis que le quatrième coupon a subi trois impacts contigus qui ont entraîné une délamination d'environ 21 mm de diamètre.

L'algorithme d'apprentissage par SVM sépare un ensemble donné de données d'apprentissage binaires étiquetées à l'aide d'un hyperplan qui en est le plus éloigné possible (appelé hyperplan de marge maximale). Dans les cas où une séparation linéaire n'est pas possible, ils peuvent fonctionner en combinaison avec la technique des “*noyaux*”, qui réalise automatiquement un mappage non linéaire vers un espace de caractéristiques. L'hyperplan trouvé par le SVM dans l'espace des caractéristiques correspond à une limite de décision non-linéaire dans l'espace d'entrée. Pour étendre les SVM aux scénarii multi-classes, une méthode conventionnelle typique consiste à décomposer un problème multi-classes en une série de problèmes à deux classes. On peut distinguer deux types d'implémentation :

- Approche “*Un contre tous*” (OAA pour “*One Against All*”)
- Approche “*Un contre un*” (OAO pour “*One Against One*”)

Les approches OAO et OAA sont deux stratégies populaires pour les SVM multi-classes. L'OAO construit un SVM pour chaque paire de classes, tandis que l'OAA”consiste à construire un SVM par classe, entraîné à distinguer les échantillons d'une seule classe des échantillons de toutes les autres classes.

Les deux principales questions abordées ici consistent à déterminer si l'utilisation de NLMBF augmente les performances de classification et si la réduction de la dimension du vecteur de caractéristiques à l'aide de l'ACP permet de renforcer l'approche de classification/quantification proposée. Plusieurs scénarii de caractéristiques d'entrée sont donc envisagés en fonction des

caractéristiques à sélectionner pour alimenter et entraîner l'algorithme SVM :

- **Scénario 1** : Seuls les SBF sont utilisés pour entraîner l'algorithme SVM
- **Scénario 2** : Seuls les NMBF sont utilisés pour entraîner l'algorithme SVM
- **Scénario 3** : Le SBF et le NMBF sont tous deux utilisés pour entraîner l'algorithme SVM
- **Scénario 4** : L'ACP est réalisée à la fois sur le SBF et le NMBF et seules 2 composantes principales sont utilisées pour l'apprentissage de l'algorithme SVM.
- **Scénario 5** : L'ACP est réalisée à la fois sur le SBF et le NMBF et seules 3 composantes principales sont utilisées pour entraîner l'algorithme SVM.

Les résultats obtenus sont présentés en Figure V.7. Ces résultats montrent qu'en introduisant le NMBF, les performances de classification sont améliorées. En outre, l'ACP permet d'obtenir des taux de reconnaissance élevés tout en réduisant la dimension du vecteur de caractéristiques. L'utilisation des MHPs dans ce contexte est donc a priori très intéressante.

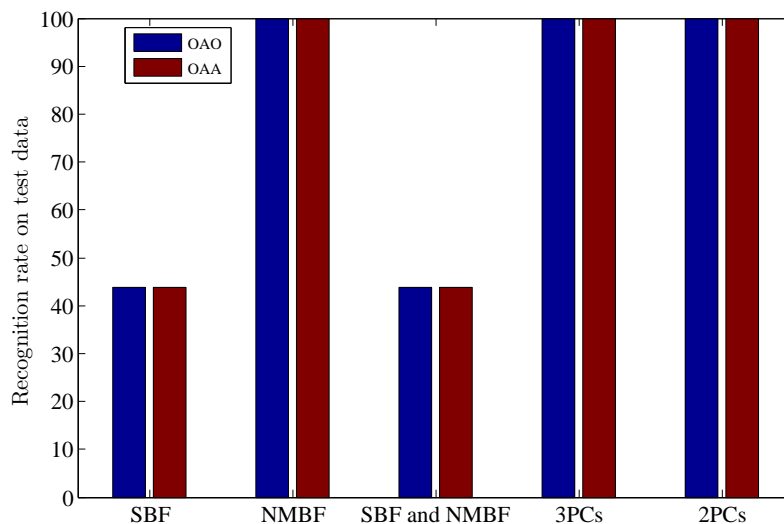


FIGURE V.7 – Comparaison des résultats de quantifications obtenus en utilisant les approches SBF et NMBF.

V.2.4 Application des MHPs au génie civil [C|Reb+14a; C|BRM15]

Les objets d'étude sont ici des commutateurs électriques à haute tension, et plus particulièrement sur les isolateurs en céramique, voir Fig. V.9 à gauche, qui sont des composants cruciaux pour la restauration du réseau électrique en cas de tremblement de terre. Un exemple de classification des dommages via leurs non-linéarités sur un modèle numérique simple est d'abord présenté, puis un processus de quantification de la taille des dommages validé lors d'une campagne expérimentale est présenté.

V.2.4.1 Classification du type d'endommagement par MHPs [C|BRM15]

Cette section présente des résultats concernant l'utilisation d'indices de dommages non-linéaires pour l'étape de classification sur un modèle numérique très simplifié de l'isolateur en céramique. Les approches existantes de classification des dommages au moyen d'ondes ne

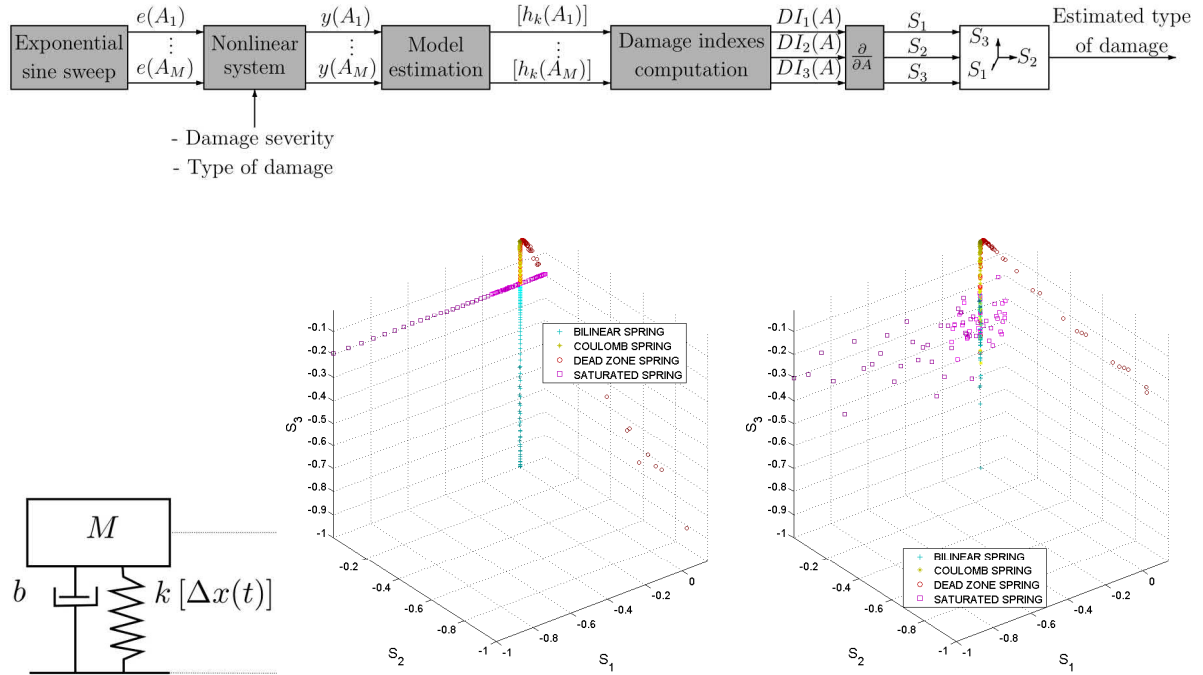


FIGURE V.8 – Vue d’ensemble de la méthode de classification proposée (en haut). Système ressort-masse-amortisseur simulé (en bas, à gauche). Évolution des pentes moyennes des indices de dommages pour plusieurs sévérités de dommages, pour les différents types de dommages non linéaires considérés, et pour différents RSB [en bas, au milieu : sans bruit et en bas, à droite : avec bruit].

modélisent en général que les signaux reçus à la position du capteur et non le chemin suivi par le signal de l’actionneur au capteur [R|LO10; R|Cha+09; R|Zho+09; R|DCS10]. De plus, elles ne s’appuient que sur des outils de traitement linéaire du signal et sont donc incapables de tirer un bénéfice de la partie non linéaire de l’information provenant de l’avarie.

Nous avons donc cherché à exploiter une représentation non linéaire plus riche du chemin suivi par le signal entre l’actionneur et le capteur à l’intérieur de la structure pour développer et valider numériquement une solution originale et simple pour l’étape de classification. Cette approche (voir la Fig. V.8 [en haut] pour une vue d’ensemble de la procédure) est basée sur une représentation en MHP du trajet actionneur-capteur. Sur la base des modèles estimés à différentes amplitudes d’entrée, trois indices de dommages dépendant de l’amplitude sont construits : le premier surveille le déplacement de la fréquence de résonance de la structure, le deuxième le rapport entre l’énergie non linéaire et l’énergie linéaire dans le signal de sortie, et le dernier le rapport entre l’énergie provenant des non-linéarités impaires et l’énergie provenant des non-linéarités paires dans le signal de sortie. Les pentes de ces DI dépendants de l’amplitude sont ensuite utilisées comme coordonnées pour placer la structure endommagée étudiée dans un espace tridimensionnel de classification. Un système “masse-ressort-amortisseur” (voir Fig. V.8 [en bas à gauche]) a été considéré pour illustrer la capacité de cet espace à classer différents types de dommages. Quatre types de dommages de gravité différente sont simulés à travers différentes non-linéarités du ressort : rigidité bilinéaire, zone morte, saturation et frottement de Coulomb. Comme on peut le voir sur les Fig. V.8 [en bas au milieu] et Fig. V.8 [en bas à droite], pour

toutes les sévérités, les quatre types de dommages sont extrêmement bien séparés dans l'espace tridimensionnel proposé, même en présence de bruit, ce qui met en évidence son potentiel à des fins de classification.

V.2.4.2 Quantification de la sévérité par MHPs [C|Reb+14a]

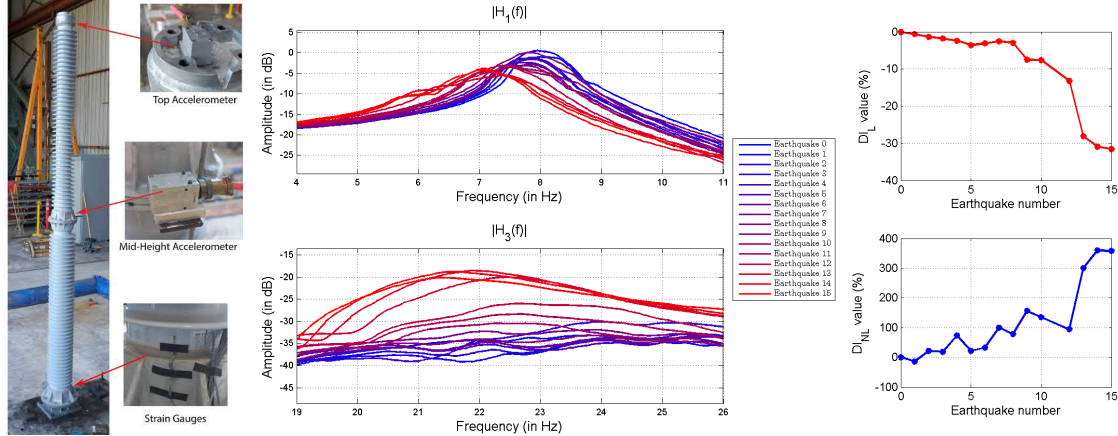


FIGURE V.9 – Spécimen instrumenté de deux jauges de contrainte à sa base et de deux accéléromètres 3 axes placés à mi-hauteur et au sommet de la structure sur la table vibrante (à gauche). Zoom sur le fondamental et les troisièmes harmoniques de $|H_1(f)|$ et $|H_3(f)|$ pour l'axe x de l'accéléromètre à mi-hauteur (au milieu). Les couleurs codent le nombre de séismes. Évolution des indices de dommages avec le nombre de séismes pour la jauge de contrainte (à droite).

L'idée sous-jacente à la procédure de quantification proposée ici est de surveiller l'apparition de fissures dans les isolateurs en céramique à un stade précoce grâce au changement de la fréquence de résonance du premier mode de la structure et aux non-linéarités qu'elles génèrent dans sa réponse dynamique [C|Reb+14a]. En première approximation, l'effet de l'apparition de la fissure dans la structure étudiée peut être modélisé comme une diminution locale de sa rigidité. Ainsi, au fur et à mesure que la fissure s'agrandit, la rigidité globale de la structure diminue ainsi que la fréquence de son premier mode. Si f_H est la fréquence du premier mode de la structure dans le cas sain et f_D la même fréquence dans le cas endommagé, nous pouvons alors définir un DI linéaire classique comme [R|Sal97] :

$$DI_L = \frac{f_D - f_H}{f_H} \quad (V.26)$$

En se concentrant sur la réponse dynamique d'une fissure respiratoire, il est également évident que la réponse dynamique d'une fissure apparaissant dans un isolateur en céramique est non-linéaire [R|FP02]. En outre, la quantité de non-linéarité générée par la fissure dans la réponse dynamique de la structure devrait également être proportionnelle à son étendue. En désignant $R_3(f)$ comme le rapport de l'amplitude de la troisième harmonique à l'amplitude de la fondamentale dans le voisinage $[f - \delta f, f + \delta f]$ de la fréquence f , un second DI non linéaire original DI_{NL} peut alors être construit comme suit :

$$R_3(f) = \int_{f-\delta f}^{f+\delta f} \left| \frac{H_3(3\nu)}{H_1(\nu)} \right| d\nu \quad \text{and} \quad DI_{NL} = \frac{R_3(f_D) - R_3(f_H)}{R_3(f_H)} \quad (V.27)$$

Une table à secousses hydraulique à six axes a été utilisée pour cette expérience [R|WFG07]. L'isolateur en céramique (hauteur : 4 m, poids : 450 kg), couramment utilisé sur les sectionneurs de 500 kV, est illustré à la Fig. V.9 à gauche. Le spécimen a été équipé de deux jauges de contrainte à sa base et de deux accéléromètres à trois axes placés à mi-hauteur et au sommet de la structure. Le signal de tremblement de terre utilisé dans cette expérience est celui prescrit par l'IEEE-693 [R|05]. Le spécimen a été soumis à un total de 15 signaux de tremblement de terre. Après chaque signal de tremblement de terre, un balayage sinusoidal exponentiel a été effectué séquentiellement dans chaque direction de la table (directions x et y). Ce signal d'excitation est un balayage sinusoidal exponentiel avec $f_1 = 0,7$ Hz, $f_2 = 50$ Hz, $T = 364,4$ s, $f_s = 200$ Hz, et une amplitude de 0,1 g. Le spécimen se rompt près de sa base lors du seizième tremblement de terre.

Des MHPs jusqu'à un ordre non linéaire $N = 4$ ont été estimés après chaque tremblement de terre à partir de tous les capteurs disponibles. En regardant la Fig. V.9 qui est un zoom proche de la fréquence du premier mode de la structure pour $|H_1(f)|$ et de la fréquence de la troisième harmonique pour $|H_3(f)|$ on peut voir que les effets qui ont été précédemment décrits qualitativement sont ici observés expérimentalement. En effet, si l'on considère $|H_1(f)|$, on constate que la fréquence de résonance du premier mode de la structure testée diminue avec le nombre de séismes, ce qui valide la théorie bien connue de l'adoucissement [R|Sal97]. En outre, en examinant $|H_1(f)|$ et $|H_3(f)|$, on peut observer que l'amplitude de la troisième harmonique augmente tandis que l'amplitude fondamentale diminue avec le nombre de tremblements de terre, ce qui valide cette fois le fait que la structure réagit de plus en plus de manière non linéaire lorsqu'elle est endommagée [R|FP02]. Les deux DI_L et DI_{NL} ont ensuite été calculés. Pour DI_{NL} , le paramètre δf a été fixé à 0,01 Hz. Les variations des deux DI en fonction du nombre de séismes sont représentées sur la Fig. V.9 pour une jauge de contrainte. On constate tout d'abord que, comme prévu, avec l'augmentation de la gravité des dommages, DI_L diminue de façon monotone, tandis que DI_{NL} augmente de façon monotone. En outre, on constate que les tendances fournies par les deux DI sont cohérentes, ce qui valide DI_{NL} par rapport à DI_L qui est déjà bien documenté dans la littérature et devrait être fiable [R|Sal97]. Enfin, on constate que DI_{NL} varie de près de 400 % au cours du processus d'endommagement, tandis que DI_L ne varie que d'environ 30 %. DI_{NL} semble donc être plus sensible à la quantité de dommages que DI_L .

Chapitre VI

Projets et perspectives

Sommaire

VI.1 Modèles guidés par la physique & adaptables pour le SHM	139
VI.1.1 Positionnement du problème	140
VI.1.2 Projet de recherche proposé	150
VI.2 Nouveaux matériaux actifs pour les structures multifonctionnelles	159
VI.2.1 Positionnement du problème	160
VI.2.2 Projet de recherche proposé	174

Contexte et objectifs du chapitre

Dans le Chapitre I, la notion de structure intelligente vibrante multifonctionnelle a été présentée et les problématiques liées au déploiement de ce type de structure pour la réalisation du contrôle de la santé de structures composites aéronautiques ont été détaillées dans les chapitres suivants. L’objet de ce chapitre est maintenant de se projeter vers des structures ondulantes réellement intelligentes et multifonctionnelles. En premier lieu, un projet lié à la question de la modélisation de ces structures sera proposée en Section VI.1. Puis une nouvelle façon de penser ces structures en s’appuyant sur de nouveaux matériaux actifs sera décrite à la Section VI.2.

VI.1 Modèles guidés par la physique & adaptables pour le SHM

Dans cette section, l’objectif est de réfléchir à la façon dont des modèles innovants permettant la simulation de la propagation d’ondes guidées dans les structures d’intérêt peuvent être conçus et validés. D’un point de vue pratique, deux sources d’informations sont disponibles pour réaliser des modèles de ce type : des informations issues de la *physique*, et des *données* obtenues expérimentalement. L’expression de modèles “*guidés par la physique*”¹⁶ sera ainsi ici employée dans le sens où ces deux types d’informations seront combinés simultanément pour construire ces modèles [R|Kar+17 ; R|Wil+22]. Enfin, les structures multifonctionnelles considérées sont

16. Il aurait aussi été possible ici d’utiliser le mot “*hybride*”. Mais dans ce contexte, la notion de modèle “*hybride*” a déjà été formalisée et ne correspond pas tout à fait à ce qui est présenté ici [R|Kar+17 ; R|Wil+22]. Les modèles hybrides sont en effet composés d’un modèle physique associé à un modèle basé sur les données. Comme cela sera précisé par la suite, l’idée est ici de voir comment adapter physiquement les modèles basés sur les données. En conséquence, l’expression de modèles “*guidés par la physique*” est utilisée.

relativement semblables entre elles et donc un modèle valide pour une structure donnée pourrait être adapté pour être utilisé ensuite sur une pièce similaire mais non exactement identique. Il s'agira alors de transfert d'apprentissage et le modèle ainsi construit sera qualifié d'*adaptable*. Le projet de recherche proposé ici vise donc à **explorer des méthodologies de création de modèles guidés par la physique & adaptables pour le SHM par ondes de Lamb** ou pour d'autres applications conceptuellement similaires en s'appuyant sur les connaissances physiques ainsi que sur les données expérimentales disponibles et tout en garantissant leur usage en pratique.

VI.1.1 Positionnement du problème

VI.1.1.1 Modèles directs et inverses adaptables

Il est en premier lieu nécessaire de préciser les attentes lorsque l'idée d'un modèle est évoquée. Dans le contexte des structures multifonctionnelles vibrantes intelligentes, les structures sont minces et sont équipées d'éléments actifs. Au cours de leur cycle de vie ces structures vont endurer des variations opérationnelles (température, chargement mécanique, ...) et potentiellement voir apparaître des endommagements qui devront être surveillés.

Les modèles d'intérêt dans ce contexte seront donc les modèles dits "*directs*" qui permettront de prédire les signaux reçus par les éléments actifs disposés sur la structure hôte en fonction :

1. Des propriétés du **signal d'entrée** (fréquence, nombre de cycles, amplitude, ...). Un signal d'entrée appliqué à l'élément électro-actif $n \in [1, N]$ sera noté comme une série temporelle $x(t)$. Les signaux résultants reçus par les éléments électro-actifs $k \in [1, N] (k \neq n)$ sont notés comme des séries temporelles $y_{nk}(t)$. Par souci de simplicité, on notera $y_{nn}(t) = x(t)$.
2. Des propriétés de la **structure hôte** équipée d'éléments électro-actifs (géométrie, matériaux, positions, ...). L'ensemble des paramètres liés à la structure hôte et aux éléments électro-actifs est regroupé dans le vecteur \mathcal{S} .
3. De l'**environnement opérationnel** où évolue la structure multifonctionnelle (chargement mécanique, température, ...). Les paramètres associés sont regroupés dans le vecteur \mathcal{O} .
4. De son **état de santé**. Les paramètres d'endommagement sont regroupés dans le vecteur \mathcal{D} .

Ainsi, un modèle direct $\mathcal{M}_D[\cdot]$ sera capable d'estimer pour une structure \mathcal{S} , dans un état d'endommagement \mathcal{D} et sous les conditions opérationnelles \mathcal{O} , l'ensemble des signaux $y_{nk}(t)$ avec $n, k \in [1, N]$ pour une entrée $x(t)$ donnée :

$$\{y_{nk}(t)\}_{n,k \in [1, N]} = \mathcal{M}_D [x(t), \mathcal{S}, \mathcal{O}, \mathcal{D}] \quad (\text{VI.1})$$

Il est important de préciser que l'objectif ici est de prédire la propagation d'ondes guidées dans des structures minces, donc en 2D, et que la sortie n'est pas le champ de déplacement sur l'intégralité de la structure hôte mais simplement les tensions électriques résultantes au niveau des différents éléments électro-actifs utilisés comme capteurs. De plus, les modèles directs proposés ici seront aussi potentiellement pertinents pour d'autres types d'applications conceptuellement similaires et faisant intervenir des ondes acoustiques ou électromagnétiques (acoustique sous-marine, applications radar, etc...).

Ces modèles ont de plus vocation à être adaptables. Dans le formalisme précédent cela signifie que pour deux structures décrites par leurs paramètres \mathcal{S} et \mathcal{S}' , le modèle direct $\mathcal{M}_D[\cdot]$ appris sur la structure paramétrée par \mathcal{S} pourra être adapté pour prédire les signaux sur la structure paramétrée par \mathcal{S}' . Il s'agit alors de transférer la connaissance apprise sur la première structure à

la seconde structure qui lui est semblable mais légèrement différente. Ces différences peuvent être la position des éléments électro-actifs ou des variations des propriétés matériaux par exemple. Enfin, les conditions environnementales regroupées dans le vecteur \mathcal{O} peuvent aussi évoluer et impacter les signaux à prédire. Les modèles développés pourront aussi tenir compte de cet aspect environnemental.

VI.1.1.2 Données expérimentales, connaissance de la physique, et complexité algorithmique

Les modèles décrits précédents doivent maintenant être bâtis sur la base d'informations disponibles, en un temps raisonnable, et être utilisables en pratique. Deux types d'informations sont disponibles pour construire ces modèles. En premier lieu, une certaine connaissance de la physique des phénomènes étudiés est disponible via les équations de propagation des ondes de Lamb, les lois d'interactions "ondes/dommages", ainsi que les différents paramètres qui leur sont associés par exemple. En second lieu, il est possible de réaliser des campagnes expérimentales sur des structures réelles de façon à obtenir des jeux de données pour les structures étudiées pour différentes fréquences, amplitudes, conditions environnementales, état d'endommagement... Enfin, les modèles développés ici ont une visée pratique : ils doivent donc être paramétrés ou appris en un temps acceptable et donner des résultats d'estimation assez rapidement de façon à être utilisables en pratique. Il existe donc un compromis à trouver entre les trois facteurs que sont la connaissance physique, le besoin de données expérimentales, et la complexité algorithmique dans la construction et le choix de ces modèles.

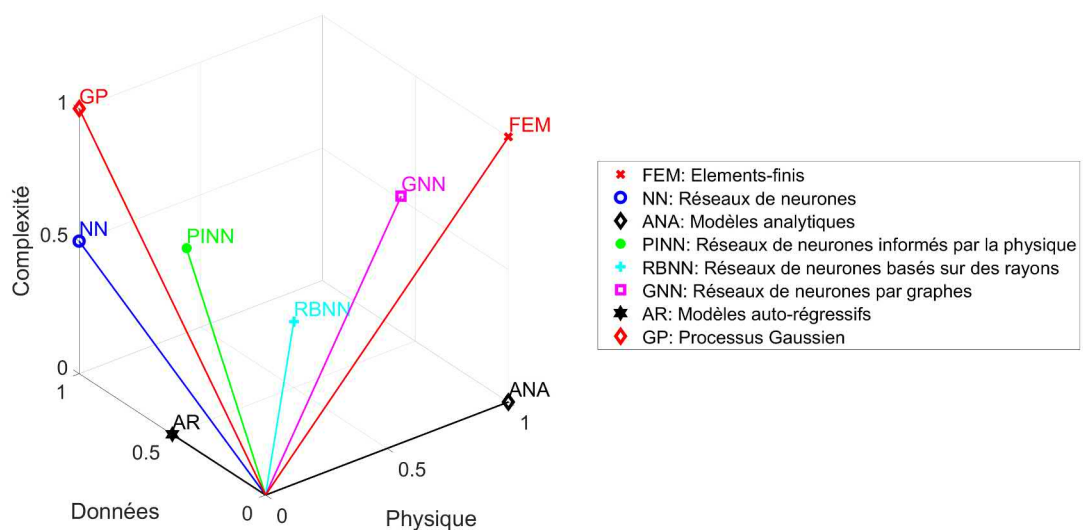


FIGURE VI.1 – Catégorisation non-exhaustive de différents modèles en fonction de leur besoins en termes de connaissance physique, de données expérimentales, et de de leur complexité algorithmique.

La Figure VI.1 propose de catégoriser (de façon non-exhaustive et empirique) un certain nombre de modèles usuels en fonction de leur besoins en termes de connaissance physique, de données expérimentales, et de de leur complexité algorithmique. Parmi les modèles basés exclusivement sur une connaissance physique du problème, il est possible de citer les modèles éléments-finis (FEM, voir Section IV.1.2.1) ou bien les modèles analytiques (ANA, voir Chapitre II). A

l'opposé des approches physiques, les réseaux de neurones [R|HSW89] (NN) sont construits sur une approche uniquement basée sur les données et n'ont aucun a priori concernant la physique du problème étudié. Toujours dans cette catégorie, les modèles auto-régressifs [A|Sil+21a] (AR), sont conceptuellement plus simples et moins lourds à entraîner que les NN. Enfin les processus Gaussien [A|Sil+21b] (GP) adjoignent aux modèles basés sur les données la possibilité de quantifier les incertitudes d'estimation. Entre ces deux extrêmes gravitent un certain nombre de modèles *guidés par la physique* qui seront présentés plus en détail par la suite. L'idée de ces modèles est de proposer une solution à ces problèmes en s'appuyant sur des approches qui non seulement apprennent à partir des données, mais utilisent également les connaissances de la physique de la propagation des ondes de Lamb, sans exiger une connaissance complète et fine de l'environnement. Un de ces modèles issus de la littérature a été appliqué au cas du SHM [E|Pos22] (*Physically Informed Neural Network* [PINN]) tandis que deux classes de modèles récentes n'ont pas encore été formalisées pour le contexte du SHM : les *Ray-Based Neural Network* [RBNN] et *Recurrent Graph Neural Network* [RGNN]. Le RBNN constitue l'objet principal du projet de recherche présenté ici.

VI.1.1.3 Modèles basés sur la physique

Cette section illustre d'abord les points forts et les points faibles des modèles basés sur la physique dans un contexte de SHM. Les principales limitations associées à ces modèles vont être soit leur coût de calcul prohibitif soit leur incapacité à s'adapter précisément à la réalité des mesures expérimentales. Leurs avantages sont qu'ils permettent une représentation fine de la physique et que les paramètres inhérents au modèle sont interprétables.

Modèles éléments-finis (FEM) : L'approche par éléments-finis est la plus courante dans le contexte du SHM [R|Wil+15 ; R|MF22] (voir Section IV.1.2.1). Elle est basée sur une connaissance fine de la géométrie et des lois physiques au sein de la structure étudiée. Du point de vue géométrique, elle repose sur un maillage qui doit être défini à l'avance et doit coïncider avec la géométrie de la structure hôte. Un paramètre important de ce maillage est lié à la taille des mailles qui doit empiriquement être un ordre de grandeur plus petit que la plus petite longueur d'onde considérée. Si des longueurs d'ondes de l'ordre du *cm* sont visées, alors des mailles de l'ordre du *mm* seront nécessaires. Cela est à mettre en parallèle avec les structures étudiées comme l'IFS ou le FC qui couvrent plusieurs mètres et donc impose en pratique des maillages irréalistes du point de vue de l'implémentation. Par ailleurs, les fréquences utilisées étant assez grandes, des pas de temps petits doivent aussi être considérés. Du point de vue physique, la connaissance fine des lois constitutives des différents matériaux, des mécanismes d'atténuation, des interactions avec les inhomogénéités, est nécessaire et doit être encodée dans le modèle. En pratique ces lois peuvent être plus ou moins bien connues ce qui limite fortement les capacités d'un modèle éléments finis à représenter fidèlement des données expérimentales. Il n'en reste pas moins vrai que les données issues de modèles éléments finis restent un excellent moyen de valider des algorithmes de SHM. La Figure VI.2 illustre la qualité de corrélation qui peut être obtenue entre des simulations par éléments-finis et des mesures expérimentales. Le premier et le second paquets d'ondes sont très bien reconstruits, ce qui signifie que les aspects propagatifs sont bien modélisés. Par contre ce n'est pas le cas pour les paquets suivants, ce qui montre la difficulté de modéliser les lois d'interaction et d'atténuation. En conclusion, même si les simulations par éléments-finis sont intéressantes du point de vue qualitatif, les coûts de calculs et les limitations liées à un certain manque de connaissance physique détaillée sont deux désavantages majeurs des modèles éléments finis.

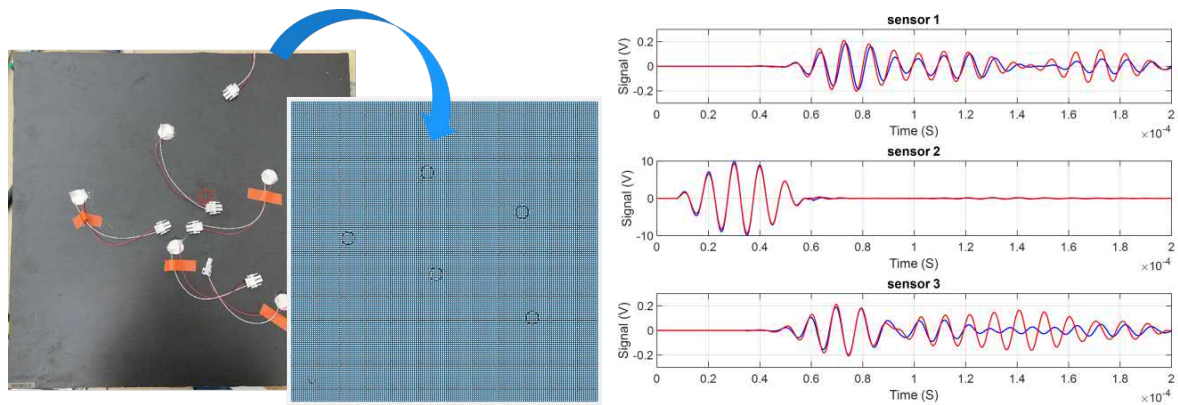


FIGURE VI.2 – Exemples de résultats de corrélation entre une simulation réalisée par éléments-finis (en bleu) et des mesures expérimentales (en rouge) (d’après [E|Pos22]).

Modèles analytiques (ANA) : Les modèles analytiques ont aussi été utilisés dans le contexte du SHM [R|Wil+15; E|Guo21]. Ils sont séduisants car ils sont souvent très efficaces en terme de temps de calcul et présentent l’avantage de permettre une interprétation directe de l’effet de différents paramètres physiques sur les résultats de simulation. Leur limitation principale réside dans le fait qu’il est impossible de représenter exactement la géométrie d’une structure hôte avec un modèle analytique. Par contre, des modèles physiques évolués peuvent être relativement simplement inclus dans des modèles analytiques, comme cela a été présenté par exemple pour l’atténuation des ondes de Lamb (voir Section II.1.3). La Figure VI.3 présente une comparaison entre un modèle analytique et un modèle éléments finis. La correspondance est très bonne pour le premier paquet qui correspond au mode S_0 mais les autres paquets ne sont pas prédits dans ce cas. En conclusion, les modèles analytiques sont très performants en terme de complexité algorithmique, peuvent potentiellement inclure des lois physiques complexes, mais restent malheureusement pauvres en détails géométriques et donc incompatibles avec des structures complexes.

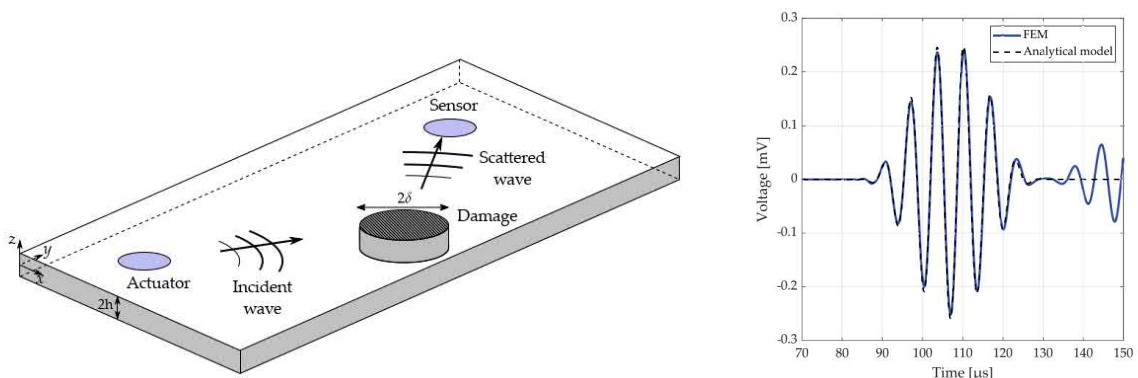


FIGURE VI.3 – Comparaison des signaux temporels prédits par un modèle FEM avec ceux prédits par un modèle analytique (d’après [E|Bri22]).

VI.1.1.4 Modèles basés sur les données

A l’opposé de la section précédente, cette section illustre à présent les points forts et les points faibles des modèles basés sur les données dans un contexte de SHM. Les principaux problèmes qui limitent l’utilisation des modèles basés exclusivement sur les données dans la modélisation de la propagation des ondes de Lamb dans une structure aéronautique en matériau composite sont la nécessité de disposer d’un grand ensemble de données d’apprentissage, l’incapacité de ces modèles à extrapoler correctement pour des cas qui sont hors de leur domaine d’apprentissage, et l’interprétation très difficile de leurs paramètres. Leurs avantages seront d’être capables d’être extrêmement proches de la réalité expérimentale et d’être très performants en terme de temps de calcul une fois l’apprentissage réalisé.

Modèles auto-régressifs simples et basés sur des processus Gaussien (AR et GP) : L’idée est à présent de présenter une première catégorie de modèles hérités du traitement du signal. Les modèles auto-régressifs sont associés à une équation de récurrence et permettent de modéliser des séquences temporelles d’échantillons comme c’est le cas dans le SHM [A|Sil+21a; A|Sil+21b]. Ces modèles sont linéaires et sont basés sur relativement peu de paramètres, ce qui les rend intéressants du point de vue de la complexité algorithmique. Par contre, le fait qu’ils soient linéaires limite leur représentativité physique. Des routines d’identification des paramètres de tels modèles sont largement disponibles. Ces modèles peuvent de plus être facilement enrichis par des processus Gaussiens qui vont venir considérer que leurs paramètres sont connus via leur densité de probabilité et donc vont être capables d’associer un intervalle de confiance à leurs prédictions. La Figure VI.4 illustre les performances d’un modèle auto-régressif associé à des processus Gaussiens. Les prédictions réalisées par ces modèles sont d’une très grande qualité. Ces modèles sont même capables d’apprendre le petit signal de diaphonie présent en début de mesure et qui n’a pas de sens physique du point de vue des ondes de Lamb. Par contre, l’interprétation des coefficients de ces modèles d’un point de vue physique reste malheureusement impossible. En conclusion ces modèles sont performants du point de vue algorithmique et peuvent modéliser des cas géométriquement complexes mais il n’est pas possible en les utilisant de tisser facilement des liens avec la physique des ondes de Lamb. Il est important de noter que les modèles auto-régressifs peuvent aussi être vus comme une sous-catégorie des réseaux de neurones [R|Sax97].

Les réseaux de neurones (NN) : Les réseaux de neurones constituent une alternative aux modèles hérités du traitement du signal et basés sur les données, qui est très utilisée dans le contexte du SHM par ondes de Lamb [A|Rah+21; E|Pos22; R|Zha+20b; R|SN22; R|EGB19; R|Rau+21; R|GB22]. Le théorème d’approximation universelle des fonctions établit en effet que les réseaux de neurones multicouches “*feed-forward*” ont la capacité d’approcher n’importe quelle fonction continue étant donné un nombre suffisant d’unités cachées [R|HSW89]. Cela suggère qu’un réseau de neurones devrait ainsi être capable d’approximer la solution de l’équation des ondes en apprenant les poids appropriés à partir des données d’apprentissage et ce pour n’importe quelle géométrie et pour n’importe quel cas d’endommagement. La contrepartie de cette précision est un coût en termes de données d’apprentissage ainsi qu’un coût en terme de complexité au niveau de la phase d’apprentissage. La Figure VI.5 présente les résultats de prédiction de signaux réalisés par un réseau de neurones basé sur des fonctions radiales de formes (*radial basis functions*, RBF) en comparaison à un modèle éléments finis. Le signal de sortie est extrêmement bien prédit dans ce cas précis. En conclusion, ces modèles permettent d’atteindre un grand degré de précision mais nécessitent un grand nombre de données d’apprentissage ainsi qu’un temps d’apprentissage important. De plus, l’interprétation physique de ces modèles reste extrêmement

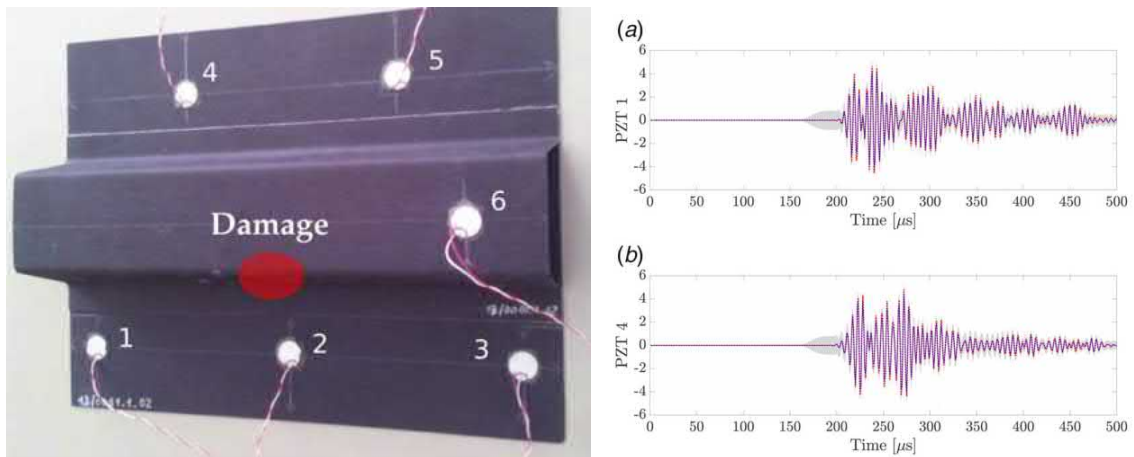


FIGURE VI.4 – Comparaison des signaux temporels prédits par un modèle auto-régressif associé à des processus Gaussiens (en rouge) avec ceux obtenus expérimentalement (en bleu) (d’après [A|Sil+21b]). Les incertitudes associées à la modélisation sont représentées par l’enveloppe grise qui entoure le signal rouge.

délicate et leur généralisation, c’est à dire leur utilisation pour des cas qui ne correspondent pas à des cas d’apprentissage, n’est pas garantie.

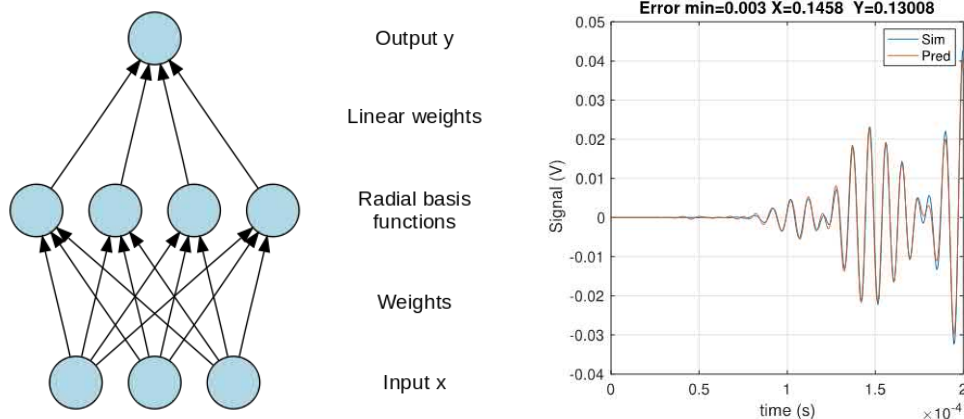


FIGURE VI.5 – Comparaison des signaux temporels prédits par un réseau de neurones basé sur des fonction radiales de formes avec ceux obtenus via un modèle éléments-finis (d’après [E|Pos22]).

VI.1.1.5 Modèles guidés par la physique

Les sections précédentes illustrent donc les forces et les faiblesses des modèles basés soit uniquement sur les données, soit uniquement sur la physique. Cette nécessité de combiner la connaissance de la physique avec la modélisation basée sur les données est l’objet d’un domaine émergent appelé “*Scientific Machine Learning*” [R|Bak+19] ou bien encore “*Theory-guided data science*” [R|Kar+17 ; R|Wil+22]. L’idée sous-jacente est d’explorer des moyens synergiques qui utilisent les connaissances du domaine physique pour aider l’apprentissage automatique. Les mo-

dèles pilotés par les données seront ainsi entraînés pour apprendre à partir des données physiques tout en respectant certaines contraintes imposées par la connaissance physique du domaine considéré. Cette hybridation entre les données et la physique peut être injectée à différents niveaux dans le processus de modélisation et être d'ampleur variable. Quatre voies sont ainsi identifiées comme pertinentes pour d'éventuelles approches guidées par la physique dans le contexte du SHM :

1. **L'interprétation physique des modèles construits à partir des données.** A ce premier niveau, l'objectif est, sans modifier la forme du modèle initial ni son processus d'apprentissage, de chercher à interpréter physiquement les paramètres du modèle construit sur les données.
2. **Le respect des lois élémentaires de la physique sous-jacentes au problème étudié.** A ce second niveau, l'objectif est de contraindre l'apprentissage du modèle mais toujours sans changer sa forme. Cette contrainte de respect des lois de la physique est en général ajoutée par l'intermédiaire d'un terme de pénalisation dans la fonction coût utilisée pour l'entraînement des modèles.
3. **La construction d'un réseau neuronal spécialisé pour le problème étudié.** A ce troisième niveau, des blocs élémentaires interprétables physiquement sont utilisés pour réaliser la construction du réseau neuronal et leur organisation est dictée par la physique du problème. Le réseau de neurones ne correspond plus à un problème abstrait mais à un problème physique et tous les outils associés aux réseaux de neurones restent disponibles.
4. **L'intégration de la topologie du problème dans le réseau de neurones.** A ce quatrième niveau, les contraintes sur le réseau de neurones sont encore plus marquées car l'objectif va être de faire correspondre les différents nœuds du réseau à la topologie physique de la structure hôte. Le réseau de neurones est ainsi topologiquement équivalent à son homologue physique et des correspondances directes entre les deux domaines peuvent être établies.

Les deux premiers niveaux sont brièvement détaillés dans la suite et les quelques travaux liés au SHM par ondes de Lamb à ces niveaux sont mentionnés. Les niveaux supérieurs n'ont pas encore été étudiés dans un contexte de SHM. Le niveau #3 constitue le niveau d'intérêt ici.

Niveau #1 → L'intelligence artificielle expliquée (*Explained Artificial Intelligence, XAI*) :

Comme cela a été soulevé précédemment, les modèles basés sur les données sont très séduisants car ils sont capables de prédire avec précision les données expérimentales. Par contre, les informations captées, via les coefficients des modèles, sont difficilement interprétables d'un point de vue physique. Réaliser une telle interprétation est néanmoins intéressant pour arriver à comprendre physiquement ce que le modèle a appris, aider à transférer les modèles entre structures similaires, et améliorer la confiance associée au modèle appris. Ce domaine de recherche nommé *Explained Artificial Intelligence* (XAI) cherche ainsi à comprendre, puis à interpréter physiquement les réseaux de neurones et peut donc être intéressant dans ce contexte [R|DR20 ; R|Sam+21 ; R|Kas+21 ; R|Sam+22]. Ici, il n'y a pas de réelles modifications qui sont apportées au réseau de neurones initial car il s'agit principalement de méthodes d'analyses appliquées *a posteriori*. De rares applications au SHM par ondes guidées du XAI sont présentes dans la littérature [R|PRM22 ; R|LGC22 ; R|Lom+23 ; R|Ewa+22]. Les travaux réalisés permettent par exemple d'analyser parmi les différents chemins actionneur-capteur disponibles, quels sont ceux qui sont les plus exploités par les réseaux de neurones pour réaliser leur prédiction, ou encore de déterminer les portions de signaux mesurés importantes pour la détection ou la localisation des

dommages. Ces approches XAI pour le SHM par ondes de Lamb permettent ainsi principalement d'avoir confiance dans le fait que les réseaux de neurones ont bien appris des informations qui sont intuitivement pertinentes d'un point de vue physique (le premier paquet d'onde est porteur de beaucoup d'information ou bien les chemins passant par les dommages sont informatifs) mais ne permettent pas réellement de disposer d'un moyen d'action sur les modèles pour y inclure davantage de sens physique.

Niveau #2 → Les réseaux de neurones physiquement informés (PINN) : Une autre stratégie populaire d'hybridation entre les données et la physique, appelée réseaux neuronaux informés par la physique (*Physics Informed Neural Networks*, PINN), consiste à imposer des contraintes physiques, sous la forme d'équations différentielles partielles par exemple pour agir comme un régularisateur dans la fonction de coût d'un réseau neuronal [R|RPK19]. La Figure VI.6 présente un exemple de comparaison entre les prédictions réalisées par un modèle PINN et une simulation éléments-finis. Dans cet exemple tiré de [E|Pos22], les informations liées au temps de vol sont incluses dans la fonction coût de façon à imposer un lien entre la physique et le modèle appris. Les deux premiers paquets sont globalement bien prédits même si leur amplitude n'est pas exactement similaire entre le modèle appris et la référence éléments-finis utilisée ici. Cette classe de modèles repose donc principalement sur les données mais permet néanmoins l'ajout de contraintes physiques. Cependant, dans l'exemple présenté, cet ajout de contraintes physiques se traduit par une légère perte de précision.

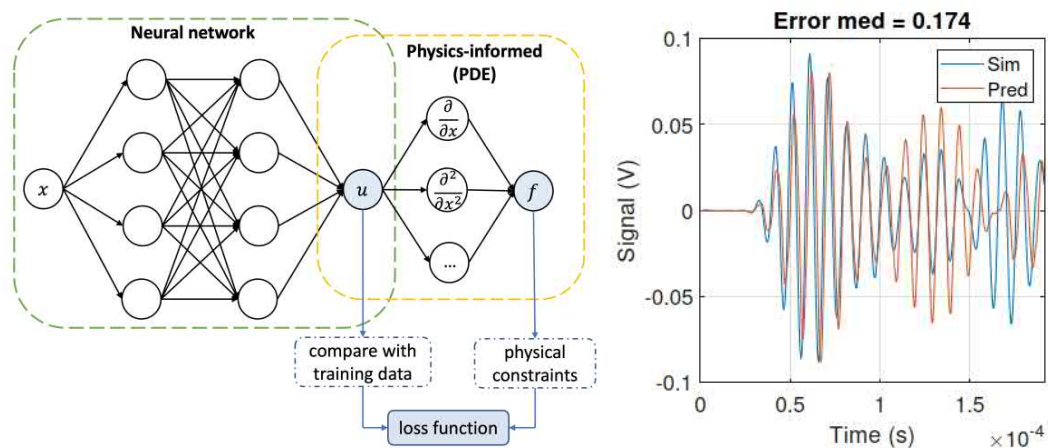


FIGURE VI.6 – A gauche, structure typique d'un PINN (d'après [R|LC22]) et à droite exemple de comparaison entre les prédictions réalisées par un modèle PINN et une simulation éléments-finis (d'après [E|Pos22]).

VI.1.1.6 Transfert d'apprentissage

Une fois un modèle établi, la question qui se pose ensuite est celle du transfert d'apprentissage qui consiste à savoir comment transférer ce qui a été appris dans un contexte donné à un contexte différent. Cette problématique peut prendre plusieurs formes dans le contexte du SHM. Il peut par exemple s'agir d'apprendre un modèle sur des données simulées pour ensuite l'utiliser dans un contexte expérimental. Il peut aussi s'agir d'apprendre sur une structure expérimentale donnée et de réaliser des prédictions ensuite sur des structures expérimentales similaires mais non rigoureusement identiques. Différentes stratégies existent pour le transfert d'apprentissage

dans le cas des modèles basés sur la physique ou bien dans le cas des modèles basés sur les données, mais cette problématique de transfert d'apprentissage n'a encore jamais été abordée pour les modèles *guidés par la physique*.

Formalisation et lien avec la SHM : Le transfert d'apprentissage pour les modèles basés sur les données est donc un domaine de recherche à part entière [R|PY10 ; R|WKW16 ; R|Zhu+20]. Dans le contexte du SHM, il s'agira de transfert d'apprentissage *homogène* car l'objectif est de réaliser un transfert d'apprentissage entre des cas globalement similaires (par exemple deux structures aéronautiques semblables ou bien une simulation numérique et son homologue expérimental). De plus, il s'agira de transfert d'apprentissage *transductif* dans le sens où les données étiquetées sont disponibles dans le domaine où est réalisé l'apprentissage (le domaine *source*) mais pas nécessairement dans le domaine où l'on souhaite transférer l'apprentissage (le domaine *cible*). Un sous-domaine du transfert d'apprentissage s'appelle l'adaptation de domaine [R|LW20 ; R|GLW20 ; R|Gar+22] et définit la notion de modèle *adaptable* qui sera utilisée ici.

Le transfert d'apprentissage et l'adaptation de domaine sont basés sur deux objets mathématiques particuliers :

- *Domaine* : un domaine $\mathcal{D} = \{\mathcal{X}, p(X)\}$ est composé d'un espace de descripteurs \mathcal{X} et d'une distribution marginale $p(X)$ ou $X = \{x_i\}_{i=1}^N \in \mathcal{X}$ est une collection de N échantillons tirés de \mathcal{X} .
- *Tâche* : une tâche pour un domaine \mathcal{D} donné est définie comme $\mathcal{T} = \{\mathcal{Y}, f(\cdot)\}$ ou \mathcal{Y} est l'espace de prédiction et $f(\cdot)$ est une fonction prédictive. La fonction $f(\cdot)$ peut aussi être interprétée comme la distribution conditionnelle $p(y|X)$ apprise sur les données d'entraînement $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ ou $y \in \mathcal{Y}$.

Dans le contexte du SHM, l'espace de descripteurs \mathcal{X} peut correspondre aux signaux issus de la propagation des ondes de Lamb, aux indicateurs d'endommagement, ou bien à des cartes de localisation par exemple. Les tâches seront la détection, la localisation, la classification ou la quantification de dommages. L'espace de prédiction \mathcal{Y} sera ainsi un espace binaire (sain ou endommagé) pour la tâche de détection, un espace continu bi-dimensionnel (x_d, y_d) pour la tâche de localisation, un espace correspondant à plusieurs types de dommages pour la tâche de classification (délamination, impact, fissure, ...) et enfin un espace continu bidimensionnel pour la quantification (taille et sévérité).

La distribution marginale $p(X)$ correspond en pratique à la façon dont sont distribués les échantillons dans l'espace des descripteurs, donc par exemple à la densité de probabilité des indices d'endommagements. La distribution conditionnelle $p(y|X)$ correspond à la distribution des prédictions dans l'espace de prédiction \mathcal{Y} étant donné un ensemble X d'échantillons dans l'espace des descripteurs \mathcal{X} . Elle peut ainsi s'interpréter comme la probabilité que la structure soit endommagée étant donné un ensemble X d'indicateurs d'endommagement.

Il est alors possible de définir le transfert d'apprentissage et l'adaptation de domaine de la façon suivante :

- *Transfert d'apprentissage* : Étant donné un domaine source \mathcal{D}_s et une tâche \mathcal{T}_s , un domaine cible \mathcal{D}_t et une tâche \mathcal{T}_t , le transfert d'apprentissage est le processus permettant d'améliorer les performances de la fonction prédictive $f_t(\cdot)$ associée à \mathcal{T}_t en utilisant les connaissances acquises sur \mathcal{D}_s et \mathcal{T}_s en supposant que $\mathcal{D}_s \neq \mathcal{D}_t$ et/ou $\mathcal{T}_s \neq \mathcal{T}_t$.
- *Adaptation de domaine* : Étant donné un domaine source \mathcal{D}_s et une tâche \mathcal{T}_s , un domaine cible \mathcal{D}_t et une tâche \mathcal{T}_t , l'adaptation de domaine est le processus permettant d'améliorer les performances de la fonction prédictive $f_t(\cdot)$ associée à \mathcal{T}_t en utilisant les connaissances acquises sur \mathcal{D}_s et \mathcal{T}_s en supposant que $\mathcal{X}_s = \mathcal{X}_t$ et $\mathcal{Y}_s = \mathcal{Y}_t$ mais que $p(X_s) \neq p(X_t)$

et que $p(Y_s|X_s) \neq p(Y_s|X_t)$. Dans ce contexte, les domaines et les tâches sont similaires dans le sens où ils partagent les mêmes espaces de définition mais pas nécessairement la même répartition des échantillons en leur sein.

La problématique associée à l'adaptation de domaine est donc relative à la mise en cohérence des distributions marginales $p(X_s)$ et $p(X_t)$, des distributions conditionnelles $p(Y_s|X_s)$ et $p(Y_s|X_t)$, ou bien des deux simultanément. Pour répondre à cette problématique, il s'agira ainsi de déployer des outils permettant de travailler sur l'espace \mathcal{X} pour réaliser cette mise en cohérence des différentes distributions ou bien sur le modèle permettant de réaliser la tâche visée.

Le recalage des modèles basés sur la physique : En ce qui concerne les modèles basés sur la physique (les modèles éléments finis et des modèles analytiques), l'idée de transfert d'apprentissage est à mettre en relation avec la notion de recalage ("*model updating*" en anglais) [R|VJ14; R|Wil+15; R|MF22]. Il s'agit alors, étant donné des données de référence et un modèle paramétrique, de trouver les paramètres du modèle garantissant la meilleure adéquation entre les données de référence et le modèle paramétrique. Dans ce contexte, l'ajustement des paramètres du modèle est évident, comme par exemple la modification de la position géométrique des éléments piézo-électriques, de l'épaisseur ou de la composition des matériaux, ou bien de la température ambiante. Ceci est une conséquence directe de la possibilité d'interprétation physique de leurs paramètres qu'offrent les modèles basés sur la physique. La question du transfert d'apprentissage pour les modèles basés sur la physique peut être abordée en contraignant les paramètres des modèles à avoir un sens physique ou bien en associant une densité de probabilité a priori à ces paramètres. Les performances de ce transfert seront néanmoins intrinsèquement limitées par les hypothèses associées au modèle utilisé qui ne pourra prédire que ce qu'il modélise. En conclusion, les modèles basés sur la physique présentent un gros avantage sur les modèles basés sur les données en ce qui concerne le transfert d'apprentissage bien que limités par leurs capacités propres de modélisation.

Stratégies de transfert d'apprentissage pour les modèles basés sur les données : Comme cela a été discuté auparavant, l'interprétation physique des paramètres est beaucoup plus délicate, pour ne pas dire impossible pour les modèles basés sur les données. Plusieurs stratégies sont disponibles pour répondre à cette problématique d'adaptation de domaine à partir d'un modèle basé sur les données :

- **La pondération des entrées :** La première idée consiste à dire que les domaines *source* et *cible* partagent un certain nombre d'entrées et qu'un poids plus important doit être donné à ces entrées communes lorsque le transfert d'apprentissage doit être réalisé entre les deux domaines. Cette approche ne prend cependant pas beaucoup de sens dans le contexte du SHM par ondes de Lamb.
- **Le transfert de descripteurs :** La seconde idée consiste à essayer d'extraire des descripteurs synthétiques des données et à essayer de transférer ces descripteurs entre le domaine *source* et le domaine *cible*. Une stratégie peut être de chercher quelle transformation de l'espace des descripteurs permet de passer du domaine *source* au domaine *cible*. Une autre stratégie consiste à se baser à l'inverse exclusivement sur les descripteurs génériques, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas influencés par le domaine considéré. Cette approche est particulièrement pertinente dans le domaine du SHM où les descripteurs correspondent exactement aux indices d'endommagement (voir Section IV.2.1).
- **Le transfert de paramètres :** La troisième idée consiste à transférer tout ou partie des paramètres entre le modèle appris sur le domaine *source* et le modèle destiné au do-

maine *cible*. Par exemple, dans le cas d'un réseau de neurones, seule une partie du réseau sera ré-entraînée sur le domaine *cible*. Dans le cas d'un modèle *guidé par la physique*, les paramètres ayant un sens physique pourront être transférés plus facilement que des paramètres arbitraires d'un réseau de neurones. Cette idée est donc également pertinente dans le contexte du SHM et particulièrement adaptée au contexte des modèles *guidés par la physique*.

- **Le transfert de relations** : La quatrième idée a pour but de transférer les relations connues entre les différentes variables du modèle appris dans le domaine *source* au modèle destiné au domaine *cible*. Ces relations peuvent être soit explicites soit implicites (lois de conservation, lois de comportement, ...). Cette idée est intéressante dans le contexte du SHM par ondes de Lamb au niveau de la modélisation des interactions *ondes/dommage*. En effet, ces lois d'interactions seront les mêmes pour des dommages similaires entre structures. Dans ce contexte, les relations décrivant les interactions *ondes/dommage* pourront potentiellement être transférées.

Le transfert d'apprentissage et plus particulièrement l'adaptation de domaine ont été relativement peu étudiés dans le contexte du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb. En premier lieu, pour des structures aéronautiques réalisées de façons identiques, le constat est fait qu'un unique modèle ne peut pas être utilisé pour réaliser le SHM par ondes de Lamb de ces structures [R|Yad+21]. L'apprentissage réalisé au cours d'une tâche de détection de dommage a aussi permis d'améliorer les performances d'une tâche de localisation et d'une tâche de quantification suite au transfert d'apprentissage [R|ZHL20 ; R|Sha+22]. L'adaptation de domaine en se basant sur des modèles basés sur des données a été réalisée avec succès dans le cas de plaques en matériau composite et interrogées par ondes de Lamb [R|ZHL22 ; R|RM22]. La possibilité d'apprendre un modèle basé sur les données sur des données simulées et de l'appliquer avec succès sur des données expérimentales a également été démontrée [R|ACH21]. Ces travaux préliminaires suggèrent que l'adaptation de domaine, réalisée sur des modèles basés sur des données, semble assez fructueuse appliquée au SHM par ondes de Lamb.

VI.1.2 Projet de recherche proposé

Le projet de recherche proposé ici cherche à **explorer des méthodologies de création de modèles guidés par la physique & adaptables pour le SHM par ondes de Lamb** ou pour d'autres applications conceptuellement similaires en s'appuyant sur les connaissances physiques ainsi que sur les données expérimentales disponibles et tout en garantissant leur usage en pratique. Au niveau de la construction de modèles guidées par la physique, le niveau #3 décrit à la Section VI.1.1.5 sera visé ici. A l'aide des réseaux de neurones basés sur les rayons, un sens physique fort sera associé à chaque couche du modèle. Enfin, en terme d'adaptation de domaine, l'objectif sera de formaliser les approches basées sur le transfert de descripteurs et de paramètres au cas des modèles guidés par la physique et de voir comment la théorie du transport optimal peut également répondre à certains besoins.

VI.1.2.1 Axe #1 : Les réseaux de neurones basés sur les rayons (RBNN, *Ray-Based Neural Networks*)

Comme cela a été discuté précédemment, l'idée directrice est ici de s'intéresser à une classe de modèles d'apprentissage automatique où la physique est codée dans la structure même des modèles. Les sous-parties de ces modèles seront ainsi automatiquement des solutions des équations décrivant la propagation des ondes de Lamb, les interactions avec les conditions limites et les

éléments géométriques, ou bien les interactions *ondes/dommage*. Cela contraint naturellement les algorithmes à n'apprendre que des fonctions physiquement réalistes dans le contexte adapté. Les principales qualités de ce type d'approches sont potentiellement les suivantes :

1. Le modèle n'a pas besoin d'une connaissance précise de l'environnement, mais est capable d'utiliser toute connaissance disponible de l'environnement a priori (géométrie de la structure hôte, position des éléments piézo-électriques, position des raidisseurs et des bords, propriétés mécaniques des différents matériaux, température, ...).
2. Le modèle n'a pas besoin d'une grande quantité de données d'entraînement et possède la capacité d'extrapoler au-delà de la région où les données ont été recueillies car il est basé sur une approche ayant du sens physiquement.
3. Il est possible d'associer des modèles basées uniquement sur les données à cette approche. Par exemple, un réseau de neurones standard pourra modéliser l'interaction "*ondes/dommages*" et ce modèle pourra être combiné avec le modèle guidé par la physique plus général.
4. Ce cadre apporte naturellement une interprétabilité aux paramètres du modèle entraîné, ce qui est particulièrement utile pour la résolution de problèmes inverses et pour le transfert d'apprentissage.

Idée directrice : D'un point de vue physique, une tension $x(t)$ est d'abord appliquée à un actionneur piézo-électrique qui convertit cette tension en ondes de Lamb de types S_0 et A_0 . Les différents modes se propagent ensuite jusqu'à interagir soit avec un bord de la structure hôte, soit avec un élément géométrique discontinu (raidisseur, changement d'épaisseur, ...), soit avec un dommage. Cette interaction peut éventuellement être le siège d'un phénomène de conversion de modes. Suite à cette interaction, les modes S_0 et A_0 se re-propagent, ré-interagissent avec les différents éléments existants dans la structure hôte, se re-propagent, ré-interagissent, et ainsi de suite... En bout de chaîne se situe finalement le capteur piézo-électrique qui va recevoir ces ondes S_0 et A_0 et les convertir en tension électrique $y(t)$ correspondant au signal de mesure. L'idée sous-jacente est illustrée graphiquement à la Figure VI.7.

Ces considérations physiques permettent ainsi d'écrire dans le domaine fréquentiel le signal $Y(f)$ correspondant à la transformée de Fourier de $y(t)$ mesuré par le capteur piézo-électrique en fonction du signal $X(f)$ lui-même étant la transformée de Fourier de $x(t)$, émis par l'actionneur piézo-électrique de la façon suivante¹⁷ :

17. Il est possible d'écrire cette équation de façon équivalente dans le domaine temporel en utilisant des convolutions, mais cela est moins lisible.

$$\begin{aligned}
Y = & H_S^{A_0} P_{A \rightarrow S}^{A_0} H_A^{A_0} X + H_S^{S_0} P_{A \rightarrow S}^{S_0} H_A^{S_0} X + \dots \\
& + H_S^{A_0} \sum_{i_K=1}^I P_{i_K \rightarrow S}^{A_0} I_{i_K}^{A_0} \left[\sum_{i_{K-1}=1}^I P_{i_{K-1} \rightarrow i_K}^{A_0} I_{i_{K-1}}^{A_0} \left[\dots \sum_{i_1=1}^I I_{i_1}^{A_0} \left[P_{A \rightarrow i_1}^{A_0} H_A^{A_0} X \right] \right] \right] \\
& + H_S^{A_0} \sum_{i_K=1}^I P_{i_K \rightarrow S}^{A_0} I_{i_K}^{S_0 \rightarrow A_0} \left[\sum_{i_{K-1}=1}^I P_{i_{K-1} \rightarrow i_K}^{S_0} I_{i_{K-1}}^{S_0} \left[\dots \sum_{i_1=1}^I I_{i_1}^{S_0} \left[P_{A \rightarrow i_1}^{S_0} H_A^{S_0} X \right] \right] \right] \quad (\text{VI.2}) \\
& + H_S^{S_0} \sum_{i_K=1}^I P_{i_K \rightarrow S}^{S_0} I_{i_K}^{S_0} \left[\sum_{i_{K-1}=1}^I P_{i_{K-1} \rightarrow i_K}^{S_0} I_{i_{K-1}}^{S_0} \left[\dots \sum_{i_1=1}^I I_{i_1}^{S_0} \left[P_{A \rightarrow i_1}^{S_0} H_A^{S_0} X \right] \right] \right] \\
& + H_S^{S_0} \sum_{i_K=1}^I P_{i_K \rightarrow S}^{A_0} I_{i_K}^{A_0 \rightarrow S_0} \left[\sum_{i_{K-1}=1}^I P_{i_{K-1} \rightarrow i_K}^{S_0} I_{i_{K-1}}^{S_0} \left[\dots \sum_{i_1=1}^I I_{i_1}^{S_0} \left[P_{A \rightarrow i_1}^{S_0} H_A^{S_0} X \right] \right] \right]
\end{aligned}$$

Où :

- Le milieu de propagation est constitué de I **éléments à l'origine d'interactions** avec les ondes de Lamb (bords de la structure hôte, discontinuités, dommages, ...).
- Une succession de K **interactions successives** sont considérées.
- Les fonctions de transfert $H_S^{A_0/S_0}$ désignent la **conversion des modes** A_0 et S_0 en **tension** réalisée au niveau du capteur piézo-électrique R . Ces fonctions peuvent être données analytiquement et leurs paramètres physiques (diamètre et épaisseur de l'élément piézo-électrique, propriétés électro-mécaniques du matériau constitutif, ...) ajustés lors de la phase d'apprentissage.
- Les fonctions de transfert $H_A^{A_0/S_0}$ désignent la **conversion de la tension en modes** A_0 et S_0 réalisée au niveau de l'actionneur piézo-électrique A . Ces fonctions peuvent être données analytiquement et leurs paramètres physiques (diamètre et épaisseur de l'élément piézo-électrique, propriétés électro-mécaniques du matériau constitutif, ...) ajustés lors de la phase d'apprentissage.
- Les fonctions de transfert $P_{i \rightarrow j}^{A_0/S_0}$ désignent la **propagation des modes** A_0 et S_0 depuis l'élément i vers l'élément j . Ces fonctions peuvent être données analytiquement et leurs paramètres physiques (vitesse de propagation, coefficient d'atténuation, position des éléments piézo-électriques, ...) ajustés lors de la phase d'apprentissage.
- Les fonctions, potentiellement non-linéaires, $I_i^{A_0/S_0}$ désignent l'**interaction des modes** A_0 et S_0 au niveau de l'élément i . Ces fonctions peuvent être données analytiquement (avec une loi de diffraction ou de réflexion par exemple) et ajustées lors de la phase d'apprentissage ou apprises en utilisant un réseau de neurones dédié si le comportement de l'interaction est trop complexe.
- Les fonctions, potentiellement non-linéaires, $I_i^{A_0 \rightarrow S_0/S_0 \rightarrow A_0}$ désignent les phénomènes de **conversion entre les modes** A_0 et S_0 au niveau de l'élément i . Ces fonctions peuvent être données analytiquement si une loi physique est connue et ajustées lors de la phase d'apprentissage ou apprises en utilisant un réseau de neurones dédié si le comportement de l'interaction est trop complexe.
- Les dépendances fréquentielles des fonctions $X(f)$, $Y(f)$, $P_{ij}(f)$, $H_{S/A}^{A_0/S_0}(f)$ sont omises pour faciliter la lecture.

L'équation (VI.2) décrit ainsi la propagation d'un paquet d'onde dans une structure hôte suite à son émission par un élément piézo-électrique, son interaction avec les différents éléments

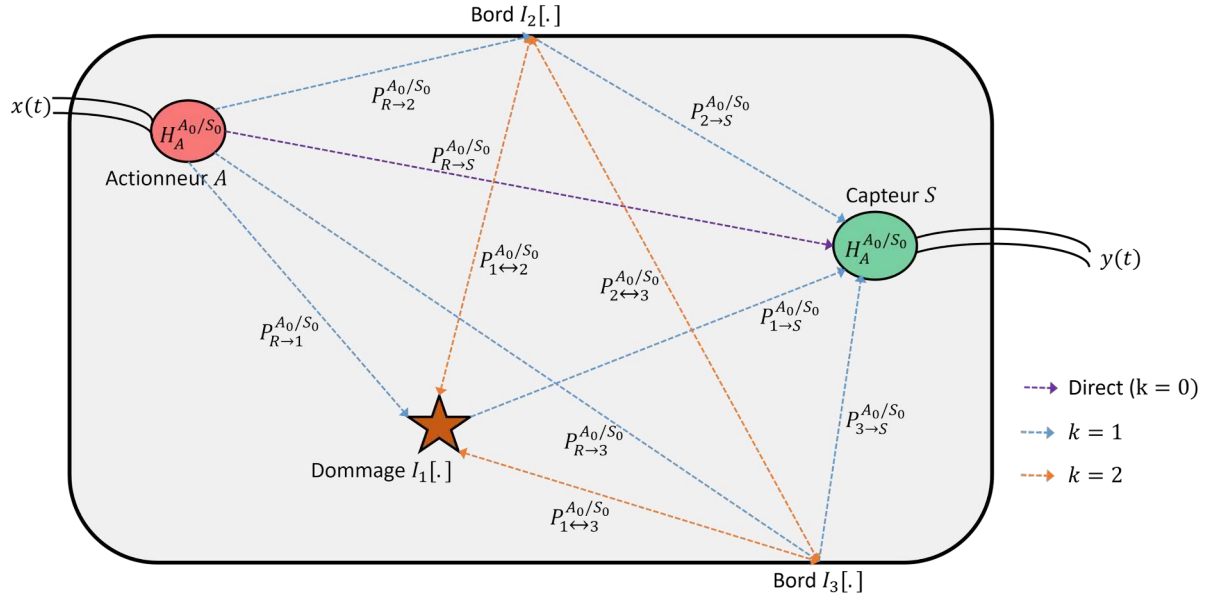


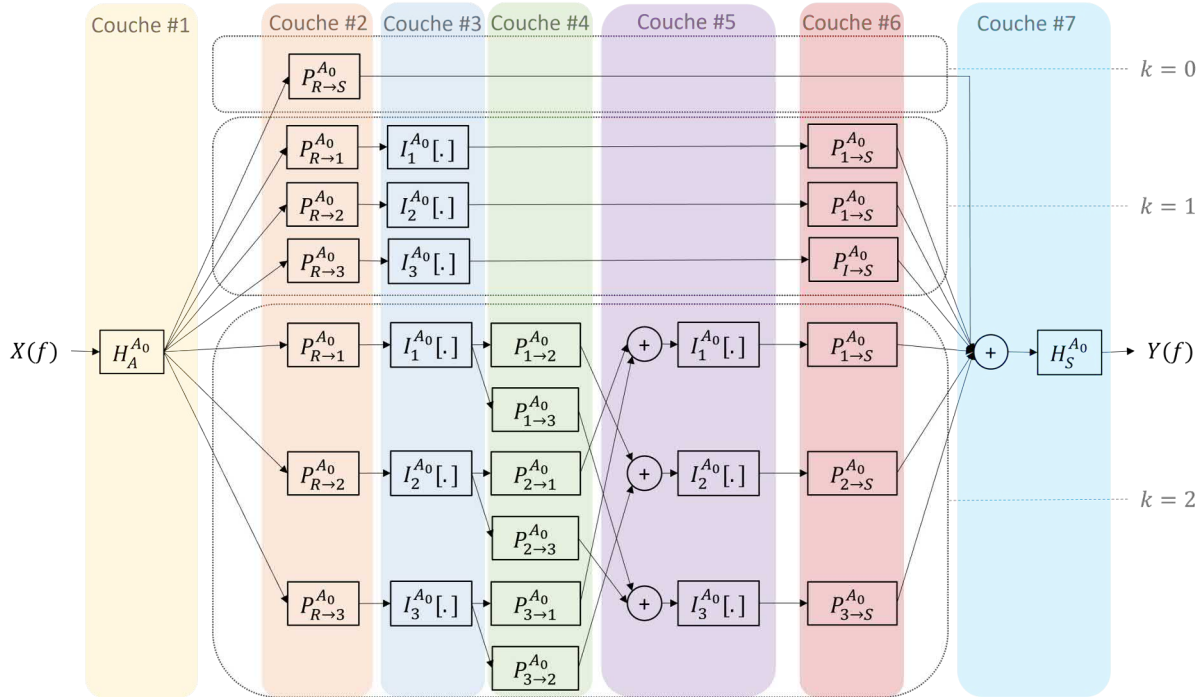
FIGURE VI.7 – Schéma de principe illustrant l'idée physique sous-jacente au réseau de neurones basé sur les rayons.

de la structure, et enfin sa réception au niveau d'un autre élément piézo-électrique utilisé comme capteur. Dans cette équation, la première ligne désigne les chemins directs pour les modes S_0 et A_0 . Les "... " désignent ensuite toutes les interactions d'ordre k avec $1 \leq k < K$. Une interaction sera considérée d'ordre k si le rayon considéré a interagi exactement k fois avec un élément d'interaction dans la structure hôte (le chemin direct correspond ainsi à $k = 0$). Les quatre dernières lignes détaillent enfin l'interaction d'ordre $k = K$ fixé ici comme le nombre maximum d'interactions modélisées. Chaque ligne correspond à un mode (mode S_0 pour la ligne 2 et mode A_0 pour la ligne 4) ou à une conversion de modes (de S_0 vers A_0 pour la ligne 3 et de A_0 vers S_0 pour la ligne 5). Si une ligne est considérée en détail, il est possible de voir qu'elle est constituée de K imbrications de fonctions $I_{i_K}[\cdot]$ recevant chacune les signaux issus des interactions précédentes après propagation.

Représentation "neuronale" : L'idée est ensuite de partir de l'équation (VI.2) pour montrer qu'il est possible de construire un réseau de "neurones" la représentant. Un tel réseau est construit pour l'exemple du mode A_0 , pour $I = 3$ éléments d'interaction, et pour $K = 2$ interactions successives pour illustrer cette idée. Ce réseau est représenté graphiquement à la Figure VI.8. En considérant cette figure ligne par ligne, il est possible de retrouver les différents termes de l'Eq. (VI.2) avec en haut le chemin direct correspondant à $k = 0$, ensuite une unique interaction correspondant à $k = 1$ et enfin une double interaction correspondant à $k = 2$. Il est aussi possible de considérer cette figure de gauche à droite. En regardant les choses de cette façon, il est alors naturel de faire apparaître 7 couches successives en interaction les unes avec les autres et qui constituent donc un réseau "neuronal".

Les "neurones" de la Figure VI.8 sont néanmoins assez particuliers au regard des neurones classiquement considérés dans les réseaux de neurones habituels. En effet, il est possible de voir que 3 familles de neurones coexistent :

- Les neurones "électromécaniques" qui réalisent les conversions électro-mécaniques et qui


 FIGURE VI.8 – Exemple d’implémentation “neuronal” pour le mode A_0 avec $K = 2$ et $I = 3$.

sont présents sur les couches d’entrée et de sortie (couches #1 et #7). Ces neurones peuvent en pratique correspondre à des fonctions de transferts analytiques dont les paramètres peuvent être adaptés lors du processus d’apprentissage. Ces paramètres font intervenir différentes grandeurs physiques telles que le diamètre et l’épaisseur de l’élément piézo-électrique, les propriétés électro-mécaniques du matériau constitutif, ...

- Les neurones “*propagatifs*” qui propagent des paquets d’ondes d’un point à un autre. Ces neurones sont des opérateurs de propagation paramétrés par une vitesse de propagation et un coefficient d’atténuation spatial qui peut être déterminé analytiquement. Ces neurones sont présents uniquement dans des couches paires (ici les couches #2, #4, et #6).
- Les neurones “*d’interaction*” qui représentent les interactions des ondes avec les discontinuités géométriques et avec les dommages. Si des modélisations analytiques sont disponibles, elles peuvent être utilisées ou alors ces neurones peuvent eux-même contenir un réseau de neurone classique. Ces neurones sont présents uniquement dans des couches impaires (ici les couches #3 et #5).

Il est par ailleurs important de souligner le fait que les “neurones” intervenant dans les différentes couches ne sont pas indépendants les uns des autres. En effet, les 9 blocs correspondant aux fonctions d’interaction $I_{1,2,3}^{A_0}[\cdot]$ ne correspondent qu’à 3 blocs différents et ayant les mêmes paramètres. De même, en fonction des hypothèses retenues, il est sans doute possible de considérer que $P_{i \rightarrow j}^{A_0} = P_{j \rightarrow i}^{A_0}$. Les connexions entre les différentes couches sont également dictées par la physique et peuvent être plus ou moins complexes et spécifiées a priori.

Enfin, un dernier commentaire est lié au fait que cette représentation de l’équation (VI.2) sous la forme d’un réseau de “neurones” à 7 couches pour l’exemple du mode A_0 , pour $I = 3$ éléments d’interaction, et pour $K = 2$ interactions successives n’est pas unique. En effet, le bloc associé au chemin direct a été associé à la couche #4 mais aurait aussi bien pu être associé à la couche #5 ou à la couche #6. De façon similaire, les “neurones” propagatifs et d’interaction

associés à $k = 1$ auraient pu être affectés de façon équivalente à d'autres couches.

Travaux de recherche proches : Cette approche possède des liens avec les algorithmes de type “*Orthogonal Matching Pursuit*” [R|LM13 ; R|Zha+20a ; R|Gao+23]. Ces algorithmes cherchent à décomposer un signal sur un dictionnaire de signaux élémentaires établi à l'avance. Dans le cas du SHM, il s'agit de chercher à décomposer un signal mesuré sur un dictionnaire de signaux de type “*burst*” temporellement décalés et atténués. Dans cette approche, l'idée sous-jacente est encore que le signal qui sera reçu sera la somme de paquets d'ondes qui auront voyagé dans la structure hôte. Cependant cette approche ne va pas jusqu'à une description physique et n'est pas basée sur des réseaux de neurones.

L'idée de structurer des algorithmes d'apprentissage automatique pour le SHM par ondes de Lamb a également été étudiée dans le contexte des processus gaussiens. Dans ce contexte, un noyau codant directement les phénomènes d'atténuation des ondes a été proposé [R|Hay+21]. Cette approche ne modélise cependant ni les aspects propagatifs ni les interactions entre les ondes et les différents éléments de la structure hôte.

Cette idée a aussi été brièvement explorée dans un domaine légèrement différent qui est celui de l'acoustique sous-marine. La problématique est ici de comprendre les signaux reçus par un sonar qui peuvent être le résultats de différents phénomènes de propagation et d'interaction. L'idée de “*Ray-based neural networks*” a initialement été proposée et mise en œuvre dans ce contexte [R|LC22]. Le contexte du SHM est cependant plus large et l'approche proposée ici est ainsi plus générique.

Enfin, cette idée de construire un modèle pour le SHM par ondes de Lamb en se basant exclusivement sur des rayons a été également proposée dans un contexte de modèle basé uniquement sur la physique [R|Hei+17]. En couplant des simulations par éléments finis avec une modélisation géométrique de la structure hôte, il a été montré que de bons résultats peuvent être obtenus. L'objectif du projet proposé ici est d'étendre cette approche en lui adjoignant les possibilités offertes par l'apprentissage automatique.

Plan de travail et collaborations potentielles : Cette première formalisation montre que l'approche par rayons, inspirée de la physique, peut s'implémenter sous la forme d'un réseau de “*neurones*” avec des neurones spécialisés et interprétables physiquement (“*neurones*” électromécaniques, propagatifs, ou d'interaction). Les prochaines étapes associées à cet axe de recherche seront de démontrer que l'équation (VI.2) s'écrit nécessairement sous la forme d'un tel réseau, de proposer une procédure pour trouver ce réseau, et enfin de réaliser son implémentation et sa validation sur des données issues de simulation par éléments finis et sur des données expérimentales. Pour mener à bien cet objectif, des collaborations avec Pierre MARGERIT, Eric MONTEIRO, Chady GHNATIOS, Nicolas HASCOET, Francisco CHINESTA, Etienne BALMES et Nazih MECHBAL (équipe DYSCO, PIMM) ainsi éventuellement qu'avec David ROZE et Thomas HELIE (équipe S3AM, IRCAM) sont envisageables.

VI.1.2.2 Axe #2 : Adaptation de modèles guidés par la physique

L'autre axe de recherche proposé dans ce contexte est lié à la façon de réaliser l'adaptation de domaine dans le contexte du SHM de structures aéronautiques par ondes de Lamb) (voir Section VI.1.1.6). Comme cela a été défini dans la Section VI.1.1.6, le problème de l'adaptation de domaine est lié à des distributions marginales qui sont différentes ($p(X_s) \neq p(X_t)$) ou bien à des distributions conditionnelles qui sont différentes ($p(y_s|X_s) \neq p(y_t|X_t)$). Il est possible de penser le problème d'abord du point de vue des *données* en cherchant un nouvel espace $\phi(\mathcal{X})$

dans lequel l'une, l'autre, ou ces deux distributions sont similaires et donc où il est possible de réaliser la tâche désirée. Il est aussi possible de penser le problème du point de vue du *modèle* réalisant la tâche désirée en cherchant à modifier les paramètres du modèle pour passer d'un espace à un autre ou bien en rendant le modèle efficace sur les domaines *cible* et *source*. Une piste intéressante pour les modèles basés sur les données sera d'abord présentée en se basant sur la théorie du transport optimal puis des idées relatives aux modèles *guidés par la physique* seront ensuite évoquées.

Adaptation de domaine par transport pour le SHM : Les outils actuellement développés pour répondre à cette problématique cherchent donc un nouvel espace $\phi(\mathcal{X})$ dans lequel l'une, l'autre, ou ces deux distributions sont similaires et donc où il est possible de réaliser la tâche désirée. Dans le contexte du SHM, trois méthodes ont été explorées dans ce but [R|LW20 ; R|GLW20 ; R|Gar+22] :

- *Transfer Component Analysis (TCA)* : La TCA propose d'apprendre une transformation non-linéaire de l'espace \mathcal{X} qui rend proche les probabilités marginales $p(X_s)$ et $p(X_t)$ dans ce nouvel espace. Ce nouvel espace, est ensuite utilisé (après éventuellement un opération de réduction de dimension) pour réaliser la tâche voulue. Cette méthodologie n'utilise donc pas les prédictions connues y_s et y_t et le choix de la transformation non-linéaire ϕ à appliquer reste empirique.
- *Joint Domain Adaptation (JDA)* : La JDA cherche à apprendre une transformation non-linéaire de l'espace \mathcal{X} qui rend proche les probabilités marginales $p(X_s)$ et $p(X_t)$ ainsi que les probabilités conditionnelles $p(y_s|X_s)$ et $p(y_t|X_t)$. Comme pour la TCA, ce nouvel espace est ensuite utilisé (après éventuellement un opération de réduction de dimension) pour réaliser la tâche voulue. Cette méthodologie utilise donc les prédictions connues pour le domaine source y_s et doit estimer les prédictions pour le domaine cible y_t si elles ne sont pas connues. Le choix de la transformation non-linéaire ϕ à appliquer reste également empirique.
- *Adaptation Regularization based Transfer Learning (ARTL)* : Plutôt que de chercher d'abord un nouvel espace, puis d'apprendre ensuite la tâche dans ce nouvel espace, la méthode ARTL propose de coupler les deux actions au sein de la même optimisation. La méthode ARTL cherche donc simultanément et de façon itérative la transformation non-linéaire permettant de passer à un nouvel espace dans lequel les distributions sont proches et d'obtenir la fonction permettant de réaliser la tâche désirée. La fonction ϕ est trouvée par apprentissage machine parmi une famille de fonctions candidates.

Les opportunités offertes par le transport optimal : La théorie du transport optimal date du 18^{ème} siècle et a commencé avec Gaspard Monge qui recherchait la solution la plus économique pour déplacer des objets depuis un ensemble de points de départ vers un ensemble de points d'arrivée [R|Kan06 ; R|Vil09]. L'idée sous-jacente au transport optimal est donc de chercher la meilleure transformation permettant de réaliser cette opération par l'intermédiaire d'une fonction évaluant le coût de ce transport. En réalisant un parallèle avec l'adaptation de domaine, il s'agit ainsi exactement de définir comment transformer la distribution marginale $p(X_t)$ associée à l'espace cible pour qu'elle soit similaire à la distribution marginale $p(X_s)$ associée à l'espace source par l'intermédiaire d'une fonction coût dédiée. Les développements mathématiques récents associés à cette théorie ont permis de démontrer que (voir [E|Pos22] pour plus de détails) :

1. L'existence d'un minimum de la fonction coût associée au transport optimal est garantie en ne réalisant que très peu d'hypothèses (problème primal de Monge-Kantorovich).

2. Ce minimum peut être trouvé sous la forme d'une fonction convexe satisfaisant certaines contraintes (problème dual de Monge-Kantorovich).
3. Cette fonction convexe est accessible en pratique via la résolution d'un problème d'optimisation de type *MiniMax*.
4. Les réseaux de neurones à entrées convexes (*Input Convex Neural Networks*, ICNN) peuvent apprendre cette fonction convexe permettant le transport optimal en apprenant à résoudre le problème d'optimisation *MiniMax* mentionné à l'étape précédente.

Ainsi, la résolution du problème de transport optimal peut être réalisée par apprentissage automatique et est basée sur de solides fondements mathématiques garantissant la minimisation d'une fonction coût pertinente. L'utilisation de la théorie du transport optimal en apprentissage automatique est relativement récente [R|Dam+18] et n'a pas encore été appliquée au SHM. En comparaison des méthodes TCA, JDA et ARTL, les méthodes basées sur le transport optimal permettent de ne pas faire d'hypothèse relativement à la transformation non-linéaire sous-jacente mais de la découvrir via l'apprentissage d'un réseau ICNN. Cela permet potentiellement d'obtenir de meilleures propriétés de généralisation.

De premiers résultats d'application de la théorie du transport optimal au SHM par ondes de Lamb ont été obtenus dans la thèse d'H. Postorino [E|Pos22]. L'objectif était de partir d'une simulation numérique d'une pièce courbée réalisée en matériau composite et de voir comment des stratégies d'adaptation de domaine basées sur le transport optimal pouvaient compenser des incertitudes liées à la géométrie de la plaque et à ses propriétés matériau, ou bien liées au positionnement des éléments piézo-électriques sur la structure hôte. Les différents cas testés sont présentés à la Figure VI.9.

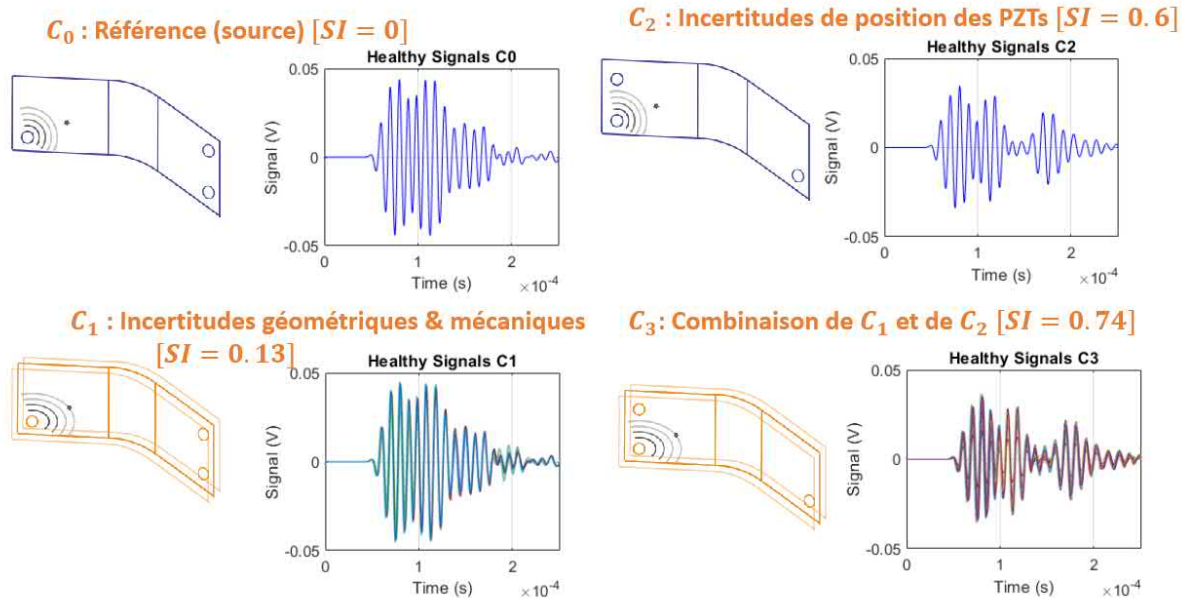


FIGURE VI.9 – Cas de figure considéré pour tester l'adaptation de domaine basée sur le transport optimal dans le contexte du SHM par ondes de Lamb (d'après [E|Pos22]).

Les dissimilarités entre les différentes structures étudiées peuvent être quantifiées par l'intermédiaire d'un *Structural Index* (noté *SI* sur la Figure VI.9) quantifiant l'écart entre les signaux obtenus pour les différentes configurations testées et décrites dans la Figure VI.9. La tâche visée

ici est la localisation d'un dommage et la quantification de sa sévérité (voir [E|Pos22] pour plus de détails). Les résultats obtenus sont présentés à la Figure VI.10 sous la forme d'une erreur quadratique moyenne synthétisant les résultats de prédiction associés aux tâches de localisation et de quantification. Quatre cas sont considérés :

- *Pas d'adaptation de domaine* : la tâche est réalisée sur les structures cibles en ayant été apprise sur la structure source.
- *Apprentissage sur le domaine cible uniquement* : la tâche est réalisée sur les structures cibles en ayant été apprise sur l'ensemble des structures cibles qui ne constituent donc pas un ensemble d'apprentissage homogène.
- *Apprentissage mixte* : la tâche est réalisée sur les structures cibles ayant été apprise sur les données issues de la structure sources et des structures cibles.
- *Adaptation de domaine* : la tâche est réalisée en ayant été apprise sur les données issues de la structure source et après une adaptation de domaine basée sur le transport optimal.

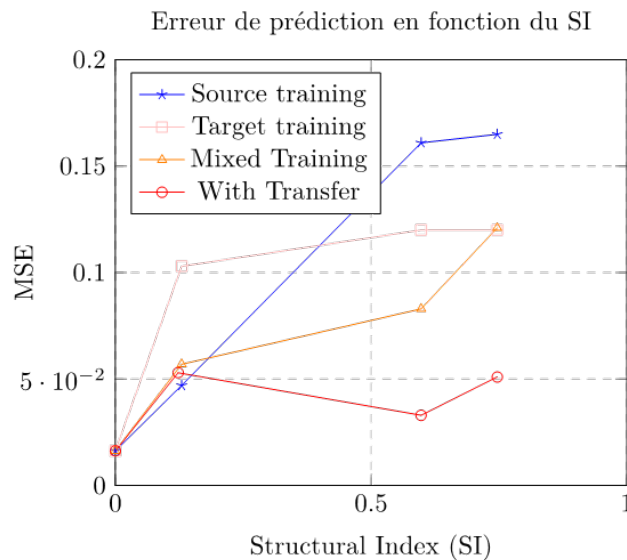


FIGURE VI.10 – Résultats d'adaptation de domaine basée sur le transport optimal dans le contexte du SHM par ondes de Lamb obtenus sur les cas d'étude considérés (d'après [E|Pos22]).

Les résultats obtenus dans ce cas purement numérique montrent que l'adaptation de domaine basée sur le transport optimal permet d'améliorer de façon significative la réalisation des tâches de localisation du dommage et de quantification de sa taille dans le contexte du SHM par ondes de Lamb. Il semble donc pertinent et intéressant de chercher à exploiter plus en avant cette méthodologie dans ce contexte. Par exemple, une comparaison des performances obtenues via cette méthode et les méthodes plus classiques que sont la TCA, la JDA et l'ARTL pourra être réalisée.

Adaptation de domaine pour des modèles guidés par la physique : L'approche précédente pour l'adaptation de domaine cherche uniquement à adapter les données traitées par les modèles mais sans réellement réfléchir à la façon dont les modèles pourraient être adaptés pour réaliser plus naturellement cette adaptation de domaine. L'idée est ici de se concentrer à présent sur les modèles, en particulier sur les modèles *guidés par la physique* pour envisager des solutions permettant de réaliser l'adaptation de domaine. Parmi les pistes potentielles, il est possible de

fournir aux modèles des *a priori* plausibles concernant leur paramètres tout en leur laissant une marge de manœuvre qu'ils pourront explorer au cours de leur apprentissage. Si l'exemple des RBNN est pris, pour les neurones propagatifs, il est par exemple possible de donner comme valeur initiale au modèle avant apprentissage les prédictions de vitesse de propagation et d'atténuation réalisées analytiquement en bornant les valeurs possibles qui pourront être prises en fonction des incertitudes connues sur les propriétés des matériaux. Il est également possible d'incorporer une erreur de positionnement des éléments piézo-électriques probable de quelques *mm* que le modèle pourra explorer lors de la phase d'apprentissage. De cette façon les modèles *guidés par la physique* pourront être adaptés à chaque contexte rencontré avec très peu de données expérimentales. En ce qui concerne le transport optimal, il pourra être utilisé pour réaliser l'adaptation de domaine sur les parties des modèles *guidés par la physique* ne pouvant être interprétées. Par exemple, si les interactions *ondes/dommage* sont représentées via un réseau de neurones classique, la méthodologie de transport optimal pourra opérer à ce niveau.

Plan de travail et collaborations potentielles : Ces premiers résultats montrent que l'adaptation de domaine via le transport optimal mérite d'être explorée plus en détails et comparée avec les approches plus classiques. Par ailleurs, l'adaptation de domaine pour les modèles *guidés par la physique* semble également prometteuse et sera étudiée en détail pour le cas de RBNN proposés dans l'axe précédent. Des collaborations avec Pierre MARGERIT, Eric MONTEIRO, Chady GHNATIOS, Nicolas HASCOET, Francisco CHINESTA, Etienne BALMES et Nazih MECHBAL (équipe DYSCO, PIMM) ou bien avec Samuel da SILVA et Douglas DOMINGUES BUENO (Mechanical Engineering Department, UNESP, Brésil) dans le cadre d'un projet CO-FECUB pourraient être envisagées sur ce sujet.

VI.2 Nouveaux matériaux actifs pour les structures multifonctionnelles

Comme cela a été vu dans le Chapitre III, les céramiques PZTs sont les matériaux actifs actuellement les plus utilisés pour la réalisation de structures intelligentes, vibrantes, et multifonctionnelles. Ces transducteurs électromécaniques souffrent cependant de plusieurs limitations pratiques qui brident le développement dans ce contexte :

- **leurs géométries sont limitées** à des formes simples (céramiques rectangulaires ou rondes) à cause de leur fabrication par frittage et ces matériaux sont délicats à usiner,
- **ces matériaux sont fragiles** ce qui pose problème en pratique concernant leur tenue en service en cas d'impacts ou bien leur adaptation à des surfaces qui ne sont pas planes,
- **ces matériaux contiennent du plomb**, ce qui est de moins en moins acceptable d'un point de vue environnemental.

En conséquence, l'objectif du projet de recherche présenté ici est d'explorer les opportunités offertes par différents matériaux actifs alternatifs récemment mis au point, tels que les "PVDF-s"¹⁸ ou les polymères ioniques pour surmonter ces difficultés. En effet, ces matériaux peuvent être fabriqués, mis en forme, ou imprimés sans réelles contraintes géométriques, ne sont pas fragiles, et sont exempts de plomb. Ces nouveaux matériaux actifs permettent aussi d'explorer de nouvelles possibilités d'applications en plus du SHM (contrôle actif, retour haptique, restitution sonore, ...) et d'aller vers une réelle multifonctionnalité des structures intelligentes vibrantes. Ceci est rendu possible par le fait que leur géométrie, ainsi que la géométrie du réseau entier, peuvent être entièrement optimisés pour atteindre un ensemble de fonctions cibles souhaitées,

18. Je regrouperai sous cette appellation, de façon abusive du point de vue des chimistes, différents matériaux tels que les P(VDF-co-TrFE) ou les P(VDF-ter-TrFE-ter-CTFE).

là où les géométries des PZTs étaient figées. Le positionnement du projet sera d'abord décrit brièvement en Section VI.2.1 puis les différents axes du projet de recherche seront explicités en Section VI.2.2.

VI.2.1 Positionnement du problème

VI.2.1.1 Les polymères électro-actifs comme alternative aux céramiques PZTs

Les polymères électro-actifs constituent une catégorie de matériaux bénéficiant des avantages liés à la mise en forme des polymères tout en étant électro-actifs, c'est à dire tout en présentant un couplage électromécanique permettant d'en faire des actionneurs et des capteurs. Il existe deux catégories principales de polymères électro-actifs [R|BA19 ; R|Bar01], les **polymères électroniques** pour lesquels le couplage électromécanique se fait par l'intermédiaire d'une stimulation par un champ électrique ou bien de forces de Coulomb, et les **polymères ioniques** faisant intervenir en leur sein la mobilité ou la diffusion des ions pouvant se déplacer à l'intérieur du matériau lorsqu'ils sont plongés dans un champ électrique et ainsi générer un déplacement.

Les polymères électro-actifs électroniques peuvent être ensuite classés en deux familles majeures. La première famille, les **élastomères diélectriques** [R|OOM08], regroupe les matériaux qui se déforment en présence de deux électrodes soumises à des charges opposées. Ces matériaux se déforment sous effet de l'*électrostriction* et possèdent une permittivité diélectrique qui varie avec le champ électrique qui leur est imposé. En conséquence, la déformation produite par ces matériaux est proportionnelle au carré du champ électrique qui leur est appliqué. Ces matériaux sont principalement utilisés comme actionneurs. Les propriétés électromécaniques de ces matériaux polymères vendus commercialement peuvent assez facilement être modifiées soit sous l'effet d'une précontrainte, soit en les mélangeant avec un autre polymère, soit en y ajoutant des particules chargées ou non, ou soit en les modifiant chimiquement [R|Ban+21a]. La seconde famille, les **polymères ferroélectriques** [R|Da 13], regroupe les polymères pour lesquels des dipôles électrostatiques orientables sont présents sur les chaînes [R|BB08 ; R|Zan22]. Les copolymères ou terpolymères à base de fluorides polyvinylidènes (abusivement nommés "PVDF" ici) sont les représentants majeurs de cette famille. Ces matériaux se déforment du fait de la réorientation de ces dipôles en présence d'un champ électrique. La déformation produite par ces matériaux peut être proportionnelle au champ (effet *piézoélectrique*) ou bien à son carré (effet *électrostrictif*) en fonction du matériau. Les propriétés électromécaniques de ces matériaux peuvent également être adaptées assez facilement sur la base de matériaux disponibles commercialement via des mélanges avec d'autres polymères, un contrôle de leur cristallisation par la mise en forme du matériau, ou bien des modifications chimiques [R|Sou+17]. Il est ainsi possible de créer des copolymères comme le P(VDF-co-TrFE) ou bien encore des terpolymères comme le P(VDF-ter-TrFE-ter-CTFE). Ces matériaux offrent donc accès à une large gamme de propriétés électromécaniques et peuvent être mis en forme de façon variée. La marque Piézotech¹⁹ rattachée au groupe ARKEMA commercialise par exemple ce genre de matériaux [R|Pie15]. Ils sont également disponibles à la vente sous la forme de fils pour l'impression 3D²⁰.

Les **polymères ioniques** (PI) peuvent également être classés en différentes familles [R|BA19 ; R|Bar01]. Quelle que soit la famille considérée, le principe d'actionnement sous-jacent est toujours le même : sous l'effet d'un champ électrique des ions peuvent se déplacer au sein du matériau et leur déplacement induit des variations locales de volume qui engendrent à leur tour une déformation mécanique. Les différentes familles de polymères électro-actifs ioniques sont les

19. <https://piezotech.arkema.com/en/>

20. <https://piezopvdf.com/pvdf-trfe-F2330-3D-printing-filament/>

	Céramiques PZTs	“PVDFs”	PI	Encres PZTs
Tension	$\simeq 10$ V	$\simeq 100$ V	$\simeq 1$ V	$\simeq 10$ V
Déformation	$\simeq 0.1$ %	$\simeq 10$ %	$\simeq 100$ %	$\simeq 0.1$ %
Temps de réponse	$\simeq \mu$ s	\simeq ms	$\simeq 100$ ms	$\simeq \mu$ s
Module de Young	$\simeq 70$ GPa	$\simeq 2$ GPa	$\simeq 0.1$ GPa	$\simeq 30$
Densité (kg/m ³)	$\simeq 7000$	$\simeq 2000$	$\simeq 1000$	$\simeq 1000$
d_{31} ($\times 10^{-12}$ C/N)	$\simeq 100$	$\simeq 10$	$\simeq 10^5$ (?)	$\simeq 10$
Température de Curie (°C)	$\simeq 300$	$\simeq 100$	$\simeq 100$	$\simeq 100$
Référence	[A Fen+16a]	[R Pie15]	[R TG11]	[R KDL21]

TABLE VI.1 – Comparaison de l’ordre de grandeur des propriétés électromécaniques principales des polymères électro-actifs, des encres PZTs et des céramiques PZT.

polymères conducteurs, les composites “*métal-polymères ioniques*” (IPMC pour “*ionic polymer metal composites*” [R|Kru+15; R|Jo+13; R|TG11]), et les composites réalisés à l’aide de particules carbonées (nano-tubes de carbones par exemple). Les polymères conducteurs nécessitent de forts voltages et des courants élevés et les composites réalisés à l’aide de particules carbonées sont encore à un stade précoce de développement. Pour ces matériaux actifs, il est également possible de contrôler les propriétés électromécaniques via l’utilisation de différents liquides ioniques et en mélangeant différents polymères capables de créer des canaux pour les ions ou bien non-miscibles avec ces derniers. De part leur mécanisme d’actuation basé sur la mobilité des ions et des cations, les polymères ioniques sont cependant plus lents que les autres matériaux considérés.

En complément des différents polymères électro-actifs mentionnés précédemment, une dernière catégorie de matériaux est disponible pour répondre au cahier des charges visé ici. Ces matériaux, appelés **encres ou pâtes PZT** sont constitués de particules plus ou moins grosses de céramiques PZT noyées dans un solvant plus ou moins visqueux et permettant leur dépôt sur une surface selon une géométrie désirée [R|KDL21; R|Gli+22]. La société ALGRA²¹ commercialise par exemple une pâte de ce type et l’utilise pour la réalisation de claviers et d’interfaces *homme-machine*. Cependant, elle ne communique pas sur la composition de sa pâte ni sur les propriétés électromécaniques associées. Ces encres ou pâtes PZT offrent de nombreuses possibilités en terme de design mais les propriétés électromécaniques résultantes restent néanmoins plus basses que celles des céramiques frittées.

Le tableau VI.1 compare les propriétés électromécaniques des polymères électro-actifs piézo-électriques, des encres PZTs et des céramiques PZT trouvées dans la littérature. Les avantages des céramiques piézoélectriques est leur rigidité et leur densité qui leur assurent un bon couplage avec les matériaux hôtes. De plus ces céramiques répondent rapidement, fortement, et peuvent soutenir des températures relativement élevées. Elles supportent cependant de faibles déformations et leur géométrie est impossible à personnaliser. Les matériaux “PVDF” sont moins denses et moins rigides, ce qui leur permet de se déformer plus et assez rapidement. Les polymères ioniques sont encore moins lourds et moins denses et présentent a priori des capacités de déformations bien plus importantes. Les valeurs présentes dans la littérature demandent cependant à être vérifiées expérimentalement (le coefficient d_{31} annoncé de 10^5 pC/N dans [R|TG11] paraît très grand). Enfin les encres PZT présentent globalement des propriétés comparables aux “PVDFs” mais avec une capacité de déformation moindre.

21. <https://www.algragroup.ch/fr/>

VI.2.1.2 Un large champ des possibles

Dans le contexte des structures vibrantes multifonctionnelles, l'atout majeur des matériaux décrits précédemment est que leurs propriétés électromécaniques peuvent être contrôlées via la microstructure du matériau considéré et que de nombreux procédés de mise en œuvre sont disponibles pour réaliser les géométries désirées de façon quasiment indépendante de leur complexité. Ces deux points sont illustrés ici via des travaux réalisés au sein du laboratoire PIMM pour des actionneurs en flexion réalisés en "PVDF" et en polymères ioniques [R|Zan22 ; A|Gul+23] et pour des transducteurs ultrasonores réalisés en "PVDF" par ARKEMA et en pâte PZT fournie par ALGRA par l'IFAM²².

Contrôle des propriétés électromécaniques via le contrôle de la microstructure ou de la chimie : Un premier point d'importance soulevé ici est qu'il est relativement facile de contrôler les propriétés mécaniques et électriques des matériaux électro-actifs utilisés via le contrôle de leur chimie intrinsèque ou bien par le contrôle de leur organisation interne, c'est à dire de leur microstructure. En effet, les mécanismes de couplage électromécanique dépendent de la composition chimique du matériau et de l'organisation au niveau microscopique. Par exemple, dans sa thèse, S. Zanchi [R|Zan22], a réalisé des actionneurs en flexion en terpolymères à base de VDF avec cinq compositions ayant des teneurs en CTFE différentes (allant de 0 à 10 %mol), appelées Terpo65-0, Terpo66-4.7, Terpo67-6.4, Terpo67-8.3 et Terpo68-10.3 et fabriqués à partir de deux solvants : la MEK (2-butanone) et le TEP (triéthylphosphate). La Figure VI.11 présente par exemple l'impact de cette composition sur le comportement électromécanique et sur le comportement électrique pur et électromécanique des actionneurs ainsi réalisés.

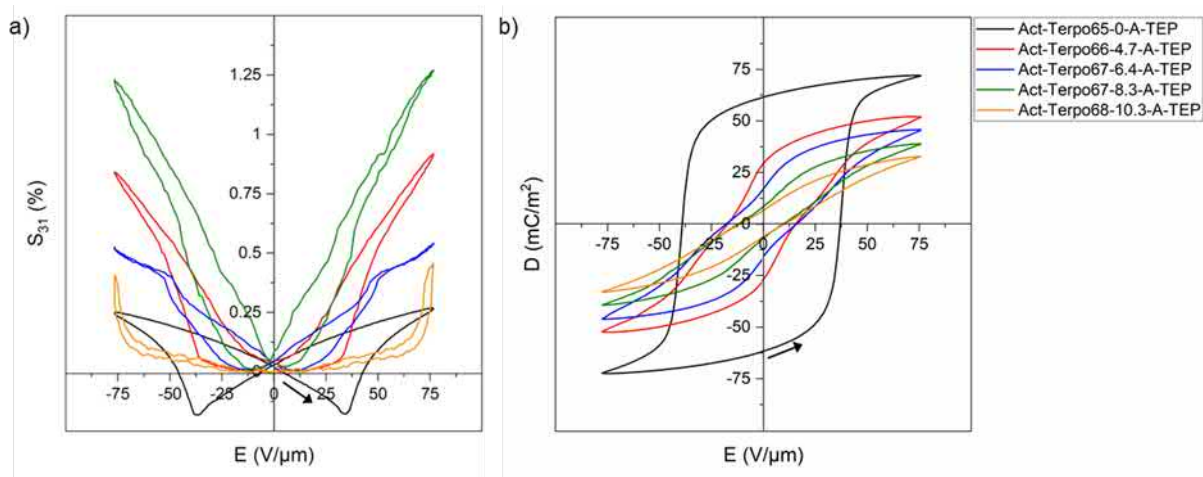


FIGURE VI.11 – a) Évolution de la déformation perpendiculaire au champ électrique appliqué pour différents actionneurs réalisés par S. Zanchi avec le solvant TEP et différentes compositions chimiques, ainsi que b) les cycles D - E correspondants (d'après [R|Zan22]).

A. Guliyeva a réalisé au PIMM des actionneurs de type "polymères ionique" (PI) en ajoutant un liquide ionique à un copolymère tribloc de type poly(methyl methacrylate-*b*-butyl acrylate-*b*-methyl methacrylate), plus familièrement appelé MAM. L'impact de la concentration massique en liquide ionique sur les morphologies obtenues et sur les propriétés électriques et mécaniques des actionneurs PI ainsi obtenus a été étudié. La figure VI.12 représente la réponse mécanique et

22. www.ifam.fraunhofer.de/printing

la microstructure correspondante (à gauche) et la conductivité électrique (à droite) en fonction de la concentration massique en liquide ionique [A|Gul+23]. Sur cette figure, il est clairement visible que la quantité de liquide ionique ajouté impacte directement les propriétés électriques et mécaniques de l'actionneur résultant.

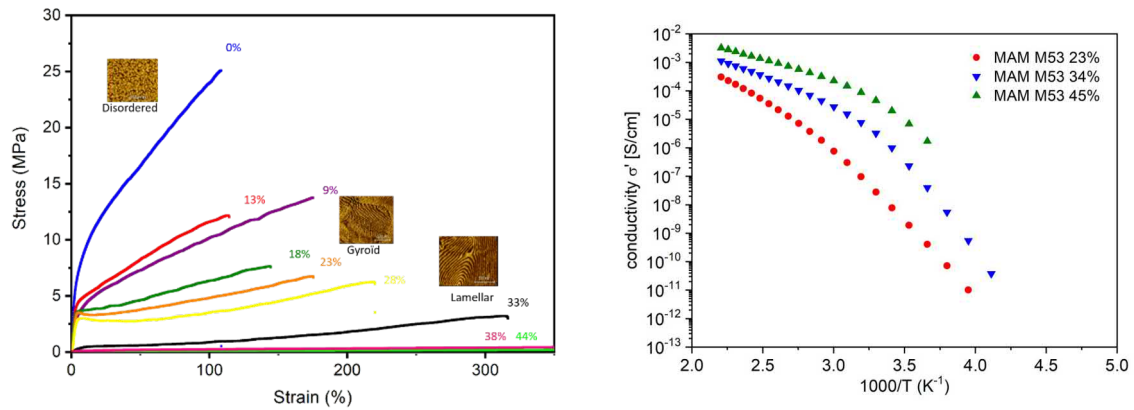


FIGURE VI.12 – Réponse mécanique et microstructure correspondante (à gauche) et conductivité électrique (à droite) en fonction de la concentration massique en liquide ionique (d’après [A|Gul+23]).

Des procédés de mise en forme variés pour des géométries variées : Le second point d’importance lié à l’utilisation de matériaux électroactifs dans le contexte des structures intelligentes multifonctionnelles vibrantes est la possibilité de s’appuyer sur de nombreux procédés de fabrication permettant la réalisation de formes variées, comme illustré par la Figure VI.13. Il est ainsi possible d’imaginer toute sorte de géométrie car les procédés de fabrications disponibles sont nombreux.

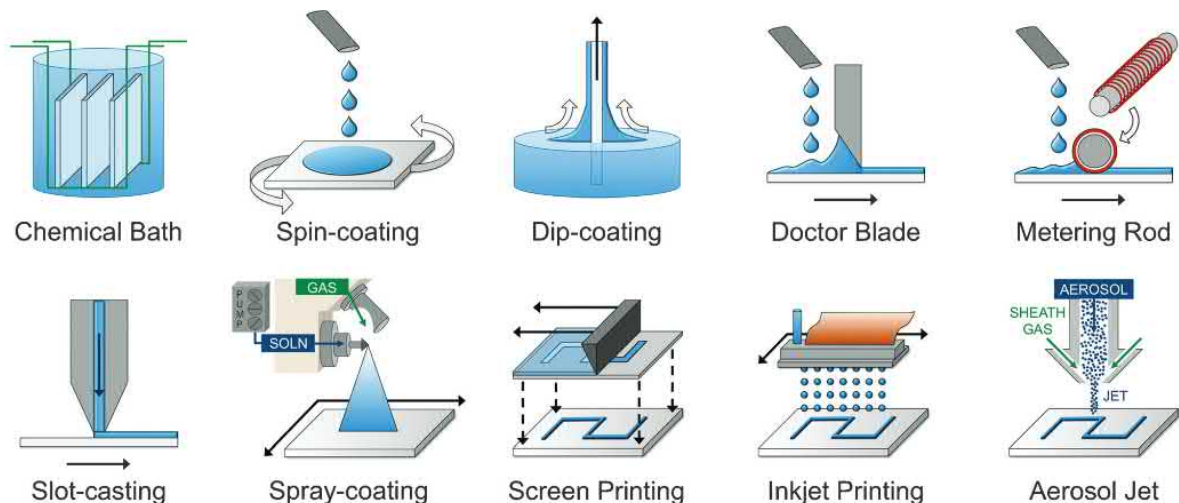


FIGURE VI.13 – Illustration de différents procédés de fabrications de films de polymères électroactifs permettant de réaliser des géométries diverses et variées (d’après [R|PGO11]).

Par exemple, des éléments piézoélectriques imprimés en P(VDF-co-TrFE) nous ont été fournis

par ARKEMA pour être testés dans un contexte de SHM. Dans le cadre du projet MORPHO, des éléments piézoélectriques ont été réalisés via un système de pochoir par l'IFAM. La Figure VI.14 présente les dispositifs réalisés lors de ces essais. Les formes retenues sont pour l'instant assez sommaires mais laissent imaginer ce qu'il est possible de réaliser dans le futur.

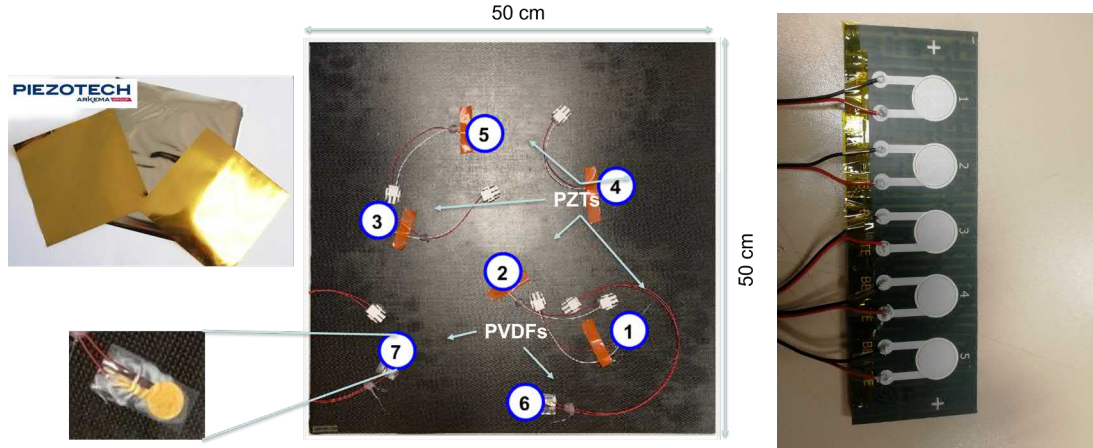


FIGURE VI.14 – Eléments piézoélectriques imprimés en P(VDF-co-TrFE) qui ont été fournis par ARKEMA pour être testés dans un contexte de SHM (à gauche). Eléments piézoélectriques qui ont été réalisés via un système de pochoir par l'IFAM dans le cadre du projet MORPHO (à droite).

VI.2.1.3 Outils de caractérisation électromécanique existants

Ces nouveaux matériaux électro-actifs ouvrent la voie à de nombreuses possibilités applicatives mais nécessitent d'être correctement caractérisés sur les plans électriques, mécaniques et électromécaniques. Ces différentes caractérisations sont importantes car elles vont permettre en pratique de choisir le matériau qui présente le meilleur compromis par rapport au cahier des charges ou à l'application qui seront visés. Les notations suivantes, dans la continuité de celle définies à la Section III.1.1, seront utilisées dans la suite :

- Les contraintes sont regroupées dans un vecteur noté $\underline{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6]$ (en N/m^2)
- Les déformations sont regroupées dans un vecteur noté $\underline{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6]$ (en m/m)
- Les composantes du champ électrique sont notées $\underline{E} = [E_1, E_2, E_3]$ (en V/m)
- Les composantes du déplacement électrique sont notées $\underline{D} = [D_1, D_2, D_3]$ (en C/m^2)

Une convention possible est de choisir d'exprimer le comportement électromécanique du matériau considéré en prenant comme référence les variables $\underline{\sigma}$ et \underline{E} mais d'autre choix sont également possibles. Les équations qui décrivent de façon générale le comportement électromécanique d'un matériau électro-actif peuvent donc être écrites de la façon suivante :

$$\begin{cases} \underline{\varepsilon} &= \underline{C} \cdot \underline{\sigma} + \underline{d}_{E \rightarrow M}(\underline{E}, \underline{\sigma}) \\ \underline{D} &= \underline{\chi} \cdot \underline{E} + \underline{d}_{M \rightarrow E}(\underline{E}, \underline{\sigma}) \end{cases} \quad (\text{VI.3})$$

avec :

- \underline{C} : matrice de souplesse du matériau.
- $\underline{\chi}$: matrice de permittivité diélectrique du matériau.
- $\underline{d}_{M \rightarrow E}(\underline{E}, \underline{\sigma})$ et $\underline{d}_{E \rightarrow M}(\underline{E}, \underline{\sigma})$: les fonctions décrivant les mécanismes de couplage électromécaniques au sein du matériau actif.

La caractérisation d'un matériau électro-actif consistera donc à quantifier expérimentalement les valeurs de ces différents paramètres. L'identification de la forme des fonctions décrivant les mécanismes de couplage fait aussi partie intégrante de la caractérisation. Dans le contexte des structures vibrantes, intelligentes, multifonctionnelles, ce seront plutôt les caractéristiques à **faible champ électrique** et **petites déformations** qui seront recherchées ici. Les effets de la fréquence et de la température sur les caractéristiques seront aussi étudiés.

Caractérisation électrique des polymères actifs à faible champ électrique : La caractérisation électrique d'un matériau électro-actif à faible champ électrique est réalisée par une analyse d'impédance électrique, aussi appelée spectroscopie diélectrique [R|Sch06 ; R|Woo21]. Le comportement électrique d'un polymère électro-actif sera caractérisé par sa matrice de permittivité diélectrique qui est dans le cas général complexe et dépendante de la fréquence. Si un coefficient particulier de la matrice $\underline{\chi}$ est considéré, il est possible d'écrire :

$$\underline{\chi}(f) = \chi'(f) - j\chi''(f) \quad (\text{VI.4})$$

Les polymères possèdent une permittivité diélectrique qui dépend de la fréquence car elle est due à plusieurs types de polarisation pouvant intervenir en leur sein : la *polarisation électronique* qui correspond au déplacement du nuage électronique au voisinage des atomes (observable jusqu'à 10^{15} Hz), la *polarisation atomique* qui correspond au fait que certains atomes attirent préférentiellement des charges positives ou négatives (observable jusqu'à 10^{12} Hz), la *polarisation d'orientation* associée à des groupes de molécules possédant un moment dipolaire permanent (observable jusqu'à 10^5 Hz) et enfin la *polarisation interfaciale* qui provient de l'accumulation de charges aux interfaces (observable jusqu'à 0.1 Hz). Ces différents types de polarisation vont se cumuler pour faire augmenter la permittivité du matériau. Ainsi, lorsque la fréquence augmente, les différentes polarisations arrêtent de se manifester, la partie réelle χ' de la permittivité diélectrique décroît, tandis que la partie imaginaire χ'' rencontre un maximum local au moment de la transition (voir Figure VI.15). Dans le contexte d'intérêt ici, c'est surtout la polarisation d'orientation et la polarisation interfaciale qui seront importantes.

Si un échantillon sous la forme d'un parallélépipède rectangle d'épaisseur e , de surface S et revêtu d'électrodes conductrices sur ses faces supérieures et inférieures est considéré, alors cet échantillon peut être modélisé en première approximation par une capacité \underline{C}_E associée à une admittance électrique \underline{Y}_E définies de la façon suivante lorsqu'il est soumis à une tension V et parcouru par un courant I :

$$\underline{C}_E = \frac{\underline{\chi}S}{e} \quad \text{et} \quad \underline{Y}_E = \frac{I}{V} = j2\pi f \underline{C}_E = \frac{2\pi f \chi'' S}{e} + j \frac{2\pi f \chi' S}{e} = \frac{1}{\tilde{R}} + j2\pi f \tilde{C} \quad (\text{VI.5})$$

L'équation (VI.5) fait donc le lien entre les propriétés diélectriques du polymère électro-actif considéré ($\underline{\chi}$), la géométrie de l'échantillon (S et e) et son comportement électrique (\underline{Y}_E). Il est ainsi possible de modéliser du point de vue électrique cet échantillon de polymère électro-actif comme la mise en parallèle d'une résistance pure \tilde{R} et d'une capacité pure \tilde{C} , qui sont elles-mêmes liées aux propriétés mentionnées précédemment.

La Figure VI.16 représente la caractérisation électrique sous la forme du module de l'admittance $|\underline{Y}_E|$ pour les actionneurs en polymère ionique et en terpolymères à base de VDF réalisés au PIMM par A. Guliyeva et S. Zanchi. Pour ces deux actionneurs, les admittances observées correspondent effectivement à des combinaisons de comportements capacitifs et résistifs, comme suggéré par l'équation (VI.5). Les valeurs observées sont ici différentes d'une part à cause des

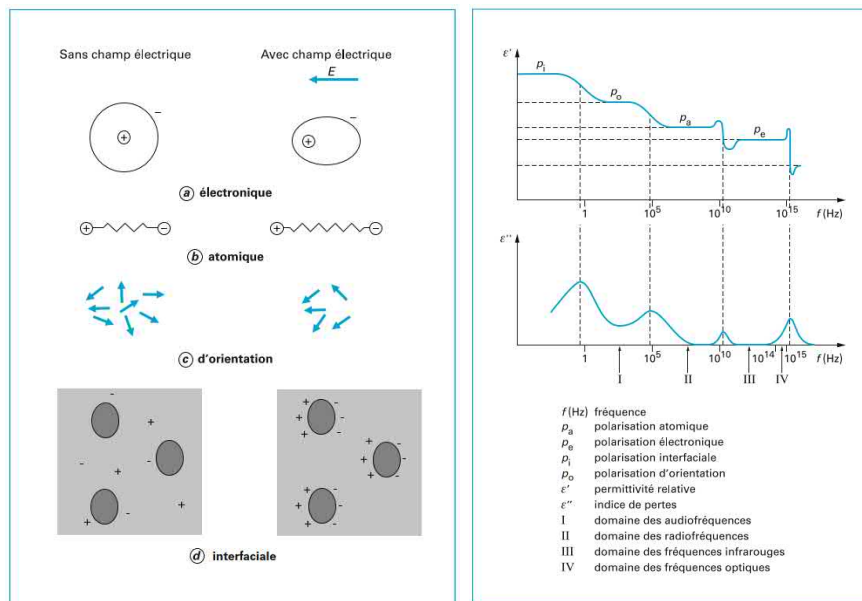


FIGURE VI.15 – À gauche, illustration schématique des différents types de polarisation et à droite, illustration de l'influence des différents types de polarisation sur la permittivité en fonction de la fréquence (d'après [R|Dub98]). La permittivité est notée ici ϵ et non χ .

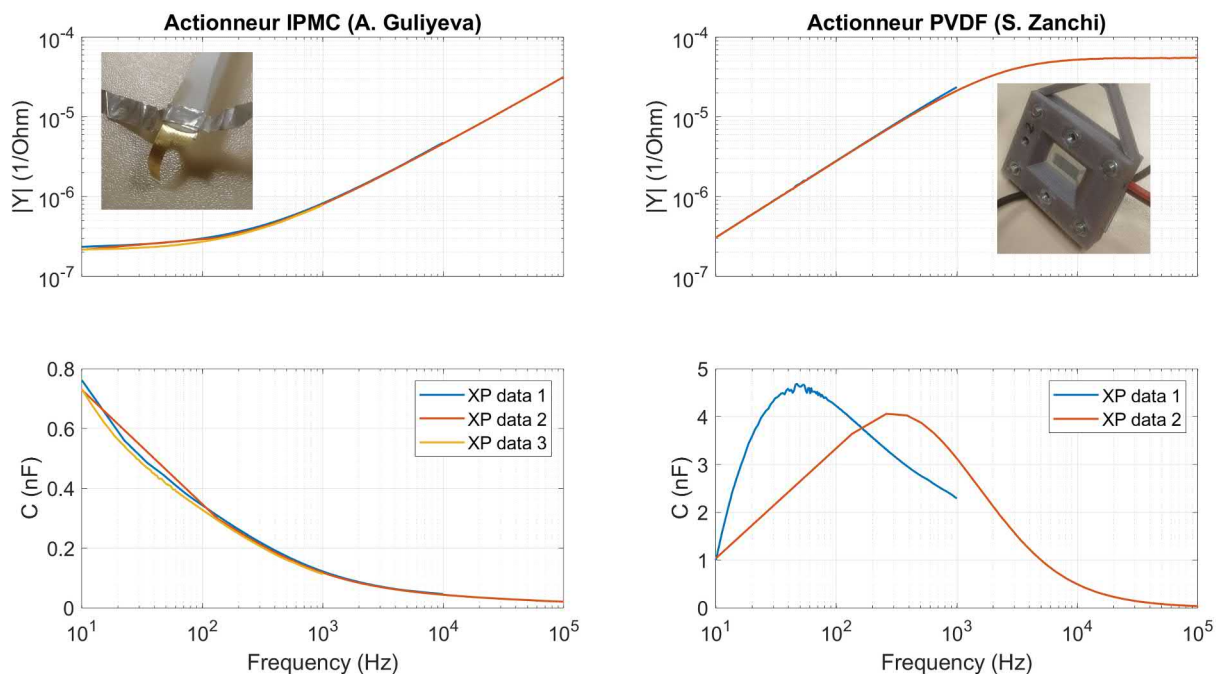


FIGURE VI.16 – À gauche, caractérisation électrique (admittance $|Y|$) d'un actionneur pseudo-IPMC et à droite caractérisation électrique (admittance $|Y|$) d'un actionneur en terpolymère à base de VDF.

géométries qui sont différentes mais également aussi à cause des mécanismes de polarisation ou d'actionnement sous jacents qui sont également différents. Sur la Figure VI.16, les capacités des deux actionneurs sont également estimées à partir de la partie imaginaire de l'admittance. Pour l'actionneur en terpolymère à base de VDF, une transition est clairement observable même si la répétabilité entre les deux mesures effectuées mérite approfondissement. Pour l'actionneur en polymère ionique, il semble que la transition ait lieu pour des fréquences plus basses que celles sondées ici. Cela est cohérent avec le fait qu'il est attendu que ces actionneurs soient plus lents que les actionneurs terpolymères à base de VDF. Ces résultats très préliminaires restent néanmoins à investiguer plus en détail.

Caractérisation mécanique des polymères actifs en petites déformations : La caractérisation mécanique d'un matériau électro-actif en petites déformations est réalisée par une analyse d'impédance mécanique, aussi appelée analyse mécanique dynamique (DMA pour “*dynamic mechanical analysis*”) [R|PAN21 ; R|Pak03]. Le comportement mécanique d'un polymère électro-actif sera caractérisé par sa matrice de souplesse qui est dans le cas général complexe et dépendante de la fréquence. Si un coefficient particulier de la matrice \underline{C} est considéré, il est possible d'écrire :

$$\underline{C}(f) = C'(f) - jC''(f) \quad (\text{VI.6})$$

Les polymères ont un comportement dynamique dépendant de la fréquence : plus la fréquence d'excitation est importante, plus ils vont se comporter comme des solides et se raidir, et moins la fréquence d'excitation va être importante, plus ils vont se comporter comme des fluides et présenter de la viscosité [R|PAN21 ; R|Pak03]. Cela est dû au fait qu'il existe à l'intérieur même du polymère différentes échelles spatiales susceptibles de se déformer lorsqu'elles sont soumises à une sollicitation mécanique. A basse fréquence, des éléments morphologiques entiers pourront se déformer (différentes couches par exemple), à moyenne fréquence ce seront des couches homogènes de polymères qui se déformeront, et plus la fréquence augmentera plus ce seront des portions petites de polymères qui se déformeront (voir Figure VI.17) : d'abord des chaînes entières, puis des fragments de chaîne, ensuite des monomères entiers et enfin des fragments de monomères. A basse fréquence, toutes les échelles mentionnées précédemment peuvent se déformer, et plus la fréquence va augmenter, moins il va y avoir d'échelles pouvant se déformer. En conséquence, le matériau aura une souplesse importante en basse fréquence qui va diminuer au fur et à mesure que cette dernière va augmenter.

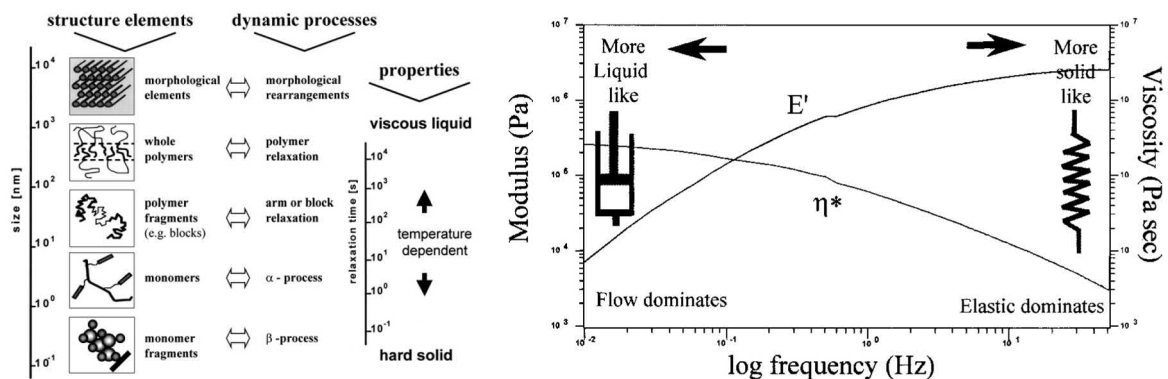


FIGURE VI.17 – À gauche, illustration des différents mécanismes de relaxation dynamique pouvant exister dans les polymères [R|Pak03]. À droite, illustration de la variation du module de stockage en fonction de la fréquence [R|MM20].

Les analyses DMA sont cependant en pratique limitées en fréquence et peuvent généralement être réalisées entre 0.1 Hz et 200 Hz, ce qui est insuffisant au regard des applications visées ici. Pour pallier cette limitation intrinsèque des essais dynamiques, la notion d'équivalence "*temps-température*" a été introduite. Cette équivalence consiste à dire qu'augmenter la fréquence est équivalent à diminuer la température. Intuitivement, un matériau va avoir tendance à se rigidifier lorsque la température va diminuer et à devenir de plus en plus visqueux jusqu'à fondre lorsque la température va augmenter. En ce qui concerne la fréquence, c'est effectivement la tendance inverse qui est attendue. Du point de vue de la modélisation, cela revient à dire que la souplesse $\underline{C}(f, T)$ à une fréquence f et une température T données peut être déduite de la souplesse $\underline{C}(f_{ref}, T_{ref})$ à une fréquence f_{ref} et une température T données par la relation suivante :

$$\underline{C}[f = \alpha(T - T_{ref})f_{ref}, T] = \underline{C}[f_{ref}, T_{ref}] \quad (\text{VI.7})$$

Ainsi la connaissance de courbes maîtresses balayant un certain domaine de fréquences à différentes températures permet théoriquement d'estimer les coefficients $\alpha(T - T_{ref})$ permettant de déterminer la dépendance en fréquence de \underline{C} pour un plus large domaine fréquentiel (voir Figure VI.18). Cette équivalence "*temps-température*" n'est valable que sous certaines hypothèses qui limitent son application en pratique. Dans les applications visées, l'objectif étant plutôt d'aller vers des hautes fréquences au regard des capacités de la DMA, cela revient à aller vers de plus basses températures.

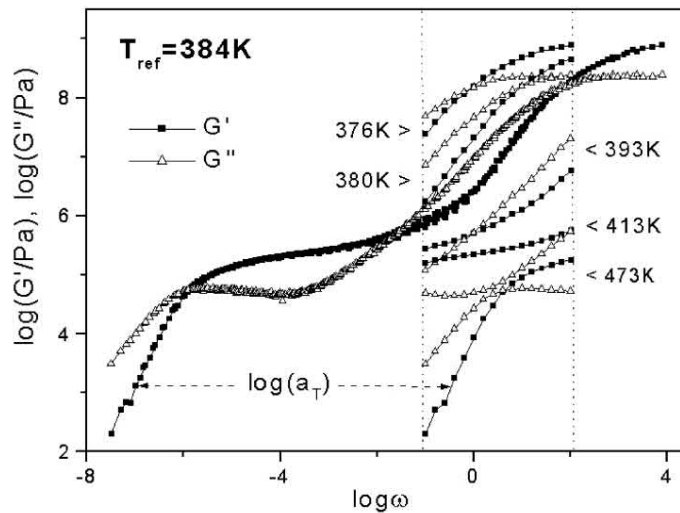


FIGURE VI.18 – Exemple d'estimation des propriétés mécaniques pour une large gamme de fréquence à une température donnée à partir d'un ensemble de courbes maîtresses obtenues dans un domaine fréquentiel plus restreint et pour différentes températures [R|Pak03].

Si un échantillon sous la forme d'un parallélépipède rectangle d'épaisseur e , et de surface S est considéré, alors cet échantillon sollicité en traction/compression avec la force F et répondant avec la vitesse v dans l'épaisseur peut être modélisé en première approximation par une raideur \underline{k}_M associée à une admittance mécanique \underline{Y}_M définies de la façon suivante :

$$\frac{1}{\underline{k}_M} = \frac{\underline{C}S}{e} \quad \text{et} \quad \underline{Y}_M = \frac{v}{F} = j2\pi f \underline{C} = \frac{2\pi f \underline{C}'' S}{e} + j \frac{2\pi f \underline{C}' S}{e} = \frac{1}{\tilde{\eta}} + \frac{j2\pi f}{\tilde{k}} \quad (\text{VI.8})$$

L'équation (VI.8) fait donc le lien entre les propriétés mécaniques du polymère électro-actif considéré (\underline{C}), la géométrie de l'échantillon (S et e) et son comportement mécanique (\underline{Y}_M). Il est

ainsi possible de modéliser du point de vue mécanique cet échantillon de polymère électro-actif comme la mise en parallèle d'un amortisseur visqueux pur $\tilde{\eta}$ et d'une raideur pure \tilde{k} , qui sont elles-mêmes liées aux propriétés mentionnées précédemment.

Caractérisation électromécanique des polymères actifs sous faible champ électrique et en petites déformations : Une fois les caractérisations électrique et mécanique réalisées, il est nécessaire de réaliser la caractérisation électromécanique du matériau considéré. L'enjeu est d'être capable de déterminer $\underline{\underline{d}}_{M \rightarrow E}(\underline{E}, \underline{\sigma})$ et $\underline{\underline{d}}_{E \rightarrow M}(\underline{E}, \underline{\sigma})$, qui sont les fonctions décrivant les mécanismes de couplage électromécaniques au sein du matériau actif. Le problème est que bien souvent, une hypothèse est réalisée concernant le comportement électro-actif du matériau considéré (piézo-électrique [PZ] ou électro-strictif [ES] par exemple) et donc concernant la forme mathématique associée à ces fonctions :

$$\text{PZ : } \left\{ \begin{array}{l} \underline{\underline{d}}_{E \rightarrow M}(\underline{E}, \underline{\sigma}) = \underline{\underline{d}}^t \cdot \underline{E} \\ \underline{\underline{d}}_{M \rightarrow E}(\underline{E}, \underline{\sigma}) = \underline{\underline{d}} \cdot \underline{\sigma} \end{array} \right. , \text{ ES : } \left\{ \begin{array}{l} \underline{\underline{d}}_{E \rightarrow M}(\underline{E}, \underline{\sigma}) = (\underline{E} \otimes \underline{E}) \cdot \underline{\underline{M}} \\ \underline{\underline{d}}_{M \rightarrow E}(\underline{E}, \underline{\sigma}) = 2(\underline{\underline{M}} : \underline{\underline{\sigma}}) \cdot \underline{E} \end{array} \right. \quad (\text{VI.9})$$

Comme indiqué par l'équation (VI.9), dans le cas d'un couplage purement piézoélectrique, la déformation est proportionnelle au champ électrique dans l'équation mécanique et le déplacement électrique est proportionnel à la contrainte dans l'équation électrique. Dans le cas d'un couplage purement électrostrictif, la déformation est proportionnelle au carré du champ électrique dans l'équation mécanique et le déplacement électrique dépend du produit entre la contrainte et le champ électrique. Ces modèles idéaux peuvent être utilisés indépendamment l'un de l'autre pour des matériaux possédant l'un ou l'autre des effets ou bien de façon couplée pour les matériaux possédant potentiellement les deux effets. De surcroît, les coefficients intervenant dans l'équation (VI.9) peuvent également dépendre de la température et de la fréquence, avec éventuellement une relation d'équivalence.

Pour les matériaux **purement piézoélectriques**, il existe des méthodes dites *directes* et *indirectes* permettant d'accéder aux coefficients de la matrice $\underline{\underline{d}}$. Les méthodes directes consistent à mesurer l'effet piézoélectrique par une comparaison directe entre les différentes grandeurs électromécaniques macroscopiques mesurables (force, déplacement, tension, courant, ...). Les méthodes *indirectes* consistent à mesurer une caractéristique intermédiaire (par exemple une fréquence de résonance) et à en déduire les valeurs des coefficients recherchés. Nous nous intéresserons uniquement aux méthodes *directes* ici car elles sont naturellement dans la continuité de la DES et de la DMA exposées précédemment. La méthode *directe* la plus commune permettant d'identifier les coefficients d_{33} ou d_{31} d'un matériau piézoélectrique est la méthode dite de *Berlincourt* [R|SC14]. Cette méthode consiste à travailler sur des échantillons parallélépipédiques de matériau sur lesquels la force F ainsi que la charge résultante Q sont mesurées. La charge Q peut être mesurée par exemple avec un amplificateur de charge qui place le matériau piézoélectrique en court-circuit. De cette façon, il est possible de déterminer le coefficient piézo-électrique d_{33} si la force est appliquée perpendiculairement aux électrodes ou bien le coefficient d_{31} si la force est parallèle aux électrodes. Ces coefficients peuvent être considérés comme complexes, de façon similaire à la DES et à la DMA, pour modéliser les pertes électromécaniques. Cette méthode de caractérisation électromécanique a été très largement appliquée aux céramiques piézoélectriques [R|SC14; R|KB21] mais également plus récemment à des polymères électroactifs piézoélectriques [R|Ber+17; R|McG+20]

Pour les matériaux **purement électrostrictifs** il existe deux méthodes de caractérisation en fonction de l'usage qui va être fait du matériau. Pour des utilisations en tant que *capteur*, les

mesures sont réalisées en se basant sur le fait que la permittivité diélectrique des matériaux électrostrictifs va varier avec la force appliquée. En conséquence, pour un échantillon parallélépipédique, sa capacité électrique étant une fonction de la permittivité diélectrique, elle va varier avec la force appliquée. Cette méthode a été appliquée à divers polymères électroactifs avec différentes configurations géométriques visant à estimer les coefficients électrostrictifs dans les directions parallèles ou perpendiculaire aux électrodes [R|SK96 ; R|SK98 ; R|SF03 ; R|LPS05 ; R|Pru18]. Pour les utilisations en tant qu'*actionneur*, l'idée est de fabriquer un actionneur le plus simple possible (une lamelle en flexion ou "*bender*" par exemple) et d'observer son déplacement qui doit être proportionnel au carré du champ électrique imposé et fonction de la réponse mécanique de la structure considérée. Cette méthode a été mise en place pour différents matériaux électroactifs comme les IPMCs [R|Ben+06 ; R|Zhu+13 ; R|Nis+11 ; R|Wal+09 ; R|NA14 ; R|NL02] et les "PVDFs" [R|AOA17 ; R|Zan22]. La gestion des conditions aux limites mécaniques, électriques, et de la géométrie de l'échantillon rendent cependant ces caractérisations assez peu fiables en pratique.

Pour les matériaux qui sont à la fois **électrostrictifs et piézoélectriques**, des investigations plus poussées doivent être menées. Dans ces cas de figure, en complément des caractérisations mécanique et électrique via la DMA et la DES, une caractérisation par rayons X est réalisée (WAXS ou SAXS typiquement). Cette caractérisation aux rayons X va permettre d'obtenir des informations sur l'arrangement cristallin du matériau considéré, et surtout sur l'évolution de cet arrangement cristallin en fonction de sollicitations électromécaniques. Par l'intermédiaire de ce type d'essais, il est ainsi possible en pratique d'expliquer au niveau de la maille cristalline, ou tout du moins à une petite échelle, l'origine du comportement électroactif observé. Ces méthodes de caractérisation sont très intéressantes car elles permettent une compréhension physique fine de l'origine du comportement électromécanique mais elles ne permettent que difficilement l'observation de grandeurs macroscopiques et donc l'obtention de valeurs pour les paramètres correspondant à un modèle donné. Ces méthodes ont été assez largement utilisées sur les "PVDFs" par exemple pour étudier le comportement électrostrictif et piézoélectrique de ces polymères électroactifs [R|Beu+22 ; R|Zan22 ; R|Toh+21 ; R|Ata+22 ; R|Kat+16].

Les méthodes de caractérisation électromécanique des polymères électroactifs sont donc beaucoup moins standardisées et encadrées que les méthodes de caractérisation purement électrique ou purement mécanique. Pour la partie piézoélectrique, des efforts ont cependant été réalisés mais uniquement pour la caractérisation des céramiques piézoélectriques qui sont à présent utilisées à échelle industrielle. Il n'existe ainsi pas de réelle solution dédiée aux polymères présentant à la fois un comportement électrostrictif et un comportement piézoélectrique et possédant une rigidité bien moindre. Enfin, les effets de la température et de la fréquence sur les paramètres mesurés ne sont pas documentés dans la littérature, en particulier dans le domaine de fréquence ciblés ici, et restent donc largement à explorer.

VI.2.1.4 Les applications actuelles de ces nouveaux matériaux actifs

Ce paragraphe précise à présent les applications qui sont actuellement couvertes par ces nouveaux matériaux actifs ainsi que les problématiques associées à ces applications. Les applications seront évoquées en fonction du domaine de fréquence considéré : en premier lieu les applications en *statique* ou en *basses fréquences* qui concernent les actionneurs seront décrites ($f < 10$ Hz). Puis les applications en *moyenne fréquence*, qui concernent les vibrations pour l'audio et l'haptique, seront évoquées ($f \in [20, 20000]$ Hz). Enfin, les applications en hautes fréquence, associées à la génération et à la mesure d'ultrasons seront détaillées ($f > 50$ kHz). Une vue d'ensemble des applications visées par les structures multifonctionnelles vibrantes basées sur de nouveaux

matériaux actifs, tirée de [R|Han+22], est présentée à la Figure VI.19.

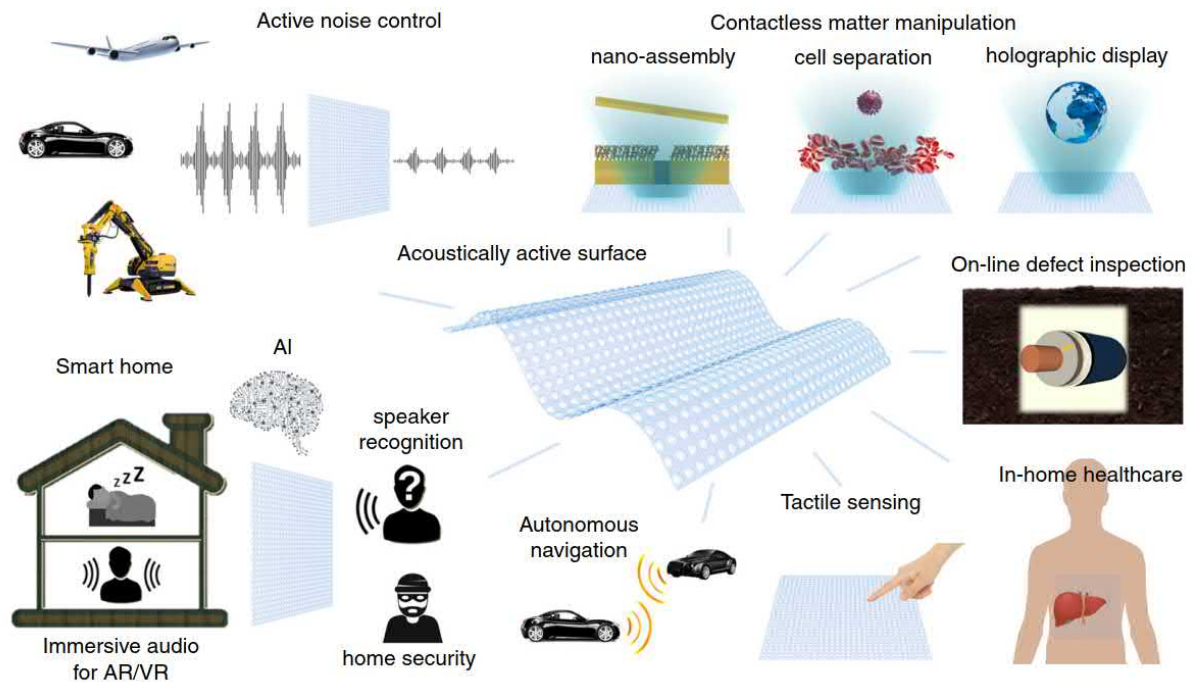


FIGURE VI.19 – Vue d'ensemble des applications visées par les structures multifonctionnelles vibrantes basées sur de nouveaux matériaux actifs (d'après [R|Han+22]).

Dans les applications en tant qu'**actionneurs**, les matériaux actifs sont utilisés de façon couplée avec un substrat sur lequel ils sont fixés soit en bicouches, soit en tricouches. Les actionneurs résultants ont alors la forme de poutres fixées à l'une de leur extrémité et libres à l'autre. L'application d'une certaine tension génère alors un mouvement de flexion de cette poutre comme cela est présenté sur la Figure VI.20 issue de [R|Zan22]. De tels actionneurs ont été réalisés en "PVDF" [R|Zan22], en IPMC [R|Kim+16; R|Kru+15; R|IKW12] et en élastomères diélectriques [R|HC21]. Dans la plupart des cas, seules les propriétés résultantes en terme de mouvement de l'actionneur sont étudiées sous des sollicitations électriques statiques. Du point de vue expérimental, la mesure de la force générée par ces actionneurs reste une difficulté pratique qui est pourtant un élément de dimensionnement important permettant de choisir le meilleur matériau et la meilleure géométrie pour concevoir un actionneur. Au niveau du matériau, la modélisation électromécanique ainsi que les moyens de garantir la stabilité dans le temps sont aussi des difficultés qui restent à surmonter. Enfin, des efforts sont également réalisés pour aller vers des applications en dynamique et pour la conception de lois de commandes permettant de piloter efficacement ces actionneurs. De façon générale, des actionneurs rapides, capables de générer des forces suffisantes sans consommer beaucoup de puissance sont recherchés. Certaines applications correspondent à des structures multifonctionnelles dans le sens où le capteur et l'actionneur ont été réalisés conjointement avec le même matériau actif [R|Kru+15].

Ces nouveaux matériaux électro-actifs ont également été utilisés dans des applications liées aux **vibrations**, c'est à dire dans le domaine des moyennes fréquences (i.e. de 20 Hz à 20 kHz typiquement). Les domaines applicatifs concernent la restitution audio, les interfaces haptiques, ou bien dans une moindre mesure le contrôle actif des vibrations. Dans ces applications, les dispositifs présentés ont été réalisés en élastomères diélectriques, en "PVDF", ou bien plus mar-

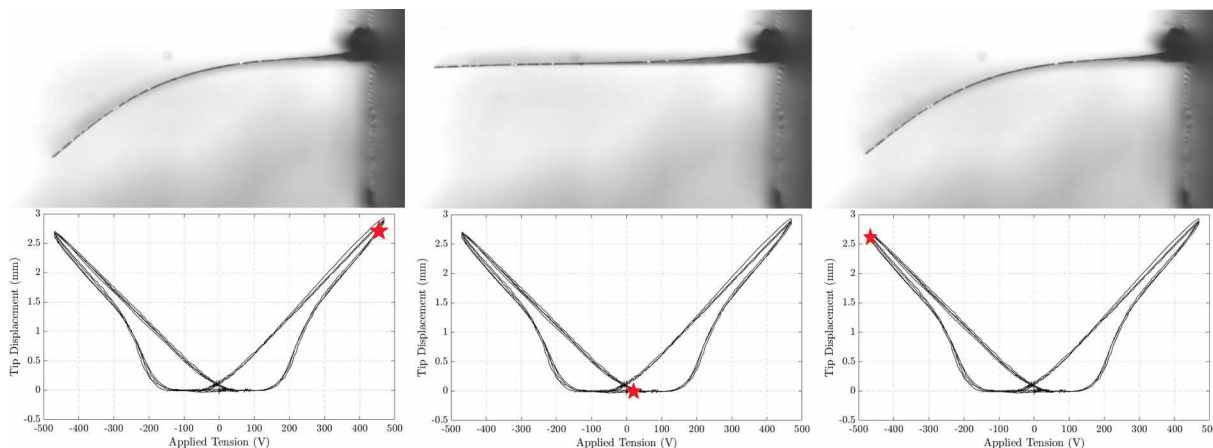


FIGURE VI.20 – Exemple d’actionneur fonctionnant en flexion réalisé lors de la thèse de S. Zanchi [R|Zan22]. Les photos de la ligne supérieure indique la position de l’actionneur vu de côté. La ligne inférieure précise, dans le plan *déplacement-tension*, la position dans le cycle (correspondant au point rouge) où l’image a été prise.

ginalement en IPMC. Le tableau VI.2 regroupe, de façon non-exhaustive, des exemples d’applications de matériaux actifs en vibrations dans le domaine des moyennes fréquences en les classant par application et par matériau actif. D’une façon générale, le cahier des charges pour ces applications est assez différent de celui permettant la réalisation d’actionneurs. En effet ici les déplacements seront bien plus petits que précédemment et devront permettre un couplage efficace avec l’air dans le cas de l’audio et dans tous les cas un couplage efficace avec la structure sur laquelle est fixé le dispositif actif.

	Audio	Haptique	Contrôle actif
PVDF	[R Khe+16 ; R Sch+15a ; R Sch+22 ; R SW22 ; R Han+22]	[R Gan+15 ; R Pon+17 ; R Sch+22 ; R Sug+09]	
Elastomères diélectriques	[R GRD19 ; R Gar+21 ; R Gra+23]	[R Gra+23]	[R KH10 ; R Zha+16]
IPMC	[R Kep+13]		

TABLE VI.2 – Exemples d’applications de matériaux actifs en vibrations dans le domaine des moyennes fréquences (liste non-exhaustive).

Il est possible de constater que peu d’applications dans ce domaine de fréquences ont utilisé les IPMCs, sans doute à cause de leur temps de réponse actuellement plus lent que les autres matériaux. Par ailleurs, il y a peu d’applications faisant l’usage de capteurs et dédiées au contrôle des vibrations. Ces matériaux piézoélectriques étant réversibles (c’est à dire pouvant fonctionner à la fois en capteurs et en actionneurs) il est pourtant très facile d’effectuer des mesures sur ces dispositifs expérimentaux. L’aspect multifonctionnel a été abordé dans ce domaine de fréquences par le biais de dispositifs couplant l’audio et l’haptique par exemple [R|Gra+23 ; R|Sch+22] (comme le montre la Figure VI.21) ou bien de dispositifs permettant simultanément

l'actionnement et la mesure (haut-parleur et microphone par exemple) [R|SW22 ; R|Han+22]. Des procédures d'optimisation sont également décrites, comme par exemple dans [R|Gar+21], où la géométrie des électrodes d'un haut parleur réalisé en élastomère diélectrique est optimisée pour ne pas exciter le second mode de la membrane électro-active. Ces procédures d'optimisation sont cependant purement géométriques et ne considèrent pas le matériau comme une variable disponible dans la conception.

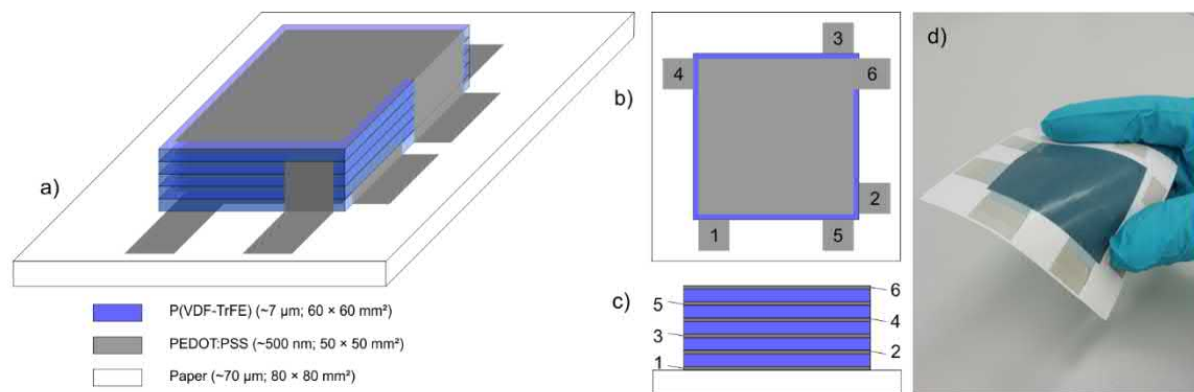


FIGURE VI.21 – Exemple de dispositif multifonctionnel audio-haptique réalisé en PVDF. Les différentes électrodes permettent de piloter indépendamment différentes couches actives du dispositif et de générer les stimuli désirés ou bien les mesures souhaitées (d'après [R|Sch+22]).

Enfin, le dernier domaine applicatif considéré est relatif aux **ondes ultrasonores** et deux catégories peuvent être distinguées : les ondes guidées utilisées pour le SHM (de l'ordre de grandeur de 100 kHz) et les ondes ultrasonores pour l'inspection volumique (de l'ordre du GHz). Une revue de littérature concernant la génération et la réception d'ondes de Lamb par des transducteurs imprimés en PVDF et pour des applications de SHM est proposée dans [R|Phi+22b]. Pour cette utilisation, le principal critère à utiliser est lié à la capacité des transducteurs à échanger de l'énergie mécanique avec les structures hôtes sur lesquelles ils sont collés. Les matériaux PVDFs imprimés ont effectivement été mis en œuvre avec succès pour générer et mesurer des ondes dans le domaine de fréquences associé au SHM [R|Che+20 ; R|Cap+14 ; R|Bul+16 ; R|Won+22] ou bien des ultrasons [R|Ban+21b ; R|Ban+23] (voir par exemple la Figure VI.22). Il y a aussi quelques tentatives via l'utilisation de pâtes PZT [R|Rol+22]. Aucune utilisation des IPMCs n'est mentionnée, sans doute à cause de leur temps de réponse incompatible avec le domaine des hautes fréquences. Enfin, des procédures d'optimisation ont été mises en œuvre avec succès pour optimiser la génération ou la réception de certains types d'ondes par le design approprié des électrodes [R|Phi+21 ; R|Phi+22a ; R|Li+22b ; R|CBB22]. Ces optimisations ne sont cependant que géométriques et ne prennent pas le matériau comme une variable qu'il est possible d'optimiser.

Au **bilan**, cette rapide analyse de l'existant montre qu'il existe des applications des polymères électroactifs dans les différents domaines applicatifs visés. Le "PVDF" a été principalement utilisé pour ces différentes applications. L'évaluation des possibilités offertes par les autres matériaux candidats pour ces applications reste cependant à réaliser. Le constat peut cependant être fait qu'il n'existe pas de recouvrement entre ces différentes applications et que l'aspect multifonctionnel naturellement offert par ces matériaux est assez peu exploité. Enfin, les procédures d'optimisation mises en œuvre dans les différents domaines mentionnés sont exclusivement géométriques et ne considèrent pas le matériau comme une variable du problème à optimiser, ce qui

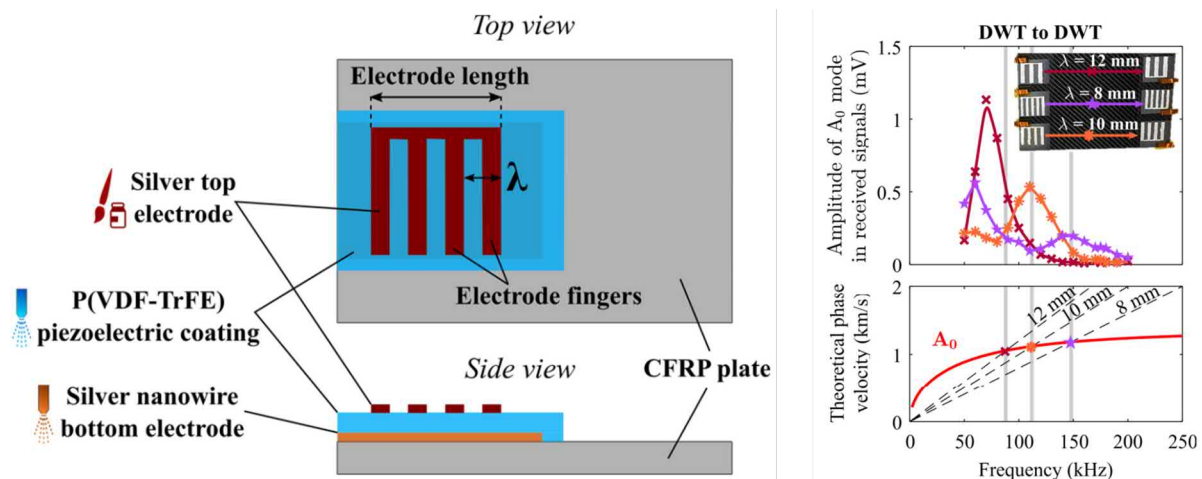


FIGURE VI.22 – Exemple de transducteur interdigité ultrasonique conçu pour le SHM de pièces aéronautiques et imprimé en P(VDF-co-TrFE) (d’après [R|Phi+21]).

est pourtant potentiellement possible.

VI.2.2 Projet de recherche proposé

Cette section décrit les différents axes du projet de recherche que je propose dans le cadre des polymères électro-actif pour les structures intelligentes multifonctionnelles vibrantes. Un premier point que je souhaite aborder est lié à la **caractérisation électromécanique des matériaux électro-actifs** qui peut être améliorée (voir Section VI.2.2.1). Un second point est relatif à l’**optimisation du placement des matériaux actifs** et au choix des matériaux en vue de remplir le cahier des charges associé à plusieurs fonctions pour une structure donnée (voir Section VI.2.2.2). Enfin le troisième point, plus fondamental, vise à explorer comment ces structures équipées de polymères électro-actifs peuvent être vues comme des implémentations physiques de réseaux neuronaux et donc peuvent être vues intrinsèquement comme des **algorithmes physiques** (voir Section VI.2.2.3).

VI.2.2.1 Axe #1 : Mieux caractériser expérimentalement les nouveaux matériaux actifs

Le premier axe de recherche proposé ici est expérimental et à visée plutôt technologique. Comme cela a été vu à la Section VI.2.1.3, les outils de caractérisation électromécanique des matériaux sont très spécialisés (caractérisation mécanique, électrique, ou piézoélectrique pour des céramiques PZT), mais il existe peu d’outils de caractérisation électromécanique capables d’identifier expérimentalement à la fois des comportements électrostrictifs et piézoélectriques et qui soit également en mesure de tester un large panel de fréquences et de températures [R|Won+19]. Or, dans le contexte applicatif visé ici, de telles caractérisations sont nécessaires.

Idée directrice : Le projet proposé ici est une généralisation de la méthode de *Berlincourt* ou encore une DMA et une DES synchronisées. L’idée directrice est de considérer des échantillons parallélépipédiques sollicités mécaniquement perpendiculairement à leurs électrodes ou bien dans le plan des électrodes et sollicités électriquement de façon synchronisée. Ainsi la mesure simultanée de la force appliquée, du déplacement, de la tension électrique et de l’intensité électrique permettront d’estimer les paramètres électromécaniques d’un modèle permettant de

décrire le comportement de ce matériau actif. L'hypothèse de sollicitation sous de faibles champs électriques et de faibles déformations est toujours conservée.

Pour un matériau électro-actif présentant un comportement à la fois piézo-électrique et électrostrictif, il est possible d'écrire de façon générale au niveau mésoscopique :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\varepsilon}} &= \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{d}}^t \cdot \underline{\underline{E}} + (\underline{\underline{E}} \otimes \underline{\underline{E}}) \cdot \underline{\underline{M}} \\ \underline{\underline{D}} &= \underline{\underline{\chi}} \cdot \underline{\underline{E}} + \underline{\underline{d}} \cdot \underline{\underline{\sigma}} + 2(\underline{\underline{M}} : \underline{\underline{\sigma}}) \cdot \underline{\underline{E}} \end{cases} \quad (\text{VI.10})$$

Considérons un échantillon parallélépipédique recouvert d'électrodes sur deux faces opposées. Soient S la surface des électrodes, e l'épaisseur de l'échantillon, $\underline{\underline{\chi}}$ sa permittivité diélectrique complexe, \underline{C}_{13} et \underline{C}_{33} ses souplesses complexes, \underline{d}_{13} et \underline{d}_{33} ses coefficients piézoélectriques complexes et \underline{M}_{13} et \underline{M}_{33} ses coefficients électrostrictifs complexes. Si l'hypothèse d'une sollicitation mécanique uniquement selon la direction 3 et d'une sollicitation électrique uniquement selon la direction 3 est retenue, il est alors possible d'écrire que :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \underline{C}_{13}\sigma_3 + \underline{d}_{13}E_3 + \underline{M}_{13}E_3^2 \\ \varepsilon_3 = \underline{C}_{33}\sigma_3 + \underline{d}_{33}E_3 + \underline{M}_{33}E_3^2 \\ D_3 = \underline{\chi}_{33}E_3 + \underline{d}_{33}\sigma_3 + 2\underline{M}_{33}E_3\sigma_3 \end{cases} \quad (\text{VI.11})$$

Un régime harmonique forcé à la pulsation ω est considéré tel que la tension U et la force F soient imposées à l'échantillon de la façon suivante :

$$\begin{cases} U = -eE_3 = U_0e^{j\omega t} \\ F = S\sigma_3 = F_0e^{j\omega t} \end{cases} \quad (\text{VI.12})$$

Il est alors possible de considérer la déformation $\varepsilon_3 = \frac{\Delta e}{e}$ et la charge électrique $Q = D_3S$ liées à la tension U et à la force F de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Delta e = \underline{C}_{33}e \frac{F_0}{S} e^{j\omega t} - \underline{d}_{33}U_0e^{j\omega t} + \underline{M}_{33} \frac{U_0^2}{e} e^{2j\omega t} \\ Q = -\underline{\chi}_{33}S \frac{U_0}{e} e^{j\omega t} + \underline{d}_{33}F_0e^{j\omega t} + 2\underline{M}_{33} \frac{U_0}{e} F_0e^{2j\omega t} \end{cases} \quad (\text{VI.13})$$

Sous forme matricielle, cette équation peut encore s'écrire :

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{C}_{33}e}{S} & -\underline{d}_{33} \\ \underline{d}_{33} & -\frac{S\underline{\chi}_{33}}{e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ U_0 \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\underline{M}_{33}}{e} \\ -\frac{2\underline{M}_{33}}{e} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ U_0 \end{bmatrix} U_0e^{2j\omega t} \quad (\text{VI.14})$$

Cette équation est très importante car elle suggère que, sous réserve qu'il soit possible d'imposer simultanément une force et une tension électrique d'amplitude et de pulsation connues et qu'il soit possible de mesurer la déformation Δe et la charge Q résultants, alors :

- La déformation Δe et la charge Q sont composées d'une composante à la pulsation ω et d'une composante à la pulsation 2ω .
- La composante à la pulsation ω permet d'identifier les impédances mécaniques et électriques au même titre que des essais de DMA ou de DES ainsi que la composante \underline{d}_{33} de façon équivalente à la méthode *Berlincourt*.
- La composante à la pulsation 2ω permet d'identifier le coefficient \underline{M}_{33} et donc les effets électrostrictifs.

- Le courant étant la dérivée de la charge, il est possible d'estimer la charge en intégrant le courant mesuré.
- Pour les deux composantes, les termes de couplage électromécanique apparaissent bien sur les antidiagonales des matrices correspondantes.
- Si une chambre climatique est disponible, ces essais peuvent être réalisés à différentes températures et en faisant varier différents paramètres environnementaux. D'éventuelles lois d'équivalence pourront ainsi être testées pour les coefficients électromécaniques.

Un schéma du dispositif expérimental envisagé pour la caractérisation électromécanique d'un polymère électro-actif est présenté sur la Figure VI.23. Sur le plan théorique, la réalisation d'un seul essai de ce type permet ainsi potentiellement de réaliser à la fois une DMA, un DES, et un essai par la méthode de *Berlincourt* tout en permettant en plus d'identifier un potentiel effet électrostrictif via la composante à 2ω . Ce type d'essai semble donc très prometteur et mérite d'être mis en œuvre pratiquement.

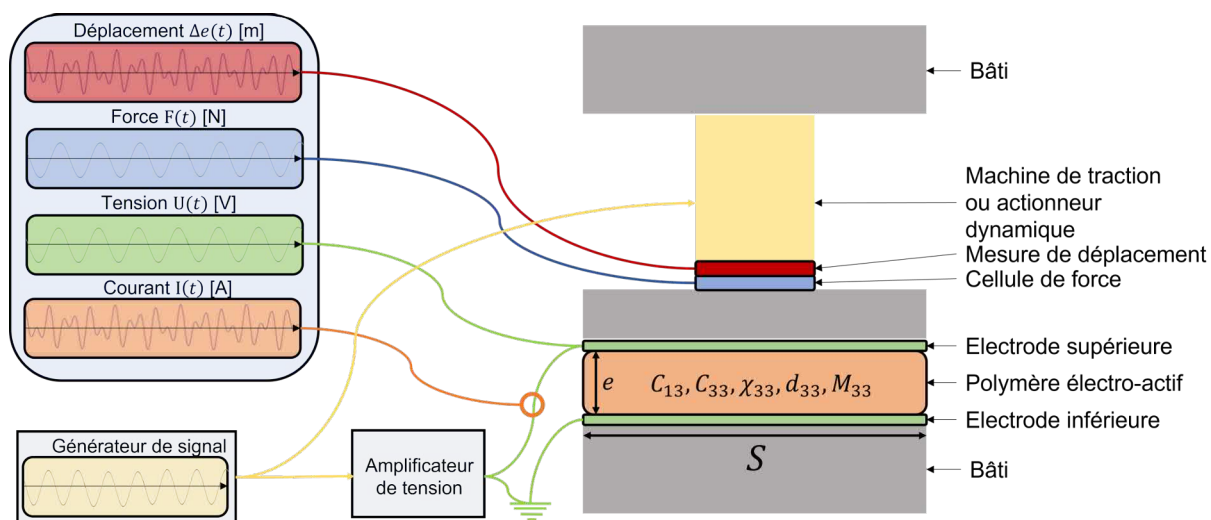


FIGURE VI.23 – Schéma du dispositif expérimental envisagé pour la caractérisation électromécanique d'un polymère électro-actif.

Plan de travail et collaborations potentielles : Cet axe de mon projet de recherche allie différentes composantes car il est nécessaire de savoir fabriquer des échantillons de polymères électroactifs à tester, de savoir mettre en place la partie mécanique et la partie électrique des essais de caractérisation envisagés, de collecter les données puis de les traiter et de les interpréter. Le laboratoire PIMM constitue ainsi un lieu privilégié pour la bonne réalisation d'un tel projet. M. Gervais et S. Roland, Maîtres de conférences au sein de l'équipe *Polymères et Composites* ou bien I. Iliopoulos et S. Girault d'ARKEMA, sont en effet capables de réaliser les échantillons à tester soit en "PVDF" soit en polymère ionique. Le laboratoire possède de plus une solide expertise en termes de DMA et d'essais mécaniques et donc le matériel et les compétences pour leur réalisation. Une collaboration avec P. Margerit, CR CNRS au PIMM sera par exemple possible sur ce sujet. Une des difficultés attendues sur ce point est liée à l'excitation contrôlée en force sur différentes bandes de fréquences. Différentes voies pourront être exploitées : machine de traction pour les très basses fréquences, DMA pour aller jusqu'à 100 Hz, haut-parleurs électrodynamiques jusqu'à 20 KHz et pourquoi pas des éléments piézoélectriques céramiques pour les fréquences supérieures. Enfin, je serai à même de prendre en charge la partie caractérisation

électrique et collecte et analyse des données. Un financement pour un post-doctorat de 12 mois est disponible via la chaire ARKEMA et des tests préliminaires de cette idée sont prévus dans ce contexte.

VI.2.2.2 Axe #2 : Déployer des matériaux actifs sur des structures multifonctionnelles

Le second axe de recherche proposé s'intéresse à la problématique pratique de la **conception de structures multifonctionnelles vibrantes basées sur les nouveaux matériaux actifs** décrits précédemment. Différents exemples de structures multifonctionnelles vibrantes ont déjà été décrits dans le manuscrit comme par exemple à la Section I.1.2 ou bien à la Section VI.2.1.4. Il est par exemple possible de citer comme fonctions possibles que peuvent héberger ces structures :

- Les **actionneurs** capables de se déformer pour répondre à certains besoins (optique adaptatives, foils modifiables, robots “mous” pour la chirurgie, ...)
- Les structures capables de **contrôler leur vibrations en basses fréquences**, dans le domaine où l'approche modale est pertinente (réduction de bruit, compensation de vibrations, ...)
- Les structures capables de **focaliser ou bien de limiter leurs vibrations dans certains zones particulières** sur une large bande fréquentielle (dégivrage piézoélectrique, restitution sonore spatialisée, limitation de propagation de dommage, ...)
- Les structures capables de faire un **auto-diagnostic de leur état de santé** comme cela a été le sujet des chapitres précédents (SHM par ondes de Lamb, ...)

La problématique étudiée par cet axe de recherche est ainsi de définir, étant donné une structure à laquelle une ou plusieurs de ces fonctions doivent être ajoutées, quels matériaux actifs choisir et où les positionner pour réaliser de façon optimale l'ensemble des fonctions à ajouter.

Idée directrice : Pour le contrôle de santé des structures composites par ondes de Lamb, la question du placement optimal d'un réseau de céramiques piézo-électriques a déjà été discutée à la Section III.3 et un état de l'art en a été dressé. Pour cette fonction particulière, les céramiques étaient les seuls matériaux disponibles et leur géométrie était fixée. Avec les polymères électro-actifs, deux nouveaux degrés de liberté sont disponibles, à savoir le matériau considéré et leur géométrie. Par ailleurs, à la Section III.3, une seule fonction était visée. Plusieurs fonctions associées à la structure hôte peuvent désormais également être considérées simultanément. L'idée directrice de l'axe de recherche proposé ici est donc de formaliser une démarche de conception partant d'une structure hôte et de fonctions à réaliser pour arriver à une disposition optimale de polymères électro-actifs permettant de réaliser les fonctions désirées. Il s'agit ici d'essayer de mettre en oeuvre de façon concrète l'idée de “*design pour la fonction*” ou plutôt de “*design pour les fonctions*”.

Pour proposer une démarche de conception générique pour les structures multifonctionnelles, plusieurs questions doivent alors être abordées simultanément :

- **Quelles sont les variables à optimiser ?** Différentes variables peuvent en effet être considérées dans ce problème et l'ajout de variables supplémentaires va accroître la difficulté du problème d'optimisation à résoudre. Ici, il sera supposé que la structure hôte est définie et qu'un cahier des charges définissant les fonctions à réaliser est établi. Les variables considérées sont donc ici le type de matériau actif et sa répartition spatiale au sein de la structure hôte. Il est également envisageable d'inclure les algorithmes permettant de réaliser les fonctions cibles dans les variables à optimiser car ils peuvent influencer sur les répartitions spatiales souhaitables.
- **Quelles sont les fonctions “coût” associées au problème d'optimisation ?** La question est ici d'arriver à définir pour chacune des fonctions à réaliser au niveau de la structure

hôte les fonctions “coût” associées. Comme cela a été discuté dans le cadre du placement optimal pour le contrôle de la santé des structures, pour une seule fonction il peut exister plusieurs fonctions “coût” candidates. Une étude de la bibliographie pour les différentes fonctions visées pourra permettre de définir ces fonctions aussi appelées “*factor of merit*” (FoM) ou “*key performance indexes*” (KPI).

- **Quel algorithme d’optimisation choisir ?** Le problème attendu ici est que les fonctions “coût” qui seront définies précédemment seront sûrement non-convexes et donc admettront potentiellement de nombreux minima locaux. Les algorithmes d’optimisation *génétiques* et plus généralement *évolutionnaires* sont néanmoins capables d’appréhender ces types de situations. Un autre aspect est lié à la façon de formuler le problème qui peut être soit binaire (il y a ou il n’y a pas de matériau actif à un endroit donné) ou bien continu (via par exemple l’épaisseur de matériau actif à un endroit donné). Ce choix amènera à utiliser différents types d’algorithmes d’optimisation. Enfin, le problème considéré est un problème d’optimisation multi-critères dans le sens où les différentes fonctions “coût” associées aux différentes fonctions à réaliser devront être satisfaites de façon optimale. Des algorithmes capables de gérer cet aspect là seront donc également recherchés.
- **Comment utiliser les modèles efficaces pour que l’optimisation soit réalisable ?** La dernière question est liée à la réalisation de l’optimisation en un temps raisonnable, ou tout du moins acceptable. Pour valider l’adéquation d’une répartition spatiale de matériaux actifs, une simulation numérique devra être réalisée pour évaluer les différentes fonctions “coût” pour cette solution potentielle. Une solution pour limiter les temps de calculs est de s’appuyer sur des modèles efficaces et représentatifs de la structure hôte étudiée. Cette question est donc en lien direct avec les modèles guidés par la physique proposés à la Section VI.1.2.1 et permettant de réduire les temps de simulation sans pour autant sacrifier la qualité des résultats obtenus.

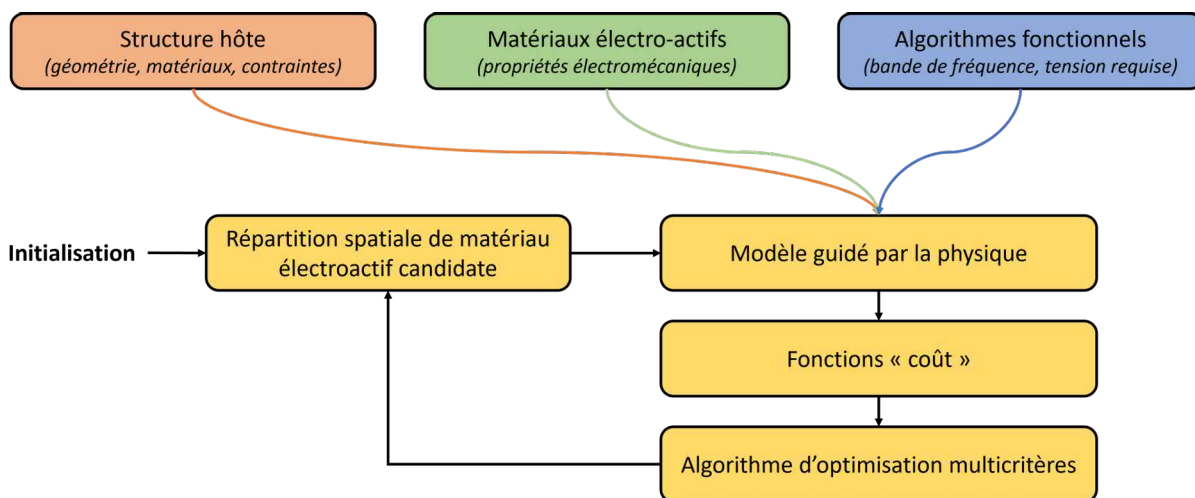


FIGURE VI.24 – Optimisation multicritère de la répartition spatiale de matériau électro-actif sur une structure hôte dans le but de réaliser différentes fonctions cibles.

La Figure VI.24 récapitule la démarche ainsi envisagée. La structure hôte sera ainsi définie par sa géométrie et les matériaux qui la composent. Des contraintes existeront qui empêcheront probablement de placer des matériaux électro-actifs à certaines positions. Une branche de différents matériaux électro-actifs dont les propriétés seront connues grâce aux travaux décrits dans la Section VI.2.2.1 sera disponible pour qu’ils soient répartis spatialement sur la structure. Les

algorithmes destinés à la réalisation de la fonction désirée (comme ceux décrits dans le Chapitre IV pour le contrôle de la santé des structures par exemple) seront également considérés en entrée car ils renseigneront sur la bande de fréquences visée et sur les niveaux de tension requis. Si nécessaire, une procédure d’initialisation proposera une première répartition spatiale de matériaux actifs candidate. Cette initialisation pourra soit être aléatoire soit résulter d’un choix intuitif. Étant donné ces données d’entrée, un modèle guidé par la physique et apte à décrire correctement le problème considéré sera utilisé pour prédire le comportement de la structure multifonctionnelle. Les fonctions “*coût*” qui auront été précédemment définies seront ensuite utilisées pour jauger de la capacité de la répartition spatiale proposée à réaliser les fonctions cibles visées. Enfin, sur la base de ces résultats un algorithme d’optimisation multicritères adéquat fera évoluer la répartition spatiale de matériaux électro-actifs candidate jusqu’à ce qu’un seuil de convergence soit atteint.

Plan de travail et collaborations potentielles : Cet axe de mon projet de recherche est plutôt la mise en relation de différents outils numériques ou expérimentaux pour répondre concrètement à un besoin de conception de structures multi-fonctionnelles. La réalisation de cet axe passera donc nécessairement par des projets collaboratifs nationaux ou internationaux faisant intervenir des partenaires intéressés par une application. Cet axe sera par exemple exploré dans le cadre du projet européen H2020 MORPHO où l’objectif est de concevoir une aube de turbine aéronautique multifonctionnelle capable de savoir si elle a été bien fabriquée, si elle subit des impacts qui l’endommagent lors de son cycle de vie, et si elle doit être démantelée. Un projet ANR coordonné par S. Rodriguez (I2M, Bordeaux) et visant à étendre les résultats obtenus concernant la décomposition tensorielle a été déposé en octobre 2022 et vient d’être accepté en seconde phase d’évaluation. Un autre projet ANR porté par M. Gervais (PIMM, CNAM) visant à étendre ces résultats a été soumis en octobre 2022 vient d’être accepté en seconde phase d’évaluation. Un contrat de post-doctorat est en cours de recrutement et est dédié en partie à ce point en collaboration avec ARKEMA. Des collaborations avec Nazih MECHBAL relativement au contrôle des vibrations et au contrôle tolérant aux dommages sont également envisagées.

VI.2.2.3 Axe #3 : L’intelligence physique des structures multifonctionnelles

Le dernier axe de ce projet de recherche tend à rendre réellement les structures multifonctionnelles “*intelligentes*”. L’intelligence est associée à la capacité de raisonner et pour l’instant les structures dite “*intelligentes*” ne sont pas dotées d’une capacité intrinsèque de raisonnement. Elles doivent en effet impérativement être associées à une électronique qui acquiert certains signaux et qui en délivrent d’autres en conséquence en guise de raisonnement. Leur capacité de raisonnement est donc extrinsèque. La problématique proposée ici est donc de savoir s’il est possible de doter des structures multifonctionnelles réalisées avec des matériaux électro-actifs d’une capacité intrinsèque de raisonnement, et donc de se passer d’électronique. Cet axe est lié à l’axe décrit dans la Section VI.1.2.1 et qui propose l’idée qu’un réseau de neurones spécialisés peut représenter la propagation d’ondes dans une structure multifonctionnelle arbitrairement complexe. L’idée directrice que je vais chercher à exploiter ici en est l’idée duale et je propose que **la propagation d’ondes dans une structure multifonctionnelle puisse faire office de réseau de neurones spécialisés et donc puisse être vue comme un algorithme**. Cela permettrait ainsi de doter intrinsèquement ces structures multifonctionnelles d’une certaine forme d’intelligence. Cette idée qui pourrait être baptisée “*Chip on Plate*” (CoP) permettrait ainsi de faire un pas supplémentaire en direction de la frugalité en proposant une solution d’implémentation algorithmique non-électrique et donc potentiellement moins énergivore.

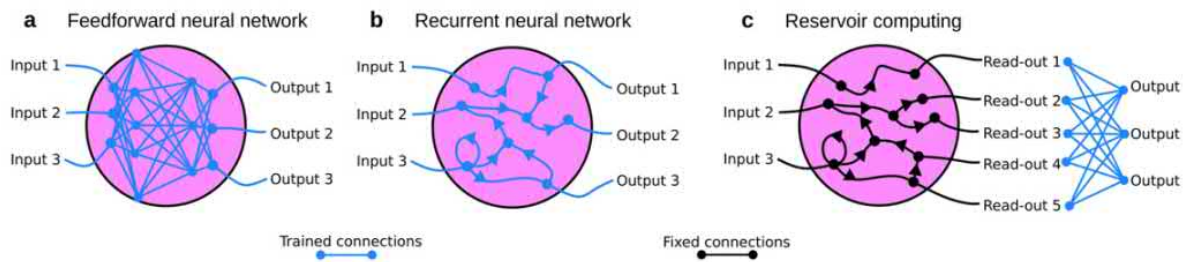


FIGURE VI.25 – Illustration des architectures classiques de réseaux de neurones ([a] Feed-Forward et [b] Feed-Back) et du concept de “*Physical Reservoir Computing*” [c] (d’après [R|Cuc+22]).

Du calcul des structures aux structures capables de calculs : Dans la bibliographie, cette idée n’est pas neuve et a déjà été formalisée sous le nom de “*Physical Reservoir Computing*” (PRC) [R|Cuc+22]. L’idée est de considérer que les processus physiques (qu’ils soient optiques, chimiques, mécaniques, électriques, ...) correspondent toujours à des suites de liens de connexion, de fonctions d’activations non-linéaires, et de boucles de retours, et que ces différentes fonctions peuvent se trouver en très grand nombre sur un substrat donné. Ainsi un substrat parcouru par des processus physiques se comporte en principe comme un réseau de neurones (voir Figure VI.25). Le problème est que, contrairement à un réseau de neurones implémenté sur un ordinateur, les poids de tous les neurones ne peuvent pas être réglés individuellement et que leurs sorties ne peuvent pas non plus être observées individuellement. En conséquence, le PRC s’appuie plutôt sur la théorie des réseaux de neurones aléatoires et propose d’entraîner juste un étage de sortie, à partir des quelques processus physiques qui sont mesurables dans le substrat. Pour que le réservoir soit capable de calculs, il est nécessaire que le substrat possède suffisamment de fonctions non-linéaires pour projeter les données d’entrée dans un espace de plus haute dimension ainsi qu’une certaine mémoire à court-terme faisant office de mémoire de calcul. L’objectif du projet de recherche proposé ici est donc de tester cette idée en prenant comme substrat une plaque mince et comme processus physique des ondes guidées.

Cette idée a même été poussée plus loin sur le plan numérique en démontrant qu’il existe une équivalence formelle entre les ondes se propageant dans une structure et les réseaux de neurones récurrents [R|Hug+19]. Sur la base de ce constat, une structure numérique a été conçue de façon à pouvoir classer des voyelles (voir Figure VI.25). La conception de cette structure était équivalente à l’entraînement d’un réseau de neurones et ici les neurones étaient des cubes de matières et le poids ajustable correspondait à leur densité volumique. Cette validation numérique sur une structure passive conforte donc l’idée selon laquelle des structures pourraient être dotées de capacités algorithmiques intrinsèques. Néanmoins ces travaux n’ont pas été validés expérimentalement et ne s’appuient pas sur des matériaux électro-actifs.

Idée directrice : L’objectif du projet de recherche que je propose ici est donc d’aller plus loin dans cette direction et d’exploiter les matériaux électro-actifs pour la réalisation de structures multifonctionnelles qui soient réellement “*intelligentes*”. Il s’agit ainsi de savoir s’il est possible de recréer les ingrédients nécessaires à la création d’un réseau de neurones récurrent aléatoire via des ondes guidées se propageant dans une structure mince. Pour cela, les travaux détaillés dans ce manuscrit proposent déjà quelques solutions pratiques et d’autres solutions peuvent être imaginées (voir Figure VI.27) :

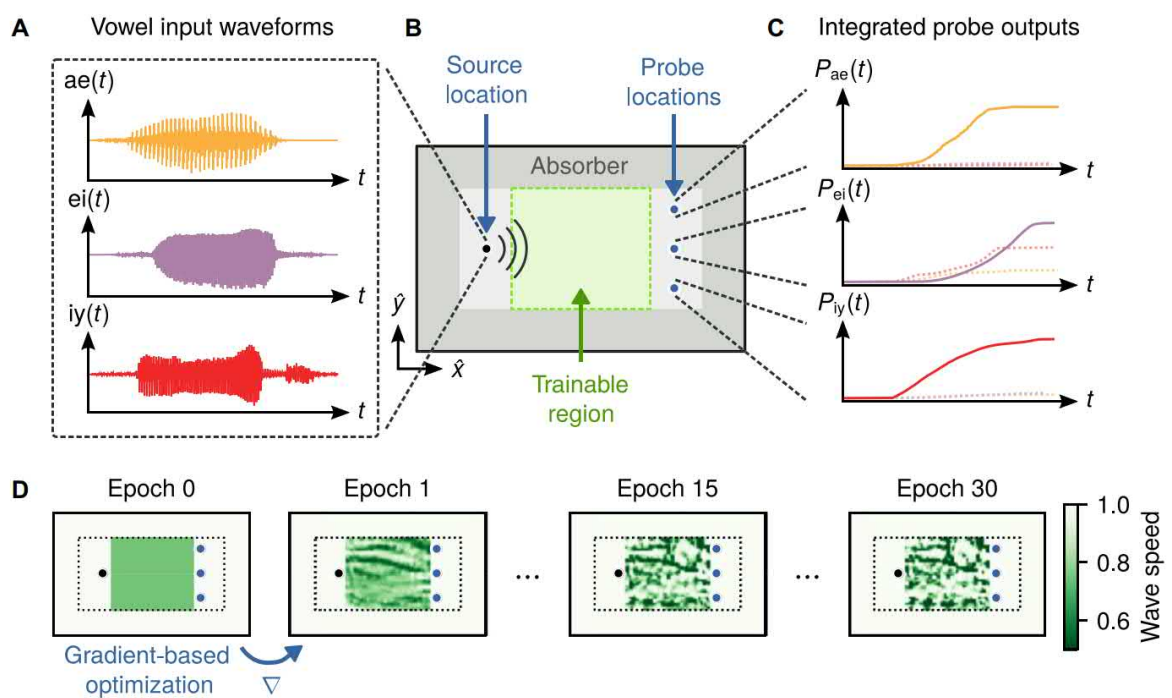


FIGURE VI.26 – Illustration d’une structure “intelligente” entraînée par modification de sa densité locale à reconnaître des voyelles (d’après [R|Hug+19]). En fonction de la voyelle présentée en entrée sous la forme d’un signal vibratoire, seule l’une de trois zones de sortie (“probe location” aura un niveau de sortie important.

- **Fonctions d’interconnexion** : L’un des ingrédients de base d’un réseau de neurones est le fait que les neurones soient interconnectés et que les informations puissent être transmises d’un neurone vers différents neurones. Dans le cas d’ondes se propageant dans des structures minces, les fonctions d’interconnexions correspondront donc naturellement au fait que les ondes se propagent dans la structure d’un point à l’autre et donc transportent une information. Les fonctions d’interconnexion ne seront donc pas une connexion directe, mais un opérateur de propagation f_P . qu’il faudra sans doute caractériser via par exemple les travaux présentés à la Section II.1. Une limitation attendue ici est que lorsqu’une onde va être générée, elle va se propager partout dans la structure et atteindra tous les points de la couche suivante. Nous aurons par défaut un réseau de neurones complètement connectés (voir Figure VI.27b) et il ne sera pas possible a priori de désactiver à l’envie certaines connexions.
- **Apprentissage** : L’apprentissage est une partie critique pour les PRCs car tout ne peut pas être modulé dans une structure mince. Étant donné que seul le niveau de sortie a besoin d’être appris dans le formalisme des PRCs, il est possible d’imaginer bénéficier des propriétés ajustables des matériaux électro-actifs pour réaliser ces ajustements. Ainsi, le niveau de sortie correspondra à des matériaux électro-actifs placés à des endroits choisis sur la structure mince et pour lesquels les propriétés de polarisation pourront être choisies de façon à obtenir le résultat désiré. En pratique cela revient à venir localement imposer un certain champ électrique à la verticale du matériau électro-actif et donc cela semble réalisable (voir Figure VI.27d où les différents degrés de polarisation sont symbolisés par la couleur du patch électro-actif).
- **Fonctions d’activation non-linéaires** : Comme cela a été décrit précédemment dans la Section II.2.3, les interactions “ondes/dommage” sont potentiellement non-linéaires et grâce au choc LASER il est possible de contrôler finement la position d’un dommage ainsi que sa taille. Il est ainsi possible d’imaginer de venir impacter une structure mince par des chocs LASER en certains points de façon à générer localement des réponses dynamiques non-linéaires qui feront office de fonctions d’activation pour les PRCs (voir Figure VI.27a). Il est possible également d’imaginer d’autres moyens permettant de générer localement des non-linéarités (ajout d’un matériau actif non-linéaire, génération d’une entaille, ...).
- **Boucle de retours** : Dans les réseaux de neurones récurrents, il existe des boucles de retour qui sont capables de renvoyer une information vers une zone où elle a déjà été traitée préalablement. Ici, en profitant du fait qu’il est possible de déposer sur les structures minces très facilement des pistes électriques via des encres conductrices, il est envisageable d’imaginer réaliser des rétroactions électriques *instantanées* entre différentes zones spatiales via des connexions électriques directes avec des matériaux électro-actifs de chaque côté qui serviraient à capter et à renvoyer l’information désirée. Ici, le terme *instantané* est utilisé car les signaux électriques se propageront bien plus rapidement que les ondes guidées. Le signe associé à la boucle de retour, c’est à dire s’il s’agit d’une rétroaction négative ou positive peut par exemple être géré par les connexions entre les électrodes des deux patches qui peuvent ou non être inversées (voir Figure VI.27c). Par défaut la conduction électrique sera bidirectionnelle, alors qu’ici il est souhaitable d’avoir plutôt une connexion unidirectionnelle. Il est peut être possible de solutionner ce problème en jouant sur la nuance de matériau actif plutôt dédiée *capteur* d’un côté et un autre plutôt *actionneur* de l’autre côté.

Il faudra d’abord caractériser proprement chacun des éléments individuellement pour s’assurer que le comportement observé est bien le comportement attendu. Ensuite pour passer à une échelle plus importante, il y aura nécessairement une problématique liée aux procédés de

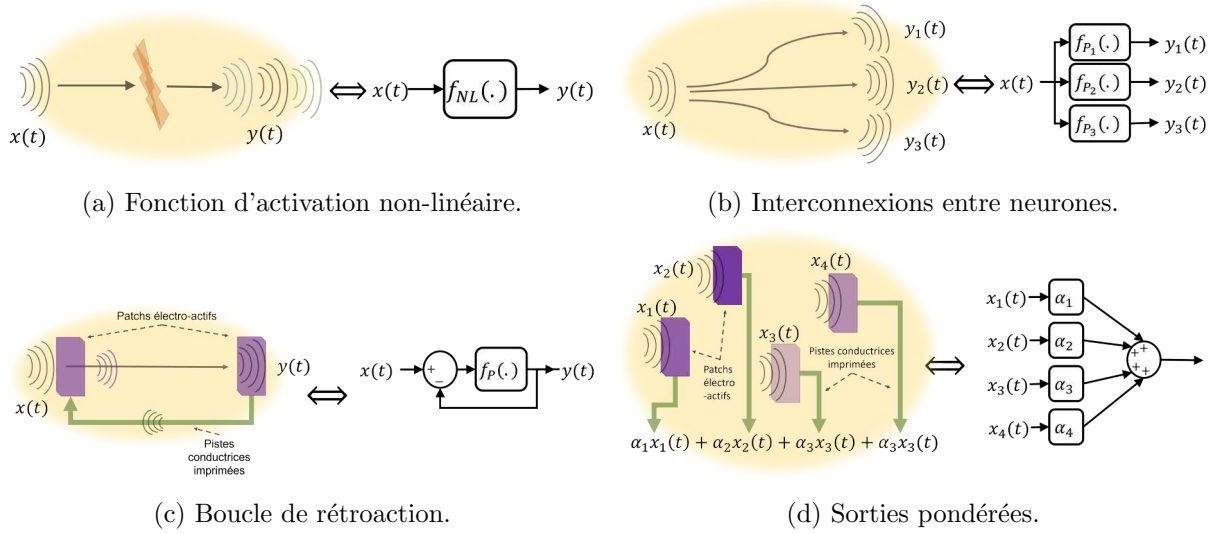


FIGURE VI.27 – Implémentations physiques par ondes guidées dans une plaque mince des différents éléments d'un réseau de neurones. Les fonctions $f_P(\cdot)$ désignent des opérateurs de propagation et la fonction $f_{NL}(\cdot)$ une fonction non-linéaire. Les patchs électro-actifs sont symbolisés en violet et l'intensité de leur couleur représente leur degré de polarisation. Les pistes conductrices déposées sur la structure hôte sont représentées en vert. Il s'agit en réalité de deux pistes côte à côte.

mise en œuvre. Dans ce contexte, il sera possible de s'appuyer sur l'expertise du laboratoire en ce qui concerne la fabrication additive et les procédés associés aux polymères pour trouver les solutions qui permettent la réalisation pratique de telles structures intelligentes. Idéalement, il serait intéressant de choisir une fonctionnalité simple (comme par exemple la détection d'une masse ajoutée) et de concevoir et réaliser un démonstrateur démontrant qu'une structure est capable de s'auto-diagnostiquer en autonomie, y compris du point de vue de l'implantation et de l'implémentation de ses algorithmes de détection.

Plan de travail et collaborations potentielles : Cet axe de travail se situe à un niveau plus fondamental que les axes évoqués précédemment. L'objectif n'est pas d'aller immédiatement vers des applications mais plutôt d'imaginer la méthodologie et de formaliser le concept sous-jacent. Des collaborations avec Pierre MARGERIT et Nazih MECHBAL seront réalisées pour la formalisation du concept. Des collaborations avec Matthieu GERVAIS et Sébastien ROLAND seront envisagées pour la partie réalisation et procédés associée à cette idée. Des réponses à des appels à projet nationaux et internationaux seront rédigées pour trouver des financements me permettant d'avancer sur cet axe.

Annexe A

Curriculum Vitae

Sommaire

A.1	Formation	186
A.2	Activités d'enseignement	186
A.3	Responsabilités collectives	187
A.3.1	Enseignement	187
A.3.2	Recherche	189
A.3.3	Instances & commissions	190

MARC RÉBILLAT, né le 11 Avril 1984 à Bordeaux (33).

Établissement : École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Campus de Paris
Affectation : 1^{er} Septembre 2012
Laboratoire : Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM)
Grade : Maître de conférences
Section CNU : 61^{ème} section

✉ Équipe DYSCO, Laboratoire PIMM
 ENSAM, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris
 ☎ +33 (0) 44 24 63 30
 @ marc.rebillat@ensam.eu
 ✓ <https://pimm.artsetmetiers.fr/user/53>

A.1 Formation

2004 - 2008	Département EEA de l'ENS Cachan
2006 - 2007	Agrégation de Physique, option " <i>Physique Appliquée</i> " (Rang : 2 ^{ème})
2007 - 2008	Master 2 Recherche ATIAM <i>"Acoustique, Traitement du signal, et Informatique Appliqués à la Musique"</i>
2008 - 2011	Thèse de doctorat, École Polytechnique <i>Vibrations de plaques multi-exciteurs de grandes dimensions pour la création d'environnements virtuels audio-visuels.</i> B. F. G. Katz (LIMSI, Uni. Paris-Saclay), X. Boutillon (LMS, École Polytechnique) et E. Corteel (<i>sonic emotion</i>) Moniteur à l'ENS Cachan
2011 - 2012	Post-doctorat, École Normale Supérieure, Département d'études Cognitives <i>Étude des corrélations entre les indices de localisation de sources sonores et les réponses neuronales associées.</i> R. Brette, Équipe de Neurosciences Computationnelles
2012	Prix " <i>Yves ROCARD - Jeune Chercheur</i> ", Société Française d'Acoustique Qualification au sein des sections CNU 60 et 61
Depuis 2012	Maître de conférences, section 61, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Équipe Dynamique, Structure, Commande (DYSCO), Laboratoire PIMM.

A.2 Activités d'enseignement

Depuis mon recrutement en tant que Maître de conférences en Septembre 2012, j'ai effectué 100% de ma charge d'enseignement au sein du campus de Paris de l'ENSAM auprès d'élèves de niveau Bac+4 (2A) ou Bac+5 (3A). Les différentes formations dans lesquelles je suis intervenu ou j'interviens encore depuis mon recrutement ainsi que les cours associés sont décrits ci-dessous. Les cours sont classés en cours magistraux (CM), séances d'exercices dirigées (ED), travaux pratiques (TP) et encadrements de projets ou tutorat (PR). Certains enseignements ont lieu deux fois par an (2 semestres) et d'autres une fois par an (1 semestre).

— **Programme Grande École (PGE), élèves ingénieurs ENSAM de 2^{ème} année :**

- Modélisation de la dynamique de systèmes multi-physiques par les Bond Graphs
 (≈ 100 étudiants, CM : 7.5h, ED : 7.5h [4 groupes], TP 4h [8 groupes], 2 semestres)

- Cas d'étude *SMART Structure*
(\simeq 25 étudiants, CM : 4.5h, ED : 6h [1 groupe], TP 4h [2 groupes], 1 semestre)
- Projets "Métier" (PJT) : participation à la coupe de France de robotique, challenge *Drone UAV* organisé par Dassault, projets en collaboration avec des partenaires industriels (Schlumberger, Solisystème, ...)
(\simeq 12 étudiants, PR : 24h, 2 semestres)
- **Apprentis ingénieurs de spécialité "Génie Industriel", 2^{ème} année :**
 - Modélisation et commande des systèmes linéaires
(\simeq 40 étudiants, CM : 15h, ED : 15h [2 groupes], 1 semestre)
 - Tutorat d'élèves apprentis ingénieurs
(\simeq 3 étudiants, PR : 12h)
- **Programme Grande École (PGE), élèves ingénieurs ENSAM de 3^{ème} année :**
 - Capteurs et actionneurs pour la mécatronique, Unité d'expertise "*Mécatronique*"
(\simeq 25 étudiants, CM : 8h, ED : 8h, TP : 4h [1 groupe], 1 semestre)
 - Traitement du signal pour la robotique, Master 2 Recherche "*Systèmes avancés et robotiques*" en partenariat avec Sorbonne Université
(\simeq 40 étudiants, CM : 8h, ED : 4h, TP : 4h [1 groupe], 1 semestre)
 - Tutorat de stage de fin d'étude, Master 2 Recherche "*Systèmes avancés et robotiques*" et Unité d'expertise "*Mécatronique*"
(\simeq 3 étudiants, PR : 12h, 1 semestre)
 - Non-destructive testing, Master 2 Recherche "*Acoustical Engineering*" en partenariat avec l'université Paris-Sud
(\simeq 15 étudiants, CM : 8h, ED : 4h, TP : 4h [1 groupe], 1 semestre)
 - Psycho-acoustics, Master 2 Recherche "*Acoustical Engineering*" en partenariat avec l'université Paris-Sud
(\simeq 15 étudiants, CM : 12h, ED : 4h, TP : 4h [1 groupe], 1 semestre)

Un résumé des heures effectuées depuis Septembre 2012 est présenté en Figure A.1. Ma charge d'enseignement est répartie en part globalement égales entre les 2A, les 3A, et la formation par apprentissage. Je suis d'abord intervenu majoritairement en 2A et ai peu à peu réalisé des cours en 3A et pris des responsabilités qui apparaissent sous forme de missions. La baisse du nombre d'heures réalisées depuis 2018 s'explique par une volonté de ma part de ne plus intervenir dans la formation par apprentissage en raison d'une charge d'enseignement devenue trop importante. Par ailleurs, le M2R "*Acoustical Engineering*" n'a pas pu rouvrir à la rentrée 2019 ce qui explique aussi une baisse de charge à partir de cette année. A présent, la charge réalisée tend asymptotiquement vers les 192h préconisées par le cadre réglementaire.

A.3 Responsabilités collectives

A.3.1 Enseignement

- Responsable de la partie "**Modélisation de la dynamique de systèmes multi-physiques par les Bond Graphs**", rattachée à l'unité d'enseignement fondamentale "Électronique, Électrotechnique & Automatique" de 2A.
- Responsable de l'unité d'enseignement "**Modélisation et commande des systèmes linéaires**" en 2A pour les ingénieurs apprentis (jusqu'en 2018).

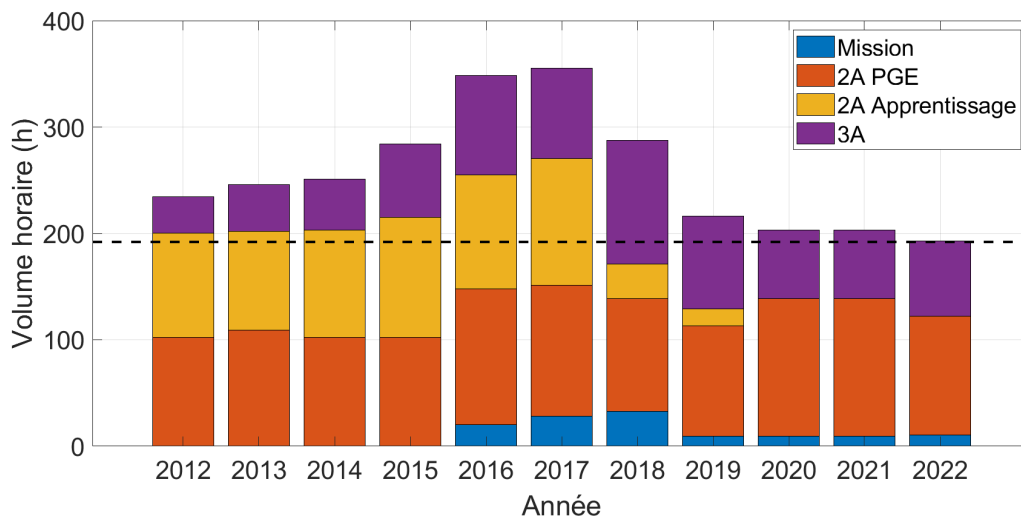


FIGURE A.1 – Heures d’enseignement effectuées et répartition associée.

- Responsable de l’**unité d’expertise “Mécatronique”** pour les élèves de 3A.
- Création et animation du **cas d’étude “SMART Structures”**. En 2016, une réforme pédagogique a été engagée à l’ENSAM pour les étudiants de 2A. L’objectif de cette réforme était de déployer des méthodes pédagogiques dites innovantes permettant de placer l’étudiant en mode projet. Dans ce contexte j’ai défini et mis en place avec les collègues du campus de Paris de l’ENSAM un cas d’étude multidisciplinaire “Smart Structures” (80 heures d’enseignements pour les élèves, 25 élèves par semestre). Dans ce cas d’étude, les élèves concourent par équipe pour concevoir le meilleur haut-parleur piézo-électrique réalisé par fabrication additive (voir Figure A.2).
- Création et animation du **Master 2 Recherche “Acoustical Engineering”** en lien avec l’ENSTA et l’École Polytechnique. J’étais responsable à l’ENSAM du Master 2 “Acoustical Engineering” animé conjointement par l’ENSTA, l’École Polytechnique, le CEA et l’ENSAM. En 2015, j’ai participé à la création de ce M2R, à la rédaction de sa maquette pédagogique et au montage du dossier à défendre auprès des différentes instances. J’ai ensuite animé différents cours (psycho-acoustique, contrôle non-destructif), me suis occupé du recrutement des étudiants, et ai supervisé les étudiants de l’ENSAM qui participaient à ce M2R. Ce M2R était suivi par environ 15 étudiants par an. Ce M2R n’a pu rouvrir à partir de Septembre 2019 suite à la réorganisation du plateau de Saclay.
- **Atelier “Buzz le piézoélectrique” lors de la fête de la science**. Je suis responsable de l’organisation de l’atelier “Buzz le piézo!” ayant pour objectif de vulgariser la piézo-électricité auprès du grand public et de faire la démonstration de quelques-unes de ses applications pratiques (haut-parleur piézo-électrique et contrôle de la santé des structures par exemple) lors de la Fête de la Science (voir Figure A.2). Durant cet événement, l’atelier proposé a accueilli 127 participants en 2016 et 285 participants en 2017. Il a rouvert en 2021 avec deux groupes de 12 participants préinscrits.



FIGURE A.2 – À gauche, “Arbre à haut-parleurs” et poster présentés lors de l’atelier “Buzz le piézo!”. À droite, exemple de haut-parleur piézo-électrique réalisé par impression 3D dans le cadre du cas d’étude “Smart Structures”.

A.3.2 Recherche

- Responsable de l’équipe **DISCOH** : depuis Octobre 2022, je suis responsable de l’équipe DISCOH (*Dynamics, Intelligent, Simulations, Control, Hybridation*). Les rôles principaux du responsable d’équipe sont d’animer la vie scientifique de son équipe, d’être un lien entre l’équipe et la Direction du laboratoire, et de participer au Comité de Direction du laboratoire. Pour remplir au mieux ses rôles, le responsable d’équipe doit acquérir une vue globale de l’activité de son équipe (activités scientifiques, activités de formation, ressources humaines et financières, projets, thèses, locaux et matériels). De manière collégiale avec l’ensemble des membres de son équipe, il doit procéder à un pré-arbitrage des demandes (postes, équipements, AAP IC ARTS, contrats doctoraux) de son équipe. Afin de favoriser la mise en commun de ressources pour l’achat d’équipement et de matériels, le responsable d’équipe a une vision sur les contrats et comptes de regroupement des personnes de son équipe. La direction lui délègue enfin l’entretien annuel de certains personnels techniques de son équipe.
- Responsable de la **plate-forme expérimentale & numérique SHM@PIMM** : Depuis mon arrivée en 2012, notre équipe a eu différentes activités autour de la thématique du contrôle de la santé des structures. Afin de capitaliser toute l’expérience acquise dans ce domaine, des actions de pérennisation des compétences et des savoirs ont été entreprises. Du point de vue expérimental, j’ai mis en place un banc d’essai automatisé et documenté qui permet maintenant à n’importe quel partenaire la réalisation d’essais dédiés au SHM. C’est par exemple ce banc expérimental qui nous a servi lors des essais sur A380 à Toulouse. Associés à ce banc, les différents algorithmes pour le SHM développés par l’équipe au cours du temps ont été regroupés au sein d’une boîte à outils MATLAB pour le SHM nommée SHM@PIMM disponible en interne pour la recherche et l’enseignement (voir Figure. A.3).
- **Participation à des sociétés savantes :**

Annexe A. Curriculum Vitae

- Membre depuis 2008 de la **Société Française d'Acoustique** (SFA). Actuellement impliqué au sein du *Groupe "Instrumentation et Signal"* (GIS).
- Membre depuis 2015 du **Groupe de Recherche "Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques"** (GDR-MACS) devenu la "Société d'Automatique de Génie Industriel et de Productique" (SAGIP).



FIGURE A.3 – À gauche, l’interface graphique de la boîte à outils Matlab SHM@PIMM. À droite, la plate-forme expérimentale associée.

A.3.3 Instances & commissions

- Membre élu depuis 2017 au **Conseil des Études et de la Vie Étudiante** (CEVE). Le Conseil des études et de la vie à l’école est une instance nationale de l’ENSAM. J’y ai été élu en tant que représentant du collège de Maîtres de Conférences sur une liste soutenue par le Syndicat national de l’enseignement supérieur (SNESUP). Ce conseil est consulté par la Direction Générale à propos de l’orientation générale des formations, des demandes d’accréditation, des mesures destinées à favoriser les activités offertes aux usagers, et de l’action sociale en faveur des usagers.
- Secrétaire du **Comité d’Hygiène et Sécurité Spécial du Campus de Paris** depuis 2018. J’y ai été élu sur une liste soutenue par le Syndicat national de l’enseignement supérieur (SNESUP). Le rôle du CHSCT est essentiellement préventif et ses principales missions sont de contribuer à la protection de la santé (physique et mentale) et à la sécurité des personnels du campus de Paris, de contribuer à l’amélioration de leurs conditions de travail, et de veiller à ce que les prescriptions du Code du travail concernant la santé et la sécurité au travail soient appliquées par la Direction. Le secrétaire du CHSCT est l’interlocuteur de la Direction avec laquelle il prépare l’ordre du jour, élabore le procès-verbal des réunions et suit les actions en cours.
- Membre nommé par la Direction au **Conseil de Laboratoire** (CdL) du laboratoire “*Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux*” depuis 2020.
- Depuis mon recrutement en 2012, j’ai participé à **7 comités de sélection pour des postes de Maître de Conférences** (5 en tant que membre interne ENSAM et 2 en tant que membre externe pour un autre établissement [Sorbonne Université et ENSE3]).

Annexe B

Synthèse des activités d’encadrement et de recherche

Sommaire

B.1	Activités d’encadrement	191
	B.1.1 Thèses de doctorat	191
	B.1.2 Post-Doctorats	193
	B.1.3 Master 2 Recherche et Projets de fin d’étude	194
B.2	Rayonnement scientifique	195
	B.2.1 Collaborations et programmes internationaux	195
	B.2.2 Collaborations et programmes nationaux	197
	B.2.3 Contrats directs	197
	B.2.4 Expertise scientifique	198
	B.2.5 Organisation de conférences	199
	B.2.6 Prix et distinctions	200
B.3	Publications, communications et mémoires	200
	B.3.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture	200
	B.3.2 Brevets internationaux	202
	B.3.3 Actes de conférences	203
	B.3.4 Séminaires invités	207
	B.3.5 Mémoires	208
	B.3.6 Mémoires encadrés	208

B.1 Activités d’encadrement

-
- ✓ Co-directeur de 11 thèses de Doctorat de l’École Doctorale SMI (9 soutenues)
 - ✓ Encadrant de 3 post-doctorats
 - ✓ Encadrant de 14 stages de M2R ou projets de fin d’étude
-

B.1.1 Thèses de doctorat

- [Nov. 2012 – Déc. 2015] Claude Marcellin **FENDZI TEFOIT**
 - “*Contrôle santé des structures composites : Application à la Surveillance des Nacelles Aéronautiques.*” [LIEN]

- Enc : Coffignal G. [25%, Dir.], Mechbal N. [25%], Guskov M. [25%], Rébillat M. [25%]
- Financement : contrat direct avec SAFRAN-Nacelles
- 5 publications : [A|Fen+16a; A|Fen+16b] et [C|Fen+14; A|Fen+16b; C|Hma+15]
- Claude est ingénieur en CDI au pôle “*Prognosis and Health Management*” à AIRBUS.
- **[Déc. 2014 – Déc. 2017] Meriem GHRIB**
 - “*Contrôle santé des structures composites : génération de délaminages par choc laser et quantification par apprentissage machine.*” [LIEN]
 - Enc : Berhe L. [25%, Dir.], Mechbal N. [25%], Guskov M. [25%], Rébillat M. [25%]
 - Financement : bourse HESAM Université
 - 6 publications : [A|Ghr+17a; A|Ghr+19b] et [C|Ghr+16; C|Ghr+17c; C|Ghr+17b; C|Ghr+19a]
 - Meriem est ingénieure en CDI au pôle “*Prognosis and Health Management*” à AIRBUS.
- **[Sept. 2015 – Déc. 2018] Emmanuel LIZÉ**
 - “*Détection de dommages sur des pièces aéronautiques de grande surface par ondes de Lamb.*” [LIEN]
 - Enc : Mechbal N. [33%, Dir.], C. Bolzmacher (CEA-LIST) [33%], Rébillat M. [33%]
 - Financement : bourse CEA
 - 6 publications : [A|Liz+18b] et [C|Liz+17b; C|Liz+17c; C|Liz+17a; C|Liz+18a; C|Liz+19]
 - Emmanuel est ingénieur au sein de la start-up “*e-nov ACT*”.
- **[Nov. 2017 – Juin 2021] Nassim BENBARA**
 - “*Reproduction sonore 3D par surface émettrice de sons dans un véhicule.*” [LIEN]
 - Enc : Mechbal N. [50%, Dir.], [50%], Rébillat M. [50%]
 - Financement : Projet ANR SOURCE
 - 5 publications : [A|BRM20; A|Ben+22] et [C|Bol+19; C|BRM19a; C|BRM19b]
 - Nassim est post-doctorant au sein de l'équipe DYSCO du PIMM.
- **[Juin 2017 – Juillet 2021] Mattias SCHEFFLER**
 - “*Modélisation multi-physique et commande optimale d'une pompe à membrane ondulante.*” [CONFIDENTIEL]
 - Enc : Mechbal N. [40%, Dir.], Monteiro É. [30%], Rébillat M. [30%]
 - Financement : Thèse CIFRE en partenariat avec CORWAVE
 - 3 publications : [B|Sch+20a] et [C|Sch+19; C|Sch+20b]
 - Mattias est ingénieur en CDI chez CORWAVE.
- **[Oct. 2017 – Dec. 2021] Xixi LI**
 - “*Modélisation de l'interaction nonlinéaire onde de Lamb/délamination : application au contrôle santé des structures.*” [LIEN]
 - Enc : Mechbal N. [30%, Dir.], Guskov M. [40%], Rébillat M. [30%]
 - Financement : Chinese Science Council (CSC) [4 ans]
 - 3 publications : [C|Li+19; C|Li+20; C|Li+22a]
- **[Oct. 2017 – Dec. 2021] Shuanglin GUO**
 - “*Modélisation de l'atténuation anisotrope des ondes de Lamb dans les matériaux composites : application au contrôle santé des structures.*” [LIEN]
 - Enc : Mechbal N. [40%, Dir.], Rébillat M. [60%]
 - Financement : Chinese Science Council (CSC) [4 ans]
 - 3 publications : [A|GRM22a; A|GRM22b] et [C|GRM19]
- **[Dec. 2018 – Mars 2022] William BRIAND**
 - “*Quantification de la propagation de délamination lors d'essais de fatigue : application au contrôle de santé des structures aéronautiques*” [LIEN]

- Enc : Mechbal N. [40%, Dir.], Guskov M. [30%], Rébillat M. [30%]
- Financement : Projet européen H2020 REMAP
- 5 publications : [A|Bri+21 ; A|Yue+22] et [C|Bri+22 ; C|Bri+20 ; C|Bri+19] ainsi qu'une base de donnée en accès libre²³
- **[Mars 2019 – Déc. 2022] Hadrien POSTORINO**
 - “*Méta-modèles et transfert d'apprentissage pour le contrôle santé des structures composites*”
 - Enc : Mechbal N. [30%, Dir.], É. Monteiro [40%], Rébillat M. [30%]
 - Financement : Projet FUI *MONARQUE*
 - 2 publications : [C|Pos+22 ; C|Pos+20]
- **[Oct. 2020 – en cours] Shawn KISER**
 - “*Fatigue gigacyclique ultrasonique, dynamique non-linéaire, propagation de fissure, traitement du signal non-linéaire*”
 - Enc : Ranc N. [40%, Dir.], Guskov M. [30%], Rébillat M. [30%]
 - Financement : Bourse de l'ED SMI
 - 4 publications : [C|Kis+21 ; A|Kis+22a ; C|Kis+22b ; C|Kis+22c]
- **[Oct. 2021 – en cours] Julie LIEGEY**
 - “*Génération de dommages de corrosion calibrés et quantification de leur taille par ondes de Lamb couplées à un jumeau numérique*”
 - Enc : Mechbal N. [40%, Dir.], El May M. [30%], Rébillat M. [30%]
 - Financement : Projet ANR COQTEL

B.1.2 Post-Doctorats

- **[Sept. 2012 – Aout 2014] Rafik HADJRIA**
 - “*Application de l'identification de systèmes non-linéaires au contrôle santé des structures*”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - Financement : Poste ATER ENSAM
 - 2 publications : [A|RHM14] et [C|RHM13]
- **[Sept. 2014 – Aout 2015] Ouadie HMAD**
 - “*Application de la théorie des valeurs extrêmes au contrôle de la santé des structures*”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - Financement : Poste ATER ENSAM
 - 3 publications : [A|Réb+18] et [C|Hma+15 ; C|HMR15]
- **[Décembre 2020 – Décembre 2021] Damien BOUVIER**
 - “*Formalisme de Green-Volterra pour la modélisation de dommages dans des matériaux composites*”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Monteiro É [33%], Rébillat M. [33%]
 - Financement : Projet européen H2020 REMAP
 - 2 publications : [C|BMR20] et [A|Bou+23]
- **[Mai 2021 – en cours] Nassim BENBARA**
 - “*Application de la focalisation d'onde au dégivrage d'équipements aéronautiques*”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Monteiro É [33%], Rébillat M. [33%]
 - Financement : Contrat direct avec Safran Tech

23. https://dataverse.nl/dataverse/ReMAP_H2020_SHM_data_repository

- [Février 2023 – en cours] **Shweta PAUNIKAR**
 - “Wave propagation in curved variable-thickness structures : application to SHM of smart fan blades”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Margerit P. [33%], Rébillat M. [33%]
 - Financement : Projet européen H2020 MORPHO

B.1.3 Master 2 Recherche et Projets de fin d'étude

- [Mars. 2013 – Aout 2013] **Carlos VIÑA**
 - “Localisation binaurale de sources sonores en robotique”
 - Enc : Argentieri S. (ISIR) [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*
 - 1 publication : [C|VAR13]
- [Mars. 2013 – Aout 2013] **Juan Sebastian URIBE**
 - “Diagnostic par apprentissage”
 - Enc : Mechbal N. (ISIR) [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*
 - 2 publications : [A|MUR15] et [C|Uri+13]
- [Mars. 2013 – Aout 2013] **Juan Sebastian URIBE**
 - “Contrôle de la Santé des Structures : Application aux nacelles pour Moteurs d'Avions”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*
 - 1 publication : [C|Fen+14]
- [Mars. 2014 – Aout 2014] **Christophe VIEL**
 - “Méthodes de localisation binaurale des sources sonores”
 - Enc : Argentieri S. (ISIR) [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*
- [Mars. 2014 – Aout 2014] **Myriam BAKIR**
 - “Damage classification based on nonlinear signatures of structures”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - *Télécom ParisTech*
 - 1 publication : [C|BRM15]
- [Mars. 2014 – Aout 2014] **Maxime GALLO**
 - “Estimation de non-linéarités en vibrations des structures - Comparaison de méthodes et validations expérimentales”
 - Enc : Antoni J. (INSA Lyon) [33%], Ege K. (INSA Lyon) [33%], Rébillat M. [33%]
 - *Télécom ParisTech*
 - 3 publications : [A|Reb+16a] et [C|Gal+15; C|Ege+15]
- [Mars. 2015 – Aout 2015] **Amal BHAR**
 - “Commande de drones volant pour le contrôle santé des structures”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*
- [Mars. 2015 – Aout 2015] **Huijin YANG**
 - “Maintenance prédictive des structures composites intelligentes”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Guskov M. [33%], Rébillat M. [33%]
 - M2R *Systemes Avancés et Robotique*

- [Mars. 2016 – Aout 2016] Cai YU
 - “Nouveau concept sans fil pour le contrôle santé des structures”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Barthes C. (U.C. Berkeley) [33%], Rébillat M. [33%]
 - M2R *Systèmes Avancés et Robotique*
- [Mars. 2017 – Aout 2017] Alexandre LETALENET
 - “Synthèse de champ sonore par panneaux vibrant à actionneurs piézoélectriques”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Bolzmacher C. (CEA-LIST) [33%], Rébillat M. [33%]
 - M2R *Systèmes Avancés et Robotique*
- [Mars. 2018 – Aout 2018] Hamideh HASSANPOUR
 - “Adaptive vibration control for 3D Sound Reproduction using sound-emitting surfaces in cars”
 - Enc : Mechbal N. [50%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systèmes Avancés et Robotique*
- [Mars. 2019 – Aout 2019] Amirhossein RAHBARI
 - “Structural Health Monitoring by Machine Learning”
 - Enc : Mechbal N. [33%], Canu S. (INSA Rouen) [33%], Rébillat M. [33%]
 - M2R *Systèmes Avancés et Robotique*
 - 1 publication : [A|Rah+21]
- [Mars. 2020 – Aout 2020] Shawn KISER
 - “Détection d’une fissure de fatigue lors d’un essai de fatigue ultrasonique”
 - Enc : Ranc N. [33%], Guskov M. [33%], Rébillat M. [33%]
 - M2R MAGIS
- [Mars. 2021 – Aout 2021] Lamyae HAMMOUMI
 - “Génération de dommages de corrosion calibrés et quantification de leur taille ondes de Lamb”
 - Enc : Devos O. (I2M Bordeaux) [50%], Rébillat M. [50%]
 - École Nationale Supérieure d’Ingénieur du Mans
- [Mars. 2021 – Aout 2021] Nohayla AJMI
 - “Development of a Numerical Tool to Identify Melt Pool Defect Signatures in LPBF Additive Manufacturing Process”
 - Enc : Koutiri I. [25%], Lapouge P. [25%], Mechbal N. [25%], Rébillat M. [50%]
 - M2R *Systèmes Avancés et Robotique*

B.2 Rayonnement scientifique

B.2.1 Collaborations et programmes internationaux

- Collaborations internationales :
 - [2014-2017] **Échanges avec l’Université de Berkeley en Californie** avec Clément Barthes alors au PEER Laboratory. L’objectif de cet échange était la conception et la réalisation d’une plateforme hardware et software dédiée au SHM embarqué. Son architecture logicielle est montrée sur la Figure B.1 tirée de [C|Bar+17]. Ces échanges ont menés à la publication de plusieurs articles dans des congrès internationaux [C|Reb+14a; C|Bar+17] et une bourse “*France-Berkeley Founds*” a été obtenue en 2016 pour financer des séjours en France et en Californie. Cette collaboration s’est interrompue en 2017 suite au départ de Clément Barthes dans le secteur privé.

- [Depuis 2016] **“Nonlinear system identification benchmark” (NLID)** : L’objectif de cet évènement est de confronter différentes approches dédiées à l’identification de systèmes non-linéaires. A ce titre, j’ai pu présenter la méthode [A|Réb+11b] et les échanges lors de cet évènement récurrent d’une année sur l’autre ont amené à une publication de journal [A|RS18]. La Figure B.1 tirée de [A|RS18] représente par exemple une comparaison des performances en termes de temps de calcul et de qualité d’identification des méthodes basées sur des sinus balayés et de celles basées sur une approche par moindres carrés.
- [2018-2019] **Accueil du Pr. Samuel da Silva**, responsable de l’activité *“Structural Health Monitoring”* à l’Université d’état de Sao Paulo au Brésil. Samuel a passé un an au laboratoire PIMM et cet échange a donné lieu à la publication de deux articles de journal [A|Sil+21a; A|Sil+21b]. L’objectif scientifique de cette année d’échange était de valider l’utilisation de modèles de séries temporelles pour le contrôle de la santé des structures.

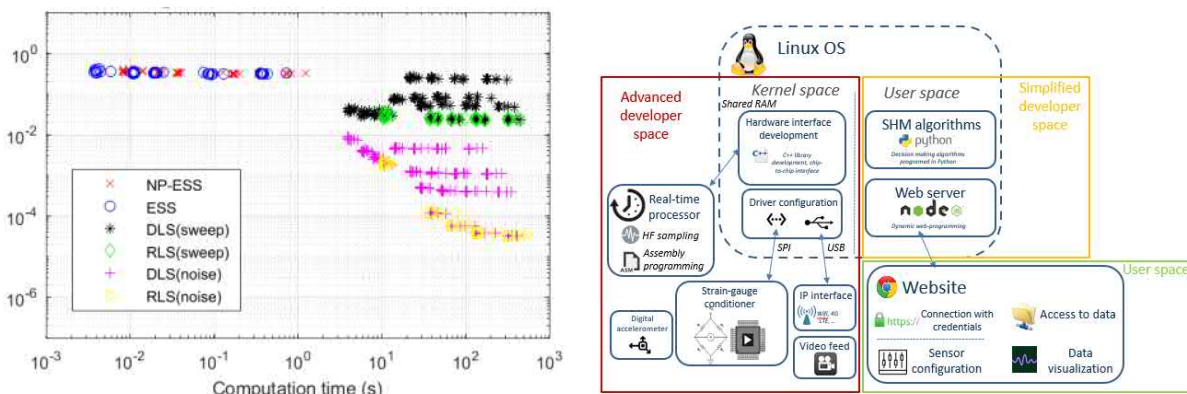


FIGURE B.1 – À gauche, comparaison des performances en termes de temps de calcul et de qualité d’identification des méthodes basées sur des sinus balayés (NP-ESS et ESS) et de celles basées sur une approche par moindres carrés (DLS et RLS) (d’après [A|RS18]). À droite, architecture logicielle de la plateforme hardware et software dédié au SHM embarqué et co-développée avec l’Université de Berkeley (d’après [C|Bar+17]).

○ **Projets européens H2020 :**

- [2018-2022] **Projet REMAP** : pour lequel nous étions en charge du contrôle de santé via les ondes de Lamb. Le budget de 495 k€ a permis de financer la thèse de William BRIAND [A|Bri+21; C|Bri+20; C|Bri+19] ainsi que le post-doctorat de Damien BOUVIER. Ce projet avait pour objectif de combiner la surveillance d’endommagements dans les structures en utilisant différentes approches (ondes de Lamb, mesures de contraintes, etc..., voir Figure B.2) et d’intégrer cette démarche avec la surveillance des systèmes et le pronostic.
- **Le projet MORPHO (2021-2024)** pour lequel nous sommes coordinateurs et équipés d’un budget de 950 k€. L’objectif de ce projet est de réaliser des structures multifonctionnelles capables de suivre leur cycle de vie depuis leur fabrication jusqu’à leur démantèlement en passant leur période d’activité. Un schéma illustrant l’idée directrice du projet est donné en Figure B.2.



FIGURE B.2 – A gauche, une photographie des moyens d'essais mis en œuvre dans le cadre du projet REMAP. A droite, un schéma explicatif de l'idée directrice du projet MORPHO.

B.2.2 Collaborations et programmes nationaux

- [Depuis 2015] **Collaboration avec Kerem EGE et Jérôme ANTONI** du LVA autour de l'identification de systèmes non linéaires et qui a donné lieu à plusieurs publications [C|Ege+15; C|Gal+15; A|Reb+16a].
- [2017 - 2020] **Projet ANR SOURCE** : L'objectif de ce projet est le remplacement des haut-parleurs traditionnels par des éléments piézo-électriques excitant directement les parois intérieures des véhicules automobiles (voir Figure B.3). Nous étions responsables de la partie algorithmique pour le pilotage simultané des éléments piézo-électriques. Ce projet a reçu un financement de 200 k€ pour la thèse de Nassim BENBARA [A|BRM20; A|Ben+22; C|Bol+19; C|BRM19a; C|BRM19b] et initier une collaboration avec Stellantis (ex PSA) et le CEA-LIST autour de la thématique du contrôle vibratoire pour la restitution audio.
- [2017 - 2022] **Projet "Fond d'investissement unique" (FUI) MONARQUE** : Dans ce projet, nous sommes responsables de la partie relative au contrôle de la santé des structures par ondes de Lamb et plus précisément de l'utilisation de métamodèles pour limiter le recours aux simulations par éléments-finis. Ce projet doté d'un financement de 425 k€ a permis de financer la thèse d'Hadrien POSTORINO [C|Pos+20] et d'amorcer des collaborations avec SAFRAN, AIRBUS, THALES, DASSAULT et le CEA-DAM.
- [2020 - 2023] **Projet ANR COQTEL** pour lequel je suis le coordinateur. Ce projet doté d'un budget de 420 k€ permet le financement de la thèse de Julie LIEGEY et à pour objet l'étude de la surveillance des dommages liés à la corrosion (voir Figure B.3) en partenariat avec l'I2M, RESCOLL et CTEC.

B.2.3 Contrats directs

- [2012-2017] **"Plan d'Investissement d'Avenir" (PIA) EPICE-CORALIE** : Ce partenariat direct avec SAFRAN Nacelles avait pour objectif de démontrer la faisabilité du contrôle de la santé des structures par ondes de Lamb sur des pièces aéronautiques produites par cette société en allant jusqu'aux essais en vol. Un budget de 330 k€ a été alloué à ce projet et il a permis le financement de la thèse de Claude FENDZI [A|Fen+16a; A|Fen+16b; C|Fen+14; A|Fen+16b; C|Hma+15]. La méthodologie de contrôle de santé des structures



FIGURE B.3 – A gauche, la portière avant d'une 3008 qui a servi de démonstrateur dans le cadre du projet ANR SOURCE. A droite, les échantillons d'aluminium avec des trous calibrés qui ont été utilisés dans le cadre du projet ANR COQTEL.

a été validé sur des coupons, des pièces représentatives, et enfin lors d'essais en vol (voir Figure B.4).

- **[2018 - 2021] Thèse CIFRE avec CORWAVE** : CORWAVE est une start-up qui produit des pompes cardiaques utilisant une membrane ondulante pour propulser le sang sans l'endommager (voir Figure B.4). Le principe physique sous-jacent à ces pompes est très proche de celui d'un haut-parleur électrodynamique. Ce partenariat direct a permis le financement de la thèse de Mattias SCHEFFLER, le dépôt d'un brevet [B|Sch+20a] et plusieurs publications [C|Sch+19 ; C|Sch+20b].
- **[2019-2022] Thèse CIFRE avec Safran-Tech** : L'objectif ici est d'évaluer si des solutions de contrôle actif des vibrations peuvent être couplées avec des solutions de contrôle de santé des structures de façon à limiter la sollicitation mécanique de la zone endommagée. Cette approche s'appelle DTAC (Damage Tolerant Active Control) et est l'objet d'étude de la thèse d'Erika BAYONA.
- **[2021-2023] : Projet PADICE** : Ce projet en partenariat direct avec Safran-Tech a pour objectif l'étude de la faisabilité du dégivrage des nacelles d'avion en se basant sur des ondes produites par des éléments piézoélectriques. Ce projet permet le financement du post-doctorat de Nassim BENBARA.

B.2.4 Expertise scientifique

- **Rapporteur pour différents journaux internationaux** :
 - Mechanical Systems and Signal Processing (MSSP - IF :6.8)
 - Structural Health Monitoring - an international journal (SHM journal - IF :5.9)
 - IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (IEEE-TIM - IF :4.0)
 - Journal of Sound and Vibration (JSV - IF :3.6)
 - Smart Materials and Structures (SMS - IF :3.5)
 - Journal of Vibration and Control (JVC - IF :3.0)
 - Journal of Intelligent Material Systems and Structures (JIMSS - IF :2.5)
 - Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E - IF :2.0)



FIGURE B.4 – A gauche, la partie interne fixe d’une nacelle d’A380 instrumentée avec des éléments piézo-électriques dédiés au contrôle de la santé des structures. A droite, une vue éclatée de la pompe à membrane ondulante produite par la société CORWAVE.

- **Editeur associé** pour le journal international *Mechanical Systems and Signal Processing* (MSSP - IF :6.8) depuis 2020 : gestion éditoriale simultanée d’entre 10 et 15 articles.
- **Examineur extérieur dans des jurys de thèse :**
 - A. Ben Dhiab “*Confinement of Vibrotactile Stimuli in Periodically Supported Plates*” (CEA, 2022)
 - A. Kulakovskiy “*Development of Structural Health Monitoring System for composite structures using guided elastic waves*” (CEA, 2019)
 - D. Bouvier “*Identification de systèmes non linéaires représentés en séries de Volterra : applications aux systèmes sonores*”(Sorbonne Université, 2018)
 - B. Maillou “*Caractérisation et identification non-paramétrique des non-linéarités de suspensions de haut-parleurs*” (Université du Maine, 2015)
 - K. Youssef “*Perception binaurale pour l’analyse de scène auditive en robotique* ” (Sorbonne Université, 2013).

B.2.5 Organisation de conférences

- Membre du comité local d’organisation de la **conférence IFAC SAFE PROCESS 2015** qui s’est déroulée en Septembre 2015 à l’ENSAM de Paris. Vincent COCQUEMPOT (CRISTAL, Université de Lille) et Nazih MECHBAL (PIMM, ENSAM) étaient les responsables de l’événement. Je les ai assisté localement en amont de la conférence pour les préparatifs et durant la conférence pour en assurer le bon déroulement.
- Membre du comité local d’organisation de la **conférence SMART 2019 (IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Material)** qui s’est déroulée en Septembre 2019 à l’ENSAM de Paris. Ayeche BENJEDDOU (Laboratoire ROBERVAL, UTC), Jean-François DEÛ (LMSSC, CNAM) et Nazih MECHBAL (PIMM, ENSAM) étaient les responsables de l’événement. Je les ai assisté localement en amont de la conférence pour les préparatifs et durant la conférence pour en assurer le bon déroulement.

B.2.6 Prix et distinctions

- 2012 : Prix “Yves Rocard - Jeune Chercheur” décerné par la Société Française d'Acoustique (SFA)
- 2012 : Qualification aux fonctions de maître de conférences en sections CNU 60 et 61
- 2018 : Obtention de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR)

B.3 Publications, communications et mémoires

-
- ✓ 30 articles dans des revues internationales à comité de lecture
 - ✓ 1 brevet international
 - ✓ 41 actes de conférences
-

B.3.1 Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- [A|RB11b] Marc RÉBILLAT et Xavier BOUTILLON. « Measurement of relevant elastic and damping material properties in sandwich thick plates ». *Journal of Sound and Vibration* 330.25 (2011), p. 6098-6121.
- [A|Réb+11b] Marc RÉBILLAT, Romain HENNEQUIN, Etienne CORTEEL et Brian FG KATZ. « Identification of cascade of Hammerstein models for the description of nonlinearities in vibrating devices ». *Journal of sound and vibration* 330.5 (2011), p. 1018-1038.
- [A|Réb+12a] Marc RÉBILLAT, Xavier BOUTILLON, Étienne CORTEEL et Brian FG KATZ. « Audio, visual, and audio-visual egocentric distance perception by moving subjects in virtual environments ». *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)* 9.4 (2012), p. 1-17.
- [A|EBR13] Kerem EGE, Xavier BOUTILLON et Marc RÉBILLAT. « Vibroacoustics of the piano soundboard : (Non) linearity and modal properties in the low-and mid-frequency ranges ». *Journal of Sound and Vibration* 332.5 (2013), p. 1288-1305.
- [A|Reb+14b] Marc REBILLAT, Victor BENICHOX, Makoto OTANI, Renaud KERIVEN et Romain BRETTE. « Estimation of the low-frequency components of the head-related transfer functions of animals from photographs ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 135.5 (2014), p. 2534-2544.
- [A|RHM14] Marc RÉBILLAT, Rafik HAJRYA et Nazih MECBAL. « Nonlinear structural damage detection based on cascade of Hammerstein models ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 48.1-2 (2014), p. 247-259.
- [A|MUR15] Nazih MECBAL, Juan Sebastian URIBE et Marc RÉBILLAT. « A probabilistic multi-class classifier for structural health monitoring ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 60 (2015), p. 106-123.
- [A|BRB16] Victor BENICHOX, Marc RÉBILLAT et Romain BRETTE. « On the variation of interaural time differences with frequency ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.4 (2016), p. 1810-1821.
- [A|Fen+16a] Claude FENDZI, Nazih MECBAL, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV et G COFFIGNAL. « A general Bayesian framework for ellipse-based and hyperbola-based damage localization in anisotropic composite plates ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 27.3 (2016), p. 350-374.

- [A|Fen+16b] Claude FENDZI, Marc REBILLAT, Nazih MECBAL, Mikhail GUSKOV et Gérard COFFIGNAL. « A data-driven temperature compensation approach for Structural Health Monitoring using Lamb waves ». *Structural Health Monitoring* 15.5 (2016), p. 525-540.
- [A|Reb+16a] Marc REBILLAT, Kerem EGE, Maxime GALLO et Jérôme ANTONI. « Repeated exponential sine sweeps for the autonomous estimation of nonlinearities and bootstrap assessment of uncertainties ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 230.6 (2016), p. 1007-1018.
- [A|Reb+16b] Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV, Etienne BALMES et Nazih MECBAL. « Simultaneous influence of static load and temperature on the electromechanical signature of piezoelectric elements bonded to composite aeronautic structures ». *Journal of vibration and acoustics* 138.6 (2016).
- [A|Ghr+17a] Meriem GHRIB, Laurent BERTHE, Nazih MECBAL, Marc RÉBILLAT, Mikhail GUSKOV, Romain ECAULT et Nas BEDREDDINE. « Generation of controlled delaminations in composites using symmetrical laser shock configuration ». *Composite Structures* 171 (2017), p. 286-297.
- [A|Liz+18b] Emmanuel LIZÉ, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Optimal dual-PZT sizing and network design for baseline-free SHM of complex anisotropic composite structures ». *Smart Materials and Structures* 27.11 (2018), p. 115018.
- [A|Réb+18] Marc RÉBILLAT, Ouadie HMAH, Farid KADRI et Nazih MECBAL. « Peaks Over Threshold-based detector design for structural health monitoring : Application to aerospace structures ». *Structural Health Monitoring* 17.1 (2018), p. 91-107.
- [A|RS18] Marc RÉBILLAT et Maarten SCHOUKENS. « Comparison of least squares and exponential sine sweep methods for Parallel Hammerstein Models estimation ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 104 (2018), p. 851-865.
- [A|Ghr+19b] Meriem GHRIB, Marc RÉBILLAT, Guillaume Vermot DES ROCHES et Nazih MECBAL. « Automatic damage type classification and severity quantification using signal based and nonlinear model based damage sensitive features ». *Journal of Process Control* 83 (2019), p. 136-146.
- [A|BRM20] Nassim BENBARA, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Bending waves focusing in arbitrary shaped plate-like structures : Application to spatial audio in cars ». *Journal of Sound and Vibration* 487 (2020), p. 115587.
- [A|RM20] Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Damage localization in geometrically complex aeronautic structures using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signal tensors ». *Structural Health Monitoring* 19.1 (2020), p. 305-321.
- [A|Bri+21] William BRIAND, Marc RÉBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nazih MECBAL. « Upcoming damage size quantification in aeronautic composite structures based on imaging results post-processing ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 30.2 (2021).

- [A|Rah+21] Amirhossein RAHBARI, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL et Stephane CANU. « Unsupervised damage clustering in complex aeronautical composite structures monitored by Lamb waves : An inductive approach ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 97 (2021).
- [A|Sil+21a] Samuel da SILVA, Jessé PAIXÃO, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Extrapolation of AR models using cubic splines for damage progression evaluation in composite structures ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 32.3 (2021), p. 284-295.
- [A|Sil+21b] Samuel da SILVA, Luis G. G. VILLANI, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Gaussian Process NARX Model for Damage Detection in Composite Aircraft Structures ». *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems* 5.1 (2021). 011007. ISSN : 2572-3901.
- [A|Ben+22] Nassim BENBARA, Guillaume MARTIN, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Bending waves focusing in arbitrary shaped plate like structures : study of temperature effects, development of a digital twin and of an associated neural network based compensation procedure ». *Journal of Sound and Vibration* 526 (2022).
- [A|GRM22a] Shuanglin GUO, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Dichotomy property of dispersion equation of guided waves propagating in anisotropic composite plates ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 164 (2022).
- [A|GRM22b] Shuanglin GUO, Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Prediction of frequency and spatially dependent attenuation of guided waves propagating in mounted and unmounted A380 parts made up of anisotropic viscoelastic composite laminates ». *Structural Health Monitoring* (2022).
- [A|Kis+22a] S. L. KISER, M. RÉBILLAT, M. GUSKOV et N. RANC. « Real-time sinusoidal parameter estimation for damage growth monitoring during ultrasonic very high cycle fatigue tests ». *Mechanical Systems and Signal Processing* (2022).
- [A|Yue+22] Nan YUE, Agnes BROER, William BRIAND, Marc RÉBILLAT, Theodoros LOUTAS et Dimitrios ZAROUCAS. « Assessing stiffness degradation of stiffened composite panels in post-buckling compression-compression fatigue using guided waves ». *Composite Structures* 293 (2022), p. 115751. ISSN : 0263-8223.
- [A|Bou+23] D. BOUVIER, M. RÉBILLAT, E. MONTEIRO et N. MECBAL. « A spatio-temporal nonlinear semi-analytical framework describing longitudinal waves propagation in damaged structures based on Green-Volterra formalism ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 189 (2023).
- [A|Gul+23] A. GULIYEVA, H. PUNG, S. TENCÉ-GIRAULT, M. RÉBILLAT, S. ANATOLI, M. GERVAIS, S. SOLLOGOUG et S. ROLAND. « Improvement of the self-assembly of low χ ABA triblock copolymers with the addition of an ionic liquid ». *Polymer International* 72.3 (2023).

B.3.2 Brevets internationaux

- [B|Sch+20a] Mattias SCHEFFLER, Nicolas BARABINO, Marc REBILLAT, Eric MONTEIRO et Nazih MECBAL. *Systems and methods for controlling an implantable blood pump*. US Patent 10,799,625. 2020.

B.3.3 Actes de conférences

- [C|RB10a] Marc RÉBILLAT et Xavier BOUTILLON. « Identification of elastic and damping properties of sandwich structures based on high resolution modal analysis of point measurements ». *ISMA2010 including USD2010*. 2010, p. 560.
- [C|RB10b] Marc RÉBILLAT et Xavier BOUTILLON. « Identification of honeycomb sandwich properties by high-resolution modal analysis ». *14th International Conference on Experimental Mechanics*. 2010.
- [C|RCK10] Marc RÉBILLAT, Étienne CORTEEL et Brian KATZ. « The SMART-I² : A new approach for the design of immersive audio-visual environments ». *Euro-VR-EVE 2010*. 2010.
- [C|RB11a] Marc RÉBILLAT et Xavier BOUTILLON. « A method to measure elastic and dissipative material properties of sandwich structures and its numerical validation ». *10ème Colloque National en Calcul des Structures*. 2011.
- [C|Réb+11a] Marc RÉBILLAT, Xavier BOUTILLON, Etienne CORTEEL et Brian KATZ. « Audio, visual, and audio-visual egocentric distance perception in virtual environments. » *Forum Acusticum*. 2011, p. 482.
- [C|BRB12] Victor BENICHOUX, Marc RÉBILLAT et Romain BRETTE. « On the variations of inter-aural time differences (ITDs) with frequency ». *Acoustics 2012*. 2012, p. 000327.
- [C|Réb+12b] Marc RÉBILLAT, Etienne CORTEEL, Brian KATZ et Xavier BOUTILLON. « From vibration to perception : using Large Multi-Actuator Panels (LaMAPs) to create coherent audio-visual environments ». *Acoustics 2012*. 2012.
- [C|RHM13] Marc RÉBILLAT, Rafik HAJRYA et Nazih MECBAL. « Detection of structural damage using the exponential sine sweep method ». *Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring (2013)*.
- [C|Uri+13] Juan Sebastian URIBE, Nazih MECBAL, Marc RÉBILLAT, Karima BOUAMAMA et Marco PENGOV. « Probabilistic decision trees using SVM for multi-class classification ». *2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*. IEEE. 2013, p. 619-624.
- [C|VAR13] Carlos VINA, Sylvain ARGENTIERI et Marc RÉBILLAT. « A spherical cross-channel algorithm for binaural sound localization ». *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2013, p. 2921-2926.
- [C|Fen+14] Claude FENDZI, Julien MOREL, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV, Nazih MECBAL et Gérard COFFIGNAL. « Optimal sensors placement to enhance damage detection in composite plates ». *7th European Workshop on Structural Health Monitoring (2014)*.
- [C|Reb+14a] Marc REBILLAT, Clement B BARTHES, Nazih MECBAL et Khalid M MOSALAM. « Structural health monitoring of high voltage electrical switch ceramic insulators in seismic areas ». *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2014, p. 1-8.
- [C|BRM15] Myriam BAKIR, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Damage type classification based on structures nonlinear dynamical signature ». *IFAC-PapersOnLine* 48.21 (2015), p. 652-657.

- [C|Ege+15] Kerem EGE, Maxime GALLO, Marc RÉBILLAT et Jérôme ANTONI. « A multi-sine sweep method for the characterization of weak non-linearities ; plant noise and variability estimation ». *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering. 2015.
- [C|Gal+15] Maxime GALLO, Kerem EGE, Marc REBILLAT et Jerome ANTONI. « A multi-sine sweep method for the characterization of weak non-linearities ; plant noise and variability estimation. » *NOVEM 2015 : Noise and Vibration-Emerging Technologies*. 2015.
- [C|Hma+15] Ouadie HMAD, Claude FENDZI, Nazih MECBAL et Marc REBILLAT. « Verification and validation of structural health monitoring algorithms : A maturation procedure ». *IFAC-PapersOnLine* 48.21 (2015), p. 952-957.
- [C|HMR15] Ouadie HMAD, Nazih MECBAL et Marc REBILLAT. « Peaks Over Threshold method for structural health monitoring detector design ». *10th International Workshop on Structural Health Monitoring*. 2015.
- [C|BRA16] Etienne BALMÈS, Marc REBILLAT et Elodie ARLAUD. « Wave damping and evanescence : how to combine the spatial and temporal visions of the same problem ? » *CFA/VISHNO 2016*. Société Française d'Acoustique. 2016, p. 1-7.
- [C|Ghr+16] Meriem GHRIB, Laurent BERTHE, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL, Mikhail GUSKOV et Romain ECAULT. « Laser shock a novel way to generate calibrated delamination in composites : concept and first results ». *Proceedings of the 8th European Workshop On Structural Health Monitoring*. 2016.
- [C|Bar+17] Clément BARTHÈS, Nazih MECBAL, Khalid MOSALAM et Marc RÉBILLAT. « On-board Decision Making Platform for Structural Health Monitoring ». *International Workshop on Structural Health Monitoring*. 2017.
- [C|Ghr+17b] Meriem GHRIB, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL, Laurent BERTHE et Mikhail GUSKOV. « Signal-based versus nonlinear model-based damage sensitive features for delamination quantification in CFRP composites ». *International Workshop on Structural Health Monitoring*. 2017, p. 1-10.
- [C|Ghr+17c] Meriem GHRIB, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL et Guillaume Vermot des ROCHES. « Automatic damage quantification using signal based and nonlinear model based damage sensitive features ». *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017), p. 7981-7986.
- [C|Liz+17a] Emmanuel LIZE, Marc REBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Estimation of the temperature field on a composite fan cowl using the static capacity of surface-mounted piezoceramic transducers. » *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017), p. 11689-11694.
- [C|Liz+17b] Emmanuel LIZÉ, Charles HUDIN, Nicolas GUENARD, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Combination of frequency shift and impedance-based method for robust temperature sensing using piezoceramic devices for SHM ». *Proceedings of the 8th European Workshop On Structural Health Monitoring* (2017).

- [C|Liz+17c] Emmanuel LIZÉ, Charles HUDIN, Marc REBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Numerical and experimental study of first symmetric and antisymmetric Lamb wave modes generated and received by dual-PZTs in a composite plate ». *Structural Health Monitoring 2017*. DEStech Publications, Inc. 2017.
- [C|RRC17] Vincent ROGGERONE, Marc REBILLAT et Etienne CORTEEL. « Parallel Hammerstein models identification using sine sweeps and the welch method ». *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017), p. 14040-14045.
- [C|Liz+18a] Emmanuel LIZÉ, Marc RÉBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Dual PZT sizing for mode decomposition on a composite anisotropic plate ». *Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring* (2018).
- [C|RM18a] Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Damage localization in composite plates using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signals tensor ». *IFAC-PapersOnLine* 51.24 (2018), p. 668-673.
- [C|RM18b] Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Damage localization in composite plates using canonical polyadic decomposition of Lamb wave difference signals tensor ». *10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technocal Processes (SAFEPROCESS)* (2018).
- [C|BRM19a] Nassim BENBARA, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Bending waves focusing in arbitrary shaped plate-like structures : application to spatial audio ». *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. ICA. 2019.
- [C|BRM19b] Nassim BENBARA, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Bending waves focusing in arbitrary shaped plate-like structures : application to spatial audio ». *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. ICA. 2019.
- [C|Bol+19] Christian BOLZMACHER, Nassim BENBARA, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Piezoelectric transducer for low frequency sound generation on surface loudspeakers ». *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. A. Benjeddou, N. Mechbal et JF Deü. 2019, p. 1-10.
- [C|Bri+19] William BRIAND, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nazih MECBAL. « Damage size quantification in aeronautic composite structures based on imaging results post-processing ». *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. A. Benjeddou, N. Mechbal et JF Deü. 2019, p. 1-12.
- [C|Ghr+19a] Meriem GHRIB, Nazih MECBAL, Laurent BERTHE, Mikhail GUSKOV et Marc RÉBILLAT. « LASER shock delamination generation and machine learning-based damage quantification in CFRP composites plates ». *SMART 2019 (IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Material)* (2019).
- [C|GRM19] Shuanglin GUO, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Spatial attenuation prediction of Lamb waves in composite materials ». *Proceeding of IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials* (2019).
- [C|Li+19] Xixi LI, Eric MONTEIRO, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nazih MECBAL. « Investigation of nonlinear Lamb wave/damage interaction : numerical and experimental approaches ». *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. A. Benjeddou, N. Mechbal et JF Deü. 2019, p. 1-12.

- [C|Liz+19] Emmanuel LIZE, Marc REBILLAT, Nazih MECBAL et Christian BOLZMACHER. « Spatial integration of baseline-free damage detection algorithms based on dual-PZT for the structural health monitoring of anisotropic composite aeronautic structures ». *International Workshop on Structural Health Monitoring 2019*. DESTech Publications. 2019, p. 1-8.
- [C|RM19a] Marc RÉBILLAT et Nazih MECBAL. « Dimension reduction algorithms in the damage indexes space for damage size quantification in aeronautic composite structures ». *Structural Health Monitoring*, (2019).
- [C|Sch+19] Mattias SCHEFFLER, Nazih MECBAL, Marc REBILLAT, Eric MONTEIRO et Nicolas BARABINO. « Sensorless Nonlinear Stroke Controller for an Implantable, Undulating Membrane Blood Pump ». *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE. 2019, p. 5668-5673.
- [C|Sil+19] Samuel da SILVA, Jessé PAIXAO, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Data-driven autoregressive model identification for structural health monitoring in anisotropic composite plates ». *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials* (2019).
- [C|BMR20] Damien BOUVIER, Nazih MECBAL et Marc RÉBILLAT. « Analytical modeling of vibrations in a damaged beam using Green-Volterra formalism ». *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Springer, Cham. 2020, p. 699-710.
- [C|Bri+20] William BRIAND, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nazih MECBAL. « Damage imaging post processing for delamination size assessment of CFRP aeronautic structures ». *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Springer, Cham. 2020, p. 140-148.
- [C|Li+20] Xixi LI, Eric MONTEIRO, Mikhail GUSKOV, Marc REBILLAT et Nazih MECBAL. « Experimental Evaluation of Nonlinear Wave/Damage Interaction for Delamination Detection in Laminated Composites ». *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Springer, Cham. 2020, p. 190-199.
- [C|Pos+20] Hadrien POSTORINO, Marc REBILLAT, Eric MONTEIRO et Nazih MECBAL. « Towards an industrial deployment of PZT based SHM processes : A dedicated metamodel for Lamb wave propagation ». *European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2020.
- [C|Sch+20b] Mattias SCHEFFLER, Nazih MECBAL, Eric MONTEIRO, Marc REBILLAT et Remi PRUVOST. « Implementation and Evaluation of a Sensorless, Nonlinear Stroke Controller for an Implementable, Undulating Membrane Blood Pump ». *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020), p. 8683-8688.
- [C|Kis+21] Shawn L. KISER, Mikhail GUSKOV, Nicolas RANC et Marc REBILLAT. « Harmonic balance framework for ultrasonic fatigue vibration ». *Eighth International Conference on Very High Cycle Fatigue, VHCF8*. Sapporo, Japan, juill. 2021. URL : <https://hal.science/hal-03960115>.
- [C|Bri+22] William BRIAND, Marc RÉBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nazih MECBAL. « Damage Size Quantification Using Lamb Waves by Analytical Model Identification ». *European Workshop on Structural Health Monitoring : EWSHM 2022-Volume 3*. Springer International Publishing Cham. 2022, p. 119-127.

- [C|Kis+22b] Shawn KISER, Marc REBILLAT, Mikhail GUSKOV et Nicolas RANC. « Nonstationarity of deterministic signals : when to use frequency estimation algorithms under real-time constraints ». *16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022*. Société Française d'Acoustique and Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Marseille, France, avr. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03848168>.
- [C|Kis+22c] Shawn L. KISER, Mikhail GUSKOV, Marc RÉBILLAT et Nicolas RANC. « Harmonic balance-based crack size estimation in an ultrasonic fatigue specimen ». *10th European Nonlinear Dynamics Conference, ENOC 2020*. Lyon, France, juill. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03960174>.
- [C|Li+22a] Xixi LI, Eric MONTEIRO, Mikhail GUSKOV, Marc REBILLAT et Nazih MECHEBAL. « Damage Index investigation for delamination models for Lamb wave-based Structural Health Monitoring ». *16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022*. Société Française d'Acoustique and Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Marseille, France, avr. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03848169>.
- [C|Pos+22] Hadrien POSTORINO, Eric MONTEIRO, Marc REBILLAT et Nazih MECHEBAL. « Experimental Damage Localization and Quantification with a Numerically Trained Convolutional Neural Network ». *European Workshop on Structural Health Monitoring : EWSHM 2022-Volume 3*. Springer International Publishing Cham. 2022, p. 401-407.
- [C|Reb+22] Marc REBILLAT, Marc FOURNIER, Mathieu THOMACHOT et Jocelyn REBUFA. « Conception d'un système de SHM fonctionnant en modes actif et passif ». *16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022*. Société Française d'Acoustique and Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Marseille, France, avr. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03848264>.

B.3.4 Séminaires invités

- [I|Réb11a] Marc RÉBILLAT. « Identification des propriétés d'élasticité et d'amortissement de panneaux sandwich : application à la réalité virtuelle audio-visuelle ». *Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS), École Polytechnique*. 2011.
- [I|Réb12] Marc RÉBILLAT. « De la vibration à la perception : contrôle de systèmes vibrants ». *Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM)*. 2012.
- [I|Réb15] Marc RÉBILLAT. « Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages ». *Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA), INSA Lyon*. 2015.
- [I|Réb16a] Marc RÉBILLAT. « Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages ». *Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM), ENSAM*. 2016.
- [I|Réb16b] Marc RÉBILLAT. « From nonlinear system identification to structural health monitoring ». *Vrije Universiteit Brussel (VUB), ELEC department*. 2016.
- [I|Réb18] Marc RÉBILLAT. « Contrôle santé des structures basé sur la signature dynamique non-linéaire de dommages ». *GT Identification, GDR MACS*. 2018.

- [I|Réb19] Marc RÉBILLAT. « Contrôle de la santé des structures à partir de la signature dynamique non-linéaire des dommages ». *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM)*. 2019.

B.3.5 Mémoires

- [M|Réb08] Marc RÉBILLAT. « Cohérence spatiale des informations visuelles et auditives dans un environnement de réalité virtuelle ». Mém. de mast. Master 2 ATIAM, 2008.
- [M|Réb11b] Marc RÉBILLAT. « Vibrations de plaques multi-exciteurs de grandes dimensions pour la création d'environnements virtuels audio-visuels : approches acoustique, mécanique et perceptive. » Thèse de doct. Ecole Polytechnique, 2011.

B.3.6 Mémoires encadrés

- [E|Fen15] C FENDZI. « Structural health monitoring of composite structures : application to the monitoring of aeronautical nacelles ». Thèse de doct. ENSAM, 2015.
- [E|Ghr16] Meriem GHRIB. « Contrôle santé des structures composites : génération de délaminages par choc laser et quantification par apprentissage machine ». Thèse de doct. HESAM Université, 2016.
- [E|Liz19] Emmanuel LIZÉ. « Détection d'endommagement sans état de référence et estimation de la température pour le contrôle santéintégré de structures composites par ondes guidées ». Thèse de doct. ENSAM, 2019.
- [E|Ben21] Nassim BENBARA. « Reproduction sonore 3D par surface émettrice de sons dans un véhicule ». Thèse de doct. HESAM Université, 2021.
- [E|Guo21] Shuanglin GUO. « Contribution to the study of guided waves propagation and attenuation in anisotropic composite laminates made up of viscoelastic composite materials : Application to A380 mounted nacelle parts ». Thèse de doct. HESAM Université, 2021.
- [E|Li21] Xixi LI. « Lamb waves propagation in composite structures in presence of LASER induced delamination : simulation and experiments ». Thèse de doct. HESAM Université, 2021.
- [E|Sch21] Mattias SCHEFFLER. « Modélisation multi-physique et commande optimale d'une pompe à membrane ondulante ». Thèse de doct. HESAM Université, 2021.
- [E|Bri22] William BRIAND. « Lamb waves based active sparse tomography for damage-size quantification in composite structures : data-driven and parameter inversion methods ». Thèse de doct. HESAM Université, 2022.
- [E|Pos22] Hadrien POSTORINO. « Développement de stratégies d'apprentissage et de leurs transferts pour le Contrôle de la Santé des Structures ». Thèse de doct. HESAM Université, 2022.

Bibliographie

- [R|CC81] Jacques CURIE et Pierre CURIE. « Contractions et dilatations produites par des tensions électriques dans les cristaux hémihédres à faces inclinées ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 93 (1881), p. 1137-1140.
- [R|Pea01] K. PEARSON. « LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2.11 (1901), p. 559-572.
- [R|Lam17] Horace LAMB. « On waves in an elastic plate ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character* 93.648 (1917), p. 114-128.
- [R|Tor52] W. S. TORGERSON. « Multidimensional scaling : I. Theory and method ». *Psychometrika* 17.4 (1952), p. 401-419.
- [R|Has53] Norman A HASKELL. « The dispersion of surface waves on multilayered media ». *Bulletin of the seismological Society of America* 43.1 (1953), p. 17-34.
- [R|Kno64] L KNOPOFF. « A matrix method for elastic wave problems ». *Bulletin of the Seismological Society of America* 54.1 (1964), p. 431-438.
- [R|GW66] James A. GREENWOOD et J.B. P.I. WILLIAMSON. « Contact of nominally flat surfaces ». *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences* 295.1442 (1966), p. 300-319.
- [R|Wel67] P. WELCH. « The use of FFT for the estimation of power spectra : A method based on time averaging over short, modified periodograms ». *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* 15.2 (1967), p. 70-73.
- [R|BD74] August A BALKEMA et Laurens DE HAAN. « Residual life time at great age ». *The Annals of probability* 2.5 (1974), p. 792-804.
- [R|CH74] T. CALINSKI et J. HARABASZ. « A dendrite method for cluster analysis ». *Communications in Statistics* 3.1 (1974). ISSN : 0090-3272.
- [R|BR75] S. L. BAUMGARTNER et W. J. RUGH. « Complete Identification Of A Class Of Nonlinear-Systems From Steady-State Frequency-Response ». *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 22.9 (1975), p. 753-759.
- [R|Gal75] P. G. GALLMAN. « Iterative Method For Identification Of Nonlinear-Systems Using A Uryson Model ». *IEEE Transactions on Automatic Control* 20.6 (1975), p. 771-775.
- [R|Pic75] James PICKANDS III. « Statistical inference using extreme order statistics ». *the Annals of Statistics* (1975), p. 119-131.
- [R|Pal79] G. PALM. « Representation and Approximation of Non-linear Systems. II : Discrete-time ». *Biological Cybernetics* 34.1 (1979), p. 49-52.
- [R|BTC83] S. BOYD, Y. S. TANG et L. O. CHUA. « Measuring Volterra Kernels ». *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 30.8 (1983), p. 571-577.
- [R|BC85] S. BOYD et L. O. CHUA. « Fading Memory And The Problem Of Approximating Nonlinear Operators With Volterra Series ». *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 32.11 (1985), p. 1150-1161.
- [R|LB85a] I. J. LEONTARITIS et S. A. BILLINGS. « Input Output Parametric Models For Non-linear Systems .1. Deterministic Non-linear Systems ». *International Journal of Control* 41.2 (1985), p. 303-328. DOI : 10.1080/0020718508961129.
- [R|LB85b] I. J. LEONTARITIS et S. A. BILLINGS. « Input Output Parametric Models For Non-linear Systems .2. Stochastic Non-linear Systems ». *International Journal of Control* 41.2 (1985), p. 329-344. DOI : 10.1080/0020718508961130.
- [R|Kac86] L. M. KACHANOV. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. Sous la dir. de Springer SCIENCE. 1986.
- [R|CD87] Edward CRAWLEY et Javier DE LUIS. « Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures ». *AIAA journal* 25.10 (1987), p. 1373-1385.

- [R|HW87] Jonathan RM HOSKING et James R WALLIS. « Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution ». *Technometrics* 29.3 (1987), p. 339-349.
- [R|JJ87] Kenneth Langstreth JOHNSON et Kenneth Langstreth JOHNSON. *Contact mechanics*. Cambridge university press, 1987.
- [R|Rou87] P. J. ROUSSEEUW. « Silhouettes : A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis ». *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20 (1987). ISSN : 0377-0427.
- [R|CB89] S. CHEN et S. A. BILLINGS. « Representations of Non-linear Systems - the Narmax Model ». *International Journal of Control* 49.3 (1989), p. 1013-1032.
- [R|HSW89] Kurt HORNIK, Maxwell STINCHCOMBE et Halbert WHITE. « Multilayer feedforward networks are universal approximators ». *Neural Networks* 2.5 (1989).
- [R|AC92] David N ALLEYNE et Peter CAWLEY. « Optimization of Lamb wave inspection techniques ». *Ndt & E International* 25.1 (1992), p. 11-22.
- [R|Che95] H. W. CHEN. « Modeling and Identification of Parallel Nonlinear-systems - Structural Classification and Parameter-estimation Methods ». *Proceedings of the IEEE* 83.1 (jan. 1995), p. 39-66.
- [R|Nay95] Adnan H NAYFEH. *Wave propagation in layered anisotropic media : With application to composites*. Elsevier, 1995.
- [R|SN95] AM SUTIN et VE NAZAROV. « Nonlinear acoustic methods of crack diagnostics ». *Radiophysics and quantum electronics* 38.3 (1995), p. 109-120.
- [R|HJ96] Nils Lid HJORT et M Chris JONES. « Locally parametric nonparametric density estimation ». *The Annals of Statistics* (1996), p. 1619-1647.
- [R|SK96] Yuri M SHKEL et Daniel J KLINGENBERG. « Material parameters for electrostriction ». *Journal of Applied Physics* 80.8 (1996), p. 4566-4572.
- [R|SSG96] WB SPILLMAN JR, JS SIRKIS et PT GARDINER. « Smart materials and structures : what are they? » *Smart materials and structures* 5.3 (1996), p. 247.
- [R|NS97] Veniamin E NAZAROV et Alexander M SUTIN. « Nonlinear elastic constants of solids with cracks ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 102.6 (1997), p. 3349-3354.
- [R|RT97] Holger ROOTZÉN et Nader TAJVIDI. « Extreme value statistics and wind storm losses : a case study ». *Scandinavian Actuarial Journal* 1997.1 (1997), p. 70-94.
- [R|Sal97] O.S. SALAWU. « Detection of structural damage through changes in frequency : a review ». *Engineering Structures* 19.9 (1997), p. 718-723.
- [R|Sax97] Henrik SAXÉN. « On the equivalence between ARMA models and simple recurrent neural networks ». *Applications of Computer Aided Time Series Modeling*. Springer, 1997, p. 281-289.
- [R|VN97] C. VEMULA et A. N. NORRIS. « Flexural wave propagation and scattering on thin plates using Mindlin theory ». *Wave motion* 26.1 (1997), p. 1-12.
- [R|Dub98] Jean-Claude DUBOIS. *Propriétés diélectriques des polymères*. Ed. Techniques Ingénieur, 1998.
- [R|SK98] Yuri M SHKEL et Daniel J KLINGENBERG. « Electrostriction of polarizable materials : Comparison of models with experimental data ». *Journal of Applied Physics* 83.12 (1998), p. 7834-7843.
- [R|CCW99] Wenwu CAO, Harley H CUDNEY et Rainer WASER. « Smart materials and structures ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96.15 (1999), p. 8330-8331.
- [R|Has99] M. HASLER. *Phénomènes non linéaires, Chapitre 3 : Séries de Volterra*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.
- [R|MH99] J. C. P. MCKEON et M. K. HINDERS. « Lamb wave scattering from a through hole ». *Journal of Sound and Vibration* 224.5 (1999), p. 843-862.
- [R|Pea99] R. K. PEARSON. *Discrete-Time Dynamic Models*. Oxford University Press, 1999.
- [R|Akh00] Georges AKHRAS. « Smart materials and smart systems for the future ». *Canadian Military Journal* 1.3 (2000), p. 25-31.
- [R|Fos+00] E FOSNESS, J GUERRERO, Ken QASSIM et SJ DENOYER. « Recent advances in multi-functional structures ». *2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8484)*. T. 4. IEEE. 2000, p. 23-28.
- [R|Bar01] Yoseph BAR-COHEN. « EAP history, current status, and infrastructure ». *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles* (2001), p. 3-44.
- [R|Col+01] Stuart COLES, Joanna BAWA, Lesley TRENNER et Pat DORAZIO. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. T. 208. Springer, 2001.
- [R|FBA01] A. FARINA, A. BELLINI et E. ARMELLONI. « Non-linear convolution : a new approach for the auralization of distorting systems ». *110th Convention of the Audio Engineering Society Paper* 5359 (2001).

- [R|LB01] Michel LEMISTRE et Daniel BALAGEAS. « Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multiresolution processing ». *Smart materials and structures* 10.3 (2001), p. 504.
- [R|PL01] B PAVLAKOVIC et M LOWE. « DISPERSE : User's Manual version 2.0. 11, Imperial College, University of London ». *Non-Destructive Testing Laboratory* 3 (2001).
- [R|VM01] V. V. VASILIEV et E. V. MOROZOV. *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier, 2001.
- [R|WR01] Luck WANG et SI ROKHLIN. « Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media ». *Ultrasonics* 39.6 (2001), p. 413-424.
- [R|WH01] X. D. WANG et G. L. HUANG. « Wave propagation in electromechanical structures : induced by surface-bonded piezoelectric actuators ». *Journal of intelligent material systems and structures* 12.2 (2001), p. 105-115.
- [R|WLC01] P WILCOX, M LOWE et P CAWLEY. « The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves ». *NDT & E International* 34.1 (2001), p. 1-9.
- [R|AF02a] D. E. ADAMS et C. R. FARRAR. « Application of frequency domain ARX features for linear and non-linear structural damage identification ». *Smart Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems* 4702 (2002), p. 134-147.
- [R|AF02b] Douglas E. ADAMS et Charles R. FARRAR. « Classifying Linear and Nonlinear Structural Damage Using Frequency Domain ARX Models ». *Structural Health Monitoring - An International Journal* 1.2 (oct. 2002), p. 185-201.
- [R|BCS02] G. BICKEN, G. F. CAREY et R. O. STEARMAN. « Frequency domain Kernel estimation for 2nd-order Volterra models using random multi-tone excitation ». *VLSI Design* 15.4 (2002), p. 701-713.
- [R|Di1+02] O. DILIGENT, T. GRAHN, A. BOSTRÖM, P. CAWLEY et M. J. S. LOWE. « The low-frequency reflection and scattering of the S0 Lamb mode from a circular through-thickness hole in a plate : Finite Element, analytical and experimental studies ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 112.6 (2002), p. 2589-2601.
- [R|Di102] David DILLARD. « Fundamentals of stress transfer in bonded ». *Adhesion Science and Engineering : Surfaces, Chemistry and Applications* (2002), p. 1.
- [R|FC02] AB FLATAU et KP CHONG. « Dynamic smart material and structural systems ». *Engineering Structures* 24.3 (2002), p. 261-270.
- [R|FP02] M. I. FRISWELL et J. E. T. PENNY. « Crack Modeling for Structural Health Monitoring ». *Structural Health Monitoring* 1.2 (2002), p. 139-148.
- [R|GZ02] Victor GIURGIUTIU et Andrei N ZAGRAI. « Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification ». *J. Vib. Acoust.* 124.1 (2002), p. 116-125.
- [R|JA02] Timothy J JOHNSON et Douglas E ADAMS. « Transmissibility as a differential indicator of structural damage ». *Journal of Vibration and Acoustics* 124.4 (2002), p. 634-641.
- [R|NL02] Kenneth M NEWBURY et Donald J LEO. « Electromechanical modeling and characterization of ionic polymer benders ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 13.1 (2002), p. 51-60.
- [R|RW02] SI ROKHLIN et L WANG. « Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media : Stiffness matrix method ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 112.3 (2002), p. 822-834.
- [R|CH03] Michel CASTAINGS et Bernard HOSTEN. « Guided waves propagating in sandwich structures made of anisotropic, viscoelastic, composite materials ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 113.5 (2003), p. 2622-2634.
- [R|Gra03] Tomas GRAHN. « Lamb wave scattering from a circular partly through-thickness hole in a plate ». *Wave motion* 37.1 (2003), p. 63-80.
- [R|HR03] G. E. HINTON et S. T. ROWEIS. « Stochastic neighbor embedding ». *Advances in neural information processing systems*. 2003, p. 857-864.
- [R|MWA03] G. MANSON, K. WORDEN et D. ALLMAN. « Experimental validation of a structural health monitoring methodology : Part II. Novelty detection on a GNAT aircraft ». *Journal of Sound and Vibration* 259.2 (2003), p. 345-363.
- [R|Nea03] G NEAU. « Lamb waves in anisotropic viscoelastic plates. Study of the wave fronts and attenuation ». Thèse de doct. L'Université de Bordeaux, 2003.
- [R|Pak03] T PAKULA. « Dielectric and Mechanical Spectroscopy—a Comparison ». *Broadband dielectric spectroscopy* (2003), p. 597-623.
- [R|SF03] Yuri M SHKEL et Nicola J FERRIER. « Electrostriction enhancement of solid-state capacitance sensing ». *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 8.3 (2003), p. 318-325.
- [R|Soh+03a] Hoon SOHN, Charles R FARRAR, Francois M HEMEZ, Devin D SHUNK, Daniel W STINEMATES, Brett R NADLER et Jerry J CZARNECKI. « A review of structural health monitoring literature : 1996–2001 ». *Los Alamos National Laboratory, USA* 1 (2003).

- [R|Soh+03b] Hoon SOHN, Gyuhae PARK, Jeannette R. WAIT, Nathan P. LIMBACK et Charles R. FARRAR. « Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures ». *Smart Materials and Structures* 13.1 (2003), p. 153.
- [R|Wil03] Paul D WILCOX. « A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals ». *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 50.4 (2003), p. 419-427.
- [R|PK04] R. J. PRAZENICA et A. J. KURDILA. « Volterra Kernel identification using triangular wavelets ». *Journal of Vibration and Control* 10.4 (2004), p. 597-622.
- [R|Tew04] Vinod K TEWARY. « Green's-function method for modeling surface acoustic wave dispersion in anisotropic material systems and determination of material parameters ». *Wave Motion* 40.4 (2004), p. 399-412.
- [R|TQW04] PS TUA, ST QUEK et Q WANG. « Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves ». *Smart Materials and Structures* 13.4 (2004), p. 643.
- [R|Voi+04] A. VOISHVILLO, A. TEREKHOV, E. CZERWINSKI et S. ALEXANDROV. « Graphing, interpretation, and comparison of results of loudspeaker nonlinear distortion measurements ». *Journal of the Audio Engineering Society* 52.4 (2004), p. 332-357.
- [R|WRC04] Chun H WANG, James T ROSE et Fu-Kuo CHANG. « A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring ». *Smart materials and structures* 13.2 (2004), p. 415.
- [R|05] 693-2005 - *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*. IEEE. 2005.
- [R|DL05] O. DILIGENT et M. J. S. LOWE. « Reflection of the S_0 Lamb mode from a flat bottom circular hole ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 118.5 (2005), p. 2869-2879.
- [R|Fox+05] Matthew R. FOX, Carl R. SCHULTHEISZ, James R. REEDER et Brian J. JENSEN. « Materials examination of the vertical stabilizer from American Airlines Flight 587 ». *Materials Science and Technology 2005 Conference and Exhibition (MS&T'05)*. 2005.
- [R|Giu05] Victor GIURGIUTIU. « Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring ». *Journal of intelligent material systems and structures* 16.4 (2005), p. 291-305.
- [R|KE05] A. H. KAYRAN et E. M. EKSHIOGLU. « Nonlinear system identification using deterministic multilevel sequences ». *Circuits Systems and Signal Processing* 24.2 (2005), p. 151-181.
- [R|LPS05] Ho Young LEE, Yiyang PENG et Yuri M SHKEL. « Strain-dielectric response of dielectrics as foundation for electrostriction stresses ». *Journal of Applied Physics* 98.7 (2005), p. 074104.
- [R|LM05] Yinghui LU et Jennifer E MICHAELS. « A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations ». *Ultrasonics* 43.9 (2005), p. 717-731.
- [R|MM05] Jennifer E. MICHAELS et Thomas E. MICHAELS. « Detection of structural damage from the local temporal coherence of diffuse ultrasonic signals ». *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 52.10 (2005), p. 1769-1782.
- [R|RC05] Ajay RAGHAVAN et Carlos ES CESNIK. « Finite-dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring ». *Smart materials and structures* 14.6 (2005), p. 1448.
- [R|Soh+05] Hoon SOHN, David W ALLEN, Keith WORDEN et Charles R FARRAR. « Structural damage classification using extreme value statistics ». *J. Dyn. Sys., Meas., Control* 127.1 (2005), p. 125-132.
- [R|SY05] Zhongqing SU et Lin YE. « Lamb Wave Propagation-Based Damage Identification for Quasi-Isotropic CF/EP Composite Laminates Using Artificial Neural Algorithm : Part II - Implementation and Validation ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16.2 (2005), p. 113-125.
- [R|WC05] Chun H WANG et Fu-Kuo CHANG. « Scattering of plate waves by a cylindrical inhomogeneity ». *Journal of Sound and Vibration* 282.1-2 (2005), p. 429-451.
- [R|Wor+05] Keith WORDEN, Graeme MANSON, Hoon SOHN et Charles R FARRAR. « Extreme value statistics from differential evaluation for damage detection ». *Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference*. Modal Analysis. 2005.
- [R|AB06] J. S. ABEL et D. P. BERNERS. « A technique for nonlinear system measurement. » *121th Convention of the Audio Engineering Society Paper 6951* (2006).
- [R|Ach06] Jan D ACHENBACH. « Reciprocity and related topics in elastodynamics » (2006).
- [R|Bar+06] Ivan BARTOLI, Alessandro MARZANI, Francesco Lanza DI SCALEA et Erasmo VIOLA. « Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section ». *Journal of sound and vibration* 295.3-5 (2006), p. 685-707.
- [R|Ben+06] Matthew D BENNETT, Donald J LEO, Garth L WILKES, Frederick L BEYER et Todd W PECHAR. « A model of charge transport and electromechanical transduction in ionic liquid-swollen Nafion membranes ». *Polymer* 47.19 (2006), p. 6782-6796.

- [R|BC06] James L BLACKSHIRE et Adam T COONEY. « Characterization of bonded piezoelectric sensor performance and durability in simulated aircraft environments ». *AIP Conference Proceedings*. T. 820. 1. American Institute of Physics. 2006, p. 1694-1701.
- [R|Byk+06] M BYKOWSKI, A HUDGINS, RM DEACON et AR MARDER. « Failure analysis of the space shuttle Columbia RCC leading edge ». *Journal of Failure Analysis and Prevention* 6.1 (2006), p. 39-45.
- [R|HG06] S HURLEBAUS et L GAUL. « Smart structure dynamics ». *Mechanical systems and signal processing* 20.2 (2006), p. 255-281.
- [R|Kan06] Leonid V KANTOROVICH. « On the translocation of masses ». *Journal of mathematical sciences* 133.4 (2006), p. 1381-1382.
- [R|Ker+06] Gaetan KERSCHEN, Keith WORDEN, Alexander F VAKAKIS et Jean-Claude GOLINVAL. « Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics ». *Mechanical systems and signal processing* 20.3 (2006), p. 505-592.
- [R|KDW06] George KONSTANTINIDIS, Bruce W. DRINKWATER et Paul D. WILCOX. « The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems ». *Smart Materials and Structures* 15.4 (2006), p. 967.
- [R|Par+06a] Gyuhae PARK, Charles R FARRAR, Amanda C RUTHERFORD et Amy N ROBERTSON. « Piezoelectric active sensor self-diagnostics using electrical admittance measurements » (2006).
- [R|Par+06b] Gyuhae PARK, Charles R FARRAR, Francesco Lanza di SCALEA et Stefano COCCIA. « Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensors in structural health monitoring ». *Smart Materials and Structures* 15.6 (2006), p. 1673.
- [R|PS06] Hyun Woo PARK et Hoon SOHN. « Parameter estimation of the generalized extreme value distribution for structural health monitoring ». *Probabilistic engineering mechanics* 21.4 (2006), p. 366-376.
- [R|Sch06] John W SCHULTZ. « Dielectric spectroscopy in analysis of polymers ». *Encyclopedia of Analytical Chemistry : Applications, Theory and Instrumentation* (2006).
- [R|SYL06] Zhongqing SU, Lin YE et Ye LU. « Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures : A review ». *Journal of sound and vibration* 295.3-5 (2006), p. 753-780.
- [R|CH07] Mircea CALOMFIRESCU et Axel HERRMANN. « On the propagation of Lamb Waves in viscoelastic composites for SHM applications ». *Key Engineering Materials*. T. 347. Trans Tech Publ. 2007, p. 543-548.
- [R|DF07] Laurens DE HAAN et Ana FERREIRA. *Extreme value theory : an introduction*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [R|Far+07] C. R. FARRAR, K. WORDEN, M. D. TODD, G. PARK, J. NICHOLS, D. E. ADAMS, M. T. BEMENT et M. T. FARINHOLT. *Nonlinear system identification for damage detection*. Rapp. tech. Los Alamos National Laboratory, 2007.
- [R|GSM07] Michael E GADRINGER, Daniel SILVEIRA et Gottfried MAGERL. « Efficient power amplifier identification using modified parallel cascade Hammerstein models ». *2007 IEEE Radio and Wireless Symposium*. IEEE. 2007, p. 305-308.
- [R|HA07] M. HAROON et D. E. ADAMS. « Time and frequency domain nonlinear system characterization for mechanical fault identification ». *Nonlinear Dynamics* 50.3 (nov. 2007), p. 387-408.
- [R|Kim+07] Young-Han KIM, Dae-Hyun KIM, Jung-Ho HAN et Chun-Gon KIM. « Damage assessment in layered composites using spectral analysis and Lamb wave ». *Composites Part B : Engineering* 38.7-8 (2007), p. 800-809.
- [R|LMB07] Francesco LANZA DI SCALEA, Howard MATT et Ivan BARTOLI. « The response of rectangular piezoelectric sensors to Rayleigh and Lamb ultrasonic waves ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 121.1 (2007), p. 175-187.
- [R|MM07a] Jennifer E MICHAELS et Thomas E MICHAELS. « Damage localization in inhomogeneous plates using a sparse array of ultrasonic transducers ». *AIP Conference Proceedings*. T. 894. 1. AIP. 2007, p. 846-853.
- [R|MM07b] Jennifer E MICHAELS et Thomas E MICHAELS. « Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates ». *Wave motion* 44.6 (2007), p. 482-492.
- [R|RC07] Ajay RAGHAVAN et Carlos CESNIK. « Modeling of guided-wave excitation by finite-dimensional piezoelectric transducers in composite plates ». *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2007, p. 1725.
- [R|WY07a] Lei WANG et FG YUAN. « Active damage localization technique based on energy propagation of Lamb waves ». *Smart Structures and Systems* 3.2 (2007), p. 201-217.
- [R|WY07b] Lei WANG et FG YUAN. « Group velocity and characteristic wave curves of Lamb waves in composites : Modeling and experiments ». *Composites science and technology* 67.7-8 (2007), p. 1370-1384.
- [R|WY07c] Lei WANG et FG YUAN. « Lamb wave propagation in composite laminates using a higher-order plate theory ». *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2007*. T. 6531. International Society for Optics et Photonics. 2007, p. 65310I.

- [R|WFG07] A. S. WHITTAKER, G. L. FENVES et A. S. J. GILANI. « Seismic evaluation and analysis of high-voltage substation disconnect switches ». *Engineering Structures* 29.12 (2007), p. 3538-3549.
- [R|Wor+07] Keith WORDEN, Charles R. FARRAR, Graeme MANSON et Gyuhae PARK. « The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring ». *Proceedings : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 463.2082 (2007), p. 1639-1664. ISSN : 13645021. (Visité le 01/06/2022).
- [R|Zha+07] Xiaoliang ZHAO, Huidong GAO, Guangfan ZHANG, Bulent AYHAN, Fei YAN, Chiman KWAN et Joseph L ROSE. « Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network : I. Defect detection, localization and growth monitoring ». *Smart materials and structures* 16.4 (2007), p. 1208.
- [R|And+08] Jennifer ANDREWS, Anthony PALAZOTTO, Martin DESIMIO et Steven OLSON. « Lamb wave propagation in varying isothermal environments ». *Structural Health Monitoring* 7.3 (2008), p. 265-270.
- [R|BB08] Siegfried BAUER et F BAUER. « Piezoelectric polymers and their applications ». *Piezoelectricity : evolution and future of a technology* 114 (2008), p. 157-177.
- [R|CRV08] F. B. CEGLA, A. ROHDE et M. VEIDT. « Analytical prediction and experimental measurement for mode conversion and scattering of plate waves at non-symmetric circular blind holes in isotropic plates ». *Wave Motion* 45.3 (2008), p. 162-177.
- [R|KS08] Seung Bum KIM et Hoon SOHN. « Instantaneous crack detection using dual PZT transducers ». *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008*. T. 6935. SPIE. 2008, p. 70-81.
- [R|LP08] ZQ LANG et ZK PENG. « A novel approach for nonlinearity detection in vibrating systems ». *Journal of Sound and Vibration* 314.3-5 (2008), p. 603-615.
- [R|MH08] L. van der MAATEN et G. HINTON. « Visualizing data using t-SNE ». *Journal of machine learning research* 9.Nov (2008), p. 2579-2605.
- [R|MM08] Brian R MACE et Elisabetta MANCONI. « Modelling wave propagation in two-dimensional structures using finite element analysis ». *Journal of Sound and Vibration* 318.4-5 (2008), p. 884-902.
- [R|MPZ08] Michele MEO, Umberto POLIMENO et Giuseppe ZUMPANO. « Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods ». *Applied composite materials* 15.3 (2008), p. 115-126.
- [R|OOM08] Ailish O'HALLORAN, Fergal O'MALLEY et Peter MCHUGH. « A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges ». *Journal of Applied Physics* 104.7 (2008), p. 9.
- [R|RC08] Ajay RAGHAVAN et Carlos E. S. CESNIK. « Effects of elevated temperature on guided-wave structural health monitoring ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 19.12 (2008), p. 1383-1398.
- [R|Wor+08] K. WORDEN, C. R. FARRAR, J. HAYWOOD et M. TODD. « A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring ». *Structural Control & Health Monitoring* 15.4 (juin 2008), p. 540-567.
- [R|YG08] Lingyu YU et Victor GIURGIUTIU. « In situ 2-D piezoelectric wafer active sensors arrays for guided wave damage detection ». *Ultrasonics* 48.2 (2008), p. 117-134.
- [R|AIP09] Steven R ANTON, Daniel J INMAN et Gyuhae PARK. « Reference-free damage detection using instantaneous baseline measurements ». *AIAA journal* 47.8 (2009), p. 1952-1964.
- [R|Bor+09] L. BORNN, C. R. FARRAR, G. PARK et K. FARINHOLT. « Structural Health Monitoring With Autoregressive Support Vector Machines ». *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the Asme* 131.2 (avr. 2009), p. 021004.
- [R|Cha+09] D. CHAKRABORTY, N. KOVVALI, J. WEI, A. PAPANDEOU-SUPPAPPOLA, D. COCHRAN et A. CHATTOPADHYAY. « Damage Classification Structural Health Monitoring in Bolted Structures Using Time-frequency Techniques ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20.11 (2009), p. 1289-1305.
- [R|Jal09] Nader JALILI. *Piezoelectric-based vibration control : from macro to micro/nano scale systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [R|Jha09] Kyung-Young JHANG. « Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material : a review ». *International journal of precision engineering and manufacturing* 10.1 (2009), p. 123-135.
- [R|KB09] Tamara G KOLDA et Brett W BADER. « Tensor decompositions and applications ». *SIAM review* 51.3 (2009), p. 455-500.
- [R|LQY09] Han-Xiong LI, Chenkun QI et Yongguang YU. « A spatio-temporal Volterra modeling approach for a class of distributed industrial processes ». *Journal of Process Control* 19.7 (2009), p. 1126-1142.
- [R|NV09] Ching-Tai NG et M VEIDT. « A Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates ». *Smart materials and structures* 18.7 (2009), p. 074006.
- [R|NT09] Jonathan M NICHOLS et Michael D TODD. « Nonlinear features for SHM applications ». *Encyclopedia of structural health monitoring* (2009).

- [R|Ove+09] Timothy G OVERLY, Gyuhae PARK, Kevin M FARINHOLT et Charles R FARRAR. « Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data ». *IEEE Sensors Journal* 9.11 (2009), p. 1414-1421.
- [R|Par+09] Seunghee PARK, Gyuhae PARK, Chung-Bang YUN et Charles R FARRAR. « Sensor self-diagnosis using a modified impedance model for active sensing-based structural health monitoring ». *Structural Health Monitoring* 8.1 (2009), p. 71-82.
- [R|SY09] Zhongqing SU et Lin YE. *Identification of damage using Lamb waves : from fundamentals to applications*. T. 48. Springer Science & Business Media, 2009.
- [R|Sug+09] Takehiro SUGIMOTO, Kazuho ONO, Akio ANDO, Kohichi KUROZUMI, Akira HARA, Yuichi MORITA et Akito MIURA. « PVDF-driven flexible and transparent loudspeaker ». *Applied Acoustics* 70.8 (2009), p. 1021-1028.
- [R|Vil09] Cédric VILLANI. *Optimal transport : old and new*. T. 338. Springer, 2009.
- [R|Wal+09] Thomas WALLMERSPERGER, Antonia HORSTMANN, Bernd KROPLIN et Donald J LEO. « Thermodynamical modeling of the electromechanical behavior of ionic polymer metal composites ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20.6 (2009), p. 741-750.
- [R|Zho+09] W. F. ZHOU, N. KOVVALI, W. REYNOLDS, A. PAPANDREOU-SUPPAPPOLA, A. CHATTOPADHYAY et D. COCHRAN. « On the Use of Hidden Markov Modeling and Time-frequency Features for Damage Classification in Composite Structures ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20.11 (2009), p. 1271-1288.
- [R|BFP10] L. BORNN, C. R. FARRAR et G. PARK. « Damage detection in initially nonlinear systems ». *International Journal of Engineering Science* 48.10 (oct. 2010), p. 909-920.
- [R|CSC10] T. CLARKE, F. SIMONETTI et P. CAWLEY. « Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems : Influence of temperature changes on performance ». *Journal of Sound and Vibration* 329.12 (2010), p. 2306-2322.
- [R|DCS10] S. DAS, A. CHATTOPADHYAY et A. N. SRIVASTAVA. « Classifying Induced Damage in Composite Plates Using One-Class Support Vector Machines ». *Aiaa Journal* 48.4 (2010), p. 705-718.
- [R|FW10] Charles R FARRAR et Keith WORDEN. « An introduction to structural health monitoring ». *New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring* (2010), p. 1-17.
- [R|Gir+10] G. GIRIDHARA, V. T. RATHOD, S. NAIK, D. ROY MAHAPATRA et S. GOPALAKRISHNAN. « Rapid Localization of Damage Using a Circular Sensor Array and Lamb Wave Based Triangulation ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 24.8 (nov. 2010), p. 2929-2946.
- [R|Glu+10] E. V. GLUSHKOV, N. V. GLUSHKOVA, O. V. KVASHA et R. LAMMERING. « Selective Lamb mode excitation by piezoelectric coaxial ring actuators ». *Smart Materials and Structures* 19.3 (2010), p. 035018.
- [R|GI10] Benjamin L GRISSO et Daniel J INMAN. « Temperature corrected sensor diagnostics for impedance-based SHM ». *Journal of Sound and Vibration* 329.12 (2010), p. 2323-2336.
- [R|Hu+10] N. HU, Y. LIU, Y. LI, X. PENG et B. YAN. « Optimal excitation frequency of Lamb waves for delamination detection in CFRP laminates ». *Journal of composite materials* 44.13 (2010), p. 1643-1663.
- [R|HSW10] Guoliang HUANG, Fei SONG et Xiaodong WANG. « Quantitative modeling of coupled piezo-elastodynamic behavior of piezoelectric actuators bonded to an elastic medium for structural health monitoring : a review ». *Sensors* 10.4 (2010), p. 3681-3702.
- [R|KH10] William KAAL et Sven HEROLD. « Electroactive polymer actuators in dynamic applications ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 16.1 (2010), p. 24-32.
- [R|LO10] O. R. de LAUTOUR et P. OMENZETTER. « Damage classification and estimation in experimental structures using time series analysis and pattern recognition ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 24.5 (2010), p. 1556-1569.
- [R|MM10] Elisabetta MANCONI et Brian R MACE. « Estimation of the loss factor of viscoelastic laminated panels from finite element analysis ». *Journal of Sound and Vibration* 329.19 (2010), p. 3928-3939.
- [R|Mol+10] J MOLL, RT SCHULTE, B HARTMANN, CP FRITZEN et O NELLES. « Multi-site damage localization in anisotropic plate-like structures using an active guided wave structural health monitoring system ». *Smart materials and structures* 19.4 (2010), p. 045022.
- [R|Nov+10] A. NOVAK, L. SIMON, F. KADLEC et P. LOTTON. « Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal ». *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement* 59.8 (2010), p. 2220-2229.
- [R|PY10] Sinno Jialin PAN et Qiang YANG. « A survey on transfer learning ». *IEEE Transactions on knowledge and data engineering* 22.10 (2010), p. 1345-1359.
- [R|PTD10] C. PARK, J. TANG et Y. DING. « Aggressive data reduction for damage detection in structural health monitoring ». *Structural Health Monitoring* 9.1 (2010), p. 59-74.

- [R|Qua+10] N. QUAEGBEUR, P. MICHEAU, P. MASSON et A. MASLOUHI. « Structural health monitoring strategy for detection of interlaminar delamination in composite plates ». *Smart materials and structures* 19.8 (2010).
- [R|Sch+10] M. SCHOUKENS, Y. ROLAIN, R. PINTELOU et J. SCHOUKENS. « Semi-parametric identification of parallel Hammerstein systems ». *UKACC International Conference on Control 2010*. Sept. 2010, p. 1-6. DOI : 10.1049/ic.2010.0407.
- [R|Vep10] Ranjan VEPA. *Dynamics of smart structures*. John Wiley & Sons, 2010.
- [R|DA11] A DEMMA et DN ALLEYNE. « Guided waves : standardization and certification ». *6th International Conference on Certification and Standardization NDT, Valencia, Spain*. T. 138. 2011.
- [R|Gan+11] R. GANGADHARAN, C. R. L. MURTHY, S. GOPALAKRISHNAN et M. R. BHAT. « Time Reversal Health Monitoring of Composite Plates using Lamb waves. » *International Journal of Aerospace Innovations* 3.3 (2011).
- [R|Hal+11] James S HALL, Peter MCKEON, L SATYANARAYAN, Jennifer E MICHAELS, Nico F DECLERCQ et Yves H BERTHELOT. « Minimum variance guided wave imaging in a quasi-isotropic composite plate ». *Smart Materials and Structures* 20.2 (2011), p. 025013.
- [R|JLB11] Hyunjo JEONG, Jung-Sik LEE et Sung-Min BAE. « Defect detection and localization in plates using a lamb wave time reversal technique ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12.3 (2011), p. 427-434.
- [R|Kar+11] Alexander KARMAZIN, Evgenia KIRILLOVA, Wolfgang SEEMANN et Pavel SYROMYATNIKOV. « Investigation of Lamb elastic waves in anisotropic multilayered composites applying the Green's matrix ». *Ultrasonics* 51.1 (2011), p. 17-28.
- [R|Lan+11] Zi-Qiang LANG, Gyuhae PARK, Charles R FARRAR, Michael D TODD, Zhu MAO, L ZHAO et Keith WORDEN. « Transmissibility of non-linear output frequency response functions with application in detection and location of damage in MDOF structural systems ». *International Journal of Non-Linear Mechanics* 46.6 (2011), p. 841-853.
- [R|Lee+11] Sang Jun LEE, Navneet GANDHI, Jennifer E. MICHAELS et Thomas E. MICHAELS. « Comparison of the effects of applied loads and temperature variations on guided wave propagation ». *AIP Conference Proceedings*. T. 1335. 1. American Institute of Physics. 2011, p. 175-182.
- [R|Mor+11] L. MOREAU, M. CALEAP, A. VELICHKO et P. D. WILCOX. « Scattering of guided waves by through-thickness cavities with irregular shapes ». *Wave Motion* 48.7 (2011), p. 586-602. ISSN : 0165-2125.
- [R|Nis+11] Gou NISHIDA, Kentaro TAKAGI, Bernhard MASCHKE et Takaaki OSADA. « Multi-scale distributed parameter modeling of ionic polymer-metal composite soft actuator ». *Control Engineering Practice* 19.4 (2011), p. 321-334.
- [R|PGO11] Robert M PASQUARELLI, David S GINLEY et Ryan O'HAYRE. « Solution processing of transparent conductors : from flask to film ». *Chemical Society Reviews* 40.11 (2011), p. 5406-5441.
- [R|Qua+11a] N QUAEGBEUR, P MASSON, D LANGLOIS-DEMERS et P MICHEAU. « Dispersion-based imaging for structural health monitoring using sparse and compact arrays ». *Smart Materials and Structures* 20.2 (2011), p. 025005.
- [R|Qua+11b] Nicolas QUAEGBEUR, Philippe MICHEAU, Patrice MASSON et Hugo BELANGER. « Structural health monitoring of bonded composite joints using piezoceramics ». *Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace, number November* 10 (2011).
- [R|Ram+11] C RAMADAS, Krishnan BALASUBRAMANIAM, Avinash HOOD, Makarand JOSHI et CV KRISHNAMURTHY. « Modelling of attenuation of Lamb waves using Rayleigh damping : Numerical and experimental studies ». *Composite Structures* 93.8 (2011), p. 2020-2025.
- [R|Sax+11] Abhinav SAXENA, Kai GOEBEL, Cecilia C. LARROSA et Fu-Kuo CHANG. *CFRP Composites Data Set*. 2011.
- [R|SPR11] M. SCHOUKENS, R. PINTELOU et Y. ROLAIN. « Parametric Identification of Parallel Hammerstein Systems ». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60.12 (2011), p. 3931-3938.
- [R|Sor+11] Ștefan SOROHAN, Nicolae CONSTANTIN, Mircea GĂVAN et Viorel ANGHEL. « Extraction of dispersion curves for waves propagating in free complex waveguides by standard finite element codes ». *Ultrasonics* 51.4 (2011), p. 503-515.
- [R|TLI11] L TAUPIN, A LHÉMERY et G INQUIÉTÉ. « A detailed study of guided wave propagation in a viscoelastic multilayered anisotropic plate ». *Journal of Physics : Conference Series*. T. 269. 1. IOP Publishing. 2011, p. 012002.
- [R|TG11] R TIWARI et E GARCIA. « The state of understanding of ionic polymer metal composite architecture : a review ». *Smart Materials and Structures* 20.8 (2011), p. 083001.
- [R|TF11] Miguel A TORRES-ARREDONDO et C-P FRITZEN. « A viscoelastic plate theory for the fast modelling of Lamb wave solutions in NDT/SHM applications ». *Ultrasonics "Ultrasound"* 66.2 (2011), p. 7-13.

- [R|YSI11a] Chul Min YEUM, Hoon SOHN et Jeong Beom IHN. « Delamination detection in a composite plate using a dual piezoelectric transducer network ». *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2011*. T. 7984. SPIE. 2011, p. 37-49.
- [R|YSI11b] Chul Min YEUM, Hoon SOHN et Jeong Beom IHN. « Lamb wave mode decomposition using concentric ring and circular piezoelectric transducers ». *Wave motion* 48.4 (2011), p. 358-370.
- [R|ZY11] Hai-Yan ZHANG et Jian-Bo YU. « Piezoelectric transducer parameter selection for exciting a single mode from multiple modes of Lamb waves ». *Chinese Physics B* 20.9 (2011), p. 094301.
- [R|ZSC11] Chao ZHOU, Zhongqing SU et Li CHENG. « Probability-based diagnostic imaging using hybrid features extracted from ultrasonic Lamb wave signals ». *Smart materials and structures* 20.12 (2011), p. 125005.
- [R|Akc12] H. AKCAY. « Estimation of cross-power and auto-power spectral densities in frequency domain by subspace methods ». *51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2012, p. 3445-3450.
- [R|DHS12] Richard O DUDA, Peter E HART et David G STORK. *Pattern Classification. 605 Third Avenue*. 2012.
- [R|Gum12] EJ GUMBEL. *Statistics of Extremes, Courier Corporation*. 2012.
- [R|HM12] Joel B. HARLEY et José M. F. MOURA. « Scale transform signal processing for optimal ultrasonic temperature compensation ». *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 59.10 (2012), p. 2226-2236.
- [R|Hma+12] Ouadir HMAD, Pierre BEAUSEROY, Édith GRALL-MAES, Agnes MATHEVET et Jean Remi MASSE. « A comparison of distribution estimators used to determine a degradation decision threshold for very low first order error ». *Advances in Safety, Reliability and Risk Manag* (2012).
- [R|IKW12] Satoru IMAIZUMI, Hisashi KOKUBO et Masayoshi WATANABE. « Polymer actuators using ion-gel electrolytes prepared by self-assembly of ABA-triblock copolymers ». *Macromolecules* 45.1 (2012), p. 401-409.
- [R|Liu+12] Y. LIU, M. Y. FARD, A. CHATTOPADHYAY et D. DOYLE. « Damage Assessment of CFRP Composites Using a Time-Frequency Approach ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 23.4 (2012).
- [R|MN12] Nazih MECHEBAL et Euripedes NOBREGA. « Damage tolerant active control : Concept and state of art ». *IFAC Proceedings Volumes* 45.20 (2012), p. 63-71.
- [R|Mor+12] L. MOREAU, M. CALEAP, A. VELICHKO et P. D. WILCOX. « Scattering of guided waves by flat-bottomed cavities with irregular shapes ». *Wave Motion* 49.2 (2012), p. 375-387.
- [R|OG12] Kanji ONO et Antolino GALLEGRO. « Attenuation of Lamb Waves in CFRP Plates. » *Journal of Acoustic emission* 30 (2012).
- [R|Pra+12] Miguel A PRADA, Janne TOIVOLA, Jyrki KULLAA et Jaakko HOLLMÉN. « Three-way analysis of structural health monitoring data ». *Neurocomputing* 80 (2012), p. 119-128.
- [R|Yeu+12] Chul Min YEUM, Hoon SOHN, Jeong Beom IHN et Hyung Jin LIM. « Instantaneous delamination detection in a composite plate using a dual piezoelectric transducer network ». *Composite Structures* 94.12 (2012), p. 3490-3499.
- [R|YS12] L. YU et Z. SU. « Application of Kernel Density Estimation in Lamb Wave-Based Damage Detection ». *Mathematical Problems in Engineering* 2012 (2012).
- [R|CS13] Inderjit CHOPRA et Jayant SIROHI. *Smart structures theory*. T. 35. Cambridge University Press, 2013.
- [R|Da 13] Gustavo DA AMARAL DE ANDRADE SOPHIA. *Diélectriques à haute permittivité - Effets des nanostructures et microstructures*. Ed. Techniques Ingénieur, 2013.
- [R|Hma+13] Ouadie HMAD, E GRALL-MAËS, P BEAUSEROY, JR MASSE et Agnès MATHEVET. « Maturation of detection functions by performances benchmark. Application to a PHM algorithm ». *Prognostics and System Health Management Conference*. T. 33. 2013.
- [R|Jo+13] Choonghee JO, David PUGAL, Il-Kwon OH, Kwang J KIM et Kinji ASAKA. « Recent advances in ionic polymer-metal composite actuators and their modeling and applications ». *Progress in Polymer Science* 38.7 (2013), p. 1037-1066.
- [R|Kep+13] Christoph KEPLINGER, Jeong-Yun SUN, Choon Chiang FOO, Philipp ROTHEMUND, George M WHITESIDES et Zhigang SUO. « Stretchable, transparent, ionic conductors ». *Science* 341.6149 (2013), p. 984-987.
- [R|Kij+13] P. KIJANKA, R. RADECKI, P. PACKO, W. J. STASZEWSKI et T. UHL. « GPU-based local interaction simulation approach for simplified temperature effect modelling in Lamb wave propagation used for damage detection ». *Smart materials and structures* 22.3 (2013), p. 035014.
- [R|LM13] Ross M LEVINE et Jennifer E MICHAELS. « Model-based imaging of damage with Lamb waves via sparse reconstruction ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 133.3 (2013), p. 1525-1534.
- [R|Li+13] Bing LI, Yongquan LIU, Kezhuang GONG et Zheng LI. « Damage localization in composite laminates based on a quantitative expression of anisotropic wavefront ». *Smart Materials and Structures* 22.6 (2013), p. 065005.

- [R|MS13] Elisabetta MANCONI et Sergey SOROKIN. « On the effect of damping on dispersion curves in plates ». *International Journal of Solids and Structures* 50.11-12 (2013), p. 1966-1973.
- [R|Pen+13] Tishun PENG, Abhinav SAXENA, Kai GOEBEL, Yibing XIANG, Shankar SANKARARAMAN et Yongming LIU. « A Novel Bayesian Imaging Method for Probabilistic Delamination Detection of Composite Materials ». *Smart Materials and Structures* 22.12 (2013), p. 125019.
- [R|SLD13] Sidney Bruce SHIKI, Vicente LOPES et Samuel DA SILVA. « Damage detection in nonlinear structures using discrete-time Volterra series ». *Key Engineering Materials*. T. 569. Trans Tech Publ. 2013, p. 876-883.
- [R|Sta13] SAE STANDARD. « Guidelines for Implementation of Structural Health Monitoring on Fixed Wing Aircraft ARP6461 ». *Society of Automotive Engineers : Warrendale, PA, USA* (2013).
- [R|Tay+13] Stuart G TAYLOR, Gyuhæ PARK, Kevin M FARINHOLT et Michael D TODD. « Diagnostics for piezoelectric transducers under cyclic loads deployed for structural health monitoring applications ». *Smart Materials and Structures* 22.2 (2013), p. 025024.
- [R|TMR13] D. A. TIBADUIZA, L. E. MUJICA et J. RODELLAR. « Damage classification in structural health monitoring using principal component analysis and self-organizing maps ». *Structural Control and Health Monitoring* 20.10 (2013), p. 1303-1316.
- [R|Tib+13] D. A. TIBADUIZA, M. A. TORRES-ARREDONDO, L. E. MUJICA, J. RODELLAR et C. P. FRITZEN. « A study of two unsupervised data driven statistical methodologies for detecting and classifying damages in structural health monitoring ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 41.1-2 (2013), p. 467-484.
- [R|Yan13] Gang YAN. « A Bayesian approach for damage localization in plate-like structures using Lamb waves ». *Smart Materials and Structures* 22.3 (2013), p. 035012.
- [R|Zhu+13] Zicai ZHU, Kinji ASAKA, Longfei CHANG, Kentaro TAKAGI et Hualing CHEN. « Multiphysics of ionic polymer–metal composite actuator ». *Journal of Applied Physics* 114.8 (2013), p. 084902.
- [R|Bro+14] Dariusz BRODA, WJ STASZEWSKI, A MARTOWICZ, T UHL et VV SILBERSCHMIDT. « Modelling of nonlinear crack–wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review ». *Journal of Sound and Vibration* 333.4 (2014), p. 1097-1118.
- [R|Cap+14] L CAPINERI, A BULLETTI, M CALZOLAI, P GIANNELLI et D FRANCESCONI. « Arrays of conformable ultrasonic Lamb wave transducers for structural health monitoring with real-time electronics ». *Procedia Engineering* 87 (2014), p. 1266-1269.
- [R|KG14] Ayman KAMAL et Victor GIURGIUTIU. « Stiffness Transfer Matrix Method (STMM) for stable dispersion curves solution in anisotropic composites ». *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2014*. T. 9064. International Society for Optics et Photonics. 2014, p. 906410.
- [R|LM14] Ross LEVINE et Jennifer E MICHAELS. « Block-sparse reconstruction and imaging for lamb wave structural health monitoring ». *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 61.6 (2014), p. 1006-1015.
- [R|LZ14] Zhen Li et Yunfeng ZHANG. « Extreme value theory-based structural health prognosis method using reduced sensor data ». *Structure and Infrastructure Engineering* 10.8 (2014), p. 988-997.
- [R|MOS14] Ameneh MAGHSOODI, Abdolreza OHADI et Mojtaba SADIGHI. « Calculation of wave dispersion curves in multilayered composite-metal plates ». *Shock and Vibration* 2014 (2014).
- [R|MH14] C. A. MILLER et M. K. HINDERS. « Multiclass feature selection using computational homology for Lamb wave-based damage characterization ». *Journal of intelligent material systems and structures* 25.12 (2014), p. 1511-1527.
- [R|NA14] Doan Ngoc Chi NAM et Kyoung Kwan AHN. « Modeling and control of a self-sensing polymer metal composite actuator ». *Smart materials and structures* 23.2 (2014), p. 025025.
- [R|Ost+14] Pierre-Claude OSTIGUY, Alain LE DUFF, Nicolas QUAEGEBEUR, Louis-Philippe BRAULT et Patrice MASSON. « In situ characterization technique to increase robustness of imaging approaches in structural health monitoring using guided waves ». *Structural Health Monitoring* 13.5 (2014), p. 525-536.
- [R|Pan+14] S PANT, Jeremy LALIBERTE, Marcias MARTINEZ et B ROCHA. « Derivation and experimental validation of Lamb wave equations for an n-layered anisotropic composite laminate ». *Composite Structures* 111 (2014), p. 566-579.
- [R|Pil+14] Gianluigi PILLONETTO, Francesco DINUZZO, Tianshi CHEN, Giuseppe De NICOLAO et Lennart LJUNG. « Kernel methods in system identification, machine learning and function estimation : A survey ». *Automatica* 50.3 (2014), p. 657-682.
- [R|QOM14] N QUAEGEBEUR, PC OSTIGUY et P MASSON. « Correlation-based imaging technique for fatigue monitoring of riveted lap-joint structure ». *Smart Materials and Structures* 23.5 (2014), p. 055007.
- [R|Roy+14] Surajit ROY, Kuldeep LONKAR, Vishnuvardhan JANAPATI et Fu-Kuo CHANG. « A novel physics-based temperature compensation model for structural health monitoring using ultrasonic guided waves ». *Structural Health Monitoring* 13.3 (2014), p. 321-342.

- [R|RH14] David ROZE et Thomas HÉLIE. « Introducing a Green–Volterra series formalism to solve weakly nonlinear boundary problems : Application to Kirchhoff’s string ». *Journal of Sound and Vibration* 333.7 (2014), p. 2073-2086.
- [R|SA14] Z SHARIF-KHODAEI et MH ALIABADI. « Assessment of delay-and-sum algorithms for damage detection in aluminium and composite plates ». *Smart materials and structures* 23.7 (2014), p. 075007.
- [R|SC14] Mark STEWART et Markys G CAIN. « Direct piezoelectric measurement : The berlincourt method ». *Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films* (2014), p. 37-64.
- [R|Tor+14] M. A. TORRES-ARREDONDO, D. A. TIBADUIZA, L. E. MUJICA, J. RODELLAR et C. P. FRITZEN. « Data-driven multivariate algorithms for damage detection and identification : evaluation and comparison ». *Structural Health Monitoring* 13.1 (2014), p. 19-32.
- [R|Van14] L. VAN DER MAATEN. « Accelerating t-SNE using tree-based algorithms ». *The Journal of Machine Learning Research* 15.1 (2014), p. 3221-3245.
- [R|VJ14] O. Arda VANLI et Sungmoon JUNG. « Statistical updating of finite element model with Lamb wave sensing data for damage detection problems ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 42.1-2 (2014).
- [R|Wan+14] Yishou WANG, Limin GAO, Shenfang YUAN, Lei QIU et Xinlin QING. « An adaptive filter–based temperature compensation technique for structural health monitoring ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 25.17 (2014), p. 2187-2198. DOI : 10.1177/1045389X13519001. eprint : <https://doi.org/10.1177/1045389X13519001>. URL : <https://doi.org/10.1177/1045389X13519001>.
- [R|ZJQ14] Jinling ZHAO, Hongli JI et Jinhao QIU. « Modeling of Lamb waves in composites using new third-order plate theories ». *Smart materials and structures* 23.4 (2014), p. 045017.
- [R|Che+15] CM CHENG, ZK PENG, XJ DONG, WM ZHANG et Guang MENG. « A novel damage detection approach by using Volterra kernel functions based analysis ». *Journal of the Franklin Institute* 352.8 (2015), p. 3098-3112.
- [R|CL15] Vamshi Krishna CHILLARA et Cliff J LISSENDEN. « Review of nonlinear ultrasonic guided wave nondestructive evaluation : theory, numerics, and experiments ». *Optical Engineering* 55.1 (2015), p. 011002.
- [R|Gan+15] F GANET, M-Q LE, JF CAPSAL, Jean-François GÉRARD, Sébastien PRUVOST, J DUCHET, Sébastien LIVI, Patrick LERMUSIAUX, A MILLON et P-J COTTINET. « Haptic feedback using an all-organic electroactive polymer composite ». *Sensors and Actuators B : Chemical* 220 (2015), p. 1120-1130.
- [R|GMR15] F. GHARIBNEZHAD, L. E. MUJICA et J. RODELLAR. « Applying robust variant of principal component analysis as a damage detector in the presence of outliers ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 50 (2015), p. 467-479.
- [R|Giu15] Victor GIURGIUTIU. « Structural health monitoring of aerospace composites » (2015).
- [R|GG15] Matthieu GRESIL et Victor GIURGIUTIU. « Prediction of attenuated guided waves propagation in carbon fiber composites using Rayleigh damping model ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 26.16 (2015), p. 2151-2169.
- [R|HT15] Colin HAYNES et Michael TODD. « Enhanced damage localization for complex structures through statistical modeling and sensor fusion ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 54 (2015), p. 195-209.
- [R|Kru+15] Karl KRUSAMÄE, Andres PUNNING, Alvo AABLOO et Kinji ASAKA. « Self-sensing ionic polymer actuators : a review ». *Actuators*. T. 4. 1. MDPI. 2015, p. 17-38.
- [R|MAI15] MAIB. *MAIB Report number 08/2015 - Cheeki Rafiki - Very Serious Marine Casualty*. Rapp. tech. 2015.
- [R|NLS15] Antonin NOVAK, Pierrick LOTTON et Laurent SIMON. « Synchronized Swept-Sine : Theory, Application, and Implementation ». *J. Audio Eng. Soc* 63.10 (2015).
- [R|Pie15] SAS PIEZOTECH. « Piezoelectric Films Technical Information ». *Technical Manual*. Available online : <http://www.piezotech.fr/>(accessed on 20 March 2016) (2015).
- [R|Qui+15] F Hernando QUINTANILLA, Z FAN, MJS LOWE et RV CRASTER. « Guided waves’ dispersion curves in anisotropic viscoelastic single-and multi-layered media ». *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471.2183 (2015), p. 20150268.
- [R|RBH15] R.S. RISULEO, G. BOTTEGAL et H. HJALMARSSON. « A new kernel-based approach for overparameterized Hammerstein system identification ». *54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2015.
- [R|Sch+15a] Georg C SCHMIDT, Daniel HÖFT, Katherina HAASE, Maxi BELLMANN, Bahman KHERADMAND-BOROJENI, Tomi HASSINEN, Henrik SANDBERG, Frank ELLINGER et Arved C HÜBLER. « Fully printed flexible audio system on the basis of low-voltage polymeric organic field effect transistors with three layer dielectric ». *Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics* 53.20 (2015), p. 1409-1415.
- [R|Sch+15b] Christine M SCHUBERT KABBAN, Brandon M GREENWELL, Martin P DESIMIO et Mark M DERRISO. « The probability of detection for structural health monitoring systems : Repeated measures data ». *Structural Health Monitoring* 14.3 (2015), p. 252-264.

- [R|Sre+15] P SREEKUMAR, C RAMADAS, Anoop ANAND et Makarand JOSHI. « Attenuation of Ao Lamb mode in hybrid structural composites with nanofillers ». *Composite Structures* 132 (2015), p. 198-204.
- [R|Sto+15] Pavla STOKLASOVÁ, Petr SEDLÁK, Hanuš SEINER et Michal LANDA. « Forward and inverse problems for surface acoustic waves in anisotropic media : A Ritz-Rayleigh method based approach ». *Ultrasonics* 56 (2015), p. 381-389.
- [R|TT15] D. A. TIBADUIZA-BURGOS et M. A. TORRES-ARREDONDO. « Investigation of an expert health monitoring system for aeronautical structures based on pattern recognition and acousto-ultrasonics ». *Smart Materials and Structures* 24.8 (2015), p. 085020.
- [R|Tre+15] A TREVISO, B VAN GENECHTEN, D MUNDO et M TOURNOUR. « Damping in composite materials : Properties and models ». *Composites Part B : Engineering* 78 (2015), p. 144-152.
- [R|Wil+15] Christian WILLBERG, Sascha DUCZEK, Juan Miguel VIVAR-PEREZ et Z.A. Bin AHMAD. « Simulation methods for guided wave-based structural health monitoring : a review ». *Applied Mechanics Reviews* 67.1 (2015).
- [R|Zhe+15] Rencheng ZHENG, Kimihiko NAKANO, Rui OHASHI, Yoji OKABE, Mamoru SHIMAZAKI, Hiroki NAKAMURA et Qi WU. « PARAFAC Decomposition for Ultrasonic Wave Sensing of Fiber Bragg Grating Sensors : Procedure and Evaluation ». *Sensors* 15.7 (2015), p. 16388-16411.
- [R|Bud+16] Marc BUDINGER, Valrie POMMIER-BUDINGER, Gael NAPIAS et Arthur COSTA DA SILVA. « Ultrasonic ice protection systems : analytical and numerical models for architecture tradeoff ». *Journal of Aircraft* 53.3 (2016), p. 680-690.
- [R|Bul+16] Andrea BULLETTI, Pietro GIANNELLI, Marco CALZOLAI et Lorenzo CAPINERI. « An integrated acousto/ultrasonic structural health monitoring system for composite pressure vessels ». *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 63.6 (2016), p. 864-873.
- [R|Che+16] Prasad CHEEMA, Nguyen Lu Dang KHOA, Mehrisadat MAKKI ALAMDARI, Wei LIU, Yang WANG, Fang CHEN et Peter RUNCIE. « On Structural Health Monitoring Using Tensor Analysis and Support Vector Machine with Artificial Negative Data ». *Proceedings of the 25th ACM International on Conference on Information and Knowledge Management*. ACM. 2016, p. 1813-1822.
- [R|DAG16] Souhail DAHMEN, Morched Ben AMOR et Mohamed Hédi Ben GHOZLEN. « Investigation of the coupled Lamb waves propagation in viscoelastic and anisotropic multilayer composites by Legendre polynomial method ». *Composite Structures* 153 (2016), p. 557-568.
- [R|EDS16] A EBRAHIMKHANLOU, B DUBUC et S SALAMONE. « Damage localization in metallic plate structures using edge-reflected lamb waves ». *Smart Materials and Structures* 25.8 (2016), p. 085035.
- [R|FG16] Hadi FANAEE-T et João GAMA. « Tensor-based anomaly detection : An interdisciplinary survey ». *Knowledge-Based Systems* 98 (2016), p. 130-147.
- [R|JSS16] Vicente Lopes JUNIOR, V STEFFEN JR et Marcelo Amorim SAVI. « Dynamics of smart systems and structures ». *Springer International Publishing, Switzerland* (2016), p. 1-342.
- [R|Kat+16] Ilias KATSOURAS, Kamal ASADI, Mengyuan LI, Tim B VAN DRIEL, Kasper S KJAER, Dong ZHAO, Thomas LENZ, Yun GU, Paul WM BLOM, Dragan DAMJANOVIC et al. « The negative piezoelectric effect of the ferroelectric polymer poly (vinylidene fluoride) ». *Nature materials* 15.1 (2016), p. 78-84.
- [R|Khe+16] Bahman KHERADMAND-BOROJENI, Georg Cornelius SCHMIDT, Daniel HÖFT, Maxi BELLMANN, Katharina HAASE, Koichi ISHIDA, Reza SHABANPOUR, Tilo MEISTER, Corrado CARTA, Pol GHESQUIERE et al. « A fully-printed self-biased polymeric audio amplifier for driving fully-printed piezoelectric loudspeakers ». *IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers* 63.6 (2016), p. 785-794.
- [R|Kim+16] Onnuri KIM, Hoon KIM, U Hyeok CHOI et Moon Jeong PARK. « One-volt-driven superfast polymer actuators based on single-ion conductors ». *Nature communications* 7.1 (2016), p. 13576.
- [R|MG16] Mira MITRA et S GOPALAKRISHNAN. « Guided wave based structural health monitoring : A review ». *Smart Materials and Structures* 25.5 (2016), p. 053001.
- [R|PWS16] S. PAVLOPOULOU, K. WORDEN et C. SOUTIS. « Novelty detection and dimension reduction via guided ultrasonic waves : Damage monitoring of scarf repairs in composite laminates ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 27.4 (2016), p. 549-566.
- [R|Pez+16] N. PEZZOTTI, B. P. F. LELIEVELDT, L. van der MAATEN, T. HÖLLT, E. EISEMANN et A. VILANOVA. « Approximated and user steerable t-SNE for progressive visual analytics ». *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 23.7 (2016), p. 1739-1752.
- [R|PG16a] Banibrata PODDAR et Victor GIURGIUTIU. « Complex modes expansion with vector projection using power flow to simulate Lamb waves scattering from horizontal cracks and disbonds ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 140.3 (2016), p. 2123-2133.
- [R|PG16b] Banibrata PODDAR et Victor GIURGIUTIU. « Scattering of Lamb waves from a discontinuity : An improved analytical approach ». *Wave Motion* 65 (2016), p. 79-91.

- [R|Poz+16] F. POZO, I. ARRUGA, L. E. MUJICA, M. RUIZ et E. PODIVILOVA. « Detection of structural changes through principal component analysis and multivariate statistical inference ». *Structural Health Monitoring* 15.2 (2016), p. 127-142.
- [R|QLC16] F Hernando QUINTANILLA, MJS LOWE et RV CRASTER. « Full 3D dispersion curve solutions for guided waves in generally anisotropic media ». *Journal of Sound and Vibration* 363 (2016), p. 545-559.
- [R|SAM16] KK SAIRAJAN, GS AGLIETTI et KM MANI. « A review of multifunctional structure technology for aerospace applications ». *Acta astronautica* 120 (2016), p. 30-42.
- [R|TKA16] M THIENE, Z Sharif KHODAEI et MH ALIABADI. « Optimal sensor placement for maximum area coverage (MAC) for damage localization in composite structures ». *Smart materials and structures* 25.9 (2016), p. 095037.
- [R|Ver+16] N. VERVLiet, O. DEBALS, L. SORBER, M. VAN BAREL et L. DE LATHAUWER. *Tensorlab 3.0*. Available online. 2016. URL : <https://www.tensorlab.net>.
- [R|WKW16] Karl WEISS, Taghi M KHOSHGOFTAAR et DingDing WANG. « A survey of transfer learning ». *Journal of Big data* 3.1 (2016), p. 1-40.
- [R|Yan+16] J. YANG, J. HE, X. GUAN, D. WANG, H. CHEN, W. ZHANG et Y. LIU. « A Probabilistic Crack Size Quantification Method Using In-Situ Lamb Wave Test and Bayesian Updating ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 78 (2016), p. 118-133.
- [R|Yel+16] Nitesh P YELVE, Mira MITRA, PM MUJUMDAR et C RAMADAS. « A hybrid method based upon nonlinear Lamb wave response for locating a delamination in composite laminates ». *Ultrasonics* 70 (2016), p. 12-17.
- [R|Yua16] Fuh-Gwo YUAN. *Structural health monitoring (SHM) in aerospace structures*. Woodhead Publishing, 2016.
- [R|Zha+16] Zhenghong ZHAO, Changgeng SHUAI, Yan GAO, Emiliano RUSTIGHI et Yuan XUAN. « An application review of dielectric electroactive polymer actuators in acoustics and vibration control ». *Journal of Physics : Conference Series*. T. 744. 1. IOP Publishing. 2016, p. 012162.
- [R|AOA17] Saad AHMED, Zoubeida OUNAIES et Erika Ann F ARROJADO. « Electric field-induced bending and folding of polymer sheets ». *Sensors and Actuators A : Physical* 260 (2017), p. 68-80.
- [R|BG17] Darun BARAZANCHY et Victor GIURGIUTIU. « A comparative convergence and accuracy study of composite guided-ultrasonic wave solution methods : Comparing the unified analytic method, SAFE method and DISPERSE ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 231.16 (2017), p. 2961-2973.
- [R|Ber+17] Francois BERNARD, Leticia GIMENO, Bernard VIALA, Boris GUSAROV et Orphee CUGAT. « Direct piezoelectric coefficient measurements of PVDF and PLLA under controlled strain and stress ». *Proceedings*. T. 1. 4. MDPI. 2017, p. 335.
- [R|BSS17] Pezhman Taghipour BIRGANI, Sina SODAGAR et Mohammad SHISHESAZ. « Generation of low-attenuation Lamb wave modes in three-layer adhesive joints ». *International Journal of Acoustics and Vibrations* 22 (2017), p. 51-57.
- [R|Bol+17] Christian BOLLER, D Roy MAHAPATRA, Ramanan SRIDARAN VENKAT, Nitin Balajee RAVI, Nibir CHAKRABORTY, Rakesh SHIVAMURTHY et Keerthy M SIMON. « Integration of Non-Destructive Evaluation-based Ultrasonic Simulation : A means for simulation in structural health monitoring ». *Structural Health Monitoring* 16.5 (2017), p. 611-629.
- [R|Che+17] CM CHENG, ZK PENG, WM ZHANG et Guang MENG. « Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications : A state-of-the-art review ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 87 (2017), p. 340-364.
- [R|Gol+17] Andrew GOLATO, Fauzia AHMAD, Sridhar SANTHANAM et Moeness G AMIN. « Multipath exploitation for enhanced defect imaging using Lamb waves ». *NDT & E International* 92 (2017), p. 1-9.
- [R|Hei+17] Christoph HEINZE, Sascha DUCZEK, Michael SINAPIUS et Peter WIERACH. « A minimal model-based approach for the fast approximation of wave propagation in complex structures ». *Structural Health Monitoring* 16.5 (2017), p. 568-582.
- [R|Hon+17] Ming HONG, Zhu MAO, Michael D TODD et Zhongqing SU. « Uncertainty quantification for acoustic nonlinearity parameter in Lamb wave-based prediction of barely visible impact damage in composites ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 82 (2017), p. 448-460.
- [R|HZL17] Liping HUANG, Liang ZENG et Jing LIN. « Baseline-free damage detection in composite plates based on the reciprocity principle ». *Smart materials and Structures* 27.1 (2017), p. 015026.
- [R|Kar+17] Anuj KARPATNE, Gowtham ATLURI, James H FAGHMOUS, Michael STEINBACH, Arindam BANERJEE, Auroop GANGULY, Shashi SHEKHAR, Nagiza SAMATOVA et Vipin KUMAR. « Theory-guided data science : A new paradigm for scientific discovery from data ». *IEEE Transactions on knowledge and data engineering* 29.10 (2017), p. 2318-2331.

- [R|Lam+17] Rolf LAMMERING, Ulrich GABBERT, Michael SINAPIUS, Thomas SCHUSTER et Peter WIERACH. *Lamb-wave based structural health monitoring in polymer composites*. Springer, 2017.
- [R|MSS17] A. MARCONATO, M. SCHOUKENS et J. SCHOUKENS. « Filter-based regularisation for impulse response modelling ». *IET Control Theory & Applications* 11.2 (jan. 2017), p. 194-204. ISSN : 1751-8644.
- [R|NK17] Jean-Philippe NOËL et Gaëtan KERSCHEN. « Nonlinear system identification in structural dynamics : 10 more years of progress ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 83 (2017), p. 2-35.
- [R|OQM17] Pierre-Claude OSTIGUY, Nicolas QUAEGEBEUR et Patrice MASSON. « Comparison of model-based damage imaging techniques for transversely isotropic composites ». *Structural Health Monitoring* 16.4 (2017), p. 428-443.
- [R|Pon+17] Pauline PONCET, Fabrice CASSET, Antoine LATOUR, Fabrice DOMINGUES DOS SANTOS, Sébastien PAWLAK, Romain GWOZIECKI, Arnaud DEVOS, Patrick EMERY et Stéphane FANGET. « Static and dynamic studies of electro-active polymer actuators and integration in a demonstrator ». *Actuators*. T. 6. 2. MDPI. 2017, p. 18.
- [R|SST17] Sidney B SHIKI, Samuel da SILVA et Michael D TODD. « On the application of discrete-time Volterra series for the damage detection problem in initially nonlinear systems ». *Structural Health Monitoring* 16.1 (2017), p. 62-78.
- [R|Sid+17] Nicholas D SIDIROPOULOS, Lieven DE LATHAUWER, Xiao FU, Kejun HUANG, Evangelos E PAPALEXAKIS et Christos FALOUTSOS. « Tensor decomposition for signal processing and machine learning ». *IEEE Transactions on Signal Processing* 65.13 (2017), p. 3551-3582.
- [R|SNW17] Reza SOLEIMANPOUR, Ching-Tai NG et Chun H WANG. « Higher harmonic generation of guided waves at delaminations in laminated composite beams ». *Structural Health Monitoring* 16.4 (2017), p. 400-417.
- [R|SD17a] Assunta SORRENTINO et Angelo DE FENZA. « Damage Detection in Complex Composite Material Structures by Using Elliptical Triangulation Method ». *The 11th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Structural Health Monitoring 2017. Stanford, USA : DEStech Publications, Inc., sept. 2017.
- [R|SD17b] Assunta SORRENTINO et Angelo DE FENZA. « Improved Elliptical Triangulation Method for Damage Detection in Composite Material Structures ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 231.16 (août 2017), p. 3011-3023.
- [R|Sou+17] Thibaut SOULESTIN, Vincent LADMIRAL, Fabrice Domingues DOS SANTOS et Bruno AMEDURI. « Vinylidene fluoride-and trifluoroethylene-containing fluorinated electroactive copolymers. How does chemistry impact properties? ». *Progress in Polymer Science* 72 (2017), p. 16-60.
- [R|Tha+17] A. THARWAT, T. GABER, A. IBRAHIM et A. E. HASSANIEN. « Linear discriminant analysis : A detailed tutorial ». *AI communications* 30.2 (2017), p. 169-190.
- [R|YMM17] Nitesh P YELVE, Mira MITRA et PM MUJUMDAR. « Detection of delamination in composite laminates using Lamb wave based nonlinear method ». *Composite Structures* 159 (2017), p. 257-266.
- [R|YYS17] Renchun YOU, Yuan YAO et Jia SHI. « Tensor-based ultrasonic data analysis for defect detection in fiber reinforced polymer (FRP) composites ». *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 163 (2017), p. 24-30.
- [R|Caw18] Peter CAWLEY. « Structural health monitoring : Closing the gap between research and industrial deployment ». *Structural Health Monitoring* 17.5 (2018), p. 1225-1244.
- [R|Dam+18] Bharath Bhushan DAMODARAN, Benjamin KELLENBERGER, Rémi FLAMARY, Devis TUIA et Nicolas COURTY. « Deepjdot : Deep joint distribution optimal transport for unsupervised domain adaptation ». *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2018, p. 447-463.
- [R|EGB18] Vincentius EWALD, Roger M GROVES et Rinze BENEDICTUS. « Transducer placement option of lamb wave SHM system for hotspot damage monitoring ». *Aerospace* 5.2 (2018), p. 39.
- [R|HS18] Armin MA HUBER et Markus GR SAUSE. « Classification of solutions for guided waves in anisotropic composites with large numbers of layers ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 144.6 (2018), p. 3236-3251.
- [R|MHM18] L. MCINNES, J. HEALY et J. MELVILLE. « UMAP : Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction ». *arXiv preprint arXiv :1802.03426* (2018).
- [R|Mor+18] Jérémy MORIOT, Nicolas QUAEGEBEUR, Alain LE DUFF et Patrice MASSON. « A model-based approach for statistical assessment of detection and localization performance of guided wave-based imaging techniques ». *Structural Health Monitoring* 17.6 (2018), p. 1460-1472.
- [R|PR18] J PRAWIN et A Rama Mohan RAO. « Nonlinear structural damage detection based on adaptive Volterra filter model ». *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 18.02 (2018), p. 1871003.
- [R|Pru18] Mickaël PRUVOST. « Formulation of electrostrictive materials for vibrational energy recovery and development of high sensitivity stress sensors ». Thèse de doct. Université Paris sciences et lettres, 2018.

- [R|Sch+18] Christine SCHUBERT KABBAN, Richard UBER, Kevin LIN, Bin LIN, Md Yeasin BHUIYAN et Victor GIURGIUTIU. « Uncertainty evaluation in the design of structural health monitoring systems for damage detection ». *Aerospace* 5.2 (2018), p. 45.
- [R|Tar+18] Hussein TARHINI, Rafic ITANI, Mohammad Ali FAKIH et Samir MUSTAPHA. « Optimization of piezoelectric wafer placement for structural health-monitoring applications ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 29.19 (2018), p. 3758-3773.
- [R|Yan+18] Yi YANG, Ching-Tai NG, Andrei KOTOUSOV, Hoon SOHN et Hyung Jin LIM. « Second harmonic generation at fatigue cracks by low-frequency Lamb waves : Experimental and numerical studies ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 99 (2018), p. 760-773.
- [R|Zhu+18] Feng ZHU, Bin WANG, Zhenghua QIAN et Ernian PAN. « Accurate characterization of 3D dispersion curves and mode shapes of waves propagating in generally anisotropic viscoelastic/elastic plates ». *International Journal of Solids and Structures* 150 (2018), p. 52-65.
- [R|Bak+19] Nathan BAKER, Frank ALEXANDER, Timo BREMER, Aric HAGBERG, Yannis KEVREKIDIS, Habib NAJM, Manish PARASHAR, Abani PATRA, James SETHIAN, Stefan WILD et al. *Workshop report on basic research needs for scientific machine learning : Core technologies for artificial intelligence*. Rapp. tech. USDOE Office of Science (SC), Washington, DC (United States), 2019.
- [R|Bal19] E. BALMES. *Structural Dynamics Toolbox and FEMLink - Technical Documentation*. Rapp. tech. SD-Tools, 2019.
- [R|BA19] Yoseph BAR-COHEM et Iain A ANDERSON. « Electroactive polymer (EAP) actuators—background review ». *Mechanics of Soft Materials* 1.1 (2019), p. 5.
- [R|Die+19] Christoph P DIENEL, Hendrik MEYER, Malte WERWER et Christian WILLBERG. « Estimation of airframe weight reduction by integration of piezoelectric and guided wave-based structural health monitoring ». *Structural Health Monitoring* 18.5-6 (2019), p. 1778-1788.
- [R|EHT19] M. ESPADOTO, N. S. T. HIRATA et A. C. TELEA. « Deep learning multidimensional projections ». *arXiv preprint arXiv :1902.07958* (2019).
- [R|EGB19] Vincentius EWALD, Roger M GROVES et Rinze BENEDICTUS. « DeepSHM : A deep learning approach for structural health monitoring based on guided Lamb wave technique ». *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2019*. T. 10970. SPIE. 2019, p. 84-99.
- [R|GRD19] Emil GARNELL, Corinne ROUBY et Olivier DOARÉ. « Dynamics and sound radiation of a dielectric elastomer membrane ». *Journal of Sound and Vibration* 459 (2019), p. 114836.
- [R|Hug+19] Tyler W HUGHES, Ian AD WILLIAMSON, Momchil MINKOV et Shanhui FAN. « Wave physics as an analog recurrent neural network ». *Science advances* 5.12 (2019), eaay6946.
- [R|Kul19] Andrii KULAKOVSKYI. « Development of a SHM System by Elastic Guided Waves Applied to Aeronautic Structures ». PhD Thesis. France : Université Paris-Saclay, mai 2019.
- [R|MB19] Deba Datta MANDAL et Sauvik BANERJEE. « Identification of breathing type disbonds in stiffened panels using non-linear lamb waves and built-in circular PWT array ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 117 (2019), p. 33-51.
- [R|Mar+19] Pierre MARGERIT, Arthur LEBÉE, Jean-François CARON, Kerem EGE et Xavier BOUTILLON. « The high-resolution wavevector analysis for the characterization of the dynamic response of composite plates ». *Journal of Sound and Vibration* 458 (2019), p. 177-196.
- [R|MG19] Hanfei MEI et Victor GIURGIUTIU. « Guided wave excitation and propagation in damped composite plates ». *Structural Health Monitoring* 18.3 (2019), p. 690-714.
- [R|MBG19] Asaad MIGOT, Yeasin BHUIYAN et Victor GIURGIUTIU. « Numerical and Experimental Investigation of Damage Severity Estimation Using Lamb Wave-Based Imaging Methods ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 30.4 (mars 2019), p. 618-635. ISSN : 1045-389X, 1530-8138.
- [R|Mol+19] Jochen MOLL, Jens KATHOL, Claus-Peter FRITZEN, Maria MOIX-BONET, Marcel RENNOCH, Michael KOERDT, Axel S HERRMANN, Markus GR SAUSE et Martin BACH. « Open guided waves : online platform for ultrasonic guided wave measurements ». *Structural Health Monitoring* 18.5-6 (2019), p. 1903-1914.
- [R|NDS19] Anvesh R NANDYALA, Ashish K DARPE et Satinder P SINGH. « Effective stiffness matrix method for predicting the dispersion curves in general anisotropic composites ». *Archive of Applied Mechanics* 89.9 (2019), p. 1923-1938.
- [R|OGB19] Pedro OCHÔA, Roger M GROVES et Rinze BENEDICTUS. « Systematic multiparameter design methodology for an ultrasonic health monitoring system for full-scale composite aircraft primary structures ». *Structural Control and Health Monitoring* 26.5 (2019), e2340.
- [R|OSM19] Wieslaw OSTACHOWICZ, Rohan SOMAN et Pawel MALINOWSKI. « Optimization of sensor placement for structural health monitoring : A review ». *Structural Health Monitoring* 18.3 (2019), p. 963-988.
- [R|PR19] J PRAWIN et A Rama Mohan RAO. « Extraction of Opening and Closing States of Cracked Structure using Adaptive Volterra Filter Model ». *Procedia Structural Integrity* 14 (2019), p. 234-241.

- [R|Qin+19] Xinlin QING, Wenzhuo LI, Yishou WANG et Hu SUN. « Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications ». *Sensors* 19.3 (2019), p. 545.
- [R|RPK19] Maziar RAISSI, Paris PERDIKARIS et George E KARNIADAKIS. « Physics-informed neural networks : A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations ». *Journal of Computational physics* 378 (2019), p. 686-707.
- [R|RM19b] E. ROMAN-RANGEL et S. MARCHAND-MAILLET. « Inductive t-SNE via deep learning to visualize multi-label images ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 81 (2019), p. 336-345.
- [R|Som+19] Rohan SOMAN, Pawel KUDELA, Kaleeswaran BALASUBRAMANIAM, Shishir Kumar SINGH et Pawel MALINOWSKI. « A study of sensor placement optimization problem for guided wave-based damage detection ». *Sensors* 19.8 (2019), p. 1856.
- [R|SM19] Rohan SOMAN et Pawel MALINOWSKI. « A real-valued genetic algorithm for optimization of sensor placement for guided wave-based structural health monitoring ». *Journal of Sensors* 2019 (2019).
- [R|VDC19] Luis GG VILLANI, Samuel DA SILVA et Americo CUNHA JR. « Damage detection in uncertain nonlinear systems based on stochastic Volterra series ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 125 (2019), p. 288-310.
- [R|Vil+19] Luis GG VILLANI, Samuel DA SILVA, Americo CUNHA JR et Michael D TODD. « Damage detection in an uncertain nonlinear beam based on stochastic Volterra series : an experimental application ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 128 (2019), p. 463-478.
- [R|Won+19] Thumawadee WONGWIRAT, Minghuan WANG, Yanfei HUANG, Imre TREUFELD, Ruipeng LI, Pitak LAORATANAKUL, Hathaikarn MANUSPIYA et Lei ZHU. « Mesophase Structure-Enabled Electrostrictive Property in Nylon-12-Based Poly (ether-block-amide) Copolymers ». *Macromolecular Materials and Engineering* 304.9 (2019), p. 1900330.
- [R|Yan+19] Wang-Ji YAN, Meng-Yun ZHAO, Qian SUN et Wei-Xin REN. « Transmissibility-based system identification for structural health Monitoring : Fundamentals, approaches, and applications ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 117 (2019), p. 453-482.
- [R|Zha+19] Xiaoming ZHANG, Chuanzeng ZHANG, Jiangong YU et Jing LUO. « Full dispersion and characteristics of complex guided waves in functionally graded piezoelectric plates ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 30.10 (2019), p. 1466-1480.
- [R|ZWQ19] Feng ZHU, Bin WANG et Zheng-hua QIAN. « A numerical algorithm to solve multivariate transcendental equation sets in complex domain and its application in wave dispersion curve characterization ». *Acta Mechanica* 230.4 (2019), p. 1303-1321.
- [R|BWW20] P. BORATE, G. WANG et Y. WANG. « Data-driven structural health monitoring approach using guided Lamb wave responses ». *Journal of Aerospace Engineering* 33.4 (2020), p. 04020033.
- [R|Can+20a] Sergio CANTERO-CHINCHILLA, James L BECK, Manuel CHIACHIO, Juan CHIACHIO, Dimitrios CHRONOPOULOS et Arthur JONES. « Optimal sensor and actuator placement for structural health monitoring via an efficient convex cost-benefit optimization ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 144 (2020), p. 106901.
- [R|Can+20b] Sergio CANTERO-CHINCHILLA, Juan CHIACHIO, Manuel CHIACHIO, Dimitrios CHRONOPOULOS et Arthur JONES. « Optimal sensor configuration for ultrasonic guided-wave inspection based on value of information ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 135 (2020), p. 106377.
- [R|Che+20] Shuting CHEN, Zheng Zheng WONG, Lei ZHANG, Voon-Kean WONG, Kui YAO, Morteza SAFAI, Daniel Elliott SIEVERS et Gary E GEORGESON. « Monitoring of cracks near fastener holes using direct-write ultrasonic transducers ». *Engineering Research Express* 2.1 (2020), p. 015019.
- [R|DK20] I. DAFYDD et Z. S. KHODAEI. « Analysis of Barely Visible Impact Damage Severity with Ultrasonic Guided Lamb Waves ». *Structural Health Monitoring* 19.4 (2020).
- [R|DR20] Arun DAS et Paul RAD. « Opportunities and challenges in explainable artificial intelligence (xai) : A survey ». *arXiv preprint arXiv :2006.11371* (2020).
- [R|GLW20] P GARDNER, X LIU et K WORDEN. « On the application of domain adaptation in structural health monitoring ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 138 (2020), p. 106550.
- [R|GSS20] Tomáš GRABEC, Petr SEDLÁK et Hanuš SEINER. « Application of the Ritz–Rayleigh method for Lamb waves in extremely anisotropic media ». *Wave Motion* 96 (2020), p. 102567.
- [R|Hai+20] Mohammad Faisal HAIDER, Roshan JOSEPH, Victor GIURGIUTIU et Banibrata PODDAR. « An efficient analytical global-local (AGL) analysis of the Lamb wave scattering problem for detecting a horizontal crack in a stiffened plate ». *Acta Mechanica* 231.2 (2020), p. 577-596.
- [R|HM20] M. K. HINDERS et C. A. MILLER. « Intelligent structural health monitoring with ultrasonic Lamb waves ». *Intelligent Feature Selection for Machine Learning Using the Dynamic Wavelet Fingerprint*. Springer, 2020, p. 45-114.

- [R|Ism+20] Zainab ISMAIL, Samir MUSTAPHA, Mohammad Ali FAKIH et Hussein TARHINI. « Sensor placement optimization on complex and large metallic and composite structures ». *Structural Health Monitoring* 19.1 (2020), p. 262-280.
- [R|LW20] X LIU et K WORDEN. « On the application of domain adaptation in SHM ». *Special Topics in Structural Dynamics & Experimental Techniques, Volume 5*. Springer, 2020, p. 111-122.
- [R|Mar+20] Alessandro MARZANI, Nicola TESTONI, Luca DE MARCHI, Marco MESSINA, Ernesto MONACO et Alfonso APICELLA. « An open database for benchmarking guided waves structural health monitoring algorithms on a composite full-scale outer wing demonstrator ». *Structural Health Monitoring* 19.5 (2020), p. 1524-1541.
- [R|McG+20] Christine K MCGINN, Kevin A KAM, Mika-Matti LAURILA, Karem LOZANO MONTERO, Matti MÄNTYSALO, Donald LUPO et Ioannis KYMISSIS. « Formulation, printing, and poling method for piezoelectric films based on PVDF-TrFE ». *Journal of Applied Physics* 128.22 (2020), p. 225304.
- [R|MM20] Kevin P MENARD et Noah MENARD. *Dynamic mechanical analysis*. CRC press, 2020.
- [R|MAN20] Pouyan Keshavarz MOTAMED, Ali ABEDIAN et Mostafa NASIRI. « Optimal sensors layout design based on reference-free damage localization with lamb wave propagation ». *Structural Control and Health Monitoring* 27.4 (2020), e2490.
- [R|RCT20] Danny R RAMASAWMY, Ben T COX et Bradley E TREEBY. « ElasticMatrix : A MATLAB toolbox for anisotropic elastic wave propagation in layered media ». *SoftwareX* 11 (2020), p. 100397.
- [R|Sed+20] Adel SEDAGHATI, Farhang HONARVAR, Morteza TABATABAEIPOUR et Anthony SINCLAIR. « Investigation of the scattering of Lamb waves from a generalized circular cavity by using Poisson Mindlin plate theories and numerical simulation ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* 234.1 (2020), p. 152-170.
- [R|Tie+20] Ying TIE, Qingsong ZHANG, Yuliang HOU et Cheng LI. « Impact damage assessment in orthotropic CFRP laminates using nonlinear Lamb wave : Experimental and numerical investigations ». *Composite Structures* 236 (2020), p. 111869.
- [R|Vil+20] Luis GG VILLANI, Samuel da SILVA, Americo CUNHA et Michael D TODD. « On the detection of a nonlinear damage in an uncertain nonlinear beam using stochastic Volterra series ». *Structural Health Monitoring* 19.4 (2020), p. 1137-1150.
- [R|ZHL20] Bin ZHANG, Xiaobin HONG et Yuan LIU. « Multi-task deep transfer learning method for guided wave-based integrated health monitoring using piezoelectric transducers ». *IEEE Sensors Journal* 20.23 (2020), p. 14391-14400.
- [R|Zha+20a] Han ZHANG, Jiadong HUA, Fei GAO et Jing LIN. « Efficient Lamb-wave based damage imaging using multiple sparse Bayesian learning in composite laminates ». *NDT & E International* 116 (2020), p. 102277.
- [R|Zha+20b] Zi ZHANG, Hong PAN, Xingyu WANG et Zhibin LIN. « Machine learning-enriched lamb wave approaches for automated damage detection ». *Sensors* 20.6 (2020), p. 1790.
- [R|Zhu+20] Fuzhen ZHUANG, Zhiyuan QI, Keyu DUAN, Dongbo XI, Yongchun ZHU, Hengshu ZHU, Hui XIONG et Qing HE. « A comprehensive survey on transfer learning ». *Proceedings of the IEEE* 109.1 (2020), p. 43-76.
- [R|ACH21] K Supreet ALGURI, Chen Ciang CHIA et Joel B HARLEY. « Sim-to-Real : Employing ultrasonic guided wave digital surrogates and transfer learning for damage visualization ». *Ultrasonics* 111 (2021), p. 106338.
- [R|Ban+21a] Philippe BANET, Noh ZEGGAI, Jonathan CHAVANNE, Giao TM NGUYEN, Linda CHIKH, Cédric PLESSE, Morgan ALMANZA, Thomas MARTINEZ, Yoan CIVET, Yves PERRIARD et al. « Evaluation of dielectric elastomers to develop materials suitable for actuation ». *Soft Matter* 17.48 (2021), p. 10786-10805.
- [R|Ban+21b] Aline BANQUART, Samuel CALLÉ, Franck LEVASSORT, Lionel FRITSCH, Frédéric OSSANT, Sean TOFFESSI SIEWE, Stéphanie CHEVALLIOT, Arnaud CAPRI et Jean-Marc GRÉGOIRE. « Piezoelectric P (VDF-TrFE) film inkjet printed on silicon for high-frequency ultrasound applications ». *Journal of Applied Physics* 129.19 (2021), p. 195107.
- [R|CZL21] Xuwei CAO, Liang ZENG et Jing LIN. « Lamb wave mode decomposition and reconstruction based on the viscoelastic propagation model ». *Structural Health Monitoring* 20.1 (2021), p. 25-45.
- [R|Caw21] Peter CAWLEY. « A development strategy for structural health monitoring applications ». *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems* 4.4 (2021).
- [R|DG21] Souhail DAHMEN et Christ GLORIEUX. « Optimization of coupled Lamb wave parameters for defect detection in anisotropic composite three-layer with Kelvin-Voigt viscoelasticity using Legendre polynomial method ». *Composite Structures* 272 (2021), p. 114158.
- [R|EGB21] Vincentius EWALD, Roger GROVES et Rinze BENEDICTUS. « Integrative approach for transducer positioning optimization for ultrasonic structural health monitoring for the detection of deterministic and probabilistic damage location ». *Structural Health Monitoring* 20.3 (2021), p. 1117-1144.

- [R|Gar+21] Emil GARNELL, Bekir AKSOY, Corinne ROUBY, Herbert SHEA et Olivier DOARÉ. « Geometric optimization of dielectric elastomer electrodes for dynamic applications ». *Applied Acoustics* 181 (2021), p. 108120.
- [R|HC21] Ehsan HAJIESMAILI et David R CLARKE. « Dielectric elastomer actuators ». *Journal of Applied Physics* 129.15 (2021), p. 151102.
- [R|Hay+21] Marcus HAYWOOD-ALEXANDER, Nikolaos DERVILIS, Keith WORDEN, Elizabeth J CROSS, Robin S MILLS et Timothy J ROGERS. « Structured machine learning tools for modelling characteristics of guided waves ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 156 (2021), p. 107628.
- [R|HA21] Hossein HOSSEINI-TOUDESHPY et Fazel Abdolrezaei AMJAD. « Sensor placement optimization for guided wave-based structural health monitoring ». *Structural Monitoring and Maintenance* 8.2 (2021), p. 125-150.
- [R|Kas+21] K KASHINATH, M MUSTAFA, A ALBERT, JL WU, C JIANG, S ESMAEILZADEH, K AZIZZADENESHELI, R WANG, A CHATTOPADHYAY, A SINGH et al. « Physics-informed machine learning : case studies for weather and climate modelling ». *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 379.2194 (2021), p. 20200093.
- [R|KB21] Marcin J KRAŚNY et Chris R BOWEN. « A system for characterisation of piezoelectric materials and associated electronics for vibration powered energy harvesting devices ». *Measurement* 168 (2021), p. 108285.
- [R|KDL21] Danjela KUSCER, Silvo DRNOVŠEK et Franck LEVASSORT. « Inkjet-printing-derived lead-zirconate-titanate-based thick films for printed electronics ». *Materials & Design* 198 (2021), p. 109324.
- [R|MSK21] A MARDANSHAH, MM SHOKRIEH et S KAZEMIRAD. « Simulated Lamb wave propagation method for nondestructive monitoring of matrix cracking in laminated composites ». *Structural Health Monitoring* (2021), p. 14759217211008620.
- [R|Mus+21] Samir MUSTAPHA, Ye LU, Ching-Tai NG et Pawel MALINOWSKI. « Sensor networks for structures health monitoring : placement, implementations, and challenges—a review ». *Vibration* 4.3 (2021), p. 551-585.
- [R|Ort+21] Adil Han ORTA, Jeroen VANDENDRIESSCHE, Mathias KERSEMANS, Wim VAN PAEPEGEM, Nicolaas Bernardus ROOZEN et Koen VAN DEN ABEELE. « Modelling lamb wave propagation in visco-elastic composite plates using a fifth-order plate theory ». *Ultrasonics* (2021), p. 106482.
- [R|PAN21] Sudeshna PATRA, Pulickel M AJAYAN et Tharangattu N NARAYANAN. « Dynamic mechanical analysis in materials science : The Novice's Tale ». *Oxford Open Materials Science* 1.1 (2021), itaa001.
- [R|Phi+21] Marilyne PHILIBERT, Shuting CHEN, Voon-Kean WONG, Kui YAO, Constantinos SOUTIS et Matthieu GRESIL. « Direct-write piezoelectric transducers on carbon-fiber-reinforced polymer structures for exciting and receiving guided ultrasonic waves ». *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 68.8 (2021), p. 2733-2740.
- [R|Rau+21] Mahindra RAUTELA, J SENTHILNATH, Jochen MOLL et Srinivasan GOPALAKRISHNAN. « Combined two-level damage identification strategy using ultrasonic guided waves and physical knowledge assisted machine learning ». *Ultrasonics* 115 (2021), p. 106451.
- [R|Sam+21] Wojciech SAMEK, Grégoire MONTAVON, Sebastian LAPUSCHKIN, Christopher J ANDERS et Klaus-Robert MÜLLER. « Explaining deep neural networks and beyond : A review of methods and applications ». *Proceedings of the IEEE* 109.3 (2021), p. 247-278.
- [R|SN21] Reza SOLEIMANPOUR et Ching-Tai NG. « Scattering analysis of nonlinear Lamb waves at delaminations in composite laminates ». *Journal of Vibration and Control* (2021), p. 1077546321990145.
- [R|Toh+21] Nikruesong TOHLUEBAJI, Panu THAINIRAMIT, Chatchai PUTSON et Nantakan MUENSIT. « Phase and structure behavior vs. electromechanical performance of electrostrictive P (VDF-HFP)/ZnO composite nanofibers ». *Polymers* 13.15 (2021), p. 2565.
- [R|Wan+21] Kai WANG, Menglong LIU, Zhongqing SU, Shifeng GUO et Fangsen CUI. « Mode-mismatching enhanced disbond detection using material nonlinearity in guided waves at low frequency ». *Journal of Sound and Vibration* 490 (2021), p. 115733.
- [R|Woo21] WH Hunter WOODWARD. « Broadband Dielectric Spectroscopy—A Practical Guide ». *Broadband Dielectric Spectroscopy : A Modern Analytical Technique*. ACS Publications, 2021, p. 3-59.
- [R|Yad+21] Susheel Kumar YADAV, Spandan MISHRA, Fotis KOPSAFTOPOULOS et Fu-Kuo CHANG. « Reliability of crack quantification via acousto-ultrasound active-sensing structural health monitoring using surface-mounted PZT actuators/sensors ». *Structural Health Monitoring* 20.1 (2021), p. 219-239.
- [R|Yun+21] Hongguang YUN, Rakiba RAYHANA, Shashank PANT, Marc GENEST et Zheng LIU. « Nonlinear ultrasonic testing and data analytics for damage characterization : A review ». *Measurement* 186 (2021), p. 110155.
- [R|Ata+22] Bienvenu ATAWA, Léa MANEVAL, Pierre ALCOUFFE, Guillaume SUDRE, Laurent DAVID, Nathalie SINTES-ZYDOWICZ, Emmanuel BEYOU et Anatoli SERGHEI. « In-situ coupled mechanical/electrical investigations on conductive TPU/CB composites : Impact of thermo-mechanically induced structural reorganizations of soft and hard TPU domains on the coupled electro-mechanical properties ». *Polymer* 256 (2022), p. 125147.

- [R|AM22] Clarisse AUJOUX et Olivier MESNIL. « Environmental impact assessment of guided wave-based structural health monitoring ». *Structural Health Monitoring* (2022), p. 14759217221088774.
- [R|Beu+22] Clémentine BEUTIER, Anatoli SERGHEI, Philippe CASSAGNAU, Patrick HEUILLET, Bernard CANTALOUBE, Nathan SELLES, Isabelle MORFIN, Guillaume SUDRE et Laurent DAVID. « In situ coupled mechanical/electrical/WAXS/SAXS investigations on ethylene propylene diene monomer resin/carbon black nanocomposites ». *Polymer* 254 (2022), p. 125077.
- [R|CBB22] Lorenzo CAPINERI, Luca BERGAMASCHI et Andrea BULLETTI. « Design of Piezopolymer Interdigital Transducers with Scaled Electrode Geometries Based on FEM Analysis ». *Actuators*. T. 11. 11. MDPI. 2022, p. 326.
- [R|Che+22] Zhenhua CHEN, Guochen XU, Wei LU, Chenggeng LI et Chao LU. « Nonlinear lamb wave imaging method for testing Barely Visible Impact Damage of CFRP laminates ». *Applied Acoustics* 192 (2022), p. 108699.
- [R|Cuc+22] Matteo CUCCHI, Steve ABREU, Giuseppe CICCONE, Daniel BRUNNER et Hans KLEEMANN. « Hands-on reservoir computing : a tutorial for practical implementation ». *Neuromorphic Computing and Engineering* (2022).
- [R|Ewa+22] Vincentius EWALD, Ramanan Sridaran VENKAT, Aadhik ASOKKUMAR, Rinze BENEDICTUS, Christian BOLLER et Roger M GROVES. « Perception modelling by invariant representation of deep learning for automated structural diagnostic in aircraft maintenance : A study case using DeepSHM ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 165 (2022), p. 108153.
- [R|Fal+22] Francesco FALCETELLI, Nan YUE, Raffaella Di SANTE et Dimitrios ZAROUCAS. « Probability of detection, localization, and sizing : The evolution of reliability metrics in Structural Health Monitoring ». *Structural Health Monitoring* 21.6 (2022), p. 2990-3017.
- [R|GB22] Thulsiram GANTALA et Krishnan BALASUBRAMANIAM. « DPAI : A Data-driven simulation-assisted-Physics learned AI model for transient ultrasonic wave propagation ». *Ultrasonics* 121 (2022), p. 106671.
- [R|Gar+22] P GARDNER, LA BULL, J GOSLIGA, J POOLE, N DERVILIS et K WORDEN. « A population-based SHM methodology for heterogeneous structures : Transferring damage localisation knowledge between different aircraft wings ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 172 (2022), p. 108918.
- [R|GND22] Mehrdad GHYABI, Hamidreza NEMATI et Ehsan DEGHAN-NIRI. « A simplified framework for prediction of sensor network coverage in real-time structural health monitoring of plate-like structures ». *Structural Health Monitoring* 21.4 (2022), p. 1379-1395.
- [R|Gli+22] Sebastjan GLINSEK, Longfei SONG, Veronika KOVACOVA, Mohamed A MAHJOUR, Nicolas GODARD, Stéphanie GIROD, Jean-Luc BIAGI, Robert QUINTANA, Thomas SCHLEE, Matthieu GUEDRA et al. « Inkjet-Printed Piezoelectric Thin Films for Transparent Haptics ». *Advanced Materials Technologies* 7.8 (2022), p. 2200147.
- [R|Han+22] Jinchuan HAN, Mayuran SARAVANAPAVANANTHAM, Matthew R CHUA, Jeffrey H LANG et Vladimir BULOVIĆ. « A versatile acoustically active surface based on piezoelectric microstructures ». *Microsystems & Nanoengineering* 8.1 (2022), p. 55.
- [R|LK22] F LAMBINET et Z Sharif KHODAEI. « Measurement platform for structural health monitoring application of large scale structures ». *Measurement* 190 (2022), p. 110675.
- [R|22] *Le livre Blanc du SHM*. 2022.
- [R|LC22] Kexin LI et Mandar CHITRE. « Data-aided Underwater Acoustic Ray Propagation Modeling ». *arXiv preprint arXiv :2205.06066* (2022).
- [R|Li+22b] Yehai LI, Kai WANG, Wei FENG, Hefeng WU, Zhongqing SU et Shifeng GUO. « Insight into excitation and acquisition mechanism and mode control of Lamb waves with piezopolymer coating-based array transducers : Analytical and experimental analysis ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 178 (2022), p. 109330.
- [R|LGC22] L LOMAZZI, M GIGLIO et F CADINI. « Explainable framework for Lamb wave-based damage diagnosis ». *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems*. CRC Press, 2022, p. 1775-1780.
- [R|MF22] Leandro MAIO et Paul FROMME. « On ultrasound propagation in composite laminates : Advances in numerical simulation ». *Progress in Aerospace Sciences* 129 (2022).
- [R|PRM22] Pushpa PANDEY, Akshay RAI et Mira MITRA. « Explainable 1-D convolutional neural network for damage detection using Lamb wave ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 164 (2022), p. 108220.
- [R|Phi+22a] Marilyne PHILIBERT, Shuting CHEN, Voon-Kean WONG, Weng Heng LIEW, Kui YAO, Constantinos SOUTIS et Matthieu GRESIL. « Direct-write piezoelectric coating transducers in combination with discrete ceramic transducer and laser pulse excitation for ultrasonic impact damage detection on composite plates ». *Structural Health Monitoring* 21.4 (2022), p. 1645-1660.
- [R|Phi+22b] Marilyne PHILIBERT, Kui YAO, Matthieu GRESIL et Constantinos SOUTIS. « Lamb waves-based technologies for structural health monitoring of composite structures for aircraft applications ». *European Journal of Materials* 2.1 (2022), p. 436-474.

- [R|RM22] Akshay RAI et Mira MITRA. « A transfer learning approach for damage diagnosis in composite laminated plate using Lamb waves ». *Smart Materials and Structures* 31.6 (2022), p. 065002.
- [R|Rol+22] Thomas ROLOFF, Rytis MITKUS, Jann Niklas LION et Michael SINAPIUS. « 3D-Printable piezoelectric composite sensors for acoustically adapted guided ultrasonic wave detection ». *Sensors* 22.18 (2022), p. 6964.
- [R|Saa+22] Karen SAAD, Hussein TARHINI, Mohammad S HARB et Samir MUSTAPHA. « Optimization of placement of piezoelectric wafers based on a hybrid model using pitch-catch and pulse-echo configurations ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 33.2 (2022), p. 266-289.
- [R|Sam+22] Wojciech SAMEK, Leila ARRAS, Ahmed OSMAN, Grégoire MONTAVON et Klaus-Robert MÜLLER. « Explaining the Decisions of Convolutional and Recurrent Neural Networks ». *Mathematical Aspects of Deep Learning* (2022), p. 229.
- [R|SN22] Afshin SATTARIFAR et Tamara NESTOROVIĆ. « Emergence of Machine Learning Techniques in Ultrasonic Guided Wave-based Structural Health Monitoring : A Narrative Review ». *International Journal of Prognostics and Health Management* 13.1 (2022).
- [R|Sch+22] Georg C SCHMIDT, Jonas M WERNER, Thomas WEISSBACH, Jörg STRUTWOLF, Robert ELAND, Welf-Guntram DROSSEL et Arved C HÜBLER. « Printed Multilayer Piezoelectric Transducers on Paper for Haptic Feedback and Dual Touch-Sound Sensation ». *Sensors* 22.10 (2022), p. 3796.
- [R|Sha+22] Weihang SHAO, Hu SUN, Yishou WANG et Xinlin QING. « A multi-level damage classification technique of aircraft plate structures using Lamb wave-based deep transfer learning network ». *Smart Materials and Structures* 31.7 (2022), p. 075019.
- [R|SW22] Mudassar SHEHZAD et Yaojin WANG. « PVDF based piezoelectric condenser loudspeaker and microphone ». *Sensors and Actuators A : Physical* 346 (2022), p. 113861.
- [R|Wil+22] Jared WILLARD, Xiaowei JIA, Shaoming XU, Michael STEINBACH et Vipin KUMAR. « Integrating scientific knowledge with machine learning for engineering and environmental systems ». *ACM Computing Surveys* 55.4 (2022), p. 1-37.
- [R|Won+22] Voon-Kean WONG, Sarbudeen Mohamed RABEEK, Szu Cheng LAI, Marilyne PHILIBERT, David Boon Kiang LIM, Shuting CHEN, Muthusamy Kumarasamy RAJA et Kui YAO. « Active Ultrasonic Structural Health Monitoring Enabled by Piezoelectric Direct-Write Transducers and Edge Computing Process ». *Sensors* 22.15 (2022), p. 5724.
- [R|Zan22] Sara ZANCHI. « Du polymère fluoré électroactif à l'actionneur ». Thèse de doct. HESAM Université, 2022.
- [R|ZHL22] Bin ZHANG, Xiaobin HONG et Yuan LIU. « Distribution adaptation deep transfer learning method for cross-structure health monitoring using guided waves ». *Structural Health Monitoring* 21.3 (2022), p. 853-871.
- [R|Ban+23] Aline BANQUART, Samuel CALLÉ, Jean-Marc GRÉGOIRE, Frédéric OSSANT, Lionel FRITSCH, Arnaud CAPRI, Jean-Marc INGLÈSE, Stéphanie CHEVALLIOT et Franck LEVASSORT. « Inkjet-printed P (VDF-TrFE) film for high-frequency annular array ». *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (2023).
- [R|Dwo+23] Ziemowit DWORAKOWSKI, Mateusz HEESCH, Jakub GORSKI et Michal DZIENDZIKOWSKI. « Guided Waves Benchmark Dataset and Classifier Comparison ». *European Workshop on Structural Health Monitoring*. Springer, 2023, p. 71-78.
- [R|Gao+23] Yuqing GAO, Weilei MU, Fuh-Gwo YUAN et Guijie LIU. « A defect localization method based on self-sensing and orthogonal matching pursuit ». *Ultrasonics* 128 (2023), p. 106889.
- [R|Gra+23] Sebastian GRATZ-KELLY, Tim KRÜGER, Gianluca RIZZELLO, Stefan SEELECKE et Giacomo MORETTI. « An audio-tactile interface based on dielectric elastomer actuators ». *Smart Materials and Structures* 32.3 (2023), p. 034005.
- [R|Lom+23] L LOMAZZI, S FABIANO, M PARZIALE, M GIGLIO et F CADINI. « On the explainability of convolutional neural networks processing ultrasonic guided waves for damage diagnosis ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 183 (2023), p. 109642.

Résumé

Les structures actuelles intègrent un écosystème allant bien au-delà de leur seule tenue mécanique qui leur procure de nouvelles fonctionnalités. Les structures vibrantes intelligentes et multifonctionnelles sont par exemple équipées de capteurs, d'actionneurs, et d'algorithmes, qui les rendent capables de réaliser différentes fonctions basées sur leur dynamique vibratoire. L'une de ces fonctions est la capacité de diagnostiquer leur état de santé en toute autonomie. Cela peut se faire via l'installation permanente à leur surface d'un réseau dispersé d'éléments piézoélectriques (PZT) capable d'émettre et de recevoir des ondes et par le biais d'algorithmes appropriés.

Pour y parvenir, la propagation des ondes dans les matériaux composites doit être comprise physiquement. Il faut également maîtriser leurs interactions avec les dommages rencontrés dans les matériaux composites. Il est ensuite nécessaire de concevoir des réseaux dispersés de PZTs et enfin de développer des algorithmes appropriés au contrôle de la santé des structures basé sur les ondes. Ce manuscrit dresse ainsi un bilan critique des travaux de recherche auxquels j'ai contribué au sein de l'équipe DYSCO du PIMM dans ces thématiques.

Il existe toutefois peu d'applications industrielles des structures multifonctionnelles vibrantes intelligentes. Une première perspective est de développer des modèles génériques et flexibles décrivant la propagation d'ondes dans ces structures et englobant la variabilité des cas rencontrés dans la vie réelle. De plus, différents matériaux actifs alternatifs au PZT récemment mis au point ouvrent de nouvelles opportunités. Une seconde perspective est alors la conception d'une structure multifonctionnelle directement par le choix de matériaux électro-actifs constitutifs et la spécification des fonctions qu'elle doit réaliser. Ces deux axes de recherche prospectifs sont détaillés dans la dernière partie du manuscrit.

Mots-clés: Ondes guidées, Traitement du signal linéaire et non-linéaire, Intelligence artificielle guidée par la physique, Matériaux électro-actifs

