

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Caractérisation de défauts d'ondulation hors plan dans des matériaux composites par ultrasons guidés

Référence : **MAS-DMAS-2026-02**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : octobre 2026

Date limite de candidature : juin 2026

Mots clés : Composites, Ultrasons, Ondes guidées, Contrôle Non Destructif

Profil et compétences recherchées

Profil universitaire ou école d'ingénieur

Compétences souhaitées en acoustique ultrasonore, traitement de signal

Intérêt pour les travaux expérimentaux et la simulation numérique

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Depuis le milieu des années 70, les matériaux composites de type polymères renforcés par des fibres de carbone (CFRP) rencontrent un intérêt croissant dans le domaine de l'aéronautique. En effet, ils présentent l'avantage d'allier robustesse et légèreté. Ces dernières années ont vu apparaître des lignes d'assemblage de grandes tailles et de nouvelles techniques de fabrication. Les pièces fabriquées sont alors susceptibles de contenir des défauts apparaissant dès la phase d'élaboration, du fait de la complexité du procédé et du nombre important de paramètres à prendre en compte. Le suivi de l'état de santé de ces structures, en sortie de fabrication, par des méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) est alors un sujet d'intérêt majeur [1], aussi bien par souci de sécurité que pour des considérations économiques.

En particulier, les défauts d'ondulation hors plan dans les composites sont identifiés comme étant une priorité pour les partenaires industriels de l'ONERA. Ces défauts se caractérisent par une désorientation locale des plis dans l'épaisseur du matériau. Ils sont très difficiles à détecter et quasiment impossibles à quantifier avec les techniques de CND traditionnelles (ultrasons ou thermographie par exemple) car ils ne produisent pas de rupture d'impédance (acoustique ou thermique) nette dans le matériau, à l'inverse de défauts plus usuels tels des fissures ou du délaminage. Réussir à quantifier la géométrie de ces ondulations se pose alors comme un objectif essentiel pour déterminer si leur présence est acceptable avant une mise en service [2].

Dans ce contexte, la thèse aura pour objectif de mettre en place une méthode CND, basée sur l'utilisation d'ondes ultrasonores guidées (ondes de Lamb), permettant de détecter et de caractériser des ondulations hors plan dans des CFRP. Le doctorant mènera ses recherches dans l'unité Elaboration et Procédés d'Imagerie et de Contrôle (EPIC) du Département Matériaux et Structures (DMAS), spécialisée dans l'élaboration et la caractérisation de différentes classes de matériaux composites, ainsi que dans leur contrôle et la surveillance santé. L'approche mise en place sera duale et reposera sur des campagnes expérimentales et des simulations numériques. Le doctorant devra tout d'abord réaliser une étude numérique avec un code d'élément fini développé en interne. Il s'agira, dans un premier temps, de valider l'utilisation de cet outil en étudiant la propagation d'ondes guidées dans les matériaux sains puis, dans un second temps, de modéliser les défauts d'intérêts. Une étude de sensibilité des différents modes de Lamb aux caractéristiques géométriques des défauts sera alors effectuée. Les résultats de cette étude paramétrique permettront de dimensionner les essais qui seront ensuite réalisés avec des traducteurs ultrasonores à couplage air, employés pour générer et détecter des ondes guidées dans les échantillons à sonder [3]. Ces mesures seront comparées aux résultats issus des simulations numériques, pour des systèmes modèles. Enfin, le doctorant devra réfléchir à une stratégie complète de méthode CND pour détecter et caractériser les ondulations hors plan ainsi qu'aux limitations d'une telle méthode. Les travaux se focaliseront majoritairement sur des éprouvettes planes mais des structures plus complexes type cornières ou panneaux raidis pourront être étudiées.

[1] : Gebrehiwet et al., A review of common aerospace composite defects detection methodologies, *International Journal of Research Publication and Review*, 4 (8), **2023**

[2] : Fougrouse C., Understanding and modelling of the effects of out-of-plane waviness defects on the mechanical performance of a thermoplastic matrix laminate, *Université Paris-Saclay*, **2023**

[3] : Castaings M., Hosten B., Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks. *NDT & E International*, **41**, **2008**

Collaborations envisagées

I2M Bordeaux

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Matériaux et Structures

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Alverède Simon

Tél. : 0146374506 Email : alverede.simon@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Eric Ducasse

Laboratoire : I2M Bordeaux

Tél. : 0540003138

Email : eric.ducasse@u-bordeaux.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

NOTA :

La proposition de sujet de thèse est destinée à être publiée et doit être rédigée à destination des candidats. Eviter les acronymes et le jargon technique. Mettre en avant les compétences qui seront acquises au cours de la thèse.

La motivation de la proposition de sujet et les compléments à destination de la DSG sont à renseigner ci-dessous.

Le sujet doit impérativement être validé par le département du proposant et diffusé à la DSG par l'intermédiaire de l'Adjoint Scientifique.

PARTIE DESTINEE EXCLUSIVEMENT A LA DSG

Les rubriques suivantes doivent être dûment renseignées :

1. Domaine et thématique scientifique, défi et feuille de route adressés

Domaine scientifique principal (MAS / MFE / PHY / SNA / TIS) : MAS

Thématique scientifique principale (liste [ici](#)) : Thématique 3 - Matériaux architecturés et multifonctionnels

Défi du PSS (liste [ici](#)) : Défi 7 - Des structures aérospatiales plus durables

Feuille(s) de route (liste [ici](#)) : Feuille de Route 3.1 - Outils et moyens d'aide à la « certificabilité » des avions futurs à coût et délai réduits

2. Objet de la thèse

Détection et caractérisation de défauts d'ondulation hors plan dans des matériaux composites, par ondes de Lamb générées et détectées avec des transducteurs à ultrasons, par une approche couplant simulations numériques et mesures expérimentales.

3. Descriptif de la thèse

a. Quels sont les problèmes qui se posent ?

Dans le contexte industriel actuel, la détection et la quantification de défauts initiaux en sortie de fabrication de pièces ou structures composites deviennent un enjeu majeur. Cet objectif est en outre critique lorsque la présence de défauts provoque un abaissement conséquent des propriétés mécaniques. Il apparaît aujourd'hui essentiel que le Contrôle Non Destructif (CND) apporte son appui concernant la classification et l'acceptabilité des défauts avant une éventuelle mise en service d'une pièce. En particulier, les défauts d'ondulation hors plan dans les composites sont identifiés comme étant une priorité pour les partenaires industriels de l'ONERA. Ces défauts se caractérisent par une désorientation locale des plis dans l'épaisseur du matériau. Dans le cadre de la convention DGAC PhyDefect, les discussions avec les partenaires notoires de l'aéronautique civile (notamment avec AIRBUS Operations et Atlantic, SAFRAN Composites et Nacelles, et Dassault Aviation) ont montré que la détection de tels défauts se réalise aujourd'hui de manière relativement sommaire par observation visuelle de la surface des pièces ou d'une tranche transversale après découpe. Ces dernières années ayant vu apparaître des lignes d'assemblage de grandes tailles, il paraît donc inenvisageable de continuer à effectuer les contrôles de cette manière. Cela est d'autant plus vrai du fait que les ondulations hors plan ne manifestent pas systématiquement leur présence à la surface et qu'elles ne se situent pas uniquement en bordure de pièce. L'apport du CND pour détecter et quantifier de tels défauts semble donc indéniable. Néanmoins, les ondulations hors plan posent le problème qu'elles ne génèrent aucune rupture d'impédance nette dans le matériau, à l'inverse de défauts plus usuels tels des fissures ou du délaminage, ce qui complexifie la mise en œuvre de méthodes CND.

b. Quel est l'état de l'art ?

La question de la détection d'ondulations par méthodes CND est relativement bien étudiée dans la littérature. L'essentiel des travaux a été publié au cours des 10 dernières années et propose différentes techniques d'identification.

Tout d'abord, l'utilisation classique de tomographie rayon X (TRX) a été étudiée, l'essentiel de l'effort se focalisant en particulier sur l'analyse des images afin d'extraire les caractéristiques géométriques des défauts [1], [2]. Néanmoins les TRX nécessitent de travailler sur des petits échantillons afin d'atteindre une résolution acceptable et peuvent rencontrer des limites dues aux faibles contrastes entre les fibres de carbone et la matrice en résine. Une autre technique utilisée est celle des Courants de Foucault (EC pour Eddy Current) qui profitent de la conductivité électrique des fibres de carbone. Cette technique présente l'avantage d'être sans contact. La présence d'une désorientation des plis se manifeste par un changement sur la phase des signaux acquis. En revanche, elle est presque exclusivement mise en œuvre pour détecter des ondulations dans le plan [3]–[6] plutôt que hors plan [7] car l'interaction entre la bobine de captage et le champ magnétique généré par les courants induits dans l'ondulation est complexe. On peut aussi noter l'existence de techniques basées sur l'analyse d'images de microscope [8] ou sur l'utilisation d'ondes Terahertz (THz), dans le cas de fibres de verre [9]. Enfin, les méthodes les plus documentées dans la littérature restent celles basées sur l'utilisation d'ultrasons (US) qui peuvent être divisés en deux catégories : les US dits « volumiques » qui se propagent dans l'épaisseur d'un système et les ondes de Lamb qui sont des ondes guidées se propageant le long des pièces.

Dans le cas des US « volumiques », une analyse de C-scan en réflexion et l'utilisation d'une analyse de spectre spatial a permis d'identifier des zones de désorientation des plis dans et hors du plan [10]–[12]. Une quantification conjointe à la localisation a également été proposée. Une autre solution a consisté à étudier la déviation des faisceaux ultrasonores sous différents angles d'incidence pour tenter de mettre en évidence une asymétrie dans la répartition de l'énergie des signaux transmis et réfléchis, caractéristique de la présence d'une ondulation [13]. Plus récemment, l'angle maximal de l'ondulation a été quantifié par une mesure en deux étapes en observant les ondes réfléchies de part et d'autre du défaut puis en fusionnant les données filtrées [14], [15]. Les travaux de ces références ont été réalisés avec des transducteurs mono-éléments. Il existe néanmoins des études ayant utilisé à leur avantage les possibilités offertes par les sondes multiéléments. En l'occurrence, la référence [16] utilise la Full Matrice Capture afin de calculer une matrice de diffusion moyenne du système sondé qui est sensible à la présence d'une ondulation. Une autre méthode propose simplement d'analyser le rapport signal sur bruit des B-scans issus d'un balayage électronique [17]. Enfin les références [18]–[20] étudient la non réciprocity des signaux ultrasons en transmission entre deux sondes multiéléments. Les différentes méthodes utilisant les US « volumiques » sont dans l'ensemble assez efficaces pour localiser les ondulations et dans une moindre mesure quantifier leurs géométries. L'inconvénient principal qui peut être noté est que ces méthodes nécessitent que l'instrumentation ultrasonore passe au-dessus du défaut afin d'être en capacité de le détecter. De plus, il est nécessaire de maîtriser le couplage entre la sonde US et le système à sonder par le biais de gel ou de jet d'eau (ou travailler en immersion). Enfin, les méthodes se basant sur la transmission de signaux ne sont pas toujours applicables dans un contexte de CND sur ligne d'assemblage où seule une unique face peut être accessible.

Les ondes guidées présentent l'avantage de se propager sur des distances importantes, ce qui rend leur utilisation particulièrement intéressante dans le cas de grands panneaux. Plusieurs articles ont étudié leur utilisation afin de détecter des ondulations dans et hors du plan. On peut tout d'abord noter les travaux de Chakrapni et al. [21]–[25] qui ont utilisé des transducteurs ultrasonores à couplage air pour générer-détecter les ondes guidées et déceler des défauts d'ondulation. L'avantage de ce type de capteur est la possibilité de sélectionner précisément un mode de propagation en changeant l'angle d'incidence du faisceau [26]. Les références [21], [22] utilisent des ondes de Rayleigh dont le déplacement est localisé à la surface d'échantillons épais. Ces travaux ont permis de réaliser une détection mais aussi une première caractérisation sommaire du ratio d'aspect (hauteur sur longueur) de l'ondulation en étudiant la différence d'amplitude et le changement de phase des signaux US. La référence [24] étudie quant à elle les ondes de Lamb dans des échantillons fins pour détecter les

ondulations dans le plan. Enfin les références [23], [25] présentent l'application de ces techniques CND à des pales d'hélicoptère. Il est à noter que de nombreuses références de la littérature telles [21], [27]–[30] traitent ce sujet par une approche de type simulation numérique, afin de maîtriser et faire varier la géométrie du défaut. En particulier, [29] et [30] s'intéressent à la détection par ondes de Lamb avec des capteurs au contact « type SHM ». Néanmoins, il est à noter qu'à part ces deux dernières références, peu d'études s'intéressent à l'impact d'ondulation hors plan sur la propagation d'un ou plusieurs modes guidés. De plus, ces études sont limitées à des stratifiés unidirectionnels et à des géométries d'ondulation pour lesquelles la « longueur d'onde » d'oscillation demeure faible.

c. Quels sont les objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite ?

Dans le contexte présenté précédemment, la thèse proposée a pour but d'avancer en parallèle des travaux du lot CND de la convention DGAC PhyDefect2 dont le démarrage est espéré pour 2025 ou 2026. En particulier, les travaux se focaliseront sur l'échelle éprouvette et seront ensuite appliqués à l'inspection de structures tests. Les objectifs généraux sont alors de :

- Mettre en place une méthode de CND d'ondes guidées générées et détectées par des transducteurs ultrasonores à couplage air, pour procéder à l'inspection de pièces composites. La possibilité de détecter et de caractériser ces défauts dès la phase d'élaboration représenterait un gain de temps conséquent lors de la validation de pièces composites.
- Identifier les modes de propagation d'ondes de Lamb les plus sensibles aux différentes caractéristiques géométriques des ondulations hors plan. Cette étude numérique paramétrique permettrait de sélectionner efficacement une configuration optimale à mettre en œuvre pour procéder à l'inspection de pièces composites.

4. Programme de la thèse

a. Quelles sont les questions scientifiques traitées ?

Cette thèse s'intéresse à la faisabilité de la détection et de la quantification de défauts initiaux dans les composites par des méthodes ultrasonores. En particulier, on se demande comment les défauts d'ondulations hors plan influencent la propagation d'ondes de Lamb et quels sont les modes de propagation sensibles aux paramètres géométriques du défaut. Il s'agit d'étudier l'effet de filtrage de nombre d'onde spatial engendré par la présence d'une ondulation dans l'épaisseur de plaques.

b. Quelles sont les approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ?

Les travaux de thèse proposés ici ont comme point de départ les études menées dans le cadre de la convention PhyDefect achevée en 2023. Une expérience de propagation d'ondes de Lamb a été réalisée en associant une génération par capteur SHM et une détection par vibrométrie laser. La Figure 1(a) présente une photo de ce dispositif. L'éprouvette sondée est constituée d'un empilement de 20 plis d'un composite thermoplastique, quasi-orthotrope et contient une ondulation hors plan présentée Figure 1(b). L'étude de la propagation des modes de Lamb A0 (antisymétrique) et S0 (symétrique) dans cette éprouvette montre que l'énergie des ondes A0 réfléchies subit une brusque chute à la position de l'ondulation hors plan, voir Figure 2. Cela signifie que ce mode est réfléchi sur l'ondulation, ce qui permet alors d'identifier la position du défaut. De plus, dans la gamme de fréquence d'émission utilisée, les longueurs d'onde de ce mode correspondent à celle de l'ondulation, ce qui rend alors possible une première caractérisation géométrique. Ces premiers travaux expérimentaux ont donc permis de mettre en lumière l'effet de filtrage des ondes de Lamb engendré par la présence d'une ondulation hors plan.

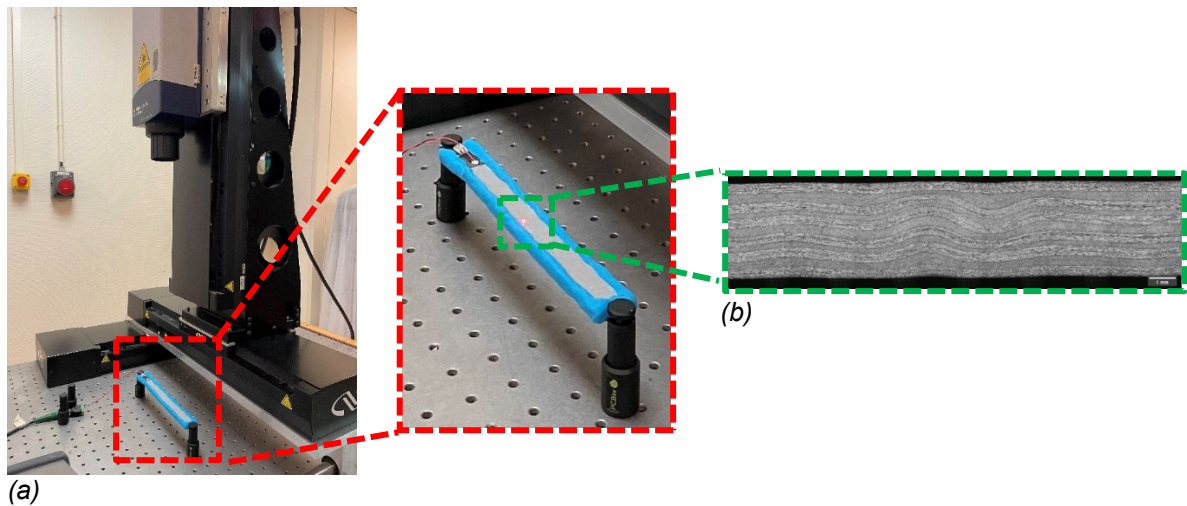


Figure 1 (a) Photo du banc de vibrométrie laser, (b) Image de l'ondulation hors plan sondée

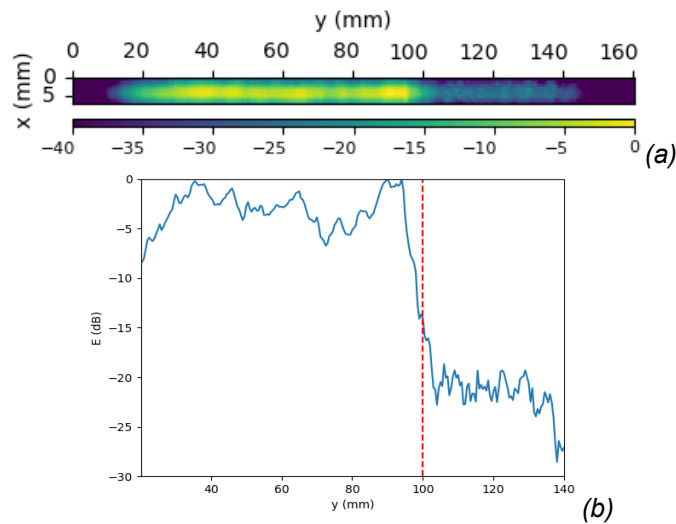


Figure 2 (a) Imagerie RMS des ondes A0 réfléchies en chaque point de l'éprouvette, (b) Imagerie RMS moyennée sur x, la ligne en pointillée rouge correspond à la position de l'ondulation hors plan

Des simulations numériques de la propagation dans des systèmes représentatifs ont ensuite été menées en 2025. Pour cela, des ondulations hors plan sont modélisées grâce aux travaux de thèse de Claire Fougereuse, soutenue en 2023. L'approche de simulation numérique permet de contrôler l'ensemble des paramètres géométriques du défaut dans un stratifié donné (étendue du défaut, longueur d'onde d'ondulation, angle maximal), voir Figure 3. Le code de simulation utilisé est le logiciel libre SimSonic2D et se base sur la méthode des différences finies. L'ondulation locale y est modélisée comme étant une modification du tenseur d'élasticité des plis dans lesquels elle se produit. Une première étude a été réalisée en simulant une onde de Lamb A0 incidente sur le défaut présent dans une plaque à empilement unidirectionnel. Un balayage fréquentiel est effectué de 10 kHz à 1 MHz. La Figure 4 présente l'amplitude des ondes réfléchies émergentes au niveau du défaut. Ces courbes montrent que l'ondulation agit tel un filtre sur les ondes de Lamb. La fréquence centrale de ce filtre dépend de la périodicité de l'ondulation et sa bande passante dépend de l'étendue spatiale. Il est à noter que cet effet apparaît aussi pour les modes de propagation symétrique. Ces résultats montrent bien la sensibilité des ondes de Lamb à la géométrie du défaut.

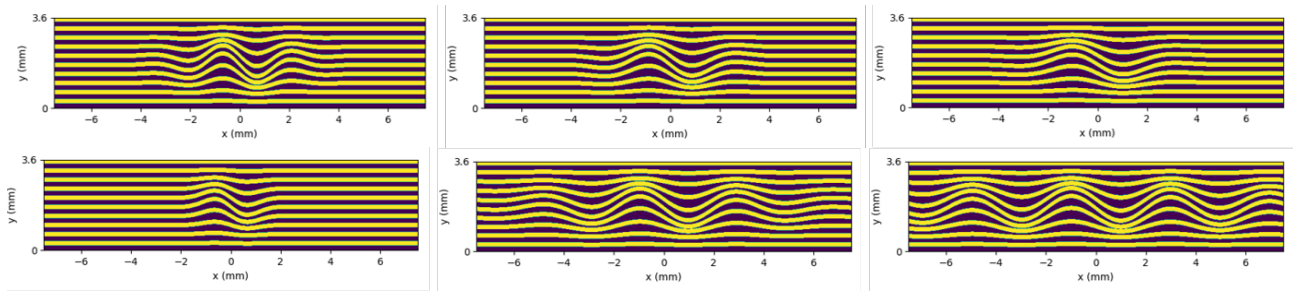


Figure 3 Modélisation d'une ondulation hors plan (ligne du haut) dont seule la périodicité spatiale change, (ligne du bas) dont seule l'étendue spatiale change

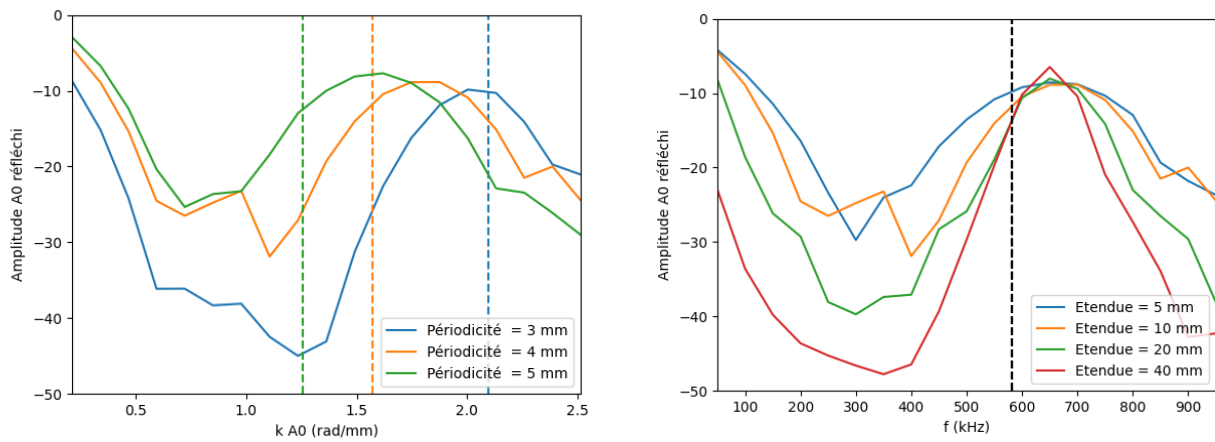


Figure 4 Amplitude des modes A0 réfléchis sur un défaut, (gauche) pour différentes périodicités spatiales, voir Figure 3 ligne du haut, (droite) pour différentes étendues spatiales, voir Figure 3 ligne du bas. Les traits pointillés correspondent à la géométrie du défaut.

Les résultats présentés ci-dessus constituent alors le point de départ de la thèse. La démarche des travaux proposés suit une approche similaire, se basant à la fois sur des simulations numériques et des essais expérimentaux. Tout d'abord, l'objectif est de continuer les simulations avec le code Zset qui emploie la méthode des éléments finis. Il est à noter qu'un stage réalisé d'avril à octobre 2025 a permis d'avancer sur ce sujet. Procéder à des simulations avec cet outil permettra de travailler avec des géométries 3D et des domaines de simulation à géométries complexes tels des cornières ou des panneaux raidis. De plus, le caractère 2D de SimSonic restreint aujourd'hui l'étude à des empilements unidirectionnels ou orthotropes. Utiliser Zset permettra alors d'étudier la propagation d'ondes dans des stratifiés à empilements quelconques reproduisant des matériaux de partenaires industriels. Comme mentionné précédemment, le but des simulations est d'identifier la sensibilité des ondes de Lamb aux paramètres géométriques des ondulations hors plan. Un objectif secondaire est aussi de se rapprocher des codes utilisés par les autres unités du DMAS. Il s'agit de faciliter l'échange de maillages éléments finis qui pourront être utilisés aussi bien pour réaliser des simulations d'inspection que des calculs de mécanique des structures.

La deuxième étape des travaux consistera à réaliser des mesures expérimentales sur des éprouvettes. Les essais seront réalisés avec un banc équipé de traducteurs ultrasonores à couplage air. En effet, ce type de capteur semble particulièrement prometteur dans l'optique de sonder une structure de taille importante avec des solutions robotisées. De plus, par le contrôle de l'angle entre les capteurs et la surface d'attaque, il est possible de sélectionner efficacement le ou les modes de Lamb propagés dans la pièce inspectée. Cette approche permettra alors de profiter pleinement des résultats issus des simulations numériques, notamment en ciblant des modes sensibles à un ou plusieurs paramètres géométriques du défaut. A ce jour, ce banc n'est pas encore disponible dans l'unité d'accueil, mais des discussions sont actuellement en cours avec l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) de

l'Université de Bordeaux, pour l'achat d'une chaîne de mesure complète incluant une paire de traducteurs, l'électronique associée et une base informatique pour piloter cette instrumentation. Ce laboratoire, spécialisé dans de nombreuses techniques CND, dispose d'une connaissance avancée sur la fabrication et l'utilisation de traducteurs ultrasonores à couplage air pour générer-détecter les ondes guidées [31]–[37]. De ce fait, il est prévu que l'I2M participe à la thèse par la personne de Michel Castaings qui sera le directeur de thèse. Le budget nécessaire à la réalisation complète du banc a été chiffré dans le budget prévisionnel de la convention PhyDefect2. Selon la date de lancement de ce projet, ce banc sera réalisé soit en amont de la thèse lors d'un stage de fin d'étude ou au cours de la première année de thèse. Néanmoins, le futur doctorant pourra toujours profiter du banc de vibrométrie laser, ayant déjà fait ses preuves pour réaliser des mesures d'ondes de Lamb dans les composites stratifiés, et des autres moyens CND de l'unité d'accueil.

Le type de matériau étudié (thermo-dure ou thermo-plastique) n'est à ce jour pas encore fixé et dépendra des discussions avec les partenaires industriels de l'ONERA. Dans le cadre de la convention PhyDefect2, il est prévu que l'ONERA récupère des éprouvettes contenant des défauts. Dans une moindre mesure, l'élaboration d'éprouvettes à défaut calibrés au sein du DMAS pourra être envisagée. Différents types d'empilements et de géométries de défaut pourront alors être étudiés. Il est à noter qu'une partie importante des travaux de thèse prévus se concentreront sur des échantillons plans. Selon l'avancement des travaux, une extension à des systèmes plus complexes, telles que des cornières ou structures avec raidisseurs, pourra être envisagée.

c. Programme prévu

➤ **Etude bibliographique ($T_0 \rightarrow T_0 + 2$ mois)**

Cette étape permettra au doctorant de s'approprier le sujet et de comprendre l'ensemble des aspects de la thèse. Il s'agira principalement d'établir un état de l'art des différentes approches établies en contrôle non destructif par ultrasons sur les composites présentant des ondulations hors plan.

➤ **Modélisation de la propagation d'ondes de Lamb dans des stratifiés avec Zset ($T_0 + 1$ mois $\rightarrow T_0 + 4$ mois)**

Les premiers travaux numériques consisteront à modéliser des composites avec COMSOL et à simuler la propagation des ondes de Lamb dans ces systèmes. Il s'agira de contrôler la bande passante ainsi que les modes générés puis d'extraire les courbes de dispersion. La génération d'ondes sera simulée en utilisant une émission avec ou sans contact, type capteur PZT ou ultrasons aériens.

➤ **Modélisation des ondulations hors plan avec Zset ($T_0 + 4$ mois $\rightarrow T_0 + 6$ mois)**

L'objectif sera ici de reproduire des ondulations hors plan dans les stratifiés modélisés avec Zset. Le contrôle de la géométrie de l'ondulation (étendue dans les 3 dimensions, longueur d'onde, angle maximal) est essentiel afin de reproduire au mieux des défauts représentatifs. Cela reviendra à transposer les travaux préliminaires effectués avec SimSonic2D sur Zset.

➤ **Identification de systèmes d'étude ($T_0 + 6$ mois $\rightarrow T_0 + 8$ mois)**

Considérant le début de thèse pour octobre 2025, après le lancement de PhyDefect2, des discussions seront engagées avec les partenaires industriels afin d'identifier clairement un ou plusieurs systèmes d'intérêts pour lesquels la détection et la quantification d'ondulations hors plan sont critiques.

➤ **Campagne de simulation ($T_0 + 6$ mois $\rightarrow T_0 + 18$ mois)**

Une fois les deux premières étapes numériques réalisées, un plan de simulation à mener sur des systèmes modèles sera proposé en premier lieu. Différents matériaux et empilements pourront être étudiés. Les simulations seront aussi menées pour des systèmes industriels d'intérêt identifiés lors de l'étape précédente. Dans un premier temps, l'objectif de cette partie sera d'identifier clairement les mécanismes qui régissent l'interaction entre les ondes de Lamb et les ondulations hors plan dans les stratifiés. Ensuite, cette campagne a pour but de

déterminer comment un traitement de signal adéquat appliqué aux ondes de Lamb peut permettre de quantifier précisément la géométrie des défauts contrôlés.

➤ **Mise en place / prise en main d'un banc d'ondes guidées par capteurs ultrasons aériens ($T_0 + 6$ mois $\rightarrow T_0 + 12$ mois)**

Selon la date de début du projet et de la réception des traducteurs ultrasonores à couplage air, le doctorant devra soit réaliser le banc expérimental soit uniquement le prendre en main. Des premières mesures avec des matériaux de référence permettront de valider la procédure de mesures d'ondes guidées. Suite à cela, des composites sains correspondant à ceux d'intérêt seront ensuite caractérisés afin d'obtenir un état de référence. Il est à noter que le banc de vibrométrie de l'unité d'accueil pourra aussi être utilisé.

➤ **Campagne de mesures expérimentales ($T_0 + 12$ mois $\rightarrow T_0 + 24$ mois)**

Une fois le banc expérimental maîtrisé, un planning de mesures à mener sur les éprouvettes réunies au cours de la première année sera proposé. Cette étape pourra être faite sur des éprouvettes calibrées réalisées à l'ONERA et sur éprouvettes fournies par les partenaires industriels. Il s'agira alors de profiter des résultats de simulations pour des systèmes modèles afin de sélectionner les paramètres de mesure optimaux. L'objectif est de mettre en place une stratégie d'acquisition de signaux en configuration CND pour détecter et caractériser les ondulations hors plan. Les résultats obtenus après traitement du signal seront mis en parallèle avec une caractérisation géométrique réalisée au microscope optique.

➤ **Etudes de systèmes complexes ($T_0 + 25$ mois $\rightarrow T_0 + 30$ mois)**

Cette dernière étape sera proposée en fonction de l'avancement au cours de la dernière année. Les travaux de simulation et expérimentaux réalisés sur des éprouvettes planes seront transposés à des cornières ou des systèmes plus complexes contenant des défauts, tels que des panneaux raidis.

➤ **Rédaction du manuscrit de thèse et préparation de la soutenance ($T_0 + 26$ mois $\rightarrow T_0 + 36$ mois)**

d. Résultats attendus

Établissement d'une méthode CND pour détecter et caractériser des défauts d'ondulations dans des composites stratifiés plans. L'idéal serait de mettre en place une méthode adaptative se basant sur des mesures précises d'ondes guidées, couplées à l'utilisation d'un modèle numérique développé sur Zset. Réussir à retrouver les principales dimensions géométriques des ondulations hors plan par une méthode expérimentale sans contact est un résultat attendu.

5. Références

- [1] G. Nikishkov, Y. Nikishkov, and A. Makeev, "Finite element mesh generation for composites with ply waviness based on X-ray computed tomography," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 58, pp. 35–44, 2013, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.01.002.
- [2] J. Glinz, M. Thor, J. Schulz, S. Zabler, J. Kastner, and S. Senck, "Non-destructive characterisation of out-of-plane fibre waviness in carbon fibre reinforced polymers by X-ray dark-field radiography," *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 37, no. 5, pp. 497–507, 2022, doi: 10.1080/10589759.2022.2063860.
- [3] K. Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "Detection of in-plane fiber waviness in cross-ply CFRP laminates using layer selectable eddy current method," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, pp. 108–118, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.11.040.
- [4] A. Bouloudenine, M. Feliachi, and M. E. H. Latreche, "Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP," *NDT E Int.*, vol. 92, no. March, pp. 30–37, 2017, doi: 10.1016/j.ndteint.2017.07.011.

- [5] Y. Liao, J. Wang, Z. Zeng, J. Lin, and Y. Dai, "Detection of fiber waviness in carbon fiber prepreg using Eddy current method," *Compos. Commun.*, vol. 28, no. March, p. 100981, 2021, doi: 10.1016/j.coco.2021.100981.
- [6] M. Newton, T. Chowdhury, I. Gravagne, and D. Jack, "Non-Destructive Evaluation of In-Plane Waviness in Carbon Fiber Laminates Using Eddy Current Testing," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 10, 2023, doi: 10.3390/app13106009.
- [7] K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 86, pp. 84–94, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.041.
- [8] S. Qi, O. Alajarmeh, T. Shelley, P. Schubel, K. Rendle-Short, and X. Zeng, "Fibre waviness characterisation and modelling by Filtered Canny Misalignment Analysis (FCMA)," *Compos. Struct.*, vol. 307, no. January, p. 116666, 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116666.
- [9] R. F. Anastasi, "Investigation of fiber waviness in a thick glass composite beam using THz NDE," *Nondestruct. Charact. Compos. Mater. Aerosp. Eng. Civ. Infrastructure, Homel. Secur. 2008*, vol. 6934, p. 69340K, 2008, doi: 10.1117/12.776765.
- [10] R. A. Smith, L. J. Nelson, M. J. Mienczakowski, and R. E. Challis, "Automated analysis and advanced defect characterisation from ultrasonic scans of composites," *Insight Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 51, no. 2, pp. 82–87, 2009, doi: 10.1784/insi.2009.51.2.82.
- [11] R. A. Smith, "Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fibre-reinforced composites," 2010.
- [12] R. A. Smith, S. Mukhopadhyay, A. Lawrie, and S. R. Hallett, "Applications of ultrasonic NDT to aerospace composites," in *5th International Symposium on NDT in Aerospace*, 2013, vol. 44, no. November, pp. 13–15.
- [13] J. P. Zardan, C. Gueudré, and G. Corneloup, "Study of induced ultrasonic deviation for the detection and identification of ply waviness in carbon fibre reinforced polymer," *NDT E Int.*, vol. 56, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1016/j.ndteint.2013.02.001.
- [14] M. Liu and Z. Li, "Double-Sided Ultrasonic Testing and Imaging of Multilayer Composites With Out-of-Plane Fiber Wrinkling," *World Congr. Comput. Mech. ECCOMAS Congr.*, vol. 1200, no. August, pp. 1–8, 2022, doi: 10.23967/wccm-apcom.2022.124.
- [15] M. Liu, Z. Li, S. Wang, Z. Zhang, and C. M. Leung, "Quantitative characterization of out-of-plane fiber wrinkling in thick CFRP with Double-side inverse-variance weight-synthetic ultrasonic imaging," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 166, no. August 2022, p. 107376, 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107376.
- [16] D. Pain and B. W. Drinkwater, "Detection of fibre waviness using ultrasonic array scattering data," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 32, no. 3, pp. 215–227, 2013, doi: 10.1007/s10921-013-0174-z.
- [17] V. V. Gonçalves, D. M. G. de Oliveira, and A. A. dos Santos Junior, "Comparison of Ultrasonic Methods for Detecting Defects in Unidirectional Composite Material," *Mater. Res.*, vol. 24, 2021, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2021-0323.
- [18] Z. Zhang, A. Cao, Q. Li, W. Yang, and Y. Li, "Imaging of Fiber Waviness in Thick Composites with Unknown Material Properties Using Probability-Based Ultrasound Non-Reciprocity," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 10, 2023, doi: 10.3390/ma16103786.
- [19] Z. Zhang, Q. Li, M. Liu, W. Yang, and Y. Ang, "Through transmission ultrasonic inspection of fiber waviness for thickness-tapered composites using ultrasound non-reciprocity: Simulation and experiment," *Ultrasonics*, vol. 123, no. February, p. 106716, 2022, doi: 10.1016/j.ultras.2022.106716.
- [20] Z. Zhang, Q. Li, A. Cao, W. Yeoh, M. Liu, and W. Yang, "Defect identification in thick porous and wavy composites with hybrid use of ultrasound non-reciprocity and scattering," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 225, no. May, p. 109514, 2022, doi: 10.1016/j.compscitech.2022.109514.

- [21] S. K. Chakrapani, V. Dayal, D. Barnard, and D. K. Hsu, "Investigation of Discrete Out-of-Plane Waviness in Composite Wind," in *ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, 2011, pp. 1–8.
- [22] S. K. Chakrapani, V. Dayal, and D. Barnard, "Detection and characterization of waviness in unidirectional GFRP using rayleigh wave air coupled ultrasonic testing (RAC-UT)," *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 24, no. 4, pp. 191–201, 2013, doi: 10.1080/09349847.2013.786158.
- [23] S. K. Chakrapani, D. Barnard, and V. Dayal, "Nondestructive evaluation of helicopter rotor blades using guided Lamb modes," *Ultrasonics*, vol. 54, no. 3, pp. 826–833, 2014, doi: 10.1016/J.ULTRAS.2013.10.011.
- [24] S. K. Chakrapani, D. Barnard, and V. Dayal, "Detection of in-plane fiber waviness in composite laminates using guided Lamb modes," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1581 33, no. April 2016, pp. 1134–1140, 2014, doi: 10.1063/1.4864948.
- [25] S. K. Chakrapani, V. Dayal, D. Barnard, R. Krafka, and A. Eldal, "Nondestructive testing of wind turbine blades using air-coupled ultrasonics," *Mater. Eval.*, vol. 73, no. 8, pp. 1046–1055, 2015.
- [26] M. S. Harb and F. G. Yuan, "Non-contact ultrasonic technique for Lamb wave characterization in composite plates," *Ultrasonics*, vol. 64, pp. 162–169, 2016, doi: 10.1016/j.ultras.2015.08.011.
- [27] C. A. C. Leckey and P. D. Juarez, "Simulation of guided wave interaction with in-plane fiber waviness," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1806, 2017, doi: 10.1063/1.4974564.
- [28] C. A. C. Leckey and P. D. Juarez, "Ultrasonic NDE Simulation for Composite Manufacturing Defects," *Nondestruct. Eval. Sci. Branch, NASA Langley Res. Cent.*, 2019.
- [29] J. Thalapil, S. Sawant, S. Tallur, and S. Banerjee, "Guided wave based localization and severity assessment of in-plane and out-of-plane fiber waviness in carbon fiber reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 297, no. November 2021, p. 115932, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115932.
- [30] R. R. Buddala, S. Tallur, and S. Banerjee, "Non-destructive evaluation of a composite honeycomb sandwich panel with in-plane waviness damage using ultrasonic guided waves," *Nondestruct. Test. Eval.*, pp. 1–19, 2024, doi: 10.1080/10589759.2024.2363983.
- [31] M. Masmoudi and M. Castaings, "Three-dimensional hybrid model for predicting air-coupled generation of guided waves in composite material plates," *Ultrasonics*, vol. 52, no. 1, pp. 81–92, 2012, doi: 10.1016/j.ultras.2011.06.014.
- [32] M. Castaings and B. Hosten, "Guided waves propagating in sandwich structures made of anisotropic, viscoelastic, composite materials □ Guided waves propagating in sandwich structures made of anisotropic, viscoelastic, composite materials," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 113, pp. 2622–2634, 2003, doi: 10.1121/1.1562913.
- [33] M. Castaings and B. Hosten, "Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks," *NDT E Int.*, vol. 41, no. 8, pp. 648–655, 2008, doi: 10.1016/j.ndteint.2008.03.010.
- [34] M. Castaings, D. Singh, and P. Viot, "Sizing of impact damages in composite materials using ultrasonic guided waves," *NDT E Int.*, vol. 46, no. 1, pp. 22–31, 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.10.002.
- [35] M. Castaings and P. Cawley, "The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers □ The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 100, pp. 3070–3077, 1996, doi: 10.1121/1.417193.
- [36] C. Biateau, M. Castaings, and M. Renier, "Brevet international : Transducteur ultrasonore multiélément capacitif à couplage air," 2018
- [37] M. Castaings and B. Hosten, "Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates," *NDT E Int.*, vol. 34, no. 4, pp. 249–258,

6. Compléments

a. Personnes participant à l'encadrement en plus des (co)directeur(s) de thèse

A l'ONERA, l'encadrement de la thèse sera réalisé par Alverède Simon. La thèse sera dirigée par Michel Castaings de l'I2M Bordeaux. Un codirecteur de thèse de l'I2M reste aujourd'hui à identifier.

b. Liens avec des projets de recherche et/ou avec d'autres thèses menées à l'ONERA

Projet en cours : PRF ACCIO

Projet en développement : Convention DGAC PhyDefect2

Thèse ONERA :

- Claire Fougerouse (2023) : Compréhension et modélisation des effets de défauts d'ondulation hors plan sur les performances mécaniques d'un stratifié à matrice thermoplastique

c. Verrous scientifiques ou techniques, risques potentiels

Verrous :

- Faible compréhension du mécanisme d'interaction entre les ondes guidées ultrasonores et les défauts d'ondulation hors plan
- Modélisation des ondulations hors plan sur Zset et génération des ondes
- A ce jour, la calibration précise des défauts dans des éprouvettes (mais génération maîtrisée)

Risques potentiels :

- Approvisionnement d'échantillons avec défauts par les partenaires industriels
- Réalisation du banc de mesures par ultrasons aériens

d. Objectif de valorisation des travaux

Publication dans des revues à comité de lecture (Journal of the Acoustical Society of America, Ultrasonics, NDT International, Journal of Composites Science, Composite Structures)

Participation à des congrès nationaux (Congrès Français d'Acoustique, Journées COFREND) et internationaux (International Congress on Ultrasonics, European Conference on Non-Destructive Testing, QNDE – Quantitative Non Destructive Evaluation)

7. Financement envisagé

Cocher dans la colonne de droite

Type de bourse	
ONERA	<input checked="" type="checkbox"/>
DGA	<input checked="" type="checkbox"/>
CNES	<input type="checkbox"/>
Région	<input type="checkbox"/>
CIFRE (préciser ci-dessous le financeur et éventuellement le candidat envisagé)	<input type="checkbox"/>

Contrat doctoral (préciser ci-dessous le % de financement extérieur attendu)	<input type="checkbox"/>
Autre (préciser ci-dessous le financeur et le % de financement extérieur attendu)	<input type="checkbox"/>

A la date de rédaction de ce document, Airbus a manifesté un intérêt sur ce sujet. Une éventuelle participation à ces travaux peut être espérée.

Candidat éventuel : Stagiaire de Master sur la thématique de la campagne de stage de 2026