

LE PROJET MOHYCAN : MODELISATION HYBRIDE ET COUPLAGE SEMI-ANALYTIQUE POUR LE CND ULTRASONORE

THE MOHYCAN PROJECT: HYBRID MODELING FOR ULTRASONIC NDT SIMULATION

S. Mahaut⁽¹⁾, N. Leymarie⁽¹⁾, A. S. Bonnet-Ben Dhia⁽²⁾, P. Joly⁽²⁾, J. Rodriguez⁽²⁾, T. Fouquet⁽³⁾, C. Rose⁽³⁾ et F. Foucher⁽⁴⁾

⁽¹⁾ CEA-LIST – CEA Saclay, Bâtiment 611, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél : 01 69 08 63 84 - Fax : 01 69 08 75 97
steve.mahaut@cea.fr

⁽²⁾ POEMS – 32, Boulevard Victor, 75739 Paris Cedex 15
Tél : 01 45 52 52 25 - Fax : 01 45 52 52 82

⁽³⁾ EDF/R&D – 1 av. Gal de Gaulle BP 408 F92141 Clamart
Tél : 01.47.65.33.34 - Fax : 01.47.65.34.99

⁽⁴⁾ CEDRAT –CEDRAT SA - 15 Chemin de Malacher - Inovalée - 38246 MEYLAN Cedex
Tél : 04.76.90.50.45 - Fax : 04.56.38.08.30

Résumé

Le projet MOHYCAN, soutenu par l'ANR (RNTL)* a pour objectif d'étendre les capacités des outils de modélisation du CND ultrasonore, pour des configurations industrielles réalistes complexes, tout en assurant des hautes performances de calcul. Pour ce faire, le projet MOHYCAN repose sur le couplage entre une méthode semi-analytique (développée au CEA LIST) pour calculer le champ ultrasonore, et une méthode numérique (Eléments Finis : module ATHENA développé par EDF/R&D) dans un domaine restreint autour des défauts. Pour pouvoir traiter des configurations 3D, l'optimisation du couplage (limitation de la taille et maillage automatique de la boîte EF, conditions aux limites...) est l'un des points essentiels du projet. Outre des développements formels sur l'établissement de la formule de couplage et son optimisation, le module proposera également des outils permettant de suivre l'avancement et la représentation du calcul couplé (visualisation des instantanés des ondes incidentes et diffractés au sein de la boîte EF, construction itérative du signal reçu). Par ailleurs, le module de simulation pourra supporter différents types d'architecture informatique (PC standard ou clusters) afin d'exploiter au mieux les nouvelles capacités des systèmes informatiques. Enfin, des campagnes de validation expérimentale seront menées au cours du projet en vue de valider l'outil de simulation avant son intégration dans CIVA.

Abstract

The MOHYCAN project (Hybrid Modeling and Coupling to semi-Analytical method for ultrasonic NDT simulation), supported by the ANR (RNTL) aims at extending the features of ultrasonic NDT simulation tools to deal with industrial, potentially complex configurations. In order to assess such configurations, the MOHYCAN project is based on a coupling method between a semi-analytical code (developed at CEA, LIST) to predict the radiated field, and a numerical method (Finite Element: Athena module, developed at EdF) performed in a restricted area around the flaw. In order to handle 3D configurations, optimization of the coupling method (automatic size and mesh of the FEM box, boundary conditions...) is a key point of the project. Apart from theoretical developments about the coupling formulation and its related optimization, the module will also provide dedicated tools allowing to drive and to

* ANR = Agence Nationale de la Recherche ;

RNTL = Réseau National de recherche et d'innovations en Technologies Logicielles.

check the coupled calculation during its progress (visualization of the elastodynamic field radiated and scattered inside the FEM box, iterative construction of the synthesis echo). Besides, the simulation module should also be operated on different hardware configurations (standard PC or clusters) in order to take advantage of their resources, thanks to parallel structures calculations carried out in the FEM box. Finally, a series of experimental validations will be performed during the project in order to validate the simulation tools prior to their integration inside CIVA.

INTRODUCTION

La simulation joue un rôle de plus en plus important dans le CND ultrasonore, en tant qu'aide à la conception de capteurs ou de mise en œuvre de techniques de contrôle, de soutien à la qualification technique et à la démonstration de performances, d'expertise et d'aide au diagnostic. Pour prétendre à ces objectifs ambitieux, la simulation doit traiter des configurations d'inspections industrielles réalistes, c'est-à-dire prenant en compte l'ensemble des paramètres mis en jeu lors du contrôle, en termes de matériaux, défauts, capteurs, techniques. En particulier, la simulation doit permettre de prédire la réponse de défauts réels en termes de :

- géométrie du défaut : défauts ramifiés, faciès irrégulier ...
- positions et orientations quelconque dans la pièce, proches d'interface ou de limites de structures
- nombre arbitraire de défauts : réseau de défauts, défauts combinés...

Les phénomènes d'interaction entre l'onde ultrasonore et le défaut et/ou la structure, conduisant à une signature complexe (réflexion, diffraction en ondes de volumes, ondes de surface ...) doivent être simulés pour aboutir à une réponse précise du signal effectivement reçu par le capteur. La réponse de ce type de défaut doit être prédite quantitativement par rapport aux procédures industrielles d'étalonnage et de référence, afin de permettre à l'utilisateur de se prononcer sur la nocivité du défaut et donc du traitement à apporter pour assurer l'intégrité de la structure.

Ce besoin constitue la motivation première du projet MOHYCAN, qui vise à développer un outil performant et accessible aux utilisateurs du domaine industriel, en réponse aux cas les plus complexes aujourd'hui non traités par les outils de simulation disponibles. Cet outil sera basé sur une méthode hybride couplant, à l'aide du principe de réciprocité, des méthodes semi-analytiques (SA) et Eléments Finis (EF), afin de combiner les avantages des deux méthodes et ainsi obtenir des résultats de simulation rapides et précis.

DESCRIPTION DU PROJET MOHYCAN

Objectifs du projet

Le projet MOHYCAN repose sur le couplage des méthodes de simulation Semi-Analytique et Eléments Finis, qui constituent aujourd'hui les principales méthodes en simulation du CND par ultrasons.

La simulation joue déjà un rôle important dans le domaine du CND, de par sa capacité à concevoir, prédire, optimiser ou qualifier des techniques de contrôle. Pour permettre une diffusion plus large dans le milieu industriel, les outils logiciels doivent être dédiés à des utilisateurs du métier du CND, non experts dans le domaine de la simulation. Les modèles intégrés au sein de la plateforme CIVA reposent sur des méthodes semi-analytiques (SA),

basées sur des approximations portant sur les phénomènes de propagation ou d'interaction de l'onde ultrasonore avec un ou plusieurs défauts, et peuvent être appliquées afin de traiter des configurations réalistes, tout en autorisant des temps de calcul compatibles avec des études industrielles, qui la plupart du temps, sont paramétriques et/ou itératives. Cependant, les méthodes semi-analytiques ne peuvent prétendre à atteindre un degré de généralité suffisant pour traiter de configurations d'études particulièrement complexes.

Réciproquement, les méthodes Eléments Finis (EF) reposent sur la résolution exacte des états élastodynamiques sur le maillage de l'ensemble de la configuration d'étude. Cependant, ces méthodes sont rapidement confrontées à des difficultés numériques, tant sur le plan des temps de calcul que sur la taille mémoire demandés, compte tenu des distances de propagation, généralement de plusieurs dizaines, voire centaines, de longueurs d'onde. En outre, la plupart des configurations industrielles sont intrinsèquement 3D, de sorte que les contraintes et limitations numériques évoquées sont encore plus pénalisantes sur des maillages 3D, alors que ces configurations doivent être traitées pour donner des prédictions quantitatives sur les performances des techniques usuellement employées. Ces limites, auxquelles on peut également ajouter les complexités de mise en œuvre numérique (définitions de maillages adaptés, de conditions aux limites) ont jusqu'ici freiné l'application des éléments finis dans le domaine industriel.

Le projet MOHYCAN a donc pour objectif de concilier les avantages complémentaires en termes de temps de calcul et de généralité des techniques EF et SA par la mise en place d'une méthode dite « hybride ». Cette méthode permettra donc de modéliser la réponse de défauts ou de structures complexes pour des cas d'études 3D, aujourd'hui non résolus à la fois en EF et SA, respectivement pour des raisons d'efficacité numérique ou d'approximations trop fortes.

La méthode hybride repose sur la mise en œuvre de la méthode SA dans son domaine d'applicabilité, par exemple pour décrire la propagation du champ ultrasonore en termes d'états de contraintes et de déplacements à la frontière d'une zone de maillage restreinte sur laquelle on appliquera un calcul en éléments finis pour prendre en compte des phénomènes complexes (interaction avec des défauts complexes, phénomènes de diffusions multiples ...).

Les développements nécessaires pour mener à bien ce projet concernent des domaines scientifiques (hybridation formelle des méthodes SA et EF) et numériques (optimisation des calculs EF sur des domaines automatiquement définis), ainsi que dans le domaine du génie logiciel (optimisation des transferts des données EF et SA, parallélisation des codes EF pour des configurations 3D), ainsi que dans le développement d'outils de suivi du calcul.

Les performances attendues du logiciel visent à obtenir des résultats quantitativement comparables à des calculs purement EF, dans des temps de calcul réduits à un, voire deux ordres de grandeur. Les performances de l'outil seront évaluées sur des configurations réalistes définies par les utilisateurs industriels finaux partenaires du projet. Les configurations retenues seront simulées et comparées à des résultats expérimentaux sur maquettes.

Les partenaires du projet

Ce projet associe les équipes du CEA-LIST, coordinateur du projet et développeur de modèles semi-analytiques dans CIVA, ainsi qu'EDF/R&D (développement des codes EF, et utilisateurs du code couplé), le laboratoire POEMS (UMR CNRS-INRIA-ENSTA, spécialiste en mathématiques appliquées et couplage de méthodes numériques) et la société grenobloise CEDRAT.

Les codes de simulation ultrasonore dans CIVA

La plateforme d'expertise en CND multi-techniques (ultrasons, courants de Foucault et radiographie) CIVA [1] développée au CEA, LIST, permet de simuler les résultats d'inspections de ces différentes techniques, pour des configurations plus ou moins complexes. En simulation ultrasonore, les codes existants permettent de prédire le champ ultrasonore et la réponse de défauts au sein de la pièce. Le code de simulation du champ permet de prédire quantitativement le champ rayonné en ondes de volumes (longitudinale et transversale) par un traducteur quelconque dans une pièce de géométrie (forme 3D canonique ou complexe, CAO) et structure complexes (hétérogène, anisotrope).

Le code ATHENA

Le code ATHENA, développé à EDF/R&D, est un logiciel de simulation de la propagation des ondes élastodynamiques en milieux hétérogènes anisotropes quelconques, par une méthode aux éléments finis. Il permet la prise en compte de la diffraction d'une onde sur une fissure de géométrie quelconque grâce à la méthode des domaines fictifs [2,3]. Il permet également la propagation en milieu non borné.

Le couplage CIVA/ATHENA 2D et les connaissances acquises en modélisation hybride

Le couplage entre la méthode de calcul de champ SA dans CIVA et le code EF ATHENA a déjà fait l'objet de collaborations entre le CEA et EDF [4], et a conduit à l'intégration d'une première version 2D utilisable dans CIVA. Le couplage de ces deux méthodes consiste à calculer le champ ultrasonore incident (en termes de déplacement et vitesse) sur l'une des frontières de la boîte EF, puis de propager ce champ et de prendre en compte l'interaction avec des défauts avec le calcul EF. Le couplage, sur la frontière d'entrée, des deux calculs (SA et EF), dans les deux états (avec et sans défauts) via le principe de réciprocité de Auld [5] en régime transitoire permet de synthétiser la réponse d'un défaut au sein de la boîte de couplage.

La figure ci-dessous présente un cas de calcul couplé SA/EF 2D (vues en coupe d'une inspection en ondes transversales obliques à 45°), dans le cas d'un défaut vertical isolé (à gauche) et dans le cas du même défaut en présence d'un réseau de petits défauts (à droite), montrant que l'écho maximal du défaut en présence d'un réseau de petits défaut ne provient plus du plus grand défaut mais d'autres interactions (ce qui potentiellement peut conduire à des problèmes de détection ou caractérisation en fonction des critères de contrôle).

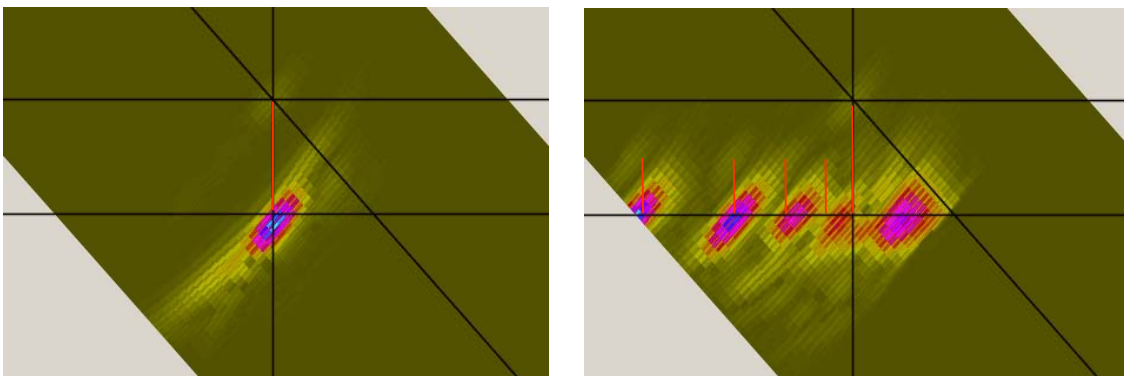


Figure 1 : Exemple de calcul couplé SA/EF en 2D issu de collaborations précédentes : comparaison du BScan vrai en T45 pour une fissure en présence ou non de faïençage

Organisation du projet

Les travaux à réaliser dans le cadre de ce projet visent à étendre le couplage des deux méthodes SA et EF aux configurations 3D. Le projet, d'une durée de trois ans, a démarré début 2007 par une phase d'établissement de spécifications techniques de l'outil logiciel attendu à l'issue du projet. Ces spécifications techniques décrivent le périmètre d'application du logiciel (types de traducteurs, pièces, ondes et phénomènes pris en compte), d'ergonomie (dimensionnement et maillage automatique de la boîte EF pour réduire les temps de calcul), des outils de suivi et d'aide au calcul (visualisation des champs élastodynamiques au sein de la boîte de calcul EF), et de fonctionnement sur différentes architectures informatiques (lancement du calcul EF sur PC « standard » ou avec parallélisation sur serveurs de PC). Des cas d'études de configurations complexes, à des fins de validation du code couplé 3D, sont également décrits dans ces spécifications techniques et serviront de cas tests (en termes de résultats et performances de calcul) au cours du projet.

Parallèlement, une étude formelle a été engagée sur le couplage des méthodes SA et EF de façon à établir une méthode d'hybridation optimale en termes de performances et de précision numérique. Cette étude vise donc à proposer une méthode d'hybridation sur un volume le plus restreint possible autour du ou des défauts (voire sur les défauts eux-mêmes), en choisissant des conditions aux limites appropriées, de façon à réduire encore les temps de calcul EF.

PREMIERS RESULTATS

Spécifications techniques de l'outil logiciel

Les spécifications de l'outil logiciel portent sur les domaines d'applications couverts par le module, l'ergonomie, les outils de suivi de calcul, ainsi que l'architecture informatique du couplage à mettre en place pour bénéficier de la parallélisation. Les seules restrictions d'applications du module couplé concernent les limitations des deux modules de calcul de champ SA (au démarrage du projet : prise en compte d'ondes de volume uniquement, pas d'ondes guidées ni d'ondes de surface) et du calcul EF (pas de prise en compte de l'atténuation ni du bruit de structure sur le code 3D). Les cas d'interaction complexes faisant intervenir des ondes de surface ou ondes rampantes, dès lors qu'elles sont générées au sein de la boîte EF (par réflexion sur le défaut ou sur le fond de la pièce, inclus dans la boîte de couplage) seront intrinsèquement pris en compte dans le code couplé.

Etude du couplage des méthodes SA et EF

La méthode actuelle de couplage entre CIVA et ATHENA présente quelques limitations. En particulier, la taille de la boîte EF doit être choisie assez grande pour permettre à la totalité du champ ultrasonore incident d'y pénétrer, avant que l'onde diffractée par les défauts n'atteigne la frontière de la boîte. Ceci peut devenir très pénalisant dans certaines configurations.

Deux formulations alternatives ont été proposées qui permettent de réduire la taille du domaine de calcul élément finis à la taille du défaut. Il suffit pour cela d'utiliser le champ diffracté comme inconnue dans les couches PML (Perfectly Matched Layer) qui bordent le domaine de calcul. Dans le reste du domaine élément fini on peut ensuite selon la complexité de l'hétérogénéité travailler en champ total ou en champ diffracté. Le couplage avec le code CIVA intervient de façon différente dans les deux cas. Dans le premier cas qui est le plus général, il se traduit par un terme source à l'interface avec la PML. Dans le second cas, le défaut agit comme une source secondaire. Ainsi, par exemple, pour un défaut de type fissure, le champ incident produit par CIVA intervient dans l'équation portant sur le

multiplicateur de Lagrange qui sert à imposer la condition de surface libre sur la fissure (méthode des domaines fictifs).

Mise en place de l'architecture informatique

L'objectif du code couplé est de permettre la simulation de cas complexes 3D pour des industriels utilisateurs. Le code couplé doit pouvoir être utilisé sur des architectures standard (PC de configuration moyenne), même au prix de performances moindres. Cependant il est bien entendu indispensable que des utilisateurs disposant de configurations plus puissantes (clusters) puissent mettre à profit leurs propres architectures pour optimiser les temps de calcul et les capacités mémoire. L'architecture informatique à mettre en place doit donc permettre de bénéficier de la parallélisation du code ATHENA3D lors du couplage avec CIVA. Dans la mesure où le calcul le plus exigeant est celui du calcul EF, seule la parallélisation du code EF est réalisée dans le cadre du projet.

La gestion de l'application ATHENA doit pouvoir s'effectuer, selon la configuration de l'utilisateur, sur le même ordinateur mais aussi sur un ou plusieurs ordinateurs reliés à un réseau (cluster de PC, serveur de calcul LINUX ou Windows) afin de bénéficier ainsi de la parallélisation du code EF. Dans ce but, on utilise un protocole basé sur la technologie Java RMI permettant des connexions et des transferts de données avec des objets distants (objet instancié sur une autre machine virtuelle ou sur une autre machine du réseau) portable à la fois vers des systèmes Windows ou LINUX. L'architecture à mettre en place est représentée à l'aide du schéma suivant :

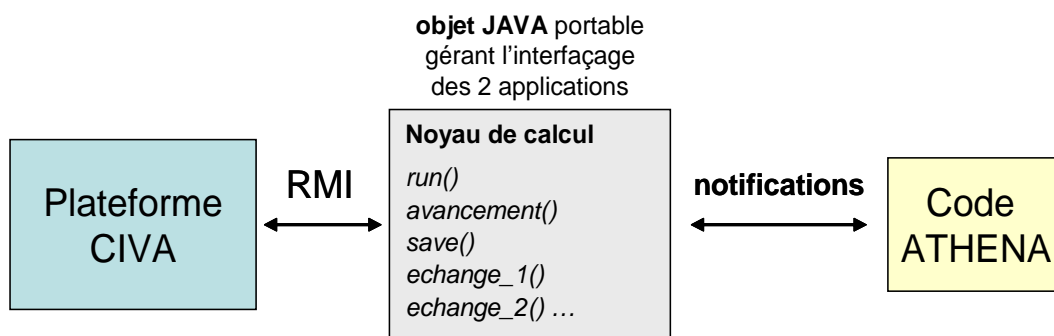


Figure 2 : architecture informatique pour adresser le code EF sur machine standard ou serveur

La première phase consiste donc à développer cette architecture sans modifier pour le moment les méthodes d'échanges avec le code ATHENA et à faire un test de lancement d'un calcul ATHENA sur une machine distante sous environnement LINUX et Windows.

Le deuxième point porte sur la mise en place des protocoles d'échanges de données entre la plateforme logicielle CIVA et le code de calcul EF à la fois en entrée (« source EF ») et en sortie (résultats issus du calcul EF). Les méthodes d'échange des données dépendent nécessairement de leur volume et du protocole de lancement du calcul EF choisi (réseau ou non). Selon les cas, la méthode de transfert peut se faire soit par le biais d'un protocole TCP/IP soit par le biais d'un disque local ou partagé en réseau. Afin d'optimiser la lecture des données issues du calcul EF, ce pour le couplage ou pour la visualisation du champ « à la volée », une modification de la structure des fichiers en sortie est souhaitable. Une des possibilités réside dans le fait de ne garder que les données pour un pas de temps de calcul ce qui limiterait la taille des fichiers concernés.

Développement d'outils de visualisation des calculs couplés

Le résultat du calcul de couplage est le signal temporel du capteur en réception dû à un défaut, pour une position de déplacement relativement à la pièce, et pour un réglage donné (cas des transducteurs multi-éléments). Outre ce signal, une information utile pour interpréter les phénomènes complexes d'interaction ayant eu lieu entre l'onde incidente et le défaut ayant donné naissance à l'écho observé, réside en l'observation des champs élastodynamiques diffractés par le défaut, calculés dans la boîte EF, en chaque pas de temps. Ces données (calculs des déplacements en chaque maille de la boîte EF, en chaque itération temporelle du calcul) peuvent être visualisées sous formes d'animations vidéo ou d'images en des temps donnés. En outre, cette visualisation permet de comprendre quel type d'onde ou quelle partie du défaut conduit principalement à la formation de l'écho, ce qui permet d'optimiser des techniques de contrôle adaptées à la configuration d'étude. Il est proposé de fournir, dans le cadre de MOHYCAN, les mêmes types d'images et d'outils que ceux actuellement disponibles (dans CIVA9) pour le calcul de champ ultrasonore : affichages des résultats dans des fenêtres dédiées (et enchaînement de zoom, traitements d'images, segmentation) et dans la scène graphique de contrôle. Ces outils devront être étendus aux cas 3D (représentation des données EF dans différents plans ou sous formes de nappes isochrones ou isoamplitudes). A titre d'exemple, les images ci-dessous présentent la propagation et l'interaction d'un champ en ondes longitudinales avec un défaut cylindrique, au sein de la boîte de calcul EF, pour le code couplé CIVA/ATHENA 2D. Ces images, représentées dans la scène de contrôle 3D, correspondent à trois temps discrets : front longitudinal incident sur le défaut, début de l'interaction et diffraction par le défaut cylindrique, ondes diffractées en mode longitudinal et transversal. Ces outils sont en cours de validation sur le code couplé ATHENA 2D et seront prochainement étendus au code couplé 3D pour MOHYCAN.

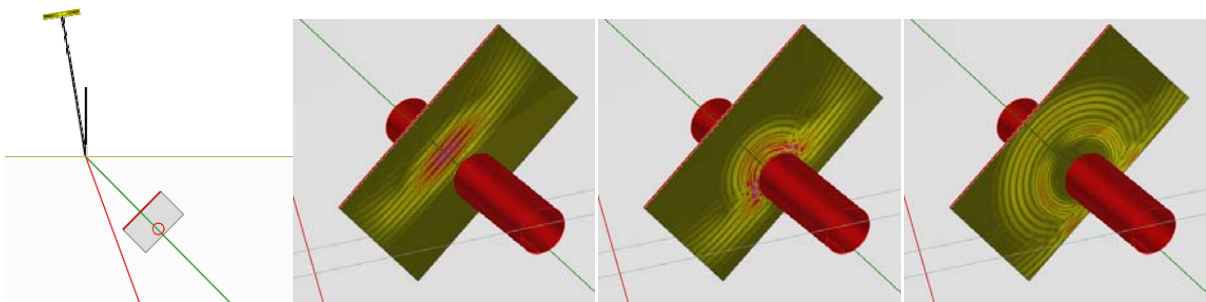


Figure 3 : Illustration de l'outil de visualisation « dynamique » du champ calculé à l'aide du code EF : cas d'un contrôle en L45 sur un TG de 4mm de diamètre, images du champ avant, pendant et après l'interaction avec le défaut.

Développement de la parallélisation du code EF

Le développement de la maquette de couplage a démontré que, pour la plupart des configurations en trois dimensions, même si la méthode de couplage permet de réduire fortement la taille du domaine de calcul traité par éléments finis, on arrive très rapidement à la limite de la mémoire des machines de calcul standard. Une idée pour pallier à ce genre de problème est de paralléliser le code aux éléments finis afin de distribuer la mémoire sur un cluster de PC. Un premier travail de parallélisation a été effectué, il permet de découper le domaine de calcul en tranche et de confier la propagation sur chaque tranche à un processeur différent. Le code ainsi parallélisé a donné des résultats encourageants et les communications entre processeurs ne posent pas trop de problème (c'est bien souvent le cas lorsque l'on parallélise un code) tant que la tranche découpée n'est pas trop fine. Depuis la parallélisation a été étendue pour pouvoir traiter des cas de matériau hétérogène. Dans l'avenir, en fonction des limites des machines et des tailles des problèmes à traiter, il est possible que l'on soit contraint de découper le domaine de calcul non pas en tranche mais

en cubes afin de pouvoir disposer de nombre de processeurs plus grands sans que la finesse de la tranche pose problème.

Parallèlement, il peut être envisagé dans le cas de couplage avec plusieurs boîtes traitées par éléments finis, d'adopter une parallélisation par boîtes éventuellement disjointes. Enfin, il est bien entendu que le fait que le code parallélisé soit compatible avec CIVA dans le cadre du couplage nécessite que le code couplé puisse gérer un code parallèle.

CONCLUSION

Le projet MOHYCAN permettra de disposer d'un modèle de simulation ultrasonore, disponible au sein de la plate-forme CIVA, capable de prendre en compte des configurations complexes 3D grâce au couplage de méthodes SA et EF. Les performances numériques attendues de ce module, et la mise en place d'outils de suivi et d'analyse de calcul dédiés au CND devraient permettre de répondre à des cas industriels complexes sans nécessité d'expertise numérique de l'opérateur. Ce projet, d'une durée de 3 ans a démarré début 2007 par une phase de spécifications techniques de l'outil logiciel en vue de déterminer les domaines d'applications du module, ainsi que les outils souhaités pour permettre l'interprétation et le suivi du calcul en 3D. En parallèle de ces spécifications techniques, une étude formelle sur l'hybridation des deux méthodes a été engagée de façon à garantir à la fois la stabilité numérique du calcul et la pertinence du couplage, ainsi que des performances numériques optimales par la restriction du calcul EF autour d'un domaine le plus restreint possible autour du ou des défauts. Le projet se poursuit par la mise en œuvre de la formule de couplage optimale, la mise en place des outils de suivi et d'analyse de calcul, la procédure d'appel au code EF parallélisé. La dernière phase du projet consistera à valider expérimentalement l'outil sur des cas réalistes et évaluer ses performances numériques, par rapport à des calculs SA ou EF purs (hors couplage), avant intégration finale au sein de la plateforme CIVA. Une base d'exemples documentés sera réalisée de manière à valoriser l'outil obtenu et faciliter son déploiement vers la communauté des utilisateurs.

RÉFÉRENCES

- [1] CIVA software website, <http://www-civa.cea.fr>
- [2] Becache E., Joly P., Tsogka C., An analysis of new mixed finite elements for the approximation of wave propagation problems, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 37, 2000, pp. 1053-1084
- [3] Chassignole B., Dupond O., Schumm A., Fouquet T., Moysan J., Ultrasonic modelling of austenitic stainless steel welds: improvement in the comprehension of anisotropic and heterogeneous structure effects, 4th ICNDE London, 2004, pp. 910-918
- [4] Gengembre N., Lhémy A., Omote R., Fouquet T. and Schumm A., A semi-analytic-FEM hybrid model for simulating UT configurations involving complicated interactions of waves with defects, in *Review of progress in QNDE*, Vol. 23, 2004, pp. 74-80
- [5] Auld B. A., General electromechanical reciprocity relations applied to the calculation of elastic wave scattering coefficients, *Wave motion*, Vol. 1, 1979, pp. 3-10