

CFA/VISHNO 2016

**Simulation de la réponse ultrasonore de défauts
paramétriques à cœur utilisant un modèle hybride 3D
temporel basé sur la méthode des éléments finis spectraux
et la décomposition de domaine**

S. Chatillon^a, A. Imperiale^a, N. Leymarie^a, E. Demaldent^a et S. Imperiale^b

^aCEA-LIST, CEA SACLAY, DIGITEO Labs - Bât. 565, 91191 Gif Sur Yvette, France

^bInria M3DISIM, 1 rue Honoré d'Estienne d'Orves, Bâtiment Alan Turing, 91120
Palaiseau, France

sylvain.chatillon@cea.fr



LE MANS

La modélisation et la simulation sont toujours plus sollicitées par les industriels concernés par des configurations d'inspection ultrasonore complexes. Les modèles asymptotiques haute fréquence historiquement implantés dans la plateforme logicielle CIVA fournissent des outils de simulation efficaces mais souffrent d'un domaine de validité limité. En particulier, ils ne sont plus valides pour simuler la diffraction d'une onde par un défaut dont la longueur caractéristique serait de l'ordre de la longueur d'onde, ce qui motive le couplage du modèle rayon à un modèle dédié au phénomène de diffraction. Dans cette communication, nous présentons le principe de ce couplage ainsi que divers modèles de diffraction disponibles dans CIVA. Puis, nous introduisons un nouveau modèle, numérique, en cours d'intégration à CIVA et dédié à la réponse de défauts 3D de forme paramétrique. Ce modèle est basé sur la méthode des éléments finis spectraux et repose sur une décomposition de domaine spécifique à chaque type de défaut paramétré.

1 Introduction

Les codes de simulation intégrés dans la plate-forme logicielle CIVA [1] permettent de prédire la propagation du faisceau ainsi que la réponse du défaut en mode échographique pour les principales techniques d'inspection ultrasonore (pulse écho, TOFD, tandem), avec divers types de capteurs (en immersion ou au contact, mono ou multiéléments) et dans divers types de milieux (homogène / hétérogène, isotrope / anisotrope, de géométrie canonique ou issue d'une CAO). Les modèles fondés sur une approximation haute fréquence, tels que les modèles rayons intégrés à CIVA [3], autorisent des calculs rapides et fournissent des prévisions quantitatives satisfaisantes pour répondre à la plupart des exigences industrielles.

Cependant le domaine de validité de ces modèles, par ailleurs bien maîtrisé, est limité. Ainsi, ils ne permettent pas de prédire quantitativement la réponse échographique dans certaines configurations, comme celles mettant en jeu des ondes de tête générées à l'angle critique, des ondes rampantes ou en présence de caustiques liées à la géométrie ou à l'anisotropie du milieu. De la même manière, ces modèles ne sont pas viables pour simuler l'écho de défauts de géométrie complexe et/ou dont la dimension caractéristique est de l'ordre de la longueur d'onde.

Privilégier le recours à des solutions asymptotiques rapides nécessite de les restreindre à leur domaine de validité. En pratique, cette gamme de validité est le plus souvent limitée à la propagation dans le milieu sain (pièce sans défaut) ou à certains types de défauts, de géométrie relativement simple. C'est pourquoi la stratégie adoptée dans CIVA consiste à coupler un modèle de propagation asymptotique générique à un modèle de diffraction dédié, si possible asymptotique (sous-entendu un modèle simplifié rapide). Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque le défaut n'autorise pas le recours à une telle solution, une méthode numérique discrète est employée (sous-entendu pour le problème élastodynamique non simplifié).

Ce type d'approche, typiquement associé à la méthode des éléments finis, est en général difficilement accessible voir inadapté du fait des distances de propagation pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de longueurs d'onde fréquemment rencontrées dans les configurations d'inspection. Ces modèles sont ici rendus accessibles par le processus de couplage du fait de la restriction du domaine de calcul à un domaine borné autour du défaut. Néanmoins, la réponse rapide et précise d'un défaut 3D (ou d'une large zone 2D) requiert la mise en œuvre d'outils numériques spécialisés.

Ici nous présentons le principe du couplage et plusieurs réalisations de couplage entre le modèle rayon et un modèle de diffraction dédié. En particulier, nous introduisons un

nouveau modèle numérique 3D de diffraction en cours d'intégration à CIVA.

2 Principe du couplage

La donnée d'entrée du modèle de diffraction est obtenue dans une zone d'intérêt associée au défaut (autour ou sur le défaut, en fonction du modèle de diffraction retenu) par un calcul rayon dans la pièce saine. La réaction du défaut soumis à ce champ est alors calculée par le modèle dédié, asymptotique si le type de défaut l'y autorise, numérique sinon. La réponse échographique du défaut est alors calculée en appliquant le principe de réciprocité de Auld [4]. En régime harmonique, pour un spectre S_i du signal d'entrée, le spectre S_e de la réponse échographique d'un défaut de surface Σ s'exprime

$$S_e = S_i \int_{\Sigma} (\mathbf{u}_E \cdot \mathbf{T}_R - \mathbf{u}_R \cdot \mathbf{T}_E) d\Sigma,$$

où \mathbf{u} et \mathbf{T} désignent les traces normales du vecteur de déplacement et du tenseur des contraintes des champs harmoniques, tandis que les indices E et R désignent deux états. E est le champ ultrasonore rayonné par la sonde émettrice dans la pièce saine, R est le celui rayonné par la sonde en réception (utilisée comme un émetteur fictif) en présence du défaut. Dans la pratique, S_e peut également s'exprimer dans le domaine temporel.

Le bien-fondé de cette approche repose sur le fait que la réponse du défaut ne perturbe pas le champ incident calculé par la méthode des rayons. En pratique cela se traduit par le fait que le défaut soit à distance suffisante des bords de pièce, pour ne pas interagir avec ceux-ci. Dans le cas contraire, il est nécessaire de tenir compte du défaut et du bord de pièce dans le modèle de diffraction.

Cette stratégie de couplage a déjà été mise en œuvre avec succès dans le logiciel CIVA [2], pour un modèle de diffraction asymptotique comme pour un premier modèle éléments finis (2D). Aujourd'hui un nouveau modèle éléments finis (3D) est en cours d'intégration et d'autres pistes, complémentaires, sont étudiées, par exemple le couplage entre modèle rayon et équations intégrales de surface pour le défaut [12].

3 Couplage du modèle rayon à des modèles de diffraction asymptotiques

Différents exemples de réalisation de couplage avec des modèles de diffraction asymptotique ont été réalisés dans CIVA, le choix du modèle dépendant de la nature du défaut et du type de contrôle réalisé [2]. Citons notamment le modèle de Kirchhoff, pour lequel la géométrie des défauts

est considérée localement comme une surface plane infinie. Cette approximation fondée sur une formulation intégrale du champ diffracté modélise parfaitement la réflexion spéculaire mais fournit une solution incorrecte pour le champ de diffraction par l'arête. A l'inverse, la GTD modélise efficacement le champ de diffraction généré par l'arête, mais le modèle n'est plus valide autour des directions de réflexion spéculaire et de transmission directe. Ces deux modèles classiques, présentant des avantages et des inconvénients complémentaires, ont été réunis dans le but de modéliser correctement à la fois la réflexion spéculaire et la diffraction par une arête. Ce modèle, connu sous le nom de PTD pour théorie physique de la diffraction, corrige la contribution calculée par l'approximation de Kirchhoff correspondant à la diffraction par le bord [5].

Notons également que, dans leur version initiale, ces modèles semi-analytiques se fondent sur des calculs de coefficients de diffraction qui expriment l'amplitude du champ diffracté en fonction des directions de propagation et de polarisation des ondes incidentes et observées. En conséquence, ils exigent que les champs ultrasonores soient exprimés sous forme d'ondes planes ou quasi-planes dont les directions et polarisations peuvent être identifiées. Cette approximation peut conduire à des erreurs importantes dans des cas défavorables, telles que pour des capteurs de grande ouverture, des défauts situés en dehors de la région focale, ou en présence de distorsions du faisceau dues aux géométries de pièces irrégulières. Aussi, un nouveau formalisme a été mis en œuvre dans CIVA pour exploiter la totalité de la réponse impulsionnelle du champ transmis sur le défaut, et ainsi s'affranchir de cette approximation [6]. Des améliorations notables ont ainsi été obtenues avec les différents modèles de diffraction implantés dans CIVA dans des configurations qui mettaient en défaut l'approximation onde plane initiale.

Ces modèles de diffraction simplifiés connaissent des limites, en particulier lorsque les interactions entre les différentes parties du défaut ont une importance significative dans la réponse échographique (par exemple pour un défaut de type entaille en forme de T), ou en présence d'une forte courbure locale (par exemple pour une inclusion sphérique petite ou de l'ordre de la longueur d'onde). Dans ce cas de figure nous avons recours à un solveur de type éléments finis pour calculer la contribution du défaut.

4 Couplage du modèle rayon à la méthode des domaines fictifs

La stratégie de couplage a déjà été appliquée avec le code éléments finis ATHENA, développé par EDF et validé pour des configurations 2D [7]. Les possibilités offertes par cette méthode hybride ont par exemple été mises en évidence pour la simulation de l'inspection de différentes entailles débouchantes en fond de pièce. La spécificité de ce modèle numérique réside dans la prise en compte de la géométrie d'un défaut quelconque au moyen de la méthode des domaines fictifs, illustrée figure 1. Cette stratégie est particulièrement efficace en 2D, mais en pratique devient difficilement évolutive pour les cas 3D (complexité de la méthode des domaines fictifs pour prendre en compte un défaut 3D quelconque et besoins élevés en moyens de calculs).

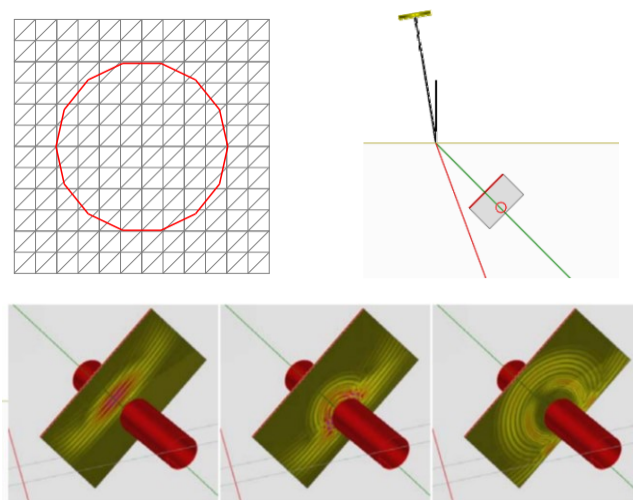


Figure 1: Illustration du couplage CIVA-ATHENA (méthode des domaines fictifs) pour un défaut cylindrique (simulation 2D)

5 Couplage du modèle rayon au modèle éléments finis 3D dédié

Pour gagner en performances, afin de répondre aux exigences liées aux applications industrielles et pour faire face à des configurations plus complexes, nous proposons une variante de la méthode hybride. Elle est fondée, d'abord, sur une représentation paramétrique du défaut, avec une méthode de décomposition de domaine dédiée et, ensuite, sur l'utilisation d'un modèle éléments finis spectral d'ordre élevé.

Plus précisément, nous avons utilisé le terme modèle hybride 3D "dédié" puisque, au lieu de constituer un solveur éléments finis générique basé sur un maillage géométrique du défaut (ou de ses environs), nous visons à la construction d'un lexique de défauts paramétriques. Ce lexique, qui correspond à ceux principalement rencontrés dans les configurations d'inspection, est interrogé en interne par le logiciel CIVA, de manière transparente pour l'utilisateur. A chaque défaut paramétrique est associée une décomposition de domaine dédiée. A titre d'illustration la figure 2 propose une telle décomposition pour une fissure en 2D. Il convient de noter que, dans cette figure, les couches absorbantes utilisées pour modéliser un domaine infini autour du défaut sont intentionnellement omises afin de simplifier la présentation (en pratique des couches absorbantes parfaitement adaptées [8] sont employées). La communication entre chaque domaine est réalisée par la méthode des éléments mortiers [9].

Les performances de calcul, au sein de chaque sous-domaine, sont considérablement améliorées par l'utilisation d'éléments finis spectraux d'ordre élevé [10, 11]. Cette méthode, permettant notamment la technique de condensation de masse, est largement répandue pour la résolution numérique de problèmes transitoires liés à la propagation d'ondes à haute fréquence. Elle combine la flexibilité des méthodes éléments finis et la performance des différences finies standards en exploitant un schéma numérique explicite. De plus et du fait de la montée en ordre de l'approximation, le nombre de points de discrétisation est significativement réduit pour atteindre une

précision donnée, ce qui est un atout majeur lors de la simulation des configurations 3D.

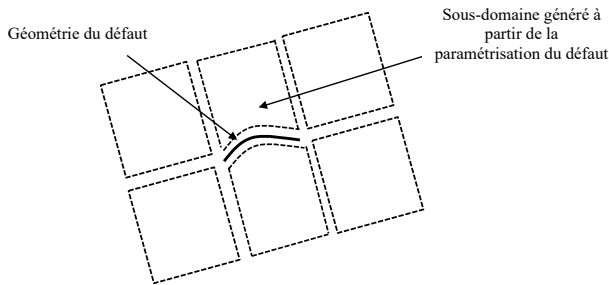


Figure 2 : Décomposition de domaine associée à un défaut 2D de type fissure.

En outre, chaque domaine de la scène est obtenu par déformation géométrique d'un domaine de référence qui porte un maillage prédéfini. Une bonne maîtrise de ce maillage, ou plus exactement de la représentation de ce maillage dans le code numérique, permet d'introduire des techniques originales d'optimisation du solveur numérique en termes de parallélisation des tâches et de réduction des besoins mémoire.

La feuille de route pour l'introduction de cette nouvelle approche de couplage dans le logiciel CIVA sont : (1) la réponse de défauts plans 3D à cœur ; (2) suivi par la réponse de défauts plans 3D débouchant en fond de pièce avec un milieu extérieur considéré (2.a) comme étant du vide, et (2 b) puis un milieu fluide. Pour être pleinement prise en compte, la dernière configuration nécessite un couplage fluide-structure dans le modèle éléments finis. A l'heure actuelle, la première étape a été atteinte et est disponible dans la version de développement de CIVA pour une fissure plane 3D dans un matériau homogène isotrope, qui peut être considéré comme la version 3D de la figure 2.

6 Premières comparaisons

Le solveur numérique 3D a d'abord été validé par comparaison à des solutions analytiques pour une onde plane incidente. Ses performances sont maintenant évaluées par comparaison à des résultats obtenus avec les modèles de diffraction déjà disponibles dans CIVA.

En guise d'exemple nous considérons ici une pièce plane, de dimension 200 x 50 x 75 mm³, constituée d'un acier ferritique standard et comportant un défaut plan carré, de côte 1mm, situé à une profondeur de 25 mm. L'inspection est réalisée avec un capteur mono-élément utilisé en immersion fonctionnant à 5 MHz pour 70% de bande passante.

Le signal calculé par CIVA est illustré figure 3 pour les couplages entre la méthode des rayons (propagation de la source dans la pièce saine) et le modèle de Kirchhoff-GTD (courbe rouge) puis le modèle numérique 3D dédié (courbe noire). Pour ce dernier, nous représentons figure 4 la valeur du champ de pression correspondant, calculé dans la boîte numérique en quelques pas de temps (représentation non accessible dans CIVA). Il convient de souligner que la solution numérique est obtenue sans aucune intervention de l'utilisateur, tous les paramètres numériques étant automatiquement déduits à partir des paramètres de la configuration d'inspection.

Nous observons une correspondance satisfaisante entre les principales composantes de l'écho. Une différence caractéristique est néanmoins visible en fin de contribution. Elle est potentiellement due à des interactions entre les bords de l'entaille, prises en compte par le modèle numérique mais négligées par le modèle Kirchhoff-GTD. Une analyse plus détaillée est en cours et des comparaisons avec des données expérimentales doivent également être réalisées.

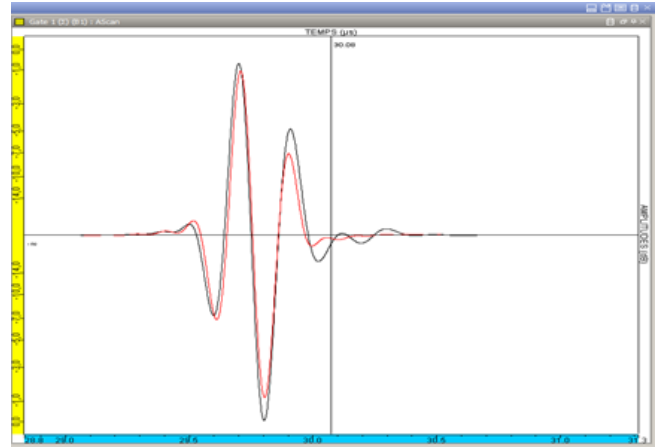


Figure 3 : Réponse du capteur obtenue dans le logiciel CIVA pour le défaut plan 3D à cœur avec le modèle de diffraction Kirchhoff-GTD (rouge) et le modèle éléments finis 3D dédié (noir).

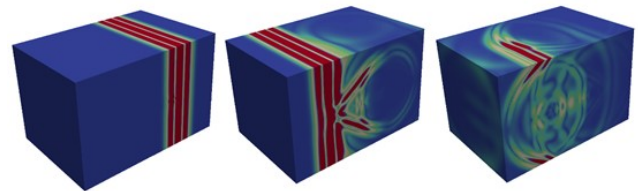


Figure 4 : Solution numérique transitoire calculée par le solveur numérique 3D dédié dans le voisinage du défaut à différents pas de temps.

7 Conclusion et perspectives

Le principe du couplage entre un modèle asymptotique rapide, le modèle rayon, pour modéliser les phénomènes de propagation dans une pièce grande devant la longueur d'onde, et les modèles de diffraction déjà disponibles dans le logiciel CIVA ont été présentés. Puis, un nouveau modèle numérique 3D en cours d'intégration à CIVA a été introduit. Celui-ci est basé sur la méthode des éléments finis spectraux et repose sur une décomposition de domaine spécifique à chaque forme de défaut. Enfin une première configuration d'inspection a été simulée pour un défaut 3D plan.

Les prochaines étapes consisteront à augmenter le nombre de défauts traités par le modèle numérique 3D (défauts multi-facettes, ramifiés, non-plans, trous génératrices ...), puis à aborder le cas de défauts débouchant en fond de pièce. Ce nouveau modèle, piloté automatiquement sans intervention de l'utilisateur final, sera disponible dans une prochaine version commerciale de CIVA.

Références

- [1] More details about CIVA, references and all the Benchmaks results can be found on the EXTENDE website <http://www.extende.com>.
- [2] Mahaut, S. Chatillon, M. Darmon, N. Leymarie, R. Raillon and P. Calmon, An Overview of Ultrasonic Beam Propagation and Flaw Scattering Models in the CIVA Software, in *Review of Progress in QNDE*, 29B, op. cit. (2009), pp. 2133-2140.
- [3] N. Gengembre and A. Lhémy, Pencil method in elastodynamics: application to ultrasonic field computation, *Ultrasonics* **38**, pp. 495-499 (2000).
- [4] B. A. Auld, General electromechanical reciprocity relations applied to the calculation of elastic wave scattering coefficients, *Wave motion*, 1979 1(1) 3-10.N.
- [5] M. Darmon, V. Dorval, A. Kamta Djakou, L. Fradkin, and S. Chatillon, A System Model for ultrasonic NDT based on the Physical Theory of Diffraction (PTD), *Ultrasonics*, vol. 64, pp. 115–127, Jan. 2016.
- [6] V. Dorval, N. Leymarie and S. Chatillon, Improved Semi-Analytical Simulation of UT Inspections Using a Ray-Based Decomposition of the Incident Fields, *Proceedings of 42th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Minneapolis USA, 2015, to be published.
- [7] S. Mahaut, N. Leymarie, C. Poidevin, T. Fouquet, O. Dupond, Study of complex ultrasonic NDT cases using hybrid simulation method and experimental validation, *Insight*, Vol. 53, N°12, Dec. 2011.
- [8] E. Demaldent, S. Imperiale, Perfectly matched transmission problem with absorbing layers: Application to anisotropic acoustics in convex polygonal domains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 96, N°11, 2013, pp 689-711.
- [9] F. Ben Belgacem, Y. Maday, The mortar element method for three dimensional finite elements, *RAIRO-Modélisation mathématique et analyse numérique*, Vol. 31, N°2, 1997, pp 289-302.
- [10] G. Cohen, *Higher-order numerical methods for transient wave equations*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] D. Komatitsch, J. Tromp, Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation, *Geophysical journal international*, Vol. 139, N°3, 1999, pp 806-822.
- [12] L. Pesudo, M. Bonnet, F. Collino, E. Demaldent, A. Imperiale, Couplage BEM-Rayon pour le Contrôle Non Destructif par Ultrasons, *CFA 2016, Le Mans*.