

SIMULATION DE LA RÉPONSE ULTRASONORE DE DÉFAUTS RÉALISTES DANS CIVA

SIMULATION OF THE UT RESPONSE OF REALISTIC FLAWS IN CIVA SOFTWARE

Clarisse Poidevin ¹, Loic Roumilly ¹, G.Cattiaux ², T.Sollier ²

¹ CEA, LIST, Centre de Saclay, point courrier 120, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France
Tél. 01 69 08 90 43 - Fax. 01 69 08 75 97
E-mail : clarisse.poidevin@cea.fr

² IRSN, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Boite postale BP 17, 92262
Fontenay aux Roses, Cedex France
Tél. 01 58 35 72 18
E-mail : gerard.cattiaux@irsn.fr

Résumé

L'appréciation des risques dus au vieillissement des installations nucléaires nécessite de disposer de moyens CND fiables et efficaces pour suivre l'évolution de défauts existants ou détecter l'apparition de nouveaux défauts (par fatigue, corrosion sous contrainte etc..).

Ces défauts peuvent présenter des caractéristiques assez différentes de celles d'un défaut artificiel (faciès, extension, profil...). La prise en compte de défauts 'réels' dans la simulation des contrôles est donc importante pour pouvoir évaluer de façon simple et rapide les capacités de détection et de caractérisation des méthodes de contrôles.

Les outils de simulation du logiciel CIVA permettent aujourd'hui de prédire la réponse ultrasonore de défauts de type artificiel (entailles électro-érodées, trous à fonds plats, trous génératrice) ou réalistes tels que des défauts plans multi facettes ou à contour irrégulier.

Une validation des modèles d'interaction faisceau/défauts sur des défauts 'réalistes' est ici présentée. Les réponses ultrasonores de défauts multi-facettes ont été simulées et comparées à des résultats expérimentaux obtenus sur des défauts artificiels pour différents angles et fréquences de contrôle.

Abstract

Reliable and efficient NDE techniques are needed to assess the risks due to ageing of nuclear power plants. NDE techniques must ensure the measurement of potential evolution of existing flaws or the detection of new flaws due to fatigue or stress corrosion damage.

Natural flaws may have different features from artificial flaws (profile, extension,...). Thus, it is important to take account for realistic flaws in simulation tools in order to easily assess the detection and characterization performances of inspection methods.

Simulation tools available in CIVA Software allow predicting the response of artificial flaws (notches, flat bottom holes, side drilled holes) or realistic flaws such as multi-faceted planar flaws or irregular shaped flaws. A validation of models dedicated to defect response prediction is here presented. Ultrasonic response of multi-faceted defect have been simulated and compared to experimental results obtained on artificial defects for various angles and frequency.

INTRODUCTION

La simulation en CND constitue un moyen d'évaluation simple et rapide des méthodes de contrôles et de leur capacité à détecter ou caractériser des défauts dans les configurations particulières. Les méthodes de contrôle par ultrasons sont largement utilisées sur les composants des installations nucléaires. Les enjeux de sûreté de ces composants, imposent que ces méthodes soient capables de détecter, caractériser et dimensionner les défauts. Les mécanismes d'endommagement auxquels sont soumis certains composants (fatigue thermique, corrosion sous contrainte) peuvent faire apparaître des fissures. Selon le mécanisme d'endommagement, les caractéristiques des fissures peuvent varier et s'écarter notablement des caractéristiques d'un défaut idéalisé de type entaille.

Les outils de simulation ultrasonore du logiciel CIVA permettent aujourd'hui de prendre en compte les principales composantes d'un contrôle ; ils permettent de traiter une grande variété de capteurs (conventionnels contacts ou immersion, multi-éléments), des géométries canoniques ou complexes à partir de descriptions CAO, des matériaux variés (isotrope, anisotropes, homogènes, hétérogènes), et des défauts de type artificiels (entailles électro-érochées, trous à fonds plats, trous à fond hémisphériques ou génératrices) ou réalistes tels que des défauts plans multi-facettes ou à contour irrégulier. Ces outils peuvent être utilisés pour évaluer les performances des méthodes de contrôle ou pour optimiser les méthodes en fonction des difficultés propres à chaque composant (géométrie, matériau ou type de défaut recherché). La simulation permet, en effet, de faire varier aisément les nombreux paramètres pouvant influencer le contrôle.

Dans de nombreux cas, les performances des moyens de contrôle restent évaluées expérimentalement sur des maquettes comportant des défauts artificiels. Ces défauts sont généralement représentatifs des défauts recherchés en termes de position, d'orientation et de dimensions. Les essais sur défauts réels restent marginaux car il est difficile et coûteux d'implanter des défauts réels 'maîtrisés' dans des maquettes. Dans ce cas la simulation est une alternative pour évaluer les écarts entre défauts réels et défauts artificiels.

Afin de pouvoir accorder une confiance suffisante aux modèles et connaître leur domaine de validité en regard des applications de contrôle, des validations sont menées sur différents cas de contrôle. Cet article présente des exemples de validation menées sur des défauts artificiels de forme complexe par comparaison à des données expérimentales.

PRINCIPE DES MODELES D'INTERACTION FAISCEAU/DEFAUT

Les modèles d'interaction faisceau/défaut sont basés sur une approche semi-analytique [1]. Cette approche permet de traiter des configurations de contrôles complexes tout en conservant des temps de calculs rapides. Les calculs de champ ultrasonore sont basés sur la méthode dite 'des pinces' appliquée à l'élastodynamique [2-3]. Le champ est calculé à partir de la somme des contributions issues de points sources répartis sur la surface du traducteur. Les différentes contributions sont sommées en tenant compte de leurs temps de vol, de leur amplitude. L'interaction du champ ultrasonore avec le défaut est calculée selon différentes méthodes qui dépendent de la nature du défaut et de la technique de contrôle. L'approximation de Kirchhoff est utilisée pour les défauts volumiques, cylindrique (trous génératrices) et les défauts plans, en considérant que l'onde ne se propage pas au sein du défaut. Pour les défauts plans, les échos de diffraction sur les extrémités peuvent être simulés par la Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD), en mode pulse écho ou en TOFD. Une version adaptée de l'approximation de Born est utilisée pour les défauts de type inclusions solides [4]. Le calcul du signal en réception est réalisé suivant le principe de réciprocité basé sur le théorème de Auld [5]. Selon ce principe de réciprocité, il est possible

de déduire la sensibilité du capteur en réception à partir du champ transmis sur le défaut. Ces champs peuvent être identiques ou différents (ex. écho de coin détecté en conversion de mode, configuration Tandem avec un capteur émetteur et un capteur récepteur ou capteur multi-éléments avec des lois de retard différentes à l'émission et à la réception).

Depuis la version CIVA_8, le logiciel permet de considérer différents types de défauts :

- i. Un ou plusieurs défauts, de position et d'orientation quelconques, sans prise en compte des interactions entre défauts excepté l'ombrage
- ii. Des défauts d'étalonnage ou de calibration (trous génératrices, trous à fonds hémisphériques, trous à fonds plats),
- iii. Défauts plans de contour rectangulaire ou définis par CAO ou semi-elliptique (CIVA_9)
- iv. Des défauts multi-facettes.

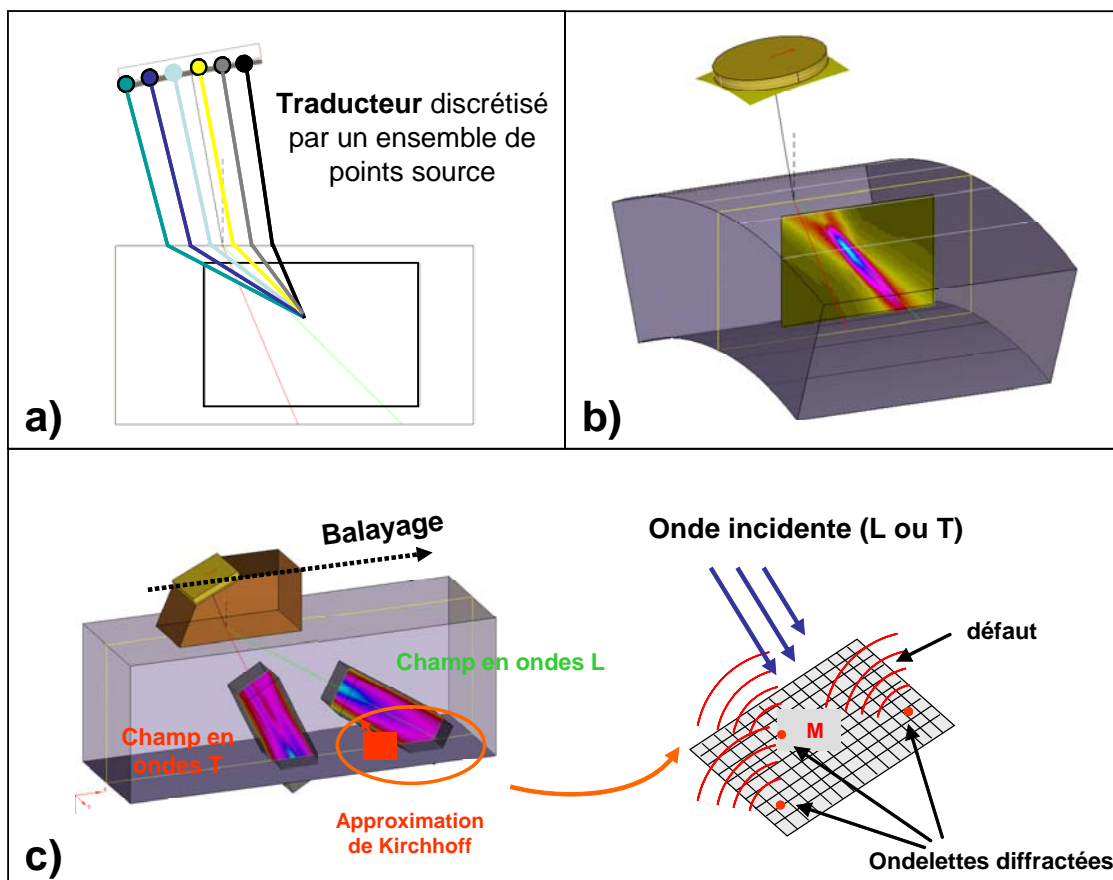


Figure 1. Illustration schématique des outils de simulation ultrasonore dans CIVA : a) principe du calcul de champ ultrasonore b) exemple de calcul de champ ultrasonore rayonné dans une pièce cylindrique c) diffraction par le défaut selon l'approximation de Kirchhoff

SIMULATION DE LA REPONSE DE DEFAUTS REALISTES

Des études ont été menées avec l'IRSN pour évaluer par la simulation la réponse ultrasonore de défauts réalistes et valider un outil permettant d'effectuer des comparaisons entre la réponse de défauts réels et la réponse de défauts artificiels. Pour cela, les outils de simulation de CIVA prenant en compte des défauts irréguliers de type 'multi-facettes' ont été

testés et les résultats de simulation obtenus avec le modèle Kirchhoff ont été comparés à des données expérimentales dans différentes configurations de contrôle.

Simulation de contrôle de défauts multi-facettes

Les outils de simulation intégrés depuis la version CIVA_8 permettent de simuler la réponse de défauts multi-facettes constitués de plusieurs segments. Ces derniers peuvent être étendus par translation dans la direction perpendiculaire de façon à créer des défauts plans CAO 2.5D ou prolongés par une poly-ligne de façon à former des défauts multi-facettes 3D.

Un outil CAO permettant de saisir à la souris le profil d'un défaut est également disponible dans cette version du logiciel. On peut, de plus, superposer une macrographie dans le plan de l'outil CAO pour définir aisément le profil d'un défaut complexe (figure 2).

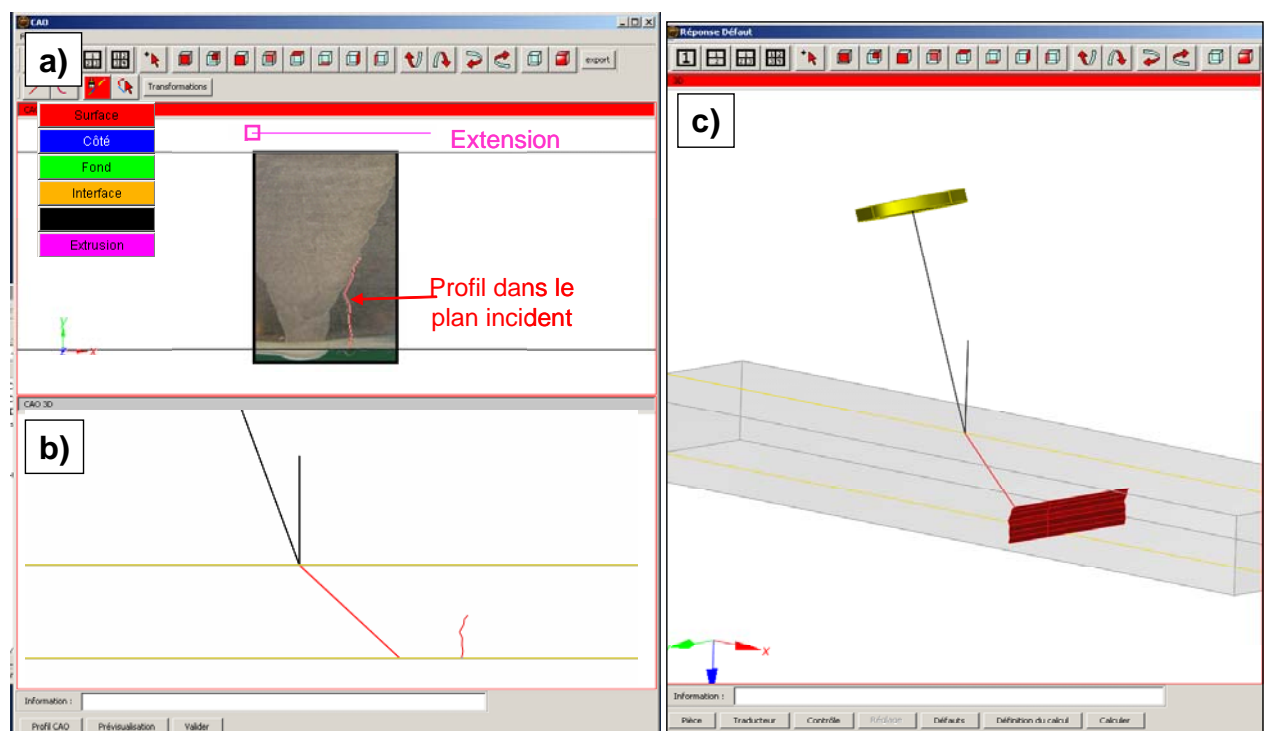


Figure 2. Description des défauts multi-facettes dans CIVA : a) outil CAO de saisie à partir d'une macrographie b) vue en coupe du défaut multi-facettes dans le plan de contrôle c) vue 3D de la configuration de contrôle

L'interaction du champ ultrasonore avec le défaut multi-facettes est calculée en sommant les contributions élémentaires de chaque facette. Deux exemples correspondant à des contrôles en ondes $L0^\circ$ de défauts multi-facettes 2.5D et 3D sont présentés en figure 3. Les résultats de simulation sont illustrés sous la forme de vues Cscan et Bscan superposées au défaut. Les vues Cscan mettent en évidence des variations d'amplitude induites par l'orientation des différentes facettes constituant le défaut. Les vues Bscan mettent en évidence des échos spéculaires sur les facettes faiblement désorientées et des échos de diffraction au niveau des discontinuités entre facettes.

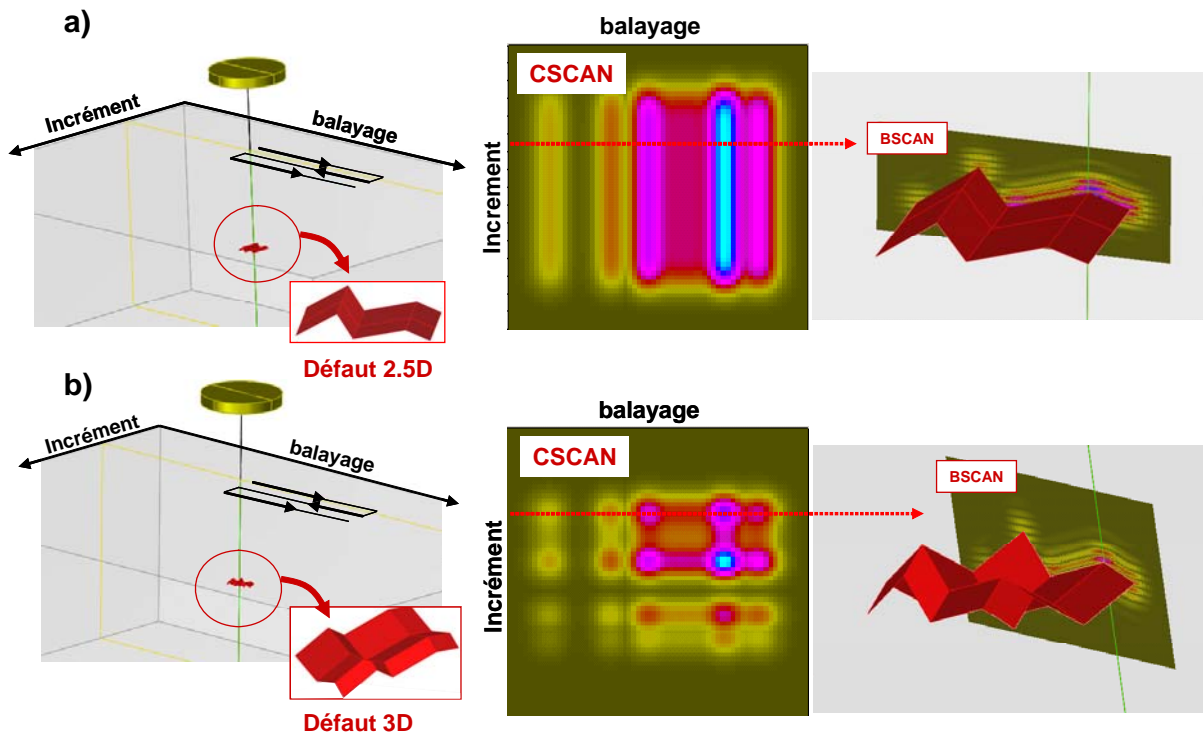


Figure 3. Simulation de la réponse de défauts multifacettes avec un traducteur immersion en $OL0^\circ$
 a) exemple d'un défaut multi-facettes 2.5D b) exemple d'un défaut multi-facettes 3D

Le comportement des défauts réels dans les composants des installations nucléaires étant primordial, il est important de pouvoir comparer la réponse de défauts réels et de défauts artificiels en évaluant notamment les effets liés aux irrégularités de forme des défauts. L'exemple de la figure 4 montre une comparaison entre un défaut plan dont le profil est irrégulier et dévié par rapport à la normale à la paroi interne et la réponse d'un défaut idéalisé de type entaille verticale détectés en ondes $T45^\circ$ avec un capteur plan. Les deux défauts présentent une signature différente : le défaut multi-facette fait apparaître un écho intermédiaire entre l'écho de coin et l'écho de diffraction. Les amplitudes des échos mesurées par rapport à l'amplitude d'une génératrice de diamètre 2 mm permettent de déterminer quantitativement l'effet du profil sur la détection des échos de coin et de diffraction.

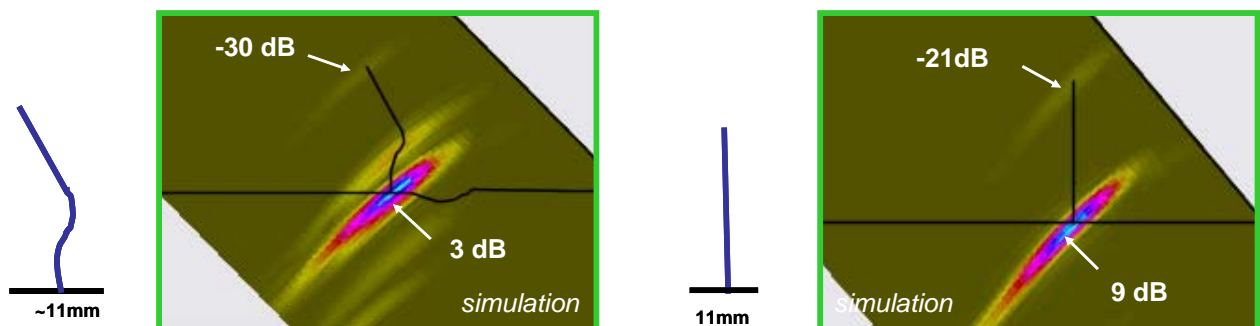


Figure 4. Comparaison de la réponse d'un défaut réel et d'un défaut artificiel a) Réponse d'un défaut réaliste avec un traducteur contact $OT45^\circ$ b) Réponse d'un défaut de type entaille avec un traducteur contact $OT45^\circ$

La simulation peut également être utilisée pour optimiser les méthodes de contrôle. Sur des défauts complexes, il est intéressant de pouvoir optimiser le design d'un transducteur et de définir un mode d'acquisition adapté aux caractéristiques du défaut recherché. L'exemple présenté en figure 5 illustre la réponse d'un défaut multi-facettes lors d'une acquisition avec un transducteur multi-éléments. La découpe annulaire sectorielle du transducteur permet de combiner une focalisation en profondeur ainsi qu'un balayage angulaire du faisceau dans le plan d'incidence. Ce mode d'acquisition permet de favoriser la détection d'échos le long du profil du défaut et d'améliorer ainsi sa caractérisation. L'optimisation par la simulation des méthodes de contrôle doit toutefois être accompagnée d'essais sur maquettes afin de démontrer en conditions réelles les performances de nouvelles méthodes en terme de caractérisation de défauts.

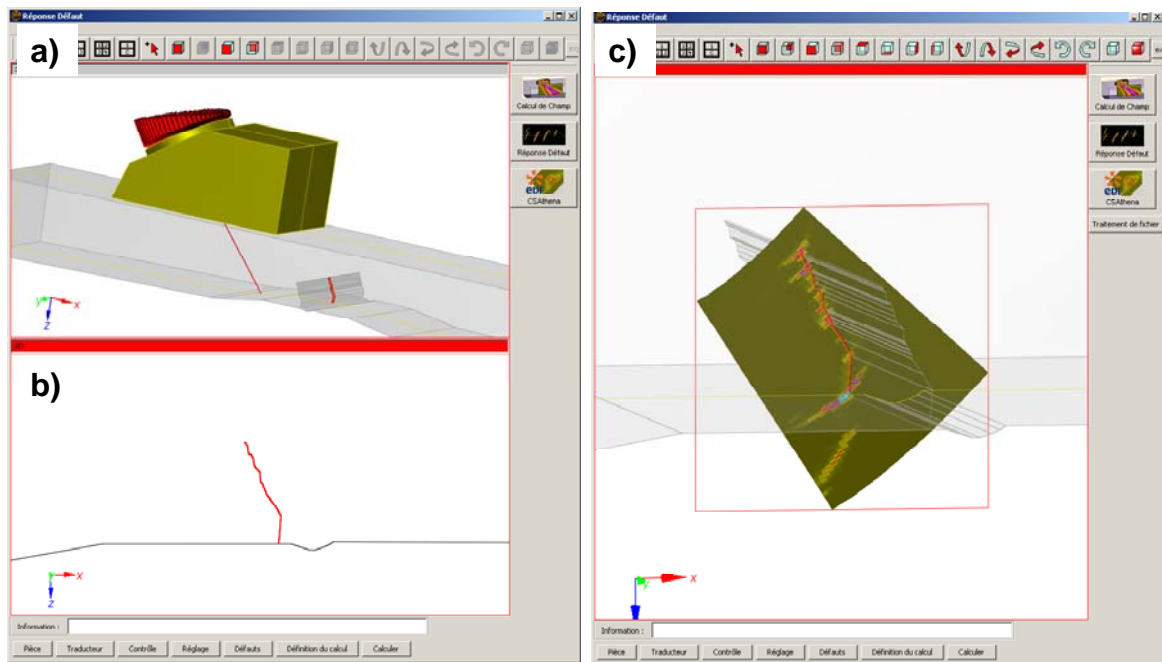


Figure 5. Simulation du contrôle d'un défaut multi-facettes par une technique multi-éléments : a) transducteur annulaire sectoriel b) défaut multi-facettes 2.5D c) réponse du défaut en OT en balayage angulaire

VALIDATIONS EXPERIMENTALES

Des validations ont été menées sur des cas de défauts complexes par comparaison à des données expérimentales. Pour cela, des défauts artificiels de forme irrégulière ont été implantés dans des maquettes. Les résultats expérimentaux obtenus sur ces défauts ont été comparés aux résultats de simulation afin de valider la prise en compte par le modèle des phénomènes liés à la forme complexe des défauts.

La figure 6 montre une comparaison entre expérience et simulation de la réponse d'un défaut multi-facettes d'extension plane lors d'un contrôle en ondes T45° à 2.25 MHz. Les images Bscan expérimentale et simulée montrent la présence d'un écho de coin localisé en pied de défaut, d'un écho de diffraction en sommet de défaut et d'un écho spéculaire intermédiaire résultant de la forme complexe du défaut. L'amplitude des différents échos, référencée par rapport à un trou génératrice de 2 mm de diamètre, indique un bon accord quantitatif entre le modèle et l'expérience.

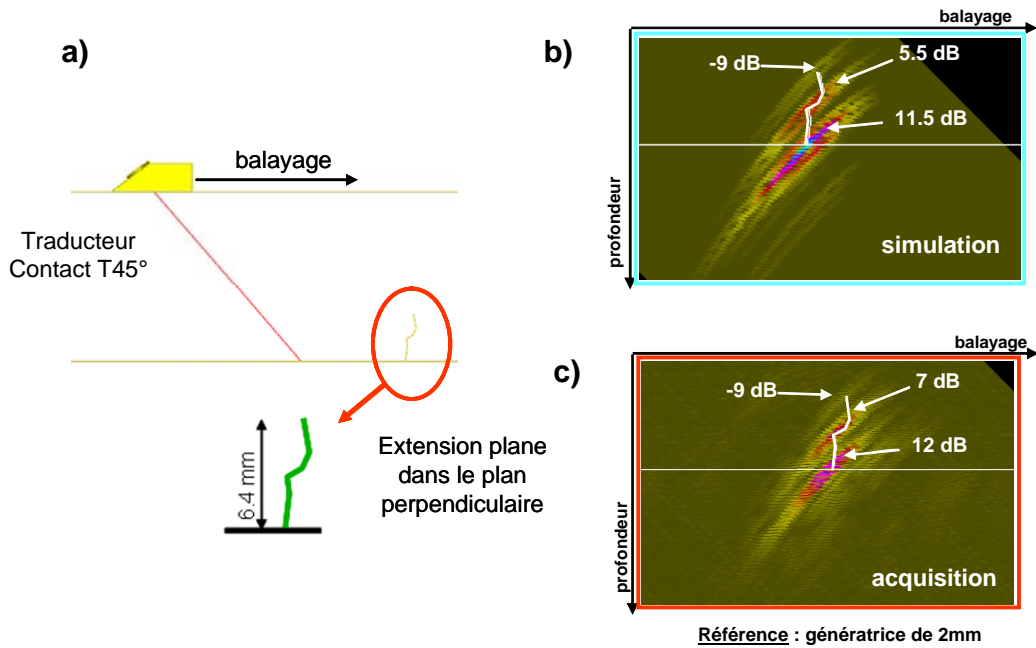


Figure 6. Réponse ultrasonore d'un défaut CAO multi-facettes lors d'un contrôle en ondes T45° à 2.25 MHz a) configuration de contrôle b) Bscan vrai simulé, c) Bscan vrai expérimental

Les contrôles en ondes longitudinales font généralement apparaître des échos supplémentaires résultant de conversions de mode sur le défaut et d'interaction avec les ondes transversales générées par le capteur. Les échos liés aux conversions de mode sont parfois exploités, lors des contrôles, pour confirmer la présence d'un défaut plan de type 'fissure'. Dans le cas d'un défaut irrégulier, ces échos peuvent être altérés par le profil du défaut. La figure 7 montre la réponse d'un défaut multi-facettes lors d'un contrôle en ondes L45°. Les images Bscan vrai indiquent une bonne prédiction qualitative et quantitative des différents échos détectés sur le défaut : les échos liés aux ondes longitudinales, les conversions de mode ainsi que les échos liés aux ondes transversales.

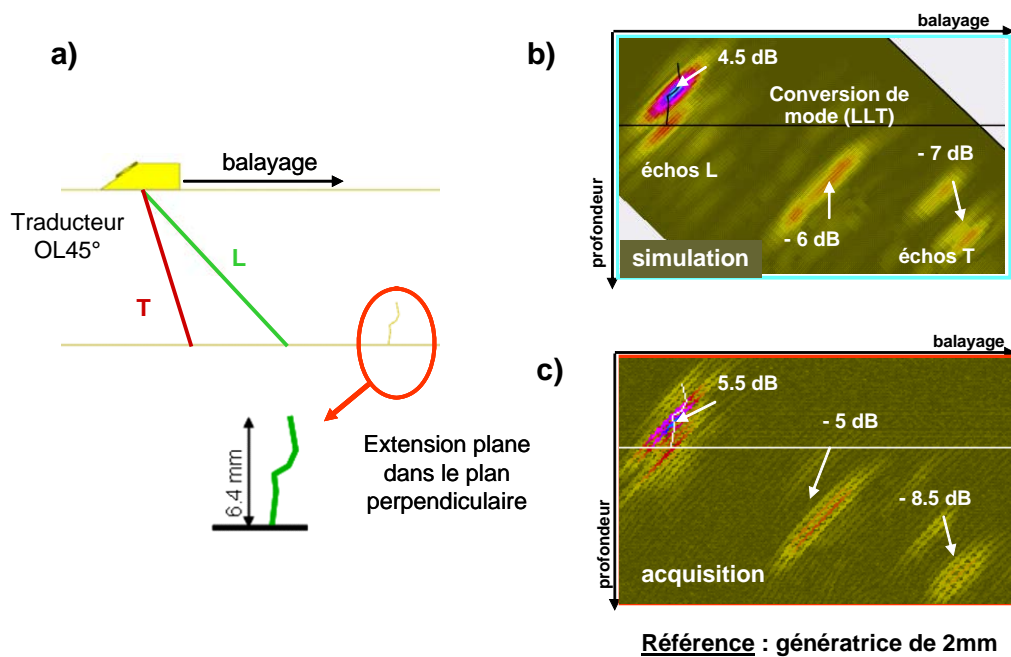


Figure 7. Réponse ultrasonore d'un défaut CAO multi-facettes lors d'un contrôle en ondes OL45° à 2.25 MHz a) configuration de contrôle b) Bscan vrai simulé, c) Bscan vrai expérimental

Les mécanismes de propagation des fissures peuvent générer des profils de défaut très variables dans le plan de propagation de la fissure. Ce paramètre est susceptible de modifier la réponse en diffraction du défaut et d'altérer la capacité d'une méthode à caractériser et dimensionner une fissure en hauteur. Pour valider la prise en compte de ces effets dans la simulation, des acquisitions ont été réalisées sur une entaille usinée avec un profil irrégulier formé de facettes désorientées de +/- 5° à 20° par rapport à une arête droite. Une simulation a été réalisée sur ce même défaut avec le modèle TGD. L'amplitude des échos de diffraction a été évaluée en fonction de l'orientation des arêtes. Les résultats synthétisés dans le tableau de la figure 8 (8 c)) montrent un bon accord entre les amplitudes simulées et expérimentales.

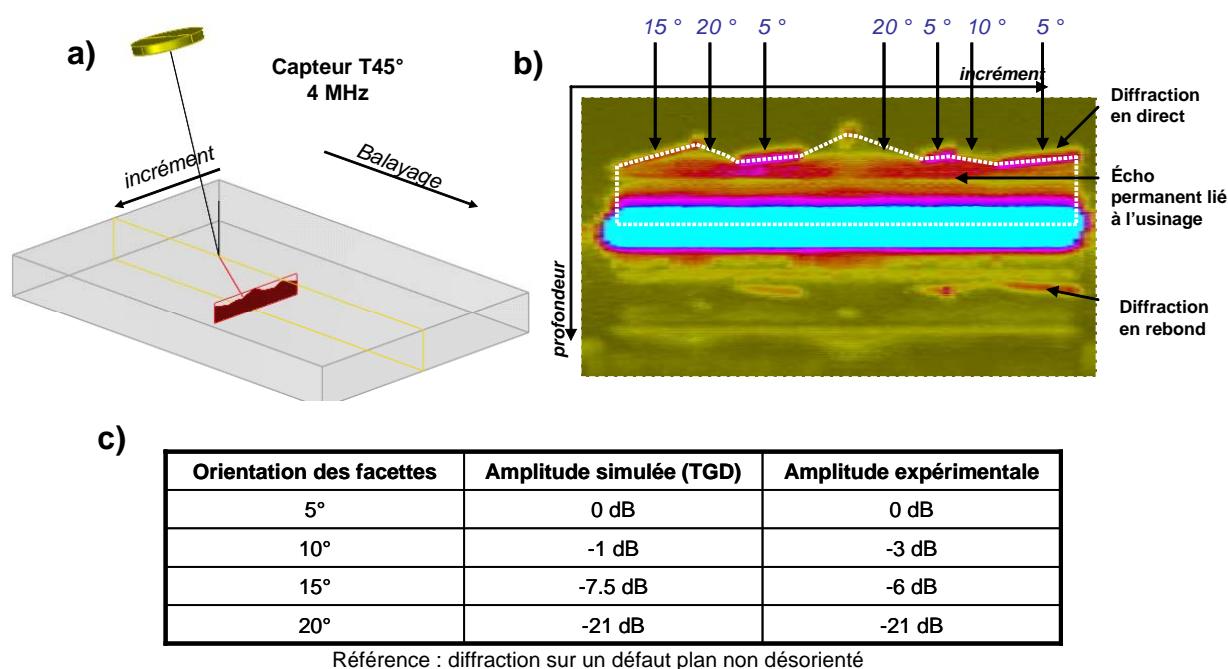


Figure 8. Réponse ultrasonore d'un défaut CAO plan à contour variable a) configuration de contrôle b) Dscan expérimental c) comparaison des amplitudes simulées (TGD) et expérimentales

CONCLUSION

Les outils de simulation ultrasonore du logiciel Civa permettent de prendre en compte des défauts de formes irrégulières décrits par CAO. Les outils actuellement disponibles permettent de décrire de façon simple des défauts multi-facettes étendus par translation ou suivant une poly-ligne pour former un défaut multi-facettes 3D.

Ces fonctionnalités ont été testées dans diverses configurations de contrôles utilisant des transducteurs conventionnels ou des transducteurs multi-éléments. Ces applications montrent que le logiciel peut être utilisé pour comparer la réponse de défauts réalistes à celle de défauts idéalisés en évaluant l'influence du profil du défaut sur sa réponse ultrasonore ou encore pour optimiser des méthodes de contrôle sur des défauts de forme complexe.

Des validations ont été menées par comparaison à des données expérimentales obtenues sur des défauts artificiels multi-facettes et des défauts plans à contour irrégulier. Ces validations contribuent à l'ensemble des actions menées par le CEA avec différents

partenaires pour améliorer la maîtrise du logiciel et la connaissance du domaine de validité des modèles en regard des applications de contrôle.

Concernant la prise en compte des défauts réalistes dans CIVA, les études réalisées avec le soutien de l'IRSN montrent que la réponse des défauts multi-facettes est globalement bien décrite par les modèles semi-analytiques d'interaction faisceau/défaut. Les limites de ces modèles portent aujourd'hui sur des configurations de contrôle mettant en jeu des ondes de surface générées en fond de pièce ou sur le défaut au voisinage des angles critiques ou des rebonds multiples entre les branches d'un défaut (ex. défauts ramifiés). De nouveaux développements devront être entrepris pour prendre en compte ces phénomènes complexes et élargir le champ d'applications des modèles dans le cas des défauts réels.

REFERENCES

- [1] Informations sur CIVA : <http://www-civa.cea.fr>
- [2] Calmon P., Lhémy A., Lecœur-Taibi I. and Raillon R., "Integrated models of ultrasonic examination for NDT expertise", in Review of progress in QNDE, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 16B, Plenum Press, New-York, 1997, pp. 1861-1868.
- [3] Gengembre N., "Pencil method for ultrasonic beam computation", Proc. of the 5th World Congress on Ultrasonics, Paris, 2003.
- [4] Darmon M., Calmon P. and Bele C., "Modelling of the ultrasonic response of inclusions in steels", in Review of progress in QNDE, Vol. 22A, AIP publishing, 2003, pp. 101-108.
- [5] Auld B.A., Wave motion, 1979 1 3-10
- [6] Mahaut S., Lonne S., Roumilly L., Cattiaux G., 'Validation of CIVA simulation tools for ultrasonic Inspection in Realistic Configuration', International Conference on NDE in relation to structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, 2006