

SIMULATION DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR ULTRASONS

SIMULATION OF ULTRASONIC NON DESTRUCTIVE TESTING

M. Castaings

Université Bordeaux 1 – Laboratoire de Mécanique Physique
UMR CNRS 5469 – 351 cours de la Libération
33400 Talence – France – m.castaings@lmp.u-bordeaux1.fr

Résumé

Un outil de calcul par éléments finis est utilisé pour simuler la propagation d'ondes ultrasonores dans des structures à contrôler. Quelques principes généraux sont rapidement présentés pour mettre en évidence certaines originalités des modèles qui prennent en compte l'anisotropie ou encore la viscoélasticité de matériaux (matériaux composites notamment). Après une validation des procédures de calculs et de traitement des données, dans un cas simple, plusieurs applications dans le domaine des essais non destructifs par ultrasons sont présentées.

Abstract

A numerical tool based on the finite element method is used to simulate the propagation of ultrasonic waves in structures to be tested. Some general principles are briefly presented to show original ways that allow the anisotropy or viscoelasticity of materials to be taken into account (namely composite materials). After a validation case of the prediction and post-processing techniques, different applications in the field of ultrasonic non-destructive testing are presented.

I. INTRODUCTION

Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés (Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc...). Parmi ces tests, on peut distinguer les contrôles non destructifs (CND) et les évaluations non destructives (END). Les premiers concernent la détection, la localisation voire le dimensionnement d'inhomogénéités (craquelures, fissures, délaminages, etc...) pouvant constituer des défauts préjudiciables ou pas, selon certains critères d'acceptabilité et de tolérance aux dommages. Les secondes visent à quantifier certaines propriétés physiques d'un matériau (densité, raideur, perméabilité, etc...) pour s'assurer de sa conformité par rapport à un cahier des charges. Les techniques les plus courantes sont maintenant bien rodées et ont été mises au point pour tester des éléments métalliques, donc isotropes et élastiques. L'emploi de plus en plus répandu des matériaux composites, ou encore le développement des procédés d'assemblages par collage qui suppriment vis, boulons ou rivets, forcent les méthodes de CND/END à évoluer pour s'adapter aux forts changements des milieux. En effet, la plupart des matériaux composites sont anisotropes (raideur plus forte dans le sens des fibres par exemple), viscoélastiques (notamment les matrices à base de polymères) et hétérogènes (fibres, plis). La propagation des ondes ultrasonores est par conséquent bien différente par rapport aux métaux, et les techniques ultrasonores classiques s'avèrent souvent inadaptées : déviation des faisceaux par l'anisotropie, atténuation par effet thermo-viscoélastique, diffraction par les interfaces entre plis, etc... Il est donc indispensable d'ajuster plusieurs paramètres (fréquence, focalisation, positions des palpeurs, milieu de couplage, etc...) pour adapter les procédés de CND/END existants ou encore de redéfinir de nouveaux procédés. Pour cela, deux approches sont possibles : la pratique avec de

nombreux palpeurs et appareils, des échantillons calibrés, et des campagnes de mesures très appliquées et systématiques, ou la simulation numérique avec un outil fiable et performant qui permette de faire varier à souhait tout paramètre du procédé de CND/END à moindre coût. C'est cette seconde solution qui est proposée dans cet article.

La technique de calcul est basée sur la méthode des éléments finis qui, contrairement aux méthodes analytiques ou semi analytiques, permet de définir des géométries complexes de structures ou de défauts. Pour réduire de manière significative les temps de calculs, les problèmes ne sont pas résolus dans le domaine temporel, mais dans le domaine fréquentiel. De plus, des régions absorbantes sont employées pour supprimer les réflexions généralement indésirables par les bords du domaine maillé. Les simulations peuvent être effectuées en deux dimensions (problèmes plans ou axisymétriques) ou en trois dimensions, selon les cas de figure. L'anisotropie, la viscoélasticité ou encore l'empilement de plusieurs couches de matériaux sont pris en compte dans les modèles. Après une présentation rapide des principes fondamentaux de la méthode, un cas de validation est présenté pour démontrer l'intérêt et la fiabilité de l'approche choisie. Ensuite, des exemples de simulations d'applications de CND ou d'END sont montrés pour afficher quelques possibilités de la méthode.

II. PRINCIPES ET PARAMETRAGES DES MODELES EF

A. Calculs dans le domaine des fréquences

La propagation d'une onde ultrasonore traduit la réponse dynamique du milieu (solide ou fluide) à une excitation qui varie au cours du temps. Par conséquent, l'approche la plus naturelle pour simuler cette réponse consiste à résoudre les équations d'équilibre dynamique du milieu dans le domaine temporel, c'est-à-dire entre un instant initial (démarrage de l'excitation) et un instant final qui tient compte de la durée de propagation prévue entre le point d'excitation et le point d'observation, mais aussi de la durée du signal. Pour cela, il est nécessaire de définir un pas temporel qui, dans les modélisations par éléments finis, sera proportionnel à la taille du maillage et inversement proportionnel à la plus grande vitesse des ondes susceptibles de se propager [1]. Généralement, pour les problèmes de propagation ou de diffraction d'ondes ultrasonores (quelques MHz) dans des solides (vitesses de l'ordre de quelques mm/μs), le pas temporel sera souvent inférieur 0.05 μs car la taille des éléments ne peut guère dépasser 1/7^{ème} de la plus petite longueur d'onde. Pour des domaines temporels souvent supérieurs à 200 μs, le nombre d'itérations en temps est alors facilement de l'ordre de plusieurs milliers. Les temps de calculs peuvent donc être assez longs (bien sûr cela dépend de la machine et du *solveur* utilisés), et le changement de données d'entrée (taille du capteur, fréquence, etc...) pour faire des études paramétrées devient difficile.

Une alternative consiste à résoudre les équations d'équilibre dynamique non pas en temps, mais dans le domaine des fréquences. En effet, un signal temporel défini par plusieurs milliers de points peut également être défini par un faible nombre (quelques centaines) de composantes fréquentielles. Les amplitudes complexes du spectre en fréquence contiennent la même information que le signal temporel. À titre d'exemple, la figure 1 montre un signal temporel riche en information défini sur 2010 points, et son spectre en fréquence comportant exactement la même information, mais défini sur seulement 100 points. Ainsi, la résolution en fréquence du problème peut être effectuée avec beaucoup moins d'itérations qu'en temps, et le gain en durée de calcul est très significatif. L'autre avantage de travailler dans le domaine en fréquence est que cela va permettre de définir de manière simple et réaliste les propriétés absorbantes des matériaux. En effet, les modules de rigidité deviennent complexes, $C_{ij} = C'_{ij} + IC''_{ij}$ avec $I^2 = -1$, leurs parties réelles représentant la raideur du matériau et leurs parties imaginaires son pouvoir absorbant dû à la viscoélasticité

(polymères) ou à de la diffusion interne (composites, béton,...). Cela évite le recours à des modèles du type ressorts-amortisseurs ou à des fonctions de relaxation, requis pour les résolutions en temps avec la méthode par éléments finis. De plus, des techniques ultrasonores largement éprouvées existent pour mesurer les modules de rigidité complexes [2, 3] qui servent alors de données d'entrée pour les simulations numériques [4].

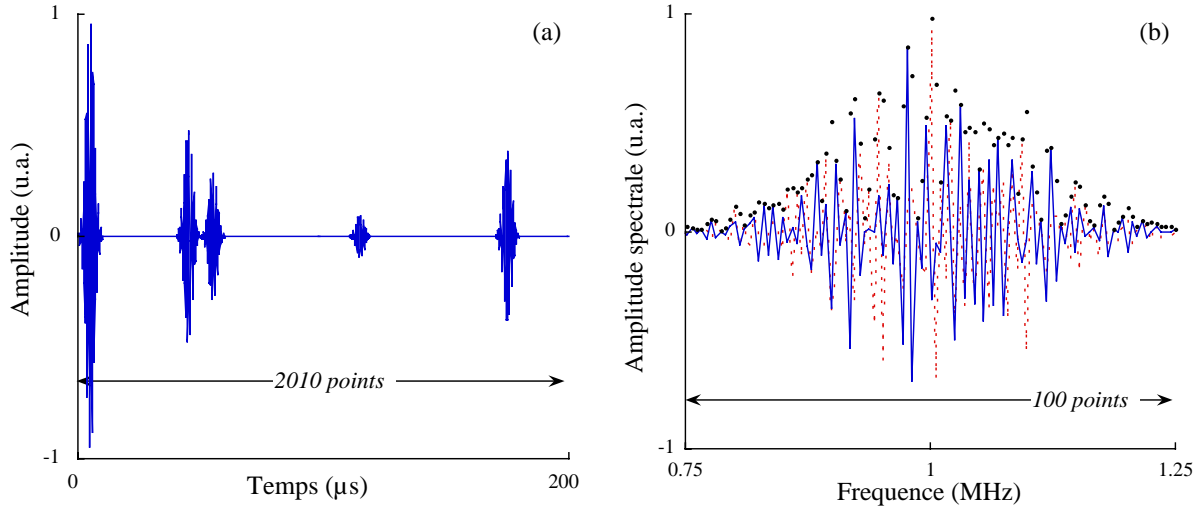


figure 1 – Correspondance entre (a) un signal temporel de fréquence centrale 1MHz défini par 2010 échantillons et (b) son spectre défini par 100 composantes fréquentielles avec (—) partie réelle, (- - -) partie imaginaire et (●●●) module du spectre. Les deux représentations contiennent la même information..

B. Régions absorbantes

La définition simple des caractéristiques viscoélastiques des matériaux, par des modules de rigidité complexes, a permis de mettre au point des régions absorbantes (notées RA par la suite). Placées aux extrémités des domaines maillés, elles suppriment les réflexions par les bords qui sont souvent indésirables lorsqu'on s'intéresse à la propagation dans le milieu ou à la diffraction par un défaut [5], pour mettre au point des procédés de CND/END. Lors de calculs en temps, on peut avoir recours à des régions de type PML (*Perfectly matched layers*) mais celles-ci n'absorbent pas tous les types de modes ultrasonores, et entraînent parfois des instabilités numériques si l'on ne réduit pas le pas temporel [6]. Les régions absorbantes utilisées dans cette étude sont définies à partir d'une augmentation progressive de la viscoélasticité du matériau, selon la loi donnée par la relation suivante :

$$\{C''_{ij}\}_{RA} = \alpha C'_{ij} \left(\frac{x - x_{RA}}{L_{RA}} \right)^3 \quad \text{Eq. 1}$$

où $\{C''_{ij}\}_{RA}$ est la partie imaginaire des modules dans la RA, α est le taux maximal de viscoélasticité atteint à l'extrémité de la RA, x est la position le long de la RA, x_{RA} est la valeur de x au début de la RA et L_{RA} est la longueur de la RA. Les parties réelles des modules de viscoélasticité dans la RA sont les mêmes que dans le reste du domaine, de manière à ne pas créer de rupture d'impédance acoustique forte qui causerait la réflexion des ondes. C'est pour cette même raison que les parties imaginaires des modules sont augmentées progressivement suivant la loi cubique donnée par Eq. 1.

C. Equation, maillage et données d'entrée

Pour traiter un problème de propagation d'ondes ultrasonores dans un solide, il est nécessaire de définir et de résoudre convenablement l'équation d'équilibre dynamique correspondant à ce problème. Deux options se présentent à l'utilisateur : soit il utilise une équation pré implémentée dans le code, soit il l'implémente lui-même. Cette seconde option est plus compliquée, mais elle implique une meilleure maîtrise du problème traité. De plus, elle permettra souvent de considérer l'anisotropie de certains matériaux ou encore des phénomènes de couplage thermo élastiques, dont les équations sont rarement implémentées dans les logiciels commerciaux. Dans tous les cas, il faut savoir choisir l'équation à résoudre dans le domaine, mais aussi définir et écrire les conditions aux limites sur le contour du domaine. Les modèles peuvent être mono, bi ou tri dimensionnels, selon les cas, cela dépendra d'un compromis portant sur la rapidité des calculs et la représentativité souhaitée d'une situation expérimentale réelle. Par exemple, pour simuler la propagation d'une onde de torsion guidée le long d'une canalisation, un modèle axisymétrique à 2 dimensions est généralement suffisant, alors que pour traiter la diffraction d'un faisceau borné par un défaut d'impact dans un composite, il faudra souvent un modèle tridimensionnel. Ces cas de figures sont présentés plus loin.

Il est aussi nécessaire de créer convenablement le maillage du domaine. Les règles issues de l'expérience des utilisateurs sont assez simples et communes : une dizaine d'éléments linéaires (ordre 1) ou cinq éléments quadratiques (ordre 2), par plus petite longueur d'onde, sont nécessaires de manière à bien représenter toute déformation spatiale. Cela implique qu'il est nécessaire d'avoir une idée des ondes susceptibles de se propager dans le domaine et surtout de l'ordre de grandeur de leur longueur d'onde (rapport vitesse / fréquence). Ces données n'étant pas toujours précisément connues, on peut définir la limite basse des longueurs d'ondes en supposant que la vitesse ne sera jamais inférieure à 1 mm/ μ s (cas de la majeure partie des solides), la fréquence étant elle systématiquement connue. Ainsi, on borne par valeur inférieure le domaine des longueurs d'ondes, ce qui permet de créer un maillage adapté. Toutefois, une idée réaliste de la plus petite vitesse permettra de ne pas borner le domaine des longueurs d'ondes par une valeur exagérément faible, ce qui favorisera le choix d'un nombre optimal d'éléments, et minimisera donc le temps des calculs. Le choix du type d'élément est très large : élément triangulaire, rectangulaire, losange, segment, membrane, tétraédrique, cubique, ... et va dépendre de la dimension (1, 2 ou 3) du problème et des géométries du domaine ou des défauts (plan, courbe). L'expérience des utilisateurs et les nombreuses publications aident à faire ce choix [7].

Les données d'entrées sont un autre aspect de la préparation du modèle. Il faut affecter des valeurs numériques aux quantités non issues de la simulation, et qui font partie de la définition du problème. Par exemple, les caractéristiques mécaniques du milieu (masse volumique, raideur, viscoélasticité, compressibilité, viscosité, ...), les propriétés électriques (constantes piézoélectriques, diélectriques, impédance, ...) ou encore les conditions ambiantes (température, pression, humidité, ...). On peut toujours partir de valeurs arbitraires ou approximatives, mais il est évidemment préférable d'avoir recours à une évaluation quantitative préalable des paramètres requis, pour une simulation plus réaliste. Pour les problèmes de propagation d'ondes ultrasonores en vue d'applications de CND/END (objectif de cet article), les caractéristiques des solides isotropes ou anisotropes, élastiques ou viscoélastiques étudiés sont préalablement mesurées par une technique ultrasonore à immersion largement éprouvée [2, 3]. Les modules de rigidité, de viscoélasticité, d'Young ou coefficients de Poisson sont ainsi mesurés, en régime dynamique, puis utilisés comme données d'entrée pour simuler la propagation ou la diffraction d'ultrasons dans la structure à tester.

D. Post-traitement des données simulées

Le mode d'affichage des données simulées joue un rôle important dans l'interprétation des résultats. Pour les problèmes de propagation d'ondes ultrasonores, on peut choisir, par exemple, de représenter un signal temporel en un point donné de la structure. Cela correspond assez bien aux conditions expérimentales où un capteur de petite taille détecte les ultrasons et transmet les signaux correspondants vers un oscilloscope. L'estimation des temps de vols ou des amplitudes des échos est alors possible. A partir d'un modèle EF résolu dans le domaine des fréquences, les signaux temporels s'obtiennent facilement et rapidement en appliquant une transformée de Fourier inverse sur l'ensemble des réponses harmoniques simulées au point d'observation. Toutefois, on peut aussi choisir d'afficher une grandeur (par exemple déformation, contrainte, température, ...) simulée à une seule fréquence et en tous les points de la structure. Ainsi, on obtient une information sur la distribution spatiale de cette grandeur, en régime entretenu. Cette approche est complémentaire à l'affichage temporel, et peut s'avérer très utile pour optimiser des techniques de CND/END, comme par exemple la shearographie.

Des techniques de post-traitement plus compliquées existent pour une analyse plus approfondie des phénomènes de propagation ou de diffraction d'ondes ultrasonores. Elles sont souvent nécessaires pour optimiser des procédés de CND/END de structures composites complexes. On peut citer par exemple la technique de double transformée de Fourier [8], bien connue des spécialistes du domaine, qui s'applique à un ensemble de signaux temporels simulés (ou mesurés lors d'expériences) le long du chemin de propagation. Elle permet d'obtenir les vitesses et les amplitudes de toutes les ondes ultrasonores présentes dans le système, et par conséquent d'établir les coefficients de réflexion ou de transmission pour une inhomogénéité du milieu, qui sont des quantités généralement ciblées pour caractériser les défauts. Si les simulations sont effectuées dans le domaine des fréquences, alors la double transformée se réduit à une seule transformée [4], et les informations obtenues sont les mêmes. Plus récente, une technique basée sur l'orthogonalité des ondes ultrasonores guidées permet d'accéder aux mêmes informations [9]. Par rapport à la méthode précédente, elle présente l'avantage important de ne pas nécessiter de relever les données le long du chemin de propagation, mais uniquement à travers l'épaisseur du guide d'onde. Cela a une conséquence directe sur la taille des modèles EF, et permet de réduire par un facteur compris respectivement entre 2 et 4 ou entre 4 et 16 des modèles bidimensionnels ou tridimensionnels. Cette méthode peut aussi bien être employée pour traiter des résultats de simulations en temps ou en fréquence.

E. Validation du modèle

Le logiciel utilisé pour cette étude est un produit commercial qui permet de simuler des problèmes statiques ou dynamiques, dans les domaines temporels ou fréquentiels [10]. Un grand nombre d'équations est pré implémenté pour des études de mécanique, de physique, de chimie, d'électromagnétisme, etc... mais il est aussi possible de résoudre des équations aux dérivées partielles dont les coefficients sont définis par l'utilisateur, ce qui apporte une grande flexibilité quant à la définition du problème à traiter [4, 11].

Le cas de validation traité ici concerne la réponse temporelle d'une plaque composite en carbone époxyde de 1 mm d'épais et 100 mm de long, à une excitation appliquée à l'une de ses extrémités (figure 2). Le modèle est bidimensionnel et l'hypothèse de déformations planes est faite (ε_{i3} avec $i = 1, 2, 3$). Les propriétés mécaniques de ce matériau anisotrope et viscoélastique sont définies dans le repère (x_1, x_2) et données dans la table 1.

ρ (kg/m ³)	C_{11} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{66} (GPa)
1500	60 + I 1.8	12 + I 0.4	9 + I 0.3	5 + I 0.1

table 1 – Propriétés mécaniques du composite anisotrope viscoélastique simulé pour le cas de validation.

L'excitation est une force à deux composantes F_1 et F_2 uniformes dans l'épaisseur de la plaque, de manière à générer les deux modes fondamentaux A_0 et S_0 guidés le long de la plaque avec des vitesses et amplitudes différentes. Cette excitation varie dans le temps suivant une sinusoïde de 4 périodes et de fréquence centrale 0.5 MHz, enveloppée par une fenêtre gaussienne. On s'intéresse aux signaux temporels prédits en surface de la plaque, à 25 mm de distance de l'excitation.

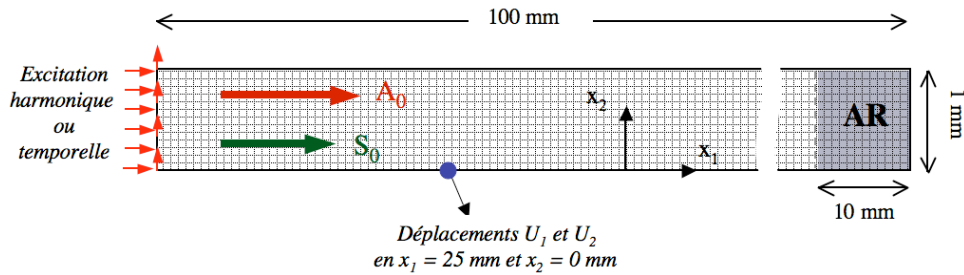


figure 2 – Schéma du modèle de validation

L'objectif est double :

a) Confronter les réponses temporelles du guide élastique en résolvant les équations d'une part dans le domaine temporel (500 itérations), puis d'autre part dans le domaine des fréquences (19 itérations) avec transformée de Fourier inverse pour reconstruction du signal temporel. La figure 3.a présente les déplacements U_2 (direction x_2) simulés avec les deux approches, et montre bien que les deux modèles fournissent les mêmes résultats lorsque le matériau est élastique. Il est intéressant de mentionner que la résolution en fréquence a duré environ 100 fois moins longtemps que la résolution en temps. Les deux modes A_0 et S_0 sont simulés avec des vitesses et amplitudes correctes, mais leur atténuation due à la viscoélasticité du matériau n'a pas été prise en compte.

b) Prédire l'effet de la viscoélasticité du matériau sur la réponse temporelle du guide. Ceci est effectué en résolvant les équations dans le domaine des fréquences, qui permet de prendre en compte la viscoélasticité de manière réaliste, comme expliqué précédemment. Une transformée de Fourier inverse est ensuite appliquée pour reconstruction du signal temporel. La figure 3.b compare les déplacements U_2 prédits sans puis avec viscoélasticité. Il est clair que même pour une courte distance de propagation (25 mm), l'effet sur l'amplitude des ondes (notamment du mode A_0) est significatif. Il faut donc prendre en compte cette caractéristique des matériaux composites (ou des polymères en général) pour simuler et préparer convenablement des procédés de CND/END. A noter que la même définition de modules de raideurs complexes convient pour simuler une atténuation non pas due à la viscoélasticité, mais à de la diffusion sur la structure interne du matériau tel que par exemple sur la porosité ou la granulosité du béton ou de la fonte.

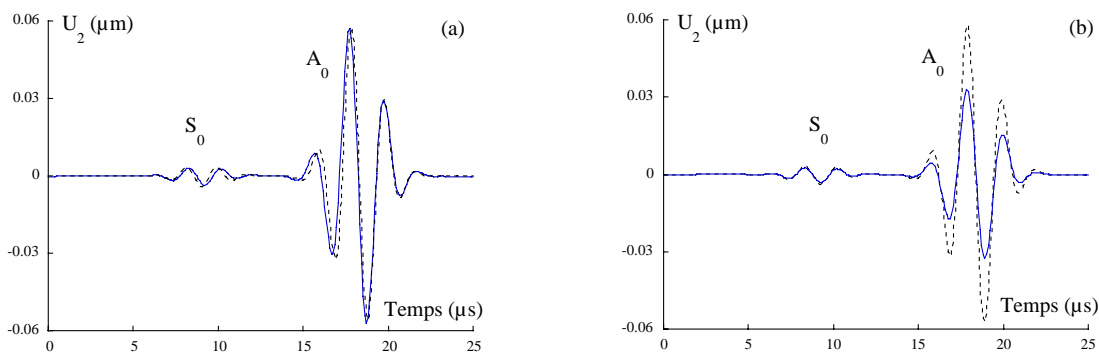


figure 3 – Réponse temporelle en un point de la surface de la plaque anisotrope ; (a) matériau élastique avec résolution (---) en temps et (—) en fréquence ; (b) résolution en fréquence pour (---) matériau élastique et (—) matériau viscoélastique.

En appliquant le traitement par transformée de Fourier [8] évoqué précédemment sur un ensemble de déplacements relevés le long du chemin de propagation, il est possible de quantifier les vitesses de phase et les atténuations de ces ondes, dans le domaine en fréquence de l'excitation [0.2-0.7] MHz. La figure 4 confronte ces valeurs aux courbes de dispersion calculées avec un logiciel annexe, basé sur des solutions semi analytiques. Le très bon accord entre les deux groupes de résultats démontre la qualité du modèle EF, et valide également le procédé de traitement des données simulées par EF.

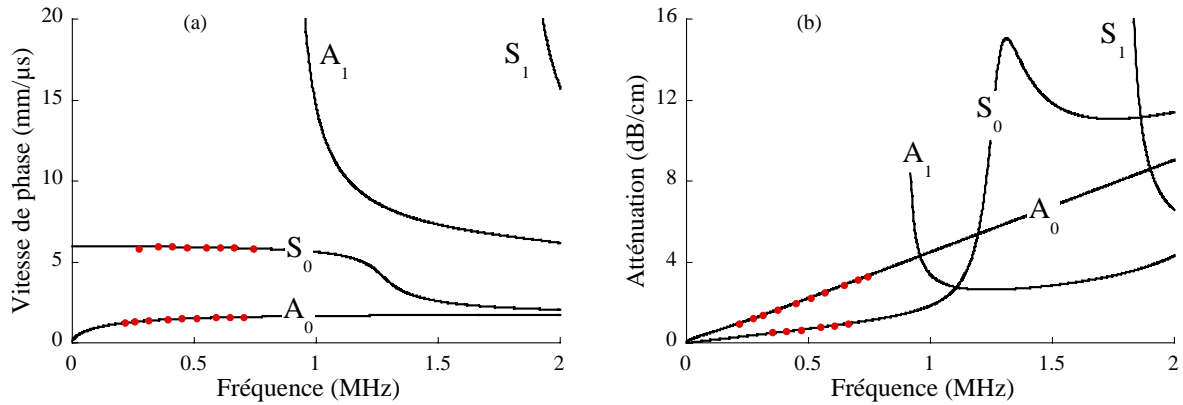


figure 4 – Comparaison entre (—) courbes de dispersion et (•••) résultats de simulation EF + post-traitement par transformée de Fourier ; (a) vitesses de phase et (b) atténuation.

III. SIMULATION DU CONTROLE NON DESTRUCTIF

L'objet de cette section est de présenter un certain nombre de résultats de simulations par EF de divers procédés de CND/END. Les modèles s'appuient sur les explications de la section précédente, donc seules les données d'entrée et quelques commentaires des résultats seront donnés ici.

A. Ultrasons en immersion aqueuse

Cette étude concerne la simulation d'un procédé traditionnel de contrôle par ultrasons, qui consiste à immerger les transducteurs (généralement des éléments piézoélectriques) et la pièce à tester. Le champ de pression dans l'eau produit par un émetteur de diamètre 25 mm est simulé à une fréquence de 0.3 MHz. Une plaque composite d'épaisseur 5 mm est placée dans le champ du faisceau ultrasonore, perpendiculairement à son axe. Le champ ultrasonore transmis par cet échantillon est alors prédit pour deux situations : (1) la plaque est saine et (2) la plaque comporte un défaut de type délaminage parallèle à ses surfaces de longueur 5 mm et largeur 1 mm. La figure 5 illustre le modèle EF bidimensionnel mis en œuvre avec les régions absorbantes, l'échantillon solide immergé dans l'eau et les zones d'excitation et de détection des ultrasons.

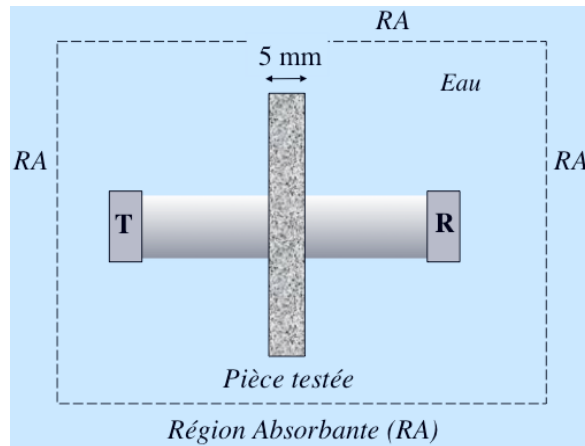


figure 5 – Schéma du modèle de simulation de CND ultrasonore par immersion.

La figure 6 présente les champs ultrasonores simulés, à 0.3 MHz, sans et avec défaut dans la plaque. Avec près de 800000 degrés de liberté, chaque calcul a duré environ 4 minutes, mais malgré cela, on envisage aisément l'intérêt d'un tel modèle pour définir par exemple la plus petite taille de défaut décelable, ou encore pour optimiser le choix des capteurs (taille, focalisation, fréquence, ...).

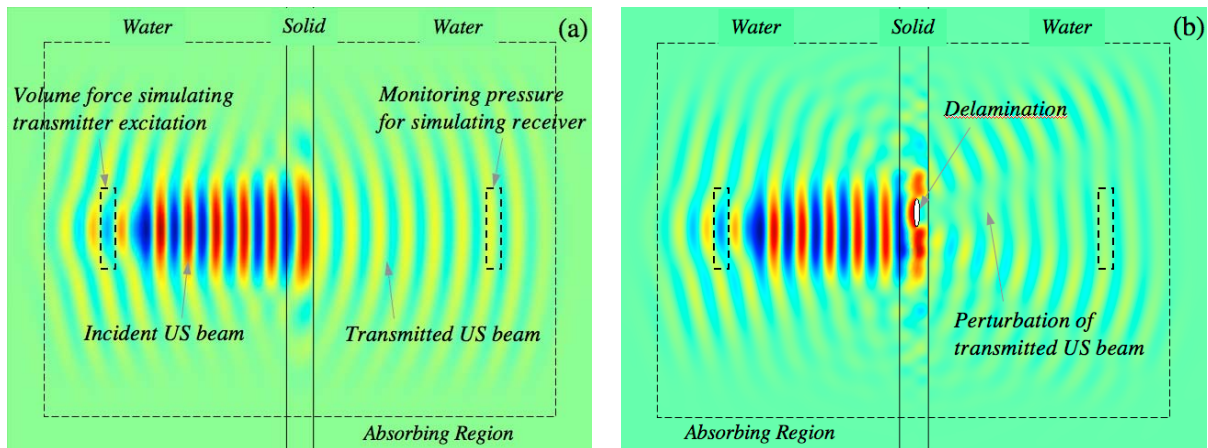


figure 6 – Transmission d'un faisceau ultrasonore par une plaque composite immergée dans de l'eau ; (a) sans défaut et (b) avec défaut de type délaminage.

B. Modes de torsion

1. Détection d'obstructions dans les tubes

Cette application concerne l'utilisation d'une onde de torsion fondamentale (T_{01}) guidée le long d'un tube en aluminium pour la détection d'un bouchon. Cette obstruction indésirable est constituée d'un matériau isotrope mais viscoélastique dont les propriétés mécaniques sont assimilées à celle de l'époxy [11]. Deux objectifs sont ciblés par la modélisation EF : (1) montrer que l'onde torsion peut détecter le bouchon et (2) quantifier l'effet de la viscoélasticité du bouchon sur les ondes ultrasonores détectées lors du contrôle. Pour simuler la propagation de l'onde de torsion fondamentale, un modèle axisymétrique suffit et les seules caractéristiques mécaniques requises sont la masse volumique et le module de Lamé μ . On prendra, $\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 26.45 \text{ GPa}$ pour l'aluminium, puis $\rho_{Epoxy} = 1170 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 1.2 + i 0.06 \text{ GPa}$ pour le bouchon viscoélastique. La figure 7.a montre un schéma du modèle EF avec un tube de rayon intérieur 8.2 mm et d'épaisseur 1.4 mm. Des régions absorbantes sont définies pour simuler un cylindre infiniment long et un bouchon semi infini. Toutefois, une longueur de 1,3 m de tube (hors RA) est simulée. L'onde de torsion est excitée en surface du cylindre par une contrainte de cisaillement semblable à

celle que pourrait produire un ensemble de traducteurs à ondes transverses disposés en couronne autour de la circonférence [12]. Elle est incidente depuis une région saine du tube et va être partiellement réfléchi par le bouchon.

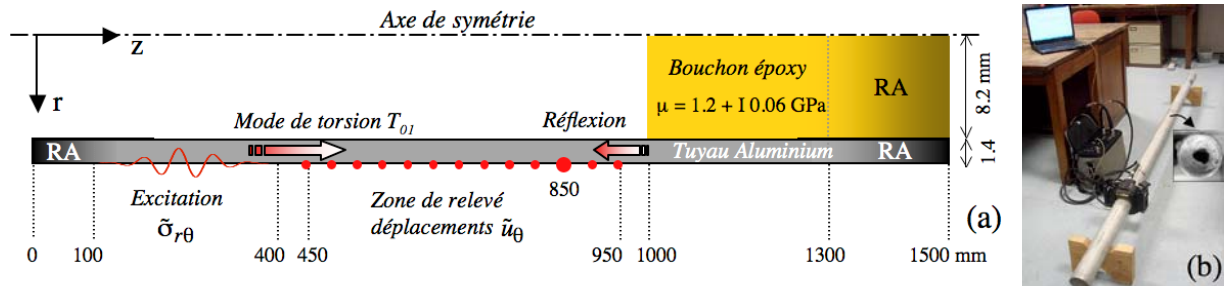


figure 7 – (a) Modèle de l'onde de torsion pour détecter un bouchon viscoélastique dans un tube en aluminium ; (b) Photo du montage expérimental (Imperial College London) avec zoom sur section partiellement bouchée.

Les calculs sont effectués pour 253 fréquences qui correspondent au spectre d'un signal temporel très bref utilisé par les partenaires anglais de cette étude [13], lors de mesures expérimentales (figure 7.b). Avec seulement 28000 degrés de liberté, les simulations pour toutes ces fréquences ont duré environ 10 minutes. La figure 8.a présente les coefficients de réflexion (rapport d'amplitudes entre les ondes de torsion réfléchi et incidente) en fonction de la fréquence, mesurés puis calculés sans et avec prise en compte de la viscoélasticité du bouchon. Les valeurs significatives de ce coefficient indiquent que l'onde de torsion T_{01} peut détecter ce type de bouchon. L'effet de la viscoélasticité sur le calcul de ce coefficient est très net, et sa bonne prise en compte par le modèle est confirmée par l'expérience. La figure 8.b-c présente les signaux temporels obtenus en appliquant une transformée de Fourier inverse sur les spectres calculés de la figure 8.a. La viscoélasticité du bouchon a pour effet de diminuer la résonance du signal réfléchi, mais cet effet est moins net que dans le domaine en fréquence.

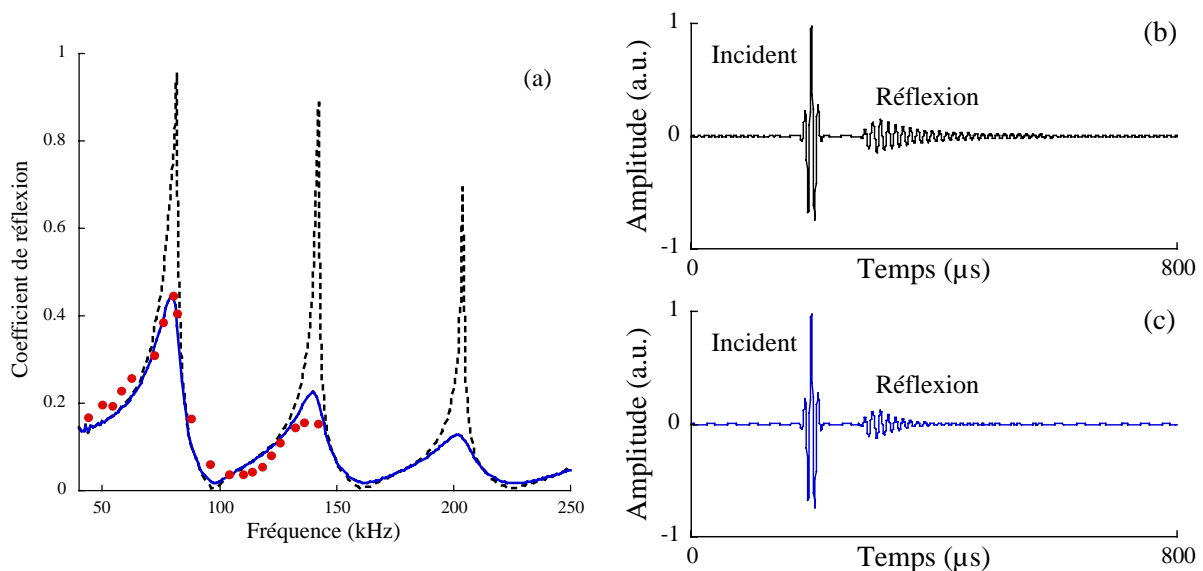


figure 8 – Réflexion d'une onde de torsion par un bouchon dans un tube en aluminium ; (a) coefficient en fréquence calculé sans (- -) ou avec (—) viscoélasticité du bouchon et (•••) mesures ; Signaux temporels (b) sans et (c) avec viscoélasticité du bouchon.

2. Détection de corrosion cachée dans les canalisations

Cet exemple montre que l'onde de torsion T_{01} peut également servir à détecter des défauts de corrosion dans des zones cachées et inaccessibles. Il s'agit ici de détecter un défaut de

corrosion dans un tuyau en fonte, ce défaut étant situé derrière un mur en béton traversé par le tuyau (figure 9.b). La nature granulaire de la structure interne de la fonte provoque une atténuation des ultrasons, même à basse fréquence (< 200 kHz) si la propagation s'effectue sur des longues distances (> 1 m) [11]. Les simulations EF menées lors de cette étude sont schématisées par la figure 9.a. L'onde de torsion incidente est excitée de la même manière que dans l'étude précédente, depuis la partie accessible du tuyau. Elle doit également être détectée dans cette partie accessible. Le signal d'excitation est une salve temporelle de 5 cycles, de fréquence centrale 100 kHz et enveloppée par une fenêtre gaussienne. Il comporte de l'énergie entre 80 et 120 kHz. Le tuyau a un diamètre interne de 50 mm et une épaisseur de 5 mm. Le mur en béton fait 20 cm d'épaisseur et est considéré comme infiniment grand dans les directions perpendiculaires à l'axe du tube. Du point de vue mécanique, on considère qu'il y a couplage entre ces deux éléments, c'est-à-dire que le béton est en contact avec le tube, ce qui permet aux ondes ultrasonores guidées le long du tube de perdre de l'énergie par rayonnement dans le béton. Ce phénomène peut être préjudiciable pour le CND si l'onde perd trop de son énergie.

Pour simuler la propagation de l'onde de torsion, son rayonnement dans le mur et sa diffraction par le défaut, un modèle axisymétrique suffit et les seules caractéristiques mécaniques requises sont la masse volumique et le module de Lamé μ . On prendra, $\rho_{\text{fonte}} = 7850 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 45 + i0.45 \text{ GPa}$ pour la fonte, puis $\rho_{\text{béton}} = 2300 \text{ kg/m}^3$ et $\mu_1 = 16 + i0.3 \text{ GPa}$ et $\mu_2 = 18 + i0.4 \text{ GPa}$ pour le béton qui, après caractérisation de plusieurs échantillons, a révélé une légère anisotropie qui justifie deux valeurs différentes de μ suivant la direction radiale ou axiale (r et z sur la figure 9.a). Les parties imaginaires de ces modules μ représentent les pouvoirs absorbants aux ultrasons des matériaux. Le défaut est simulé par une chute de 90% des propriétés mécaniques (ρ et μ) de la fonte, dans une région située juste derrière le mur, de 8 mm de long suivant z , et de 3 mm de profond suivant r à partir de la surface extérieure du tuyau. Ce défaut est axisymétrique et simule les conséquences possibles de la présence d'eau tout autour du tuyau, par exemple en provenance d'un suintement régulier le long du mur.

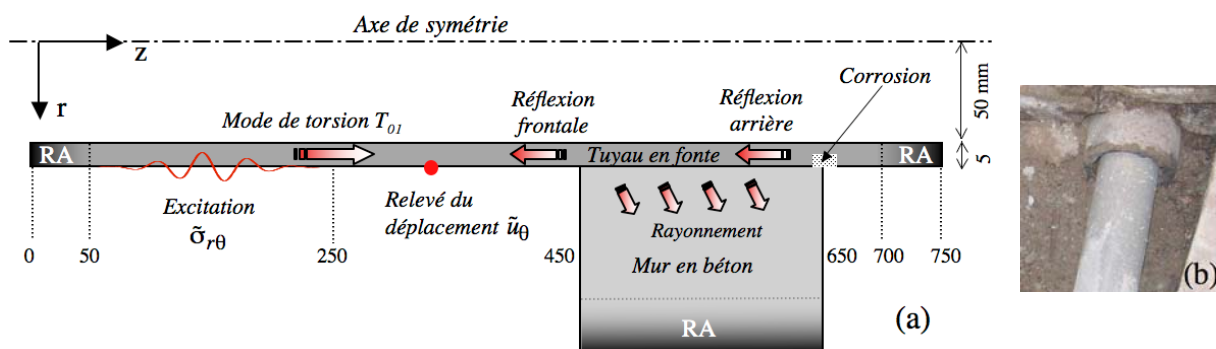


figure 9 – (a) Modèle de l'onde de torsion dans un tuyau en fonte pour détecter une zone corrodée cachée derrière un mur en béton ; (b) photographie d'un cas type.

Les simulations EF ont plusieurs objectifs :

- Prédire si l'onde de torsion continue sa course le long du tuyau lorsque celui-ci traverse le béton, et avec une amplitude significative ou trop diminuée par l'effet de rayonnement.
- Prédire si un défaut de corrosion situé derrière le mur peut être détecté par cette onde.
- Quantifier l'effet de l'absorption par la fonte sur les réponses fréquentielles et temporelles, au niveau d'un point de mesure situé dans la zone d'accès du tuyau.

Les simulations numériques ont montré que deux réflexions de l'onde de torsion étaient produites : l'une en provenance de la jonction entre le tuyau et la face avant du mur (appelée

réflexion frontale) et l'autre en provenance de la jonction entre le tuyau et l'arrière du mur (appelée *réflexion arrière*). La figure 10.a présente un coefficient de réflexion défini par le rapport entre l'amplitude de la réflexion arrière (endroit où se situe l'éventuelle corrosion) et l'amplitude de l'onde incidente, en fonction de la fréquence et en la position $z = 275$ mm en surface du tuyau (figure 9.a). Depuis la zone d'excitation à ce point d'observation, l'onde de torsion a donc parcouru environ 775 mm. La prise en compte du pouvoir absorbant de la fonte a un effet très significatif puisqu'on peut observer une différence de l'ordre de 8 dB entre les calculs de ce coefficient (avec ou sans corrosion) avec constante de Lamé réelle ou complexe, et pour une distance de propagation inférieure à 1 m. Les calculs effectués avec défaut de corrosion indique une augmentation du coefficient de réflexion d'environ 6 dB, par rapport aux calculs faits sans corrosion. Ceci montre que l'onde de torsion est bien sensible à la présence du défaut simulé, et qu'un point de mesure situé dans la région accessible du tuyau permet de détecter un défaut caché derrière le mur.

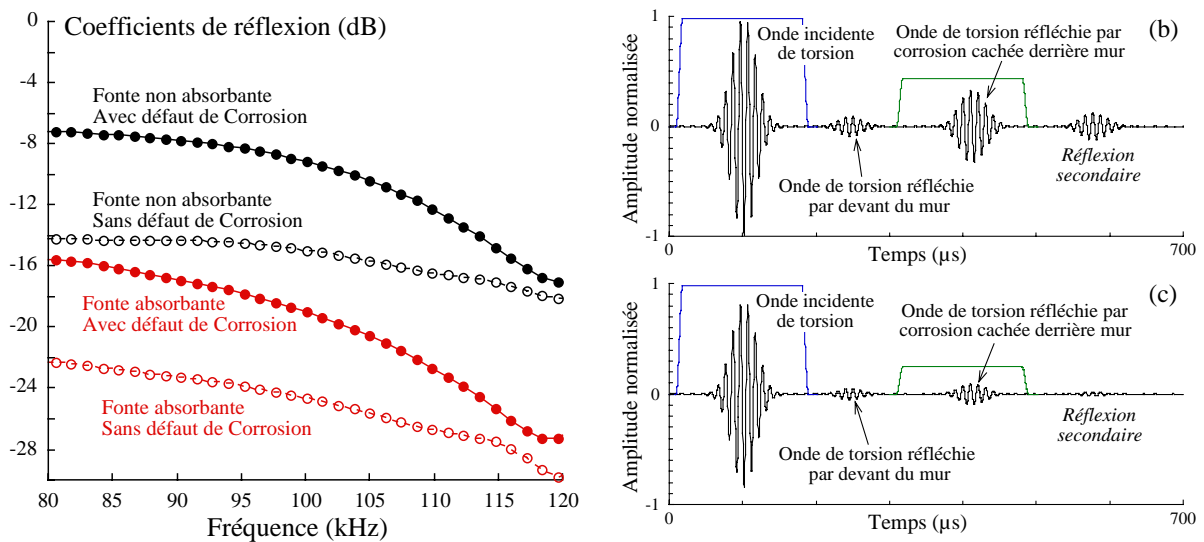


figure 10 – Réflexion d'une onde de torsion dans un tuyau en fonte par un défaut de corrosion caché derrière un mur de béton ; (a) coefficient en fréquence calculé sans (noir) ou avec (rouge) absorption par la fonte puis sans (ooo) ou avec (●●●) corrosion ; Signaux temporels avec corrosion (b) sans et (c) avec absorption par la fonte.

La figure 10.b-c présente les signaux temporels reconstruits par transformée de Fourier inverse, dans le cas où la corrosion est présente, mais (b) sans et (c) avec prise en compte du pouvoir absorbant de la fonte. Ces signaux montrent clairement l'onde incidente ainsi que les réflexions frontale ou arrière, et confirment la nécessité de prendre en compte l'absorption des ultrasons par la fonte pour modéliser correctement et optimiser une procédure de détection de corrosion par onde de torsion. A noter, avec seulement 25357 degrés de liberté, ces calculs ont duré environ 35 secondes pour l'ensemble des 43 fréquences constituant le spectre de l'excitation.

C. Diffraction d'ondes ultrasonores par des défauts de plaques

1. Transmission 2D d'ondes guidées par une rainure

Cette étude concerne la réponse fréquentielle à une onde guidée fondamentale antisymétrique (mode de Lamb A_0) d'une rainure de 4 mm de large et 1 mm de profond située en surface d'une plaque en PVC de 4 mm d'épais (figure 11).

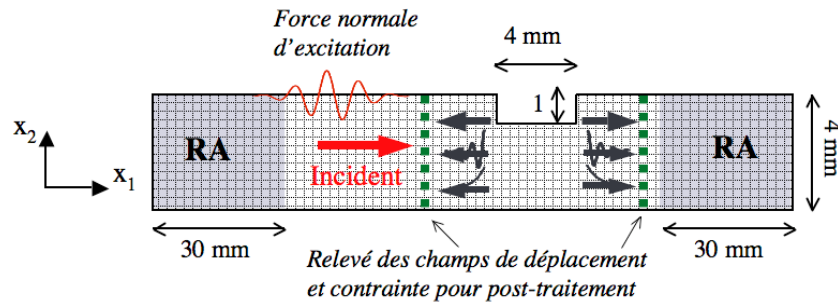


figure 11 – Schéma du modèle 2D ondes guidées transmises par une rainure.

Le modèle est bidimensionnel avec une hypothèse de déformations planes, ce qui implique une rainure et des faisceaux ultrasonores infiniment grands dans la direction x_3 . Les propriétés mécaniques de ce matériau isotrope et viscoélastique sont définies dans le repère (x_1, x_2) et données dans la table 2. Pour simuler la rainure, ces propriétés mécaniques sont multipliées par un facteur extrêmement petit (10^{-12}) dans la zone de 4 mm de large et 1 mm de profond. Cette procédure est très commode car elle permet de varier facilement la géométrie de cette inhomogénéité pour construire par exemple des courbes paramétrées en fonction de ses dimensions.

ρ (kg/m ³)	C_{11} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{66} (GPa)
1450	$7.7 + i0.2$	$7.7 + i0.2$	$4.4 + i0.13$	$1.65 + i0.035$

table 2 – Propriétés mécaniques du composite anisotrope viscoélastique avec rainure.

L'excitation est une force normale appliquée en surface de la plaque et représentative du champ de pression qui pourrait être produit par un transducteur ultrasonore à couplage par air. Elle est définie de manière à générer le mode fondamental A_0 pur guidé le long de la plaque. Cette excitation comporte plusieurs fréquences comprises entre 0.2 et 0.35 MHz. On s'intéresse aux modes transmis par la rainure qui, par phénomène de conversion modale, peuvent être au nombre de trois : A_0 , S_0 et A_1 . Plus spécifiquement, on va se focaliser sur les coefficients de transmission énergétique de ces modes, qui représentent les rapports entre leur énergie respective et celle de l'onde incidente A_0 . Pour obtenir l'énergie de chacun des modes, incident ou transmis, un post-traitement spécifique basé sur l'orthogonalité des modes de Lamb est employé [9].

Pour valider ces prédictions numériques, des mesures expérimentales ont été effectuées avec une plaque en PVC (figure 12.a). L'onde incidente A_0 et les ondes transmises par la rainure ont été respectivement générées et détectées à l'aide de capteurs ultrasonores à couplage par air [14]. La rainure a été usinée sur toute la largeur de la plaque de manière à respecter les conditions de déformations planes du modèle. La forte directivité des capteurs contribue également au respect de cette hypothèse. La figure 12.b montre le bon accord obtenu entre les coefficients de transmission simulés et mesurés, confirmant une fois de plus la validité du modèle par éléments finis. Ces résultats valident également le traitement des calculs EF par la méthode basée sur l'orthogonalité des modes guidés.

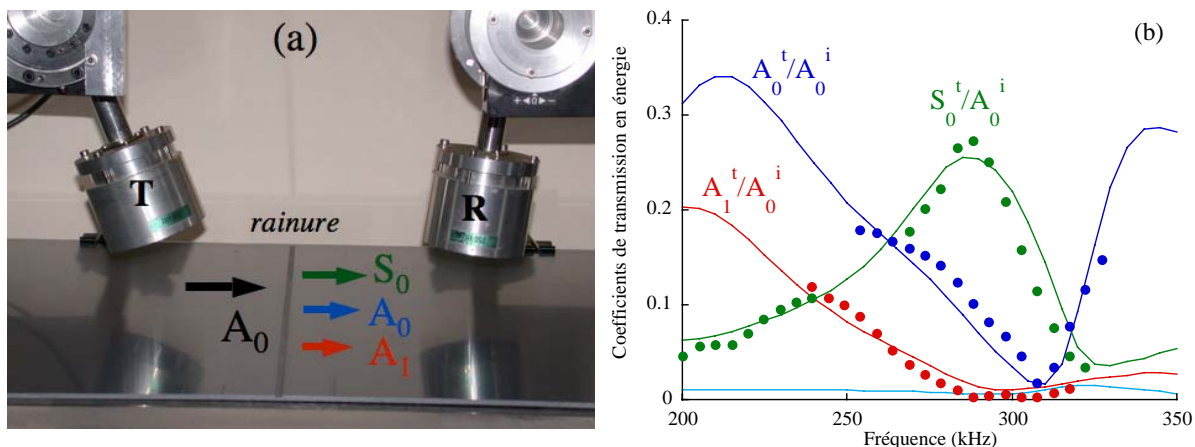


figure 12 – Transmission de modes de Lamb par une rainure dans une plaque en PVC ; (a) photographie du système expérimental et (b) coefficients de transmission calculés (traits) et mesurés (points).

2. Diffraction 3D d'un faisceau borné par un défaut dans un composite

Ce dernier exemple est le cas tridimensionnel d'un faisceau borné ultrasonore guidé le long d'une plaque composite, et incident sur un défaut (figure 13). Le matériau est un empilement $[90_2/15/90_3/15/90_2]$ de plis à fibres de carbone et matrice époxyde. Ses propriétés anisotropes et viscoélastiques, évaluées lors d'une étude pour EADS [15], sont données dans la table 3 (les plis 90 sont alignés avec la direction 3 du repère de la figure 13). La plaque fait 3 mm d'épais et le défaut est une chute brutale des propriétés mécaniques du matériau, dans une région cylindrique de 15 mm de diamètre sur toute l'épaisseur de la plaque, simulant une zone fortement dégradée suite par exemple à un impact. Ce défaut est désaxé de 10 mm par rapport à la direction centrale du faisceau incident.

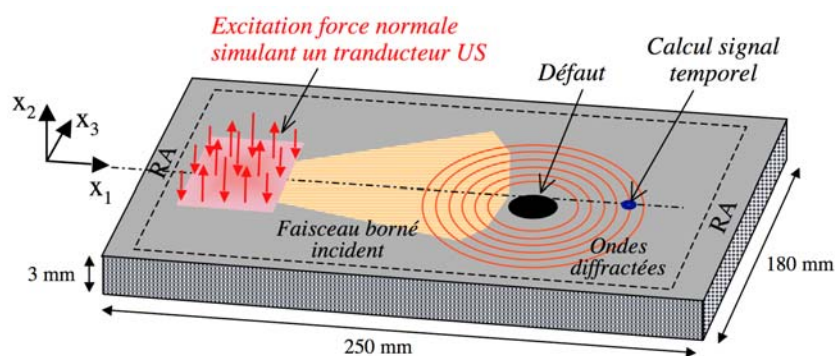


figure 13 – Schéma du modèle 3D ondes guidées diffractées par un défaut dans une plaque composite.

ρ (kg/m ³)	C_{11} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{66} (GPa)
1500	34 + i 2	11 + i 0.6	2 + i 0.1	2.5 + i 0.15
C_{33} (GPa)	C_{13} (GPa)	C_{55} (GPa)	C_{23} (GPa)	C_{44} (GPa)
104 + i 5	9 + i 0.45	7 + i 0.35	6 + i 0.3	5 + i 0.2

table 3 – Propriétés mécaniques du composite carbone époxyde.

Dans le modèle EF, le faisceau borné incident est produit par une force normale localement appliquée en surface de la plaque et simulante l'excitation que produirait un transducteur ultrasonore de dimensions latérales 45 mm. La distribution spatiale de cette excitation varie pour représenter une inclinaison du transducteur de 18 degrés, nécessaire pour générer un mode de Lamb A_0 (antisymétrique fondamental) avec un capteur à couplage par air [15]. Le signal d'excitation est harmonique et de fréquence 100 kHz (longueur d'onde du mode

incident ≈ 11 mm). Des régions absorbantes de largeur 38 mm sont simulées tout autour du domaine maillé. Elles permettent de s'affranchir des réflexions par les bords de la plaque, et donc de simuler uniquement le faisceau incident et sa diffraction par le défaut. La figure 14 présente la distribution spatiale du déplacement U_2 dans la direction normale à la plaque (composante généralement détectée par les capteurs à ultrasons) sans puis avec défaut. Ces simulations 3D apportent une bonne représentation de l'ouverture angulaire du faisceau borné incident, ainsi que de la diffraction dans toutes les directions autour du défaut. Avec près de 100000 degrés de liberté, chacun de ces deux calculs a duré environ 2 minutes.

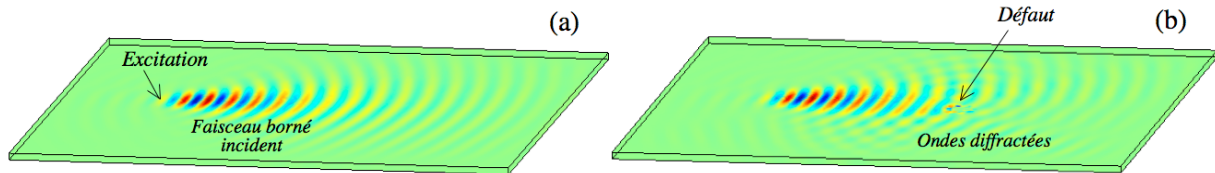


figure 14 – Propagation et diffraction de la composante U_2 des faisceaux bornés guidés le long d'une plaque composite ; (a) onde incidente et (b) ondes diffractées par un défaut.

Un post-traitement, basé sur le principe d'orthogonalité des modes guidés en trois dimensions [9], permet de tracer les diagrammes de directivité angulaire des composantes du déplacement constituant le champ diffracté par le défaut. Pour faciliter l'interprétation, ces composantes sont exprimées en coordonnées cylindriques. La figure 15 présente ces résultats et montre que le champ diffracté n'est pas symétrique par rapport au plan de propagation formé par la normale à la plaque et la direction centrale du faisceau incident. Ceci est dû au désaxement du défaut par rapport à cette direction, et est probablement accentué par l'anisotropie du matériau. Ce genre de diagramme permet de mieux comprendre les phénomènes de diffraction d'ondes ultrasonores par des défauts dans les milieux anisotropes, et contribuera certainement à une optimisation des procédés de CND/END de matériaux composites.

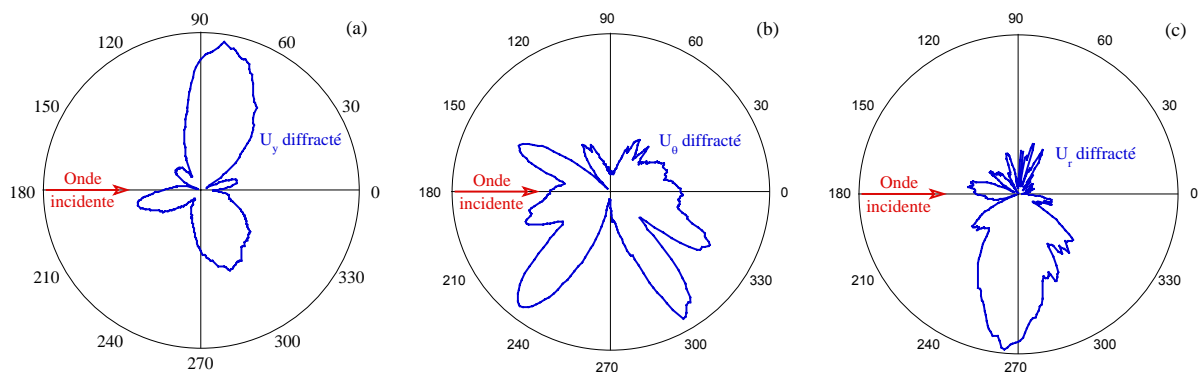


figure 15 – Diagrammes de directivité du déplacement produit par le champ diffracté par le défaut de la plaque composite ; composantes (a) U_y , (b) U_θ et (c) U_r en coordonnées cylindriques.

Il est également possible de prédire la réponse dynamique de la plaque composite à une excitation temporelle. A titre d'exemple, la figure 16 présente le signal correspondant au déplacement normal ($U_y=U_2$) calculé avec le défaut, en surface de la plaque sur l'axe du faisceau incident et en $x_1 = 200$ mm (voir figure 13).

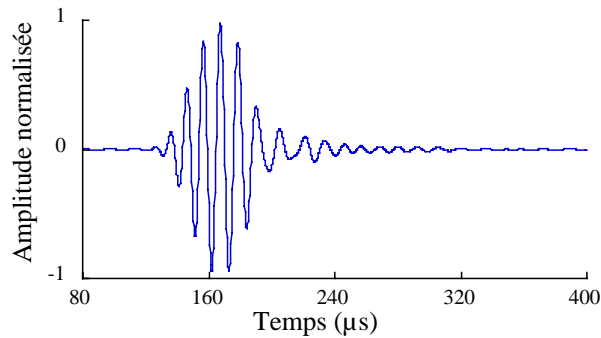


figure 16 – Réponse temporelle en un point $x_1 = 200 \text{ mm}$, $x_2 = 3 \text{ mm}$, $x_3 = 0 \text{ mm}$, avec défaut dans la plaque composite excitée par une salve de 5 cycles et de fréquence centrale 100 kHz.

IV. CONCLUSION

Un logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé pour simuler, en 2 ou 3 dimensions, diverses techniques non destructives de contrôle ou d'évaluation par ultrasons de matériaux ou de structures. Les phénomènes de propagation ou de diffraction des éléments testés sont modélisés en résolvant les équations d'équilibre dynamique dans le domaine des fréquences. Cette approche est possible même si l'objectif est de connaître la réponse temporelle à une excitation temporelle, grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier. Elle présente plusieurs avantages : (1) une réduction significative des temps de calculs, (2) la prise en compte des propriétés absorbantes du milieu (viscoélasticité et/ou diffusion interne) et (3) la réalisation simple de régions absorbantes efficaces pour simuler des pièces infiniment grandes devant les zones d'intérêt. Les modèles proposés prennent en compte l'éventuelle anisotropie des matériaux, ainsi que leur couplage avec des fluides. Il est également possible de considérer des assemblages de plusieurs matériaux.

Après un cas de validation de la méthode proposée, plusieurs configurations de CND/END ont été simulées. Tout d'abord une technique à immersion classique avec prédictions des champs ultrasonores transmis par une plaque composite saine puis comportant un délaminage. Deux applications de l'utilisation d'une onde de torsion pour tester des tubes ou canalisations ont ensuite été exposées. Pour terminer, deux cas de diffraction d'ondes guidées par des défauts de plaques ont été développés. Le premier concerne une rainure en surface d'une plaque en PVC et le second un défaut causé par impact dans un composite de type Carbone époxy. Dans la majeure partie des cas, il a été démontré l'importance de prendre en compte convenablement les caractéristiques absorbantes des matériaux, pour pouvoir utiliser les simulations numériques dans une optique de mise en place ou d'optimisation de procédés de CND/END. Pour certains exemples, les prédictions ont été validées par des résultats de mesures expérimentales.

Les travaux en cours visent à développer davantage les simulations en 3D qui sont souvent plus représentatives de la réalité que les modèles 2D, notamment pour les matériaux anisotropes ou les structures à géométries courbes souvent rencontrés dans les secteurs de l'Aéronautique, de l'Aérospatial ou des industries du transport. La prise en compte de la viscosité de certains fluides, et de leur couplage avec les solides, fait aussi l'objet d'une grande attention, avec à l'esprit des applications dans les domaines du stockage ou transport des matières énergétiques.

V. REMARQUES

Je tiens à préciser que les résultats présentés dans cet article sont issus de travaux en équipe à l'université Bordeaux 1 et avec des partenaires de l'*Imperial College* de Londres (<http://www.imperial.ac.uk/ndt/>). Les personnes intéressées par la simulation EF pour optimiser leurs techniques de CND/END sont les bienvenues pour prendre contact avec M. Castaings.

VI. RÉFÉRENCES

1. K. J. Bathe, *Finite Element procedures*. Ed. Prentice Hall, 1996.
2. M. Castaings, B. Hosten, T. Kundu, *Inversion of ultrasonic, plane-wave transmission data in composite plates to infer viscoelastic material properties*. NDT&E Int. 33, 377-392, 2000.
3. M. Castaings, *Mesures de modules de viscoélasticité*, p. 19-33, *Matériaux et Acoustique* Tome 3, Traité MIM, Hermès Lavoisier, sous la direction de M. Bruneau et C. Potel, 2006.
4. M. Castaings, C. Bacon, Hosten, M. V. Predoi, *Finite element predictions for the dynamic response of thermo-viscoelastic material structures*. J. Acoust. Soc. Am. 115, 1125-1133, 2004.
5. M. Drozd, L. Moreau, M. Castaings, M. J. S. Lowe, P. Cawley, *Efficient numerical modelling of absorbing regions for boundaries of guided waves problems*. In D. O. Thompson and D. E. Chimenti, editors, Review of Progress in Quant. Non Destruct. Eval 25, 126-133, New York. AIP Conf. Proc., 2006.
6. E. Bécache, S. Fauqueux, P. Joly. *Stability of perfectly matched layers, group velocities and anisotropic waves*. J. Comput. Physics, 188(2) :399-433, 2003.
7. M. Drozd, *Efficient Finite Element modelling of ultrasound waves in elastic media*. PhD theses, Mechanical Engineering, Imperial College London, 2008.
8. D. Alleyne and P. Cawley, A 2-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals, J. Acoust. Soc. Am. 89, 1159-1168, 1991.
9. L. Moreau, *Simulation de la diffraction d'ondes guidées ultrasonores par des défauts dans des plaques*. Thèse de l'Université Bordeaux 1, n° ordre 3543, 2007.
10. COMSOL, User's Guide and Introduction. Version 3.2 by – COMSOL AB 2005 <http://www.comsol.com/>, Dernière date de consultation 25 février 2008.
11. M. Castaings, C. Bacon, *Finite Element modelling of torsional wave modes along pipes with absorbing materials*. Journ. of Acoust. Society of Am., vol. 119(6), p. 3741-3751, 2006.
12. <http://www.guided-ultrasonics.com/> Dernière date de consultation 25 février 2008.
13. J Ma, F Simonetti, M Lowe, *Scattering of the fundamental torsional mode by an axisymmetric layer inside a pipe*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 120, p.1871-1880, 2006.
14. M. V. Predoi, M. Castaings, *The effect of material viscoelasticity in modeling the scattering of guided waves by defects*. Soumis au Journ. of Acoust. Society of Am.
15. M. Castaings, B. Hosten, *Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks*. Soumis au NDT&E Intern.