



HAL
open science

Outils numériques pour la modélisation efficace des contrôles ultrasonores des structures composites

Alexandre Imperiale, Édouard Demaldent, Nicolas Leymarie

► **To cite this version:**

Alexandre Imperiale, Édouard Demaldent, Nicolas Leymarie. Outils numériques pour la modélisation efficace des contrôles ultrasonores des structures composites. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02421131

HAL Id: hal-02421131

<https://hal.science/hal-02421131>

Submitted on 20 Dec 2019

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.

Outils numériques pour la modélisation efficace des contrôles ultrasonores des structures composites

Numerical tools for efficient modelling of the ultrasonic testing of curved composite structures

Alexandre Imperiale¹, Edouard Demaldent¹, Nicolas Leymarie¹

1 : Département d'Imagerie et de Simulation pour le Contrôle,
CEA-LIST

Adresse, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex France

e-mail : alexandre.imperiale@cea.fr, edouard.demaldent@cea.fr et nicolas.leymarie@cea.fr

Résumé

La modélisation de la propagation des ondes ultrasonores est un atout majeur dans de nombreux domaines industriels de contrôles avancés. Fournir une solution numérique à ces problèmes nécessite des procédures parfois complexes et coûteuses (capacité mémoire, temps de calcul). Le CEA LIST développe une stratégie de calcul numérique en régime transitoire basée sur une approche de décomposition de domaine et sur des éléments spectraux d'ordre élevé. Nous étendons ici cette approche aux inspections par ultrasons de structures composites renforcées de fibres de carbone. Cette approche peut être aussi bien appliquée à des configurations de contrôle par ondes guidées que pour des inspections plus classiques par ondes de volume. Afin de gérer à la fois des géométries et des défauts complexes, nous introduisons deux systèmes de coordonnées représentant la pièce avant et après sa déformation. Cette procédure permet ainsi de reconstruire à la volée l'orientation de la fibre locale tout en exploitant la stratégie de modélisation par décomposition de domaines pour y inclure les défauts. Dans cet exposé, nous présenterons les progrès de l'intégration de ces outils spécifiques dans la plate-forme logicielle CIVA.

Abstract

Ultrasonic propagation modeling is a major asset in many industrial areas of advanced control. Providing numerical solutions to these problems requires sometimes complex and expensive procedures (memory capacity, computing time). In recent years, CEA LIST has been proposing a time-domain numerical calculation strategy based on a domain decomposition approach and on high order spectral elements. Here we extend this approach to ultrasonic inspections of composite structures reinforced with carbon fibers. This approach can be applied to both guided wave control configurations and more conventional volume wave inspections. In order to manage both geometries and complex defects, we introduce two coordinate systems representing the part before and after its deformation. This procedure allows reconstructing the local fiber orientation on the fly while leveraging the domain decomposition modeling strategy to include defects. In this talk, we will present the progress of the integration of these specific tools into the CIVA software platform.

Mots Clés : ultrasons, modélisation éléments finis, contrôle non destructif, composites stratifiés

Keywords: ultrasound, finite element modeling, non-destructive testing, laminated composites

1 Contexte et motivations

De par leurs nombreux avantages fonctionnels (légèreté, résistance mécanique) par rapport aux matériaux traditionnels, les matériaux composites sont maintenant fréquemment utilisés dans la plupart des secteurs industriels innovants. Afin de garantir l'intégrité de ces pièces à forte valeur ajoutée, des techniques de contrôle non destructif sont employées et notamment par méthodes ultrasonores (ondes de volume ou ondes guidées). La simulation numérique est alors une aide importante, tant pour l'analyse que pour la conception et l'optimisation des techniques employées. Les modèles développés doivent prendre en compte le caractère anisotrope et hétérogène de ces matériaux ainsi que les phénomènes induits par la géométrie souvent complexe des pièces inspectées. Fournir une solution numérique de la propagation des ondes haute fréquence dans ce type de structures conduit à gérer des procédures de calcul complexes et fastidieuses. Plus particulièrement,

la capacité de définir un réglage approprié aux différentes entrées numériques de la configuration de contrôle est souvent le principal enjeu à relever surtout lorsque l'utilisation du modèle doit faire l'objet d'une intégration logicielle simple et accessible à un utilisateur non numéricien.

Cette tâche apparaît encore plus critique lorsque qu'il s'agit de structures composites stratifiées courbes constitués de plis à matrice époxy et fibres de carbone (PRFC) telles que celles utilisées dans le secteur de l'aéronautique (cf. Fig. 1).



Fig. 1. Configuration cible d'une structure composite courbe formée d'empilement de plis à polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC).

Dans ce contexte, les procédures d'homogénéisation traditionnelles définissent, pour chaque pli, des propriétés mécaniques isotropes transverses [1], [2], dont les orientations anisotropes dépendent de l'orientation des fibres dans l'empilement mais également de la déformation géométrique de la structure incurvée. D'un point de vue informatique, nous devons pouvoir définir l'orientation locale souhaitée en chaque point du maillage de façon suffisamment précise pour rendre compte de la courbure. Pour ces raisons pratiques, un maillage sur-raffiné, pour lequel l'orientation est considérée constante dans chaque cellule, est souvent privilégié. A titre d'exemple, le schéma de la grille associé à une solution de type différences finies telle que proposée dans [3] est illustré Fig. 2 (à droite) pour une orientation oblique des fibres. Les couches ne sont donc pas alignées sur les cellules, ce qui nécessite une grille fine pour modéliser correctement le composite stratifié. En pratique, la présence d'une ondulation de plis telle que celle illustrée Fig. 2 (à gauche) et, plus généralement, d'une distorsion localisée du stratifié, impose de sur-raffiner encore la grille de calcul. De même, la modulation des couches intermédiaires d'époxy (milieu isotrope, épaisseur de 10 à 25 μm) entre couches de carbone homogénéisées (milieu isotrope transverse, épaisseur de 100 à 500 μm) pénalise encore une fois la discrétisation. Il en résulte une limitation drastique des performances de calcul, rendant ainsi difficile l'accès à la modélisation 3D ou à toutes études paramétriques basées sur la simulation.

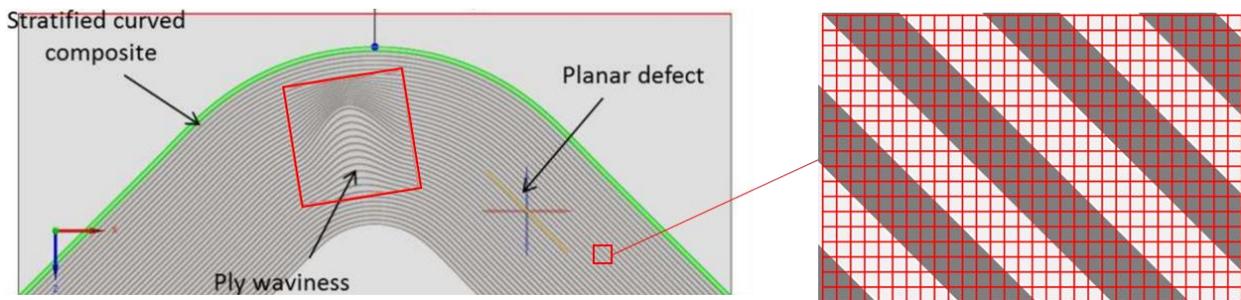


Fig. 2. Configuration d'intérêt 2D d'une pièce composite courbe avec ondulation de pli définie à l'aide de la plateforme logicielle CIVA (à gauche) [3] et illustration de la grille différences finies correspondante (à droite).

Le CEA LIST développe depuis plusieurs dizaines d'années des solutions de modélisation alternatives destinées à être utilisées sur un ordinateur standard (PC) via la plateforme logicielle CIVA. Cette plateforme inclue déjà une solution hybride combinant l'utilisation d'un modèle rayons pour propager le champ source dans le fluide entre l'émetteur et le composite avec une solution différence finies 2D (FDTD) [3] pour propager le champ à l'intérieur de l'empilement. On y trouve également une approche tout rayon considérant une homogénéisation adaptée du stratifié [4] qui reste satisfaisante pour modéliser le contrôle dans un empilement de courbure régulière. Cependant, la perturbation du signal ultrasonore due à une ondulation de couche localisée n'est pas reproduite avec précision et le bruit structurel généré par les couches époxy intermédiaires avec des inspections à haute fréquence ne peut pas être représenté de manière adéquate. D'autre part, la solution FDTD, même accélérée par son hybridation avec le lancer de rayons, souffre des difficultés énoncées ci-dessus dans un stratifié déformé et reste limité à des cas 2D.

Afin de contourner ces limitations, nous avons développé une solution alternative, inspirée des solutions précédentes. Premièrement, elle repose sur une approche hybride entre une méthode rayon dans le fluide et un modèle numérique dans le solide (recouvert d'une fine couche de fluide). Deuxièmement, la continuité de la courbure (et donc de la description des propriétés élastiques au sein de chaque couche) ainsi que la régularité du stratifié avant la déformation sont toutes deux exploitées pour accélérer et alléger la simulation. Cette simulation, réalisée dans le domaine temporel, repose sur l'utilisation de la méthode des éléments spectraux (SEM) [5,6] associée à une méthode de décomposition de domaine spécifique, adaptée ici à la modélisation de stratifiés courbes [7].

Dans ce qui suit, nous présentons en détail la stratégie numérique spécifiquement adaptée à la modélisation des composites stratifiés courbes. Nous donnons d'abord les principes de base des méthodes SEM et de la méthode de décomposition de domaine. Nous introduisons ensuite les principales étapes de la modélisation d'un stratifié courbe de type PRFC, et proposons quelques exemples numériques pour illustrer plusieurs configurations de contrôle par ondes de volume.

2 Outils numériques adaptés à la gestion optimale de structures composites courbes

Une partie importante du travail de modélisation effectué au CEA LIST consiste à proposer une stratégie de calcul numérique basée sur une utilisation spécifique d'éléments spectraux d'ordre élevé [7]. Les performances de calcul globales sont améliorées en considérant une approche de décomposition de domaine structurée en blocs, appelée stratégie macro-éléments ou macro-maillage. Dans un premier temps nous rappelons cette stratégie puis l'étendons aux inspections par ultrasons des structures composites en PRFC, où deux systèmes de coordonnées représentant l'échantillon avant et après sa déformation sont pris en compte, ce qui permet une reconstruction efficace de l'orientation locale des fibres.

2.1 Bases de la méthode spectrale des éléments finis

La méthode SEM repose sur une approche d'interpolation de Lagrange d'ordre élevé dont l'efficacité résulte du choix des degrés de liberté (DDL) au niveau de la quadrature de Gauss-Lobatto sur un élément tensoriel de référence (respectivement le segment unitaire, le quadrilatère et l'hexaèdre en 1D, 2D et 3D comme illustré Fig. 3). Ce choix associé à une indexation spécifique des DDL sur le maillage assure la convergence de l'approximation numérique vers la solution exacte à mesure que l'ordre d'approximation augmente. De plus, cela conduit à une diagonalisation de la matrice de masse et à une factorisation de la matrice de rigidité. A chaque pas de temps du schéma temporel de type saute-mouton, le calcul est explicite (l'inverse de la matrice de masse étant trivial) et le terme de rigidité n'est pas mémorisé mais réassemblé à la volée dans le produit matrice-vecteur accéléré grâce à la factorisation. Ces propriétés sont largement discutées et analysées dans la littérature [5]. Nous soulignons ici simplement le fait que le terme de rigidité porte les propriétés élastiques du milieu et

l'orientation locale de l'anisotropie dans un PRFC courbe. Ainsi, si l'on est capable de formuler explicitement l'orientation de l'anisotropie lors du calcul, il n'est pas nécessaire de stocker les propriétés élastiques du support sur le maillage complet avec la méthode SEM utilisée.

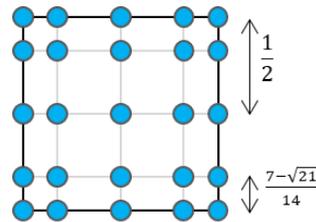


Fig. 3. Points de Gauss-Lobatto du 4^e ordre sur le quadrilatère unité.

2.2 Description de la stratégie macro-maillage

Afin de décrire la scène de calcul numérique, la stratégie proposée se base une méthode de décomposition en sous-domaines structurés par blocs. Le macro-maillage obtenu peut être incurvé et contient à la fois des informations sur les entrées géométriques et physiques. Chaque macro-élément (sous-domaine) correspond à une déformation polynomiale d'un macro-élément de référence (cf. Fig. 4 gauche) et est associé à une formulation unique (couche fluide, solide ou absorbante). Cette idée est similaire à une distorsion de grilles FDTD [8]. La communication entre les macro-éléments est effectuée à l'aide de l'approche mortier [9], qui peut être utilisée pour lier deux macro-éléments avec des formulations différentes, par exemple des formulations acoustiques et élastodynamiques pour les interactions fluide-structure ou des formulations élastodynamiques et des couches parfaitement adaptées (PML) pour modéliser des domaines non bornés. Ensuite, un raffinement structuré de chaque macro-élément assure la précision de la discrétisation SEM par rapport à la longueur d'onde. Les grilles déformées (cf. Fig. 4 à droite) associées à chaque macro-élément sont définies implicitement, ce qui diminue considérablement la charge mémoire globale de la méthode : gain en stockage sur l'indexation des ddl ainsi que sur les coordonnées des nœuds dans le maillage final. Cependant, pour une efficacité optimale, ces coordonnées doivent être stockées tant que les besoins en mémoire le permettent. De plus, une coloration optimale des éléments de la grille est utilisée pour effectuer en parallèle les opérations d'éléments finis non assemblés [10]. Comme expliqué dans l'introduction, l'objectif de cette stratégie est de rendre le code utilisable sur un PC standard.

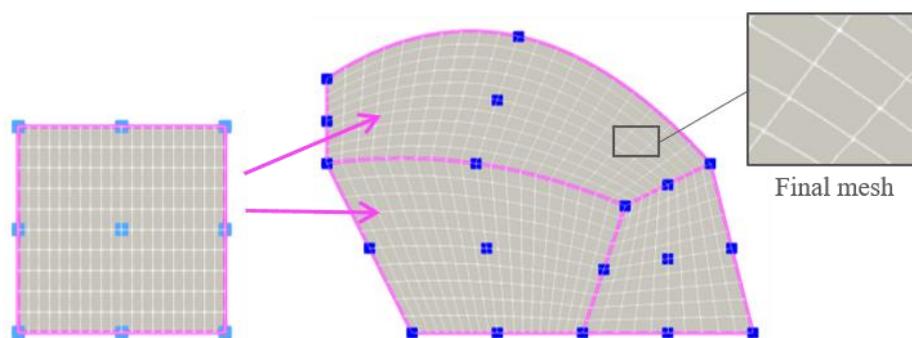


Fig. 4. A gauche le macro-élément de référence avec raffinement structuré et à droite le macro-maillage composé de différents blocs déformés et assemblés entre eux pour constituer la géométrie voulue.

Puisque nous visons à fournir des outils numériques clé en main adaptés aux études paramétriques, nous cherchons à définir des défauts paramétriques à partir desquels sont associés des modèles de maillage spécifiques. Typiquement, une fissure idéalisée est assimilée à une interface entre deux macro-éléments puis est modélisée par élimination du mortier à l'interface correspondante [11]. Des

motifs plus élaborés peuvent être fournis pour décrire des défauts de délaminage et autres trous à fond plat utilisés comme défauts étalon en CND par ultrasons dans l'aéronautique.

2.3 Méthodologie pour la prise en compte des désorientations de plis et de la courbure

Dans la plupart de nos configurations d'intérêt, le maillage 3D est obtenu en extrudant un maillage 2D où chaque macro-élément contient les informations (1D) relatives à la stratification dans son ensemble. A ce stade, l'orientation de l'anisotropie est constante par couche et les propriétés élastiques sont exprimées dans la base $\mathbf{e}_i^\Theta(z) = D\Theta(z)\mathbf{e}_i$ où $D\Theta$ désigne la matrice jacobienne de la rotation Θ associée à la couche et \mathbf{e}_i la base canonique dans le système de coordonnées local x, y, z (cf. Fig 5 de la gauche au centre). En présence d'une courbure, la scène plate équivalente est construite puis déformée selon une autre transformation Φ (cf. Fig 5 du centre vers la droite) telle que l'orientation des fibres, et donc les propriétés élastiques du milieu, sont maintenant exprimées dans la base $\mathbf{e}_i^{\Phi\Theta}(z) = D\Phi(x, y, z) D\Theta(z)\mathbf{e}_i$ où $D\Phi$ désigne la matrice Jacobienne normalisée de la transformée. Cette normalisation est un choix de modélisation visant à garantir que seule la direction de l'anisotropie varie, et non son amplitude. En particulier, un milieu isotrope reste isotrope après déformation. Enfin, une ondulation de couche, comme celle illustrée Fig. 2, peut être obtenue en combinant la déformation globale avec une déformation locale.

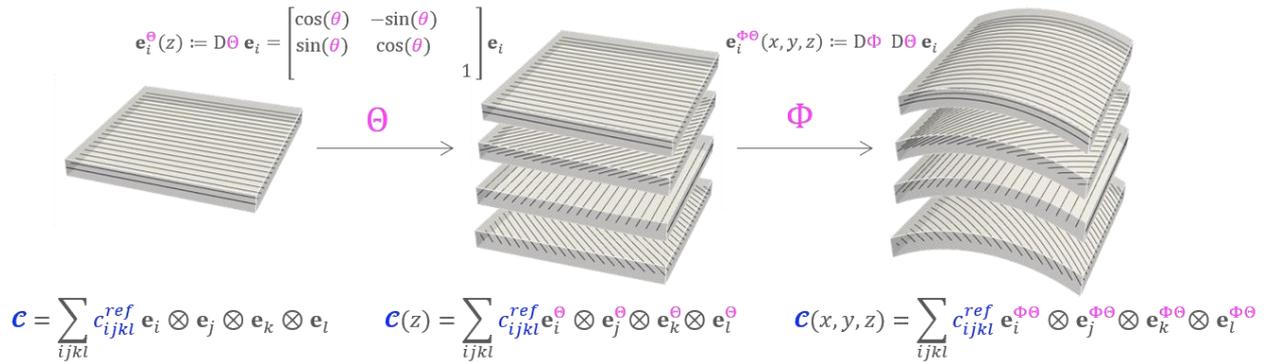


Fig. 5. Définition des propriétés élastiques par rapport à une couche de référence pour la prise en compte des désorientations inter-plis ainsi que de la courbure de la structure.

Du point de vue de la mise en œuvre, nous stockons les deux jeux de coordonnées des nœuds du macro-maillage, avant et après sa déformation, afin de synthétiser les cartographies d'orientation des repères locaux. Cela ne cause aucune difficulté en termes de mémoire car le macro-maillage est (très) grossier. Le passage d'un système à l'autre permet une reconstruction à la volée de l'orientation de la fibre locale en $\mathcal{C}(x, y, z)$ et donc un produit matrice-vecteur de rigidité efficace dans la SEM appliquée au maillage raffiné. Le raffinement du macro-maillage est défini pour correspondre à l'empilement prédéfini où chaque cellule du maillage final n'appartient qu'à une seule couche du stratifié. Des éléments finis d'ordre anisotrope sont utilisés pour réduire l'ordre d'approximation dans l'épaisseur des couches minces afin de ne pas pénaliser la discrétisation spatiale et temporelle. Les PML sont conçues sur la géométrie plate avec une déformation inverse Φ^{-1} pour assurer la stabilité y compris dans les domaines courbes.

3 Simulation de configurations de contrôles ultrasonores sur des composites PRCF

3.1 Description des paramètres utilisés

Nous proposons ici une configuration d'essai dans un échantillon incurvé présentant une ondulation de couche. Le rayon de courbure est d'environ 20 mm et l'épaisseur de la plaque est égale à 7,23 mm. La structure stratifiée comporte 14 répétitions de paires de couches orientées $[0^\circ/90^\circ]$ de 244 μm d'épaisseur avec des couches époxy intermédiaires de 15 μm d'épaisseur (pour un total de $2 \times 14 + 27$ soit 55 couches). Chaque couche est considérée comme un matériau isotrope transverse où la direction de symétrie correspond à l'axe d'alignement de la fibre dont les propriétés sont données Tab. 1.

	Densité (g.cm^{-3})	Composantes de la matrice des rigidités (GPa)								
		C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
Pli	1,6	143,2	15,8	15,8	7,5	7,5	8,2	3,8	7	7
Epoxy	1,23	7,6	7,6	7,6	4,4	4,4	4,4	1,6	1,6	1,6

Tab. 1. Propriétés des composants du PRCF (matrice de rigidité et densité) utilisées pour toutes les simulations.

Lors des simulations, la structure composite est considérée comme complètement immergée dans l'eau. La source est un transducteur circulaire de diamètre 12,7 mm dont la fréquence centrale est, sauf indication contraire, de 2,25 MHz. La sonde est toujours placée à 40 mm au-dessus de la surface du stratifié, comme illustré Fig. 6 en incidence normale (contrôle L0). Sur cette figure, notez que chaque ligne ne correspond pas à la limite entre deux couches mais à une couche époxy intermédiaire de 15 μm qui sera prise en compte dans le maillage.

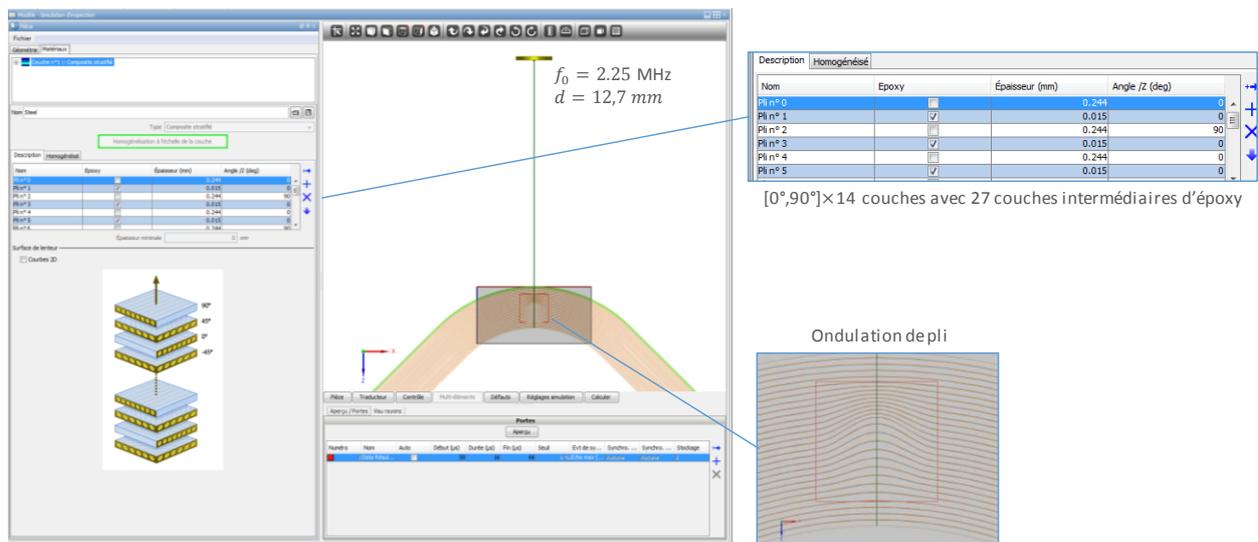


Fig. 6. Illustration des outils d'interface utilisateur CIVA pour la définition des configurations de contrôle simulées.

3.2 Résultats de simulations de contrôle à l'aide de la méthode SEM de CIVA

Le couplage pour mettre en œuvre l'hybridation entre la méthode SEM et la méthode rayon dans CIVA est configuré automatiquement. Comme pour le module FIDEL de CIVA, le champ entrant dans le fluide est calculé par tracés de rayons et la réciprocité est réalisée dans le fluide, à l'interface avec la couche absorbante. Les éléments mortiers gèrent le couplage fluide-solide ainsi que le couplage avec les PML (éventuellement courbes). Quelques instantanés de la solution pour la configuration définie Fig. 6 sont illustrés Fig. 7, où l'agencement des sous-domaines est expliqué à l'aide d'étiquettes pour les domaines et interfaces d'intérêts. Les réponses échographiques de type AScan peuvent être obtenues par application du principe de réciprocité à la même interface qu'est imposé le champ source [12].

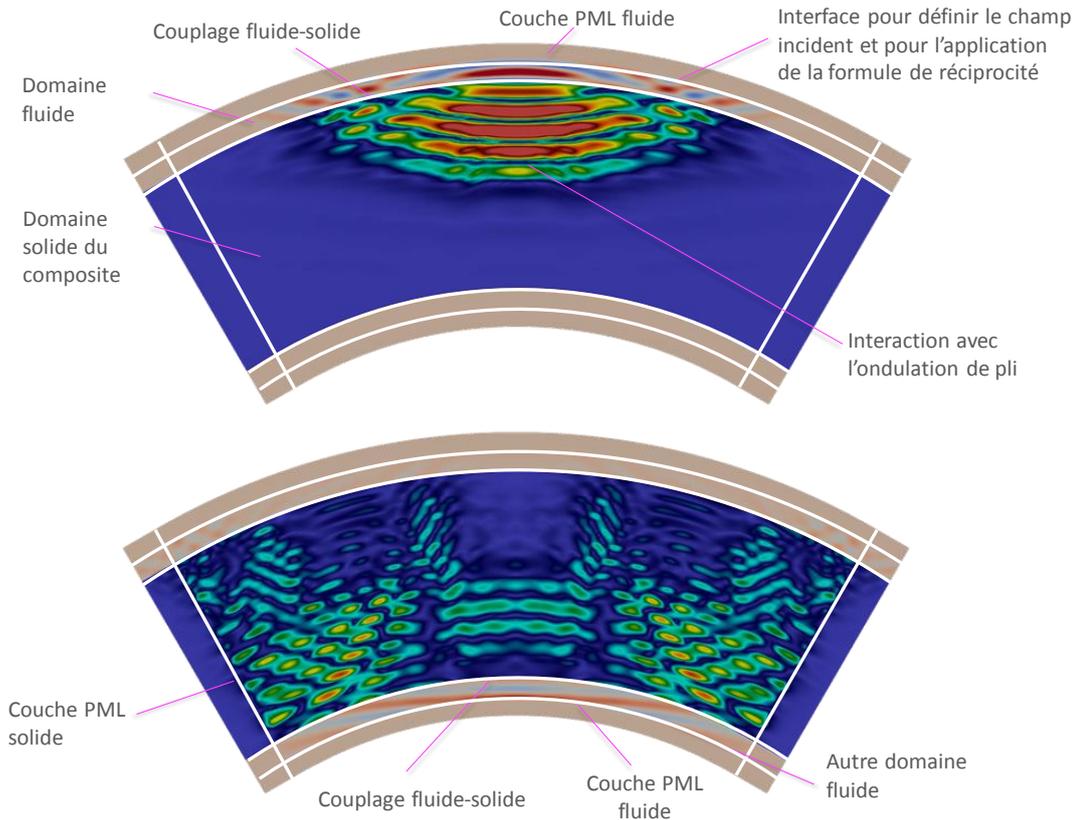


Fig. 7. Instantanés du calcul SEM : les lignes blanches représentent les frontières entre macro-éléments ; différentes palettes de couleur sont utilisées pour représenter la magnitude du champ de déplacement (sous-domaines solides) ou celle du champ de pression (sous-domaines de fluide).

On représente Fig 8 les signaux AScan obtenus avec et sans l'ondulation de plis. Le temps de simulation est fixé afin de simuler 2 allers-retours du front d'onde principal dans l'épaisseur du composite. Le signal sain est simulé en moins d'une minute et celui présentant l'ondulation des couches en 2 minutes (sur un processeur Intel® core™ i7-6820mq - 2,70 GHz). Le nombre d'inconnues est identique d'une simulation à l'autre. L'écart de temps de calcul est dû à l'augmentation du nombre de pas de temps en présence de l'ondulation des plis (le pas de temps étant lié au rapport du plus petit pas de maillage au plus grand).

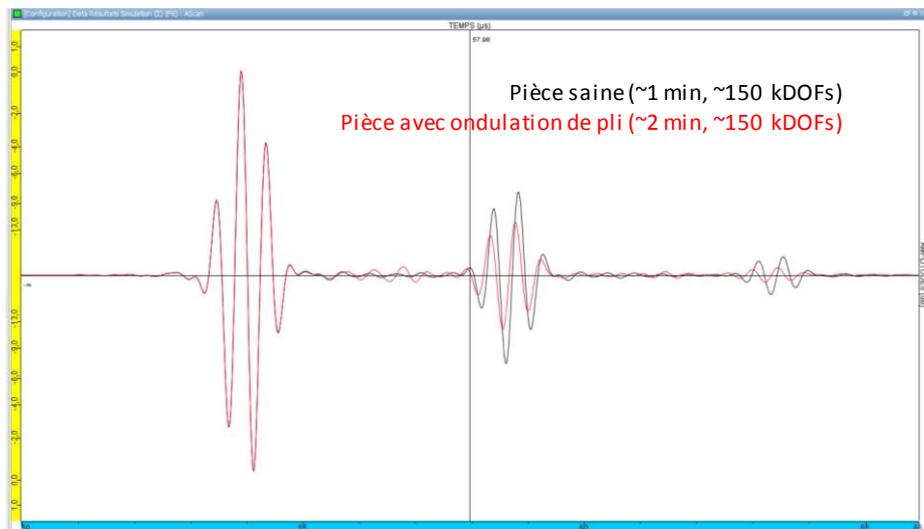


Fig. 8. Signaux AScan de la pièce saine (en noir) et avec ondulation de pli (en rouge).

Ces temps de calcul courts rendent la génération d'images B-Scan, telle que celles présentées Fig. 9, plus facilement accessibles. En comparant les deux images, nous observons que l'ondulation des couches génère peu de rétrodiffusion et n'est donc pas visible directement dans la zone des anomalies. Cependant, sa présence est caractérisée par une perte d'amplitude locale de l'écho de fond de pièce.

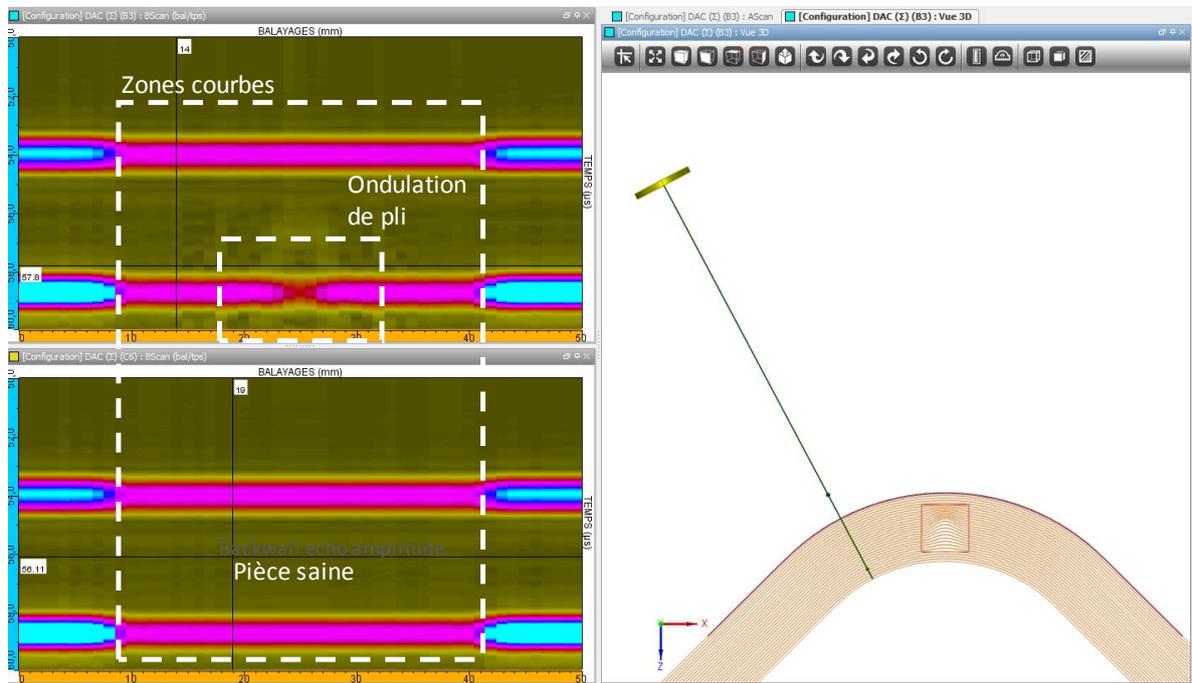


Fig. 9. Images BScan de la pièce saine (en bas) et avec ondulation de pli (en haut) pour un scan du capteur au-dessus de la zone courbe du composite.

Dans une dernière simulation, la fréquence centrale de la sonde a été décalée à 6 MHz afin d'observer un bruit de structure spécifique dû à la présence de couches époxy intermédiaires dans le stratifié. Comme le montre la représentant le AScan obtenu Fig 10, ce phénomène est bien reproduit à l'aide de la solution SEM proposée.

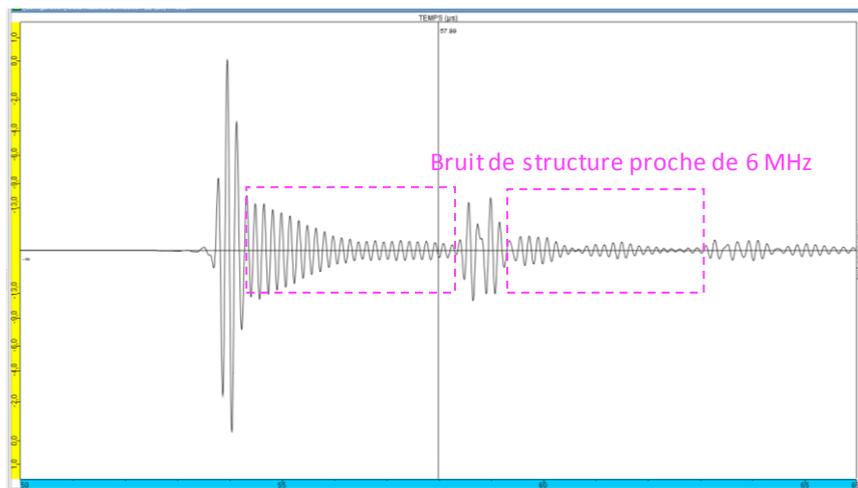


Fig. 10. Signal A-scan de l'échantillon sain en modifiant la fréquence centrale à 6 MHz afin que le bruit de structure dans ce stratifié puisse être observé dans cette bande passante.

4 Perspectives

Dans toutes les simulations présentées, le coût en mémoire n'a pas dépassé 100 ou 200 Mo, ce qui est de bonne augure pour la réalisation de solutions 3D fonctionnelles sur un PC standard. La méthode SEM pour les structures stratifiées 3D avec ondulation de plis est déjà opérationnelle (voir par exemple le cas de test présenté dans [13]) et son intégration dans CIVA est en cours. Il reste en particulier à modifier la mise en œuvre de la formule de réciprocity pour conserver des charges de mémoire raisonnables, car la convolution est effectuée sur des domaines temporels et spatiaux étendus par rapport aux applications SEM précédentes déjà disponibles dans CIVA [12]. Au-delà des développements, le prochain défi sera de confirmer expérimentalement la pertinence du modèle proposé dans un composite incurvé. Par ailleurs, la stratégie de modélisation présentée dans cette contribution est déjà exploitée en 3D pour simuler la propagation d'ondes guidée dans le cadre de la modélisation des applications de surveillance en service de type SHM [14], et un module spécifique est en cours de développement.

Références

- [1] Lonné, S., Lhémy, A., Calmon, P., Biwa, S., and Thévenot, F., 2004, "Modeling of Ultrasonic Attenuation in Uni- Directional Fiber Reinforced Composites Combining Multiple- Scattering and Viscoelastic Losses," *AIP Conference Proceedings*, pp. 875–882.
- [2] Deydier, S., Leymarie, N., Calmon, P., and Mengeling, V., 2006, "Modeling of the Ultrasonic Propagation into Carbon- Fiber- Reinforced Epoxy Composites, Using a Ray Theory Based Homogenization Method," *AIP Conference Proceedings*, pp. 972–978.
- [3] Reverdy, F., Mahaut, S., Dominguez, N., and Dubois, P., 2015, "Simulation of Ultrasonic Inspection of Curved Composites Using a Hybrid Semi-Analytical/Numerical Code," *AIP Conference Proceedings*, pp. 1047–1055.
- [4] Journiac, S., Leymarie, N., Dominguez, N., and Potel, C., 2011, "Simulation of Ultrasonic Inspection of Composite Using Bulk Waves: Application to Curved Components," *Journal of Physics: Conference Series*, p. 012022.
- [5] Cohen, G., 2002, *Higher-Order Numerical Methods for Transient Wave Equations*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [6] Komatitsch, D., and Tromp, J., 1999, "Introduction to the Spectral Element Method for Three-Dimensional Seismic Wave Propagation," *Geophys J Int*, **139**(3), pp. 806–822.
- [7] Imperiale, A., and Demaldent, E., 2019, "A Macro-Element Strategy Based upon Spectral Finite Elements and Mortar Elements for Transient Wave Propagation Modeling. Application to Ultrasonic Testing of Laminate Composite Materials," accepted for publication in *Int. J. Numer. Methods. Eng.*
- [8] Dovgilevich, L., and Sofronov, I., 2015, "High-Accuracy Finite-Difference Schemes for Solving Elastodynamic Problems in Curvilinear Coordinates within Multiblock Approach," *Applied Numerical Mathematics*, **93**, pp. 176–194.
- [9] Belgacem, F. B., 1999, "The Mortar Finite Element Method with Lagrange Multipliers," *Numer. Math.*, **84**(2), pp. 173–197.
- [10] Carrascal-Manzanares, C., Imperiale, A., Rougeron, G., Bergeaud, V., and Lacassagne, L., 2017, "A Fast Implementation of a Spectral Finite Elements Method on CPU and GPU Applied to Ultrasound Propagation," *International Conference on Parallel Computing*, IOS Press, Bologna, Italy, pp. 339–348.
- [11] Imperiale, A., Chatillon, S., Calmon, P., Leymarie, N., Imperiale, S., and Demaldent, E., 2016, "UT Simulation of Embedded Parametric Defects Using a Hybrid Model Based upon Spectral Finite Element and Domain Decomposition Methods," *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, pp. 2184–2189.
- [12] Imperiale, A., Leymarie, N., Demaldent, E., and Fortuna, T., accepted for publication, "Coupling Strategies between Asymptotic and Numerical Models with Application to Ultrasonic Non-Destructive Testing of Surface Flaws," *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*.
- [13] Jezzine, K., Ségur, D., Ecault, R., Dominguez, N., and Calmon, P., 2017, "Hybrid Ray-FDTD Model for the Simulation of the Ultrasonic Inspection of CFRP Parts," *AIP Conference Proceedings*, p. 090016.
- [14] Mesnil, O., Imperiale, A., Demaldent, E., Baronian, V., and Chapuis, B., 2018, "Simulation Tools for Guided Wave Based Structural Health Monitoring," *AIP Conference Proceedings*, p. 050001.