

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE SIMULATION D'UNE INSPECTION TOFD AU SEIN DU LOGICIEL CIVA TOFD INSPECTION SIMULATION USING CIVA SOFTWARE

Sana Chaffaï¹, Michel Darmon¹, Steve, Mahaut¹, Roch Menand²

¹ Commissariat à l'Energie Atomique, CEA-LIST, 91191 Gif-sur-Yvette, France;

² EDF, CEIDRE, 2 rue Ampère 93206 Saint Denis Cedex 1, France;

Résumé

L'inspection TOFD est une technique employée en examen non destructif en vue de la détection et de la caractérisation de défauts. La simulation d'un contrôle TOFD peut s'avérer utile pour analyser et améliorer ces méthodes plus particulièrement dans des configurations complexes.

Un nouveau module dédié à la simulation TOFD a été développé au sein du logiciel CIVA [1]. Ces outils s'appuient sur la théorie géométrique de la diffraction (GTD) et permettent de prédire la réponse ultrasonore de défauts plans désorientés ou de défauts complexes pour des formes variées de pièces (plane, paramétrique telle qu'un piquage ou définie par CAO). Outre les échos de diffraction, le module disponible dans CIVA peut simuler les ondes latérales et les échos de fond et prendre en compte les effets d'ombrage par des défauts. Différentes mesures expérimentales ont été effectuées dans le but de valider les modèles développés.

Les validations expérimentales du module ont été mises en œuvre dans des pièces planes contenant des défauts rectangulaires ou plans définis par CAO et présentant différentes désorientations possibles (tilt, skew, désorientation verticale). Des simulations et des mesures ont aussi été confrontées dans des configurations sur piquage. La communication présente les outils de simulation validés pour des contrôles de piquages et les développements en cours.

Abstract

TOFD techniques are used in Non Destructive Examination to detect and to characterize flaws. Simulation of TOFD inspection can be helpful to analyze and improve these methods especially for complex configurations.

A new TOFD modeling tool has been developed in CIVA software [1]. This module is based on the geometrical theory of diffraction (GTD) and can predict the ultrasonic response of disoriented planar or complex flaws for various specimen shapes (planar, parametric - as nozzles - or CAD). Besides diffraction echoes, the module available in CIVA allows to simulate lateral surface waves and backwall echoes and takes into account the shadowing effects from flaws. Various experimental measurements were carried out in order to validate this modeling tool.

Experimental validations of the module were performed on planar specimens containing rectangular and CAD contour planar flaws with different orientations (tilt, skew, vertical orientation). Simulation and experiments were also performed on nozzles configurations. The paper presents the simulation tools validated for nozzle inspections and the development under progress.

1- INTRODUCTION

De nouveaux développements ont été réalisés au sein du logiciel CIVA, en complément des outils de simulation pulse-écho, pour permettre de simuler les inspections TOFD. Ces nouveaux outils sont dédiés à l'aide à la conception, l'optimisation ou l'interprétation des inspections TOFD de pièces à géométries complexes.

La technique TOFD (Time of flight diffraction) est une méthode en émission-réception séparée qui nécessite l'utilisation de deux capteurs positionnés à une distance fixe donnée l'un de l'autre. C'est une technique qui exploite les phénomènes de diffraction ultrasonore générés par les extrémités des défauts permettant ainsi de les détecter et de les dimensionner.

Les différents phénomènes physiques observés lors d'un contrôle TOFD sur une pièce plane contenant un défaut rectangulaire à cœur sont décrits sur la *Figure 2*.

- Les échos de diffraction (2 et 2') sont réfléchis par les extrémités des défauts et reçus par le récepteur.
- L'onde latérale (1) correspond au trajet le plus court entre les deux capteurs et dans la majorité des cas suit la surface de contrôle.
- L'écho de fond (3) provient de la réflexion du champ ultrasonore sur le fond de la pièce.

Un phénomène d'ombrage sur l'écho de fond apparaît lorsque le défaut est débouchant en fond de pièce (surface interne). Le champ est alors partiellement réfléchi par le défaut ce qui se traduit par une baisse d'amplitude de l'écho de fond à cette position. De même un défaut débouchant en surface externe empêchera l'onde latérale de se propager d'un capteur à l'autre (Cf. *Figure 1*)

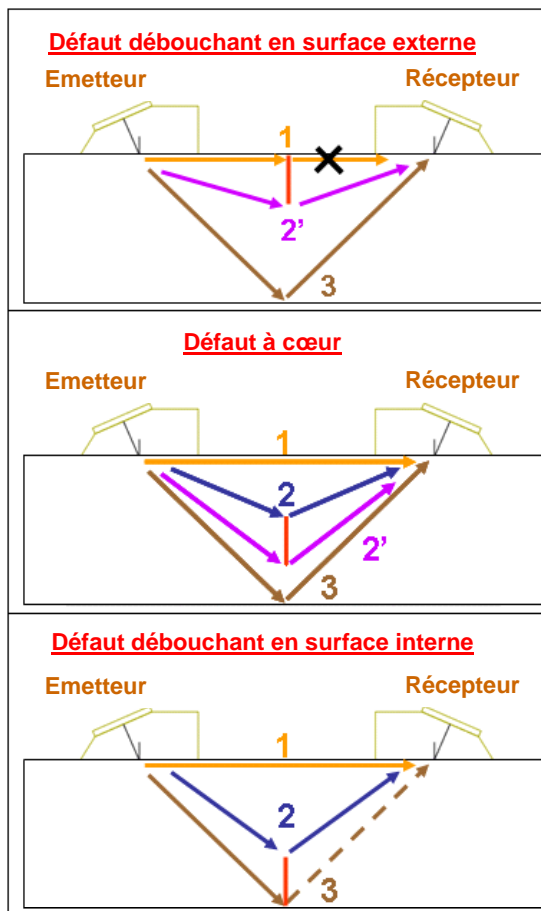


Figure 1: Illustration d'une inspection TOFD sur une pièce plane et pour différentes positions de défauts.

Une image expérimentale d'une inspection TOFD sur une pièce plane contenant un défaut à cœur est reportée *Figure 2*. Il s'agit d'une acquisition réalisée dans un plan perpendiculaire au plan du défaut en utilisant deux traducteurs au contact identiques générant des ondes L60° à 2.25MHz. Notons la présence sur cette figure d'une onde latérale, d'un écho de fond et de deux échos de diffraction (indiqués par 2 et 2') de forme parabolique et présentant un déphasage de 180° (ce qui est habituellement observé pour ce type de contrôle) : il s'agit des échos diffractés par l'extrémité haute et basse du défaut. Ces échos sont conventionnellement utilisés pour le dimensionnement et la localisation des défauts [2]. A partir de cette technique de diffraction, des méthodes de dimensionnement et caractérisation ont été décrites par Silk et Lidington [3] sur des configurations de contrôle sur pièces planes il y a une trentaine d'années.

Des besoins en simulation apparaissent dès lors que la configuration de contrôle s'éloigne des configurations canoniques usuelles (pièce plane ou cylindrique). Par exemple ces outils peuvent être très utiles pour l'évaluation des performances des méthodes de contrôle TOFD sur des géométries complexes (piquage, surface irrégulière ...), pour optimiser le positionnement des capteurs, pour aider à l'interprétation de résultats complexes, ...

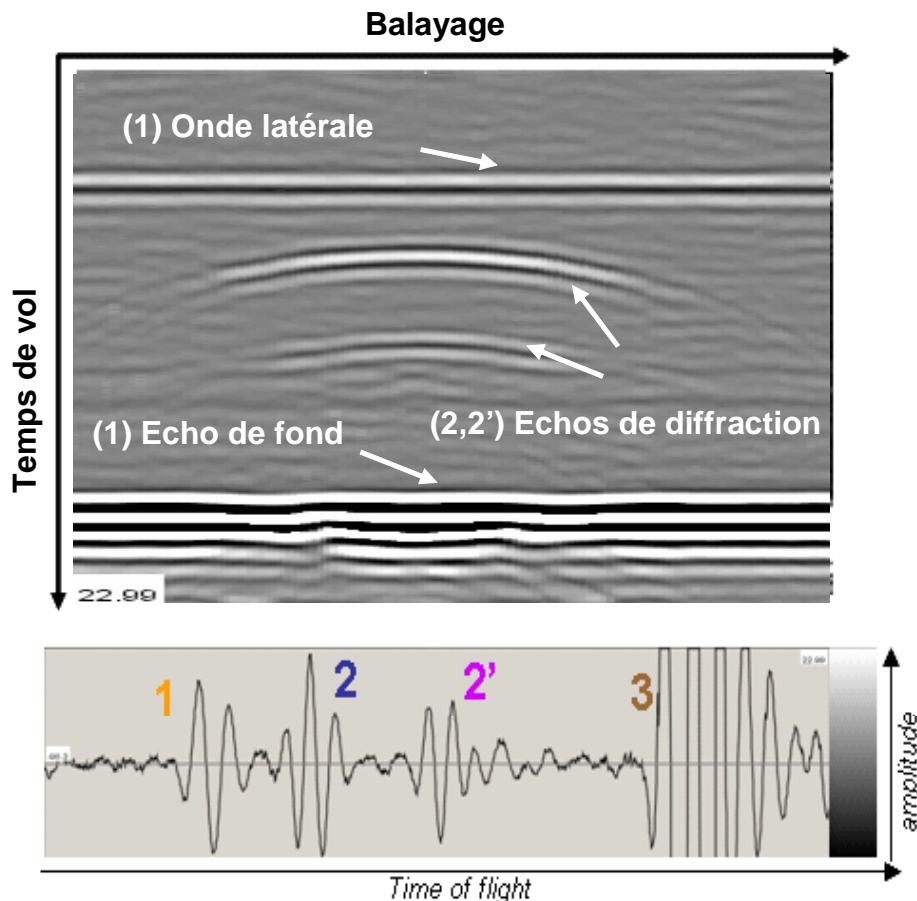


Figure 2: Images de type Bscan et Ascan d'une inspection TOFD.

Afin de mettre en place les outils de simulation d'une inspection TOFD, plusieurs développements ont été réalisés au sein du logiciel CIVA au CEA, LIST. Le module de calcul TOFD développé permet le calcul de l'onde latérale, de l'écho de fond et des échos de diffraction réfléchis par un défaut plan. Le calcul des échos de diffraction pour une orientation arbitraire de défauts dans la pièce a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec le

groupe de Larissa Fradkin du London South Bank University en utilisant les coefficients GTD 3D.

2- DEVELOPPEMENT DU MODULE DE CALCUL TOFD

L'objectif est de développer des outils de simulation permettant de prédire le résultat d'une inspection TOFD sur des cas réalistes en utilisant le logiciel CIVA, exactement comme c'est le cas pour les configurations en pulse-écho. Ces développements prennent en compte l'onde latérale, l'écho de fond, les échos diffractés par les extrémités des défauts ainsi que les différents effets d'ombrage mentionnés ci dessus.

2.1 Simulation de l'onde latérale

L'onde latérale a été évaluée en utilisant une approximation basée sur Červený [4]. On considère que la contribution de l'onde latérale correspond exclusivement à l'onde longitudinale rayonnée à l'angle critique entre le sabot et le matériau.

L'évaluation de l'amplitude et du temps de vol de l'onde latérale dépend de l'estimation des parcours sonores selon cet angle d'incidence critique, modulé par un coefficient d'amplitude basé sur Červený [4]. La simulation prend en compte la présence d'un défaut entre l'émetteur et le récepteur : l'amplitude de l'onde latérale est dans ce cas ramenée à zéro.

2.2 Simulation de l'écho de fond

L'écho de fond est estimé en utilisant le modèle de calcul Kirchhoff utilisé dans les calculs en mode pulse-écho dans CIVA [5]. Ce calcul est basé sur l'application des coefficients de diffraction de Kirchhoff sur une surface maillée du fond de la pièce, en considérant connu le faisceau émis et reçu par l'émetteur et le récepteur (en termes d'amplitude et de temps de vol). Les effets d'ombrage par un défaut débouchant sont de même pris en compte dans le calcul via l'ombrage du calcul de champ ultrasonore par le défaut.

2.3 Simulation des échos de diffraction

Pour prédire les performances d'une inspection TOFD dans des configurations réalistes, il est nécessaire de considérer des défauts plans avec des orientations arbitraires par rapport à l'orientation des capteurs. En plus d'un angle tilt (les défauts ne sont pas nécessairement perpendiculaires au fond de la pièce), un angle skew peut aussi être appliqué (c'est le cas des configurations de contrôle sur des tuyauteries ou piquages). De plus, les défauts réalistes ayant souvent un contour complexe (ils ne sont pas nécessairement rectangulaires), des développements ont été réalisés pour prendre en compte dans la simulation des défauts plans de contours définis par CAO.

Deux stratégies différentes ont été étudiées pour le calcul des coefficients GTD :

- le modèle GTD 2D projeté dont le principe consiste à projeter les directions d'incidence et d'observation dans le plan orthogonal localement au bord diffractant du défaut et d'utiliser dans ce plan les coefficients GTD 2D qui dépendent seulement de l'angle d'observation θ .

-modèle GTD 3D : qui se fonde sur l'utilisation des coefficients GTD 3D qui décrivent sans approximation géométrique la désorientation 3D des arrêtes diffractantes. Les codes des coefficients GTD 3D ont été développés par l'équipe de Larissa Fradkin à London South Bank University.

2.4 Comparaison avec la littérature

Les coefficients GTD 2D et 3D ont été intégrés dans CIVA et comparés aux résultats de la littérature [6.7]. La figure suivante illustre la comparaison entre le code GTD 3D de L.

Fradkin's group du LSBU et les coefficients GTD 3D rapportés par J. Achenbach and AK Gautesen [7].

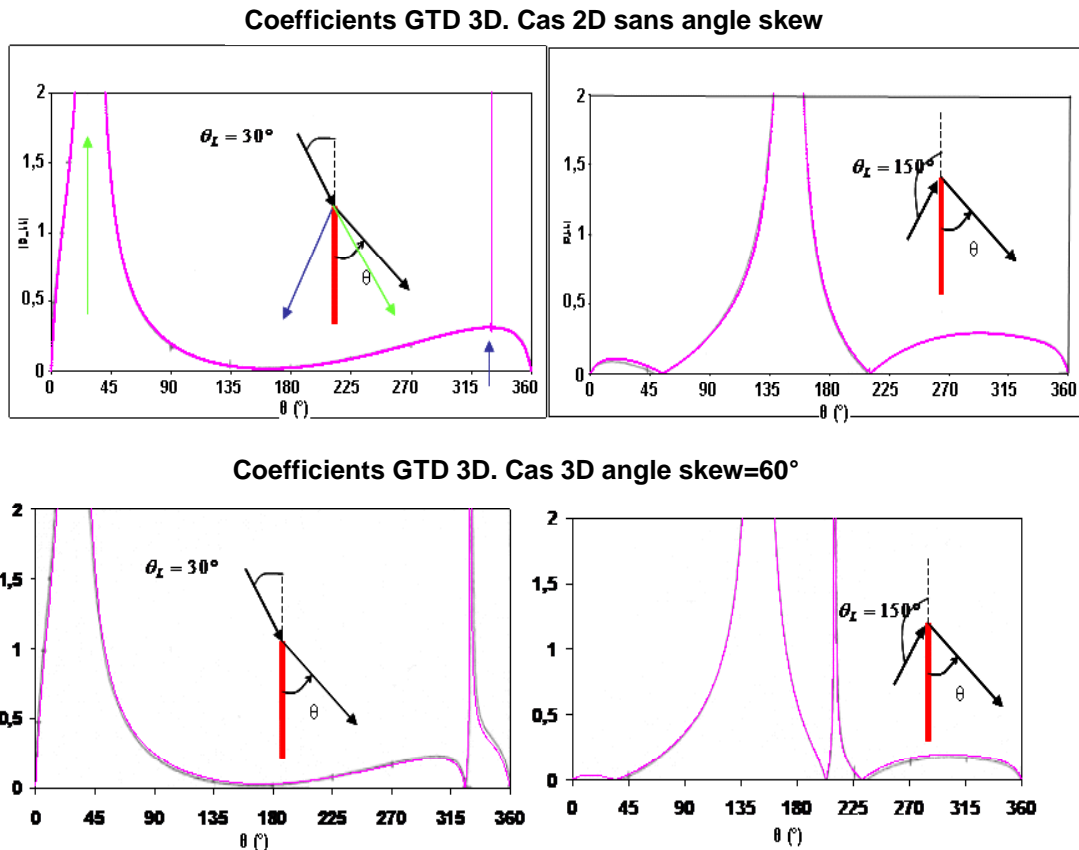


Figure 3 : Coefficients de diffraction en fonction de l'angle d'observation θ pour des configurations 2D (haut) et 3D (bas) et pour deux angles de transmission. Les coefficients sont calculés avec le code de L. Fradkin et avec la théorie de Achenbach et Gautesen [6]

Ces figures représentent les coefficients de diffraction longitudinaux en fonction de l'angle d'observation θ pour deux angles de transmission : 30° (à gauche) et 150° (à droite) et pour deux configurations de défaut : sans angle skew (en haut) c'est à dire que le défaut est perpendiculaire au plan contenant les vecteurs d'onde incident et réfléchi, et avec un angle skew de 60° (en bas) représentant une configuration 3D. Les coefficients calculés par Achenbach et Fradkin sont parfaitement superposables. On peut noter sur ces coefficients que la GTD n'est pas applicable pour certaines configurations angulaires : en particulier les coefficients de diffraction divergent lorsque l'angle d'observation est égal à l'angle d'incidence (cas d'une réflexion spéculaire, intrinsèquement non modélisée par la GTD).

3- VALIDATION EXPERIMENTALE

3.1 Inspection TOFD sur des maquettes planes

3.1.1 Défaut débouchant en surface externe

La figure suivante illustre un résultat expérimental d'une inspection TOFD réalisée sur une maquette plane contenant un défaut débouchant en surface externe de 10 mm de hauteur avec une paire de capteurs contacts de fréquence centrale 2.25 MHz et générant des ondes $L60^\circ$. La distance entre les capteurs a été fixée à 35mm de sorte que le point de croisement des faisceaux se situe au niveau de l'extrémité basse du défaut. Le résultat expérimental

présenté sur la *Figure 4* montre que les effets d'ombrage du défaut sont visibles à la fois sur l'onde latérale et l'écho de fond. Les échos de diffractions sont observés pour les ondes longitudinales et les ondes transverses et sont de forme parabolique, caractéristique d'une inspection TOFD.

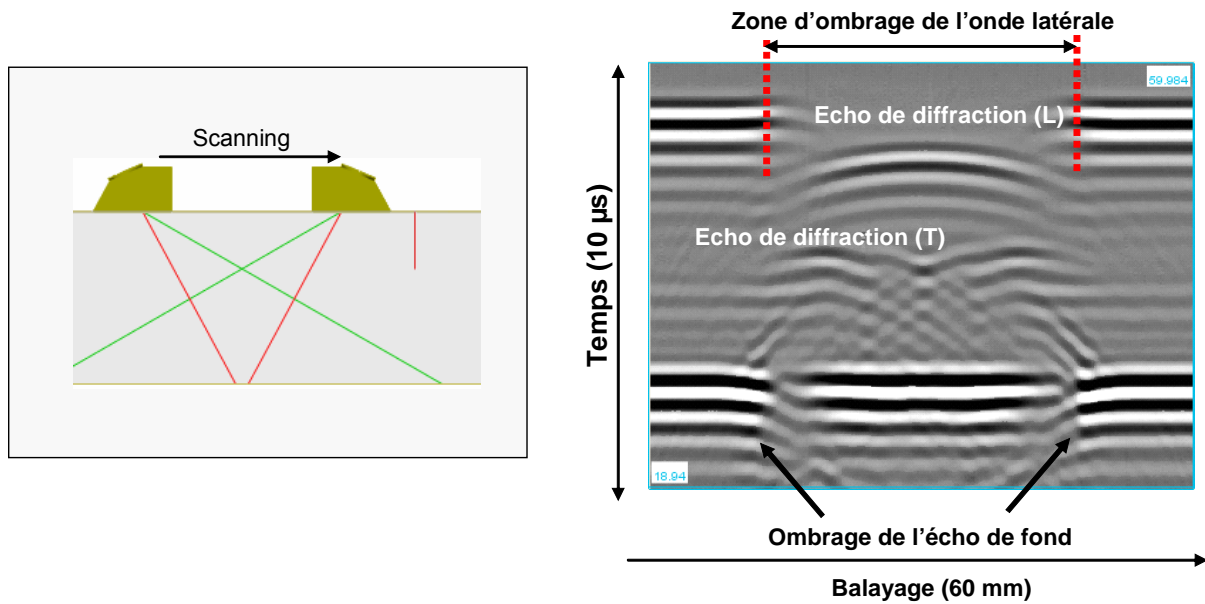


Figure 4: Bscan expérimental pour une inspection TOFD sur une maquette plane contenant un défaut débouchant en surface externe

Cette configuration a été reproduite dans le module de calcul TOFD de CIVA. En plus du résultat de calcul présenté sous la forme d'un Bscan et sur lequel figurent tous les échos identifiés ci-haut sur le Bscan expérimental, trois positions de capteurs ont été reportées.

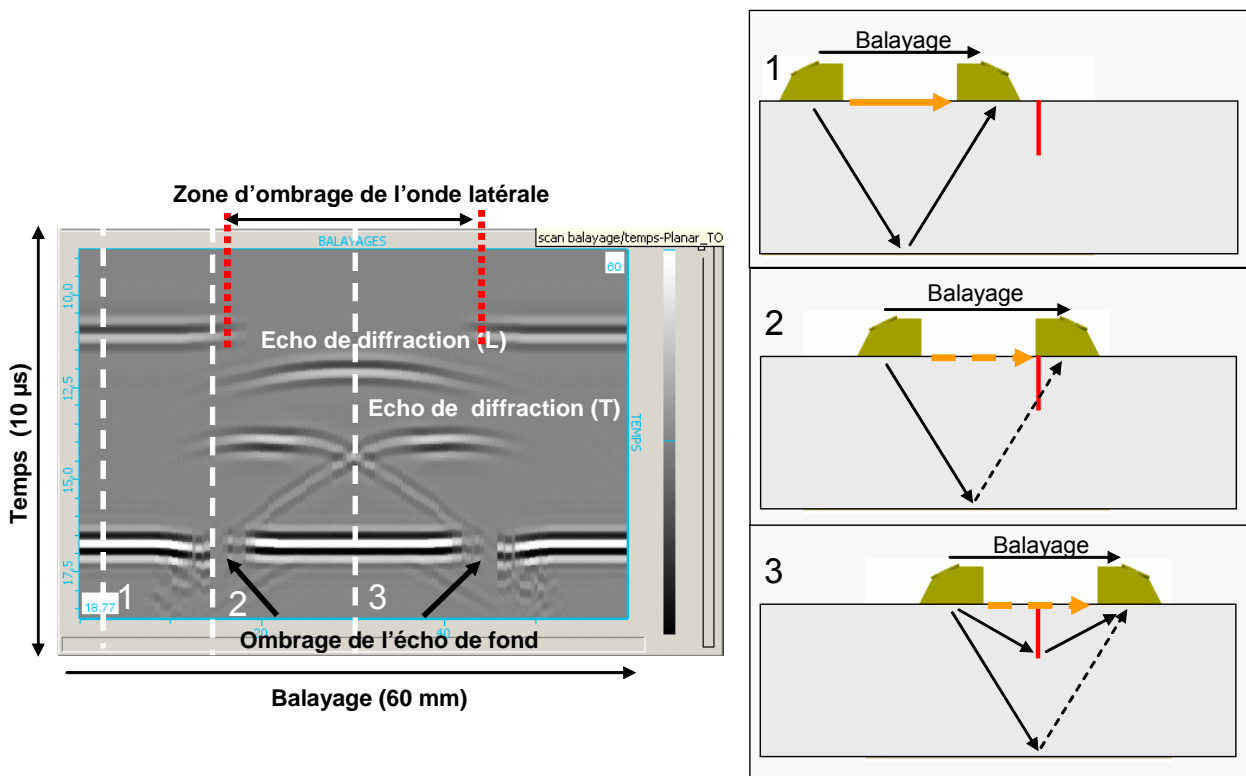


Figure 5: Bscan expérimental pour une inspection TOFD sur une maquette plane contenant un défaut débouchant en surface externe

- Position 1 : les deux capteurs sont positionnés avant le défaut. Les échos de surface et de fond ne sont pas affectés par le défaut.
- Position 2 : le défaut est situé entre les capteurs, plus proche du récepteur. Dans cette configuration la présence du défaut empêche la détection de l'onde latérale et de l'écho de fond.
- Position 3 ; le défaut est situé à mi-chemin entre l'émetteur et le récepteur. A cette position l'écho de diffraction de l'extrémité du défaut est détecté avec le temps de vol le plus court d'où sa forme parabolique. L'écho de fond n'est pas affecté par la présence du défaut.

3.1.2 Défaut débouchant en surface interne

Un contrôle TOFD est réalisé en utilisant la même maquette et les mêmes capteurs décrits au paragraphe précédent pour valider la simulation dans le cas d'un défaut débouchant en surface interne. Les traducteurs ont été positionnés sur la face opposée, la distance entre les capteurs a été adaptée pour favoriser la détection de l'écho de diffraction du sommet du défaut.

Les résultats expérimental et simulé obtenus pour cette configuration sont présentés sur la Figure 6.

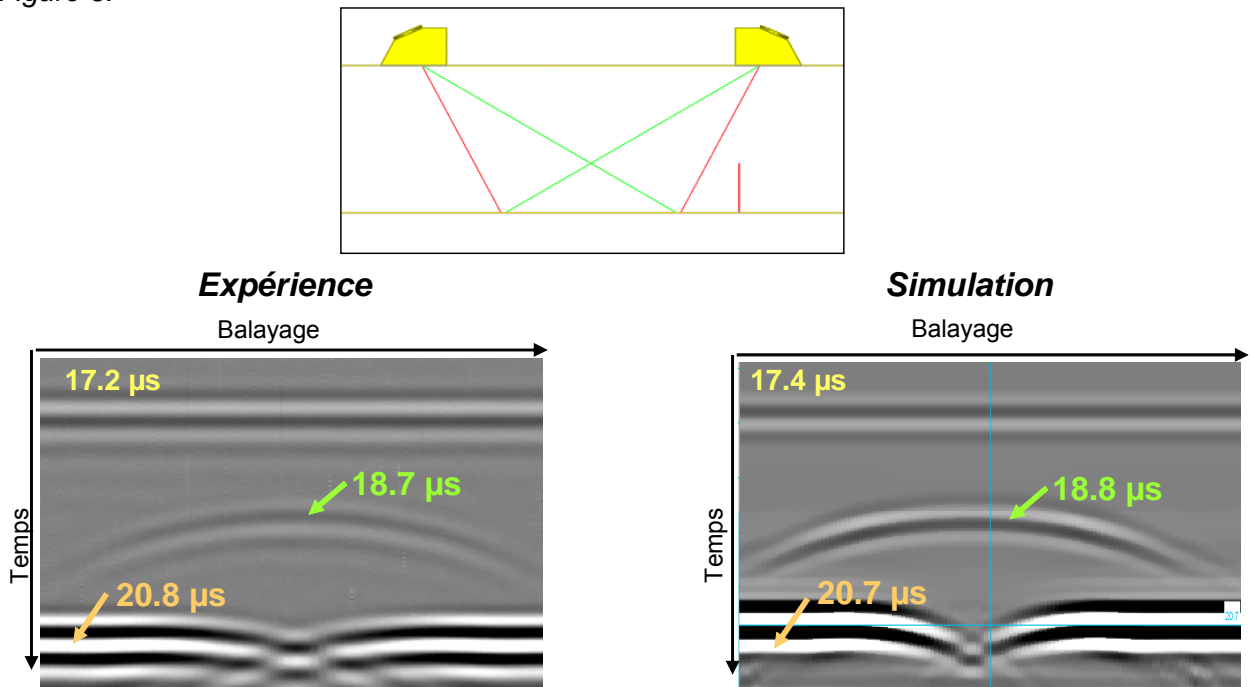


Figure 6: Inspection TOFD expérimentale et simulée pour une pièce plane contenant un défaut débouchant en surface interne

On note un très bon accord entre la simulation et l'expérience en termes de temps de vol et d'amplitudes relatives entre l'écho de diffraction et l'écho de fond (écart d'environ 2 dB entre l'expérience et la simulation). Les effets d'ombrage du défaut sur l'écho de fond sont de même correctement prédits par la simulation.

3.1.3 Effet de l'orientation des capteurs et des défauts

Des essais expérimentaux ont été réalisés sur une maquette plane en acier ferritique contenant des défauts avec différentes orientations 0, 10, 20 et 30° comme le montre la Figure 7-a. Les acquisitions ont été réalisées avec une paire de capteurs de fréquence centrale 2.25 MHz et générant des ondes L45°. Les orientations des plans d'inspection ont été adaptées pour chacun des défauts. La distance entre les capteurs a été optimisée pour

favoriser la détection de l'écho de diffraction du sommet du défaut. Un trou génératrice de 2 mm de diamètre est utilisé comme référence.

La *Figure 7* montre la configuration de contrôle adaptée pour la détection du défaut désorienté de 10° ainsi que les résultats expérimentaux et simulés (avec le modèle GTD2D projeté et le modèle GTD 3D) correspondants. Les résultats montrent un bon accord entre l'expérience et simulation avec un écart maximal d'environ 2 dB.

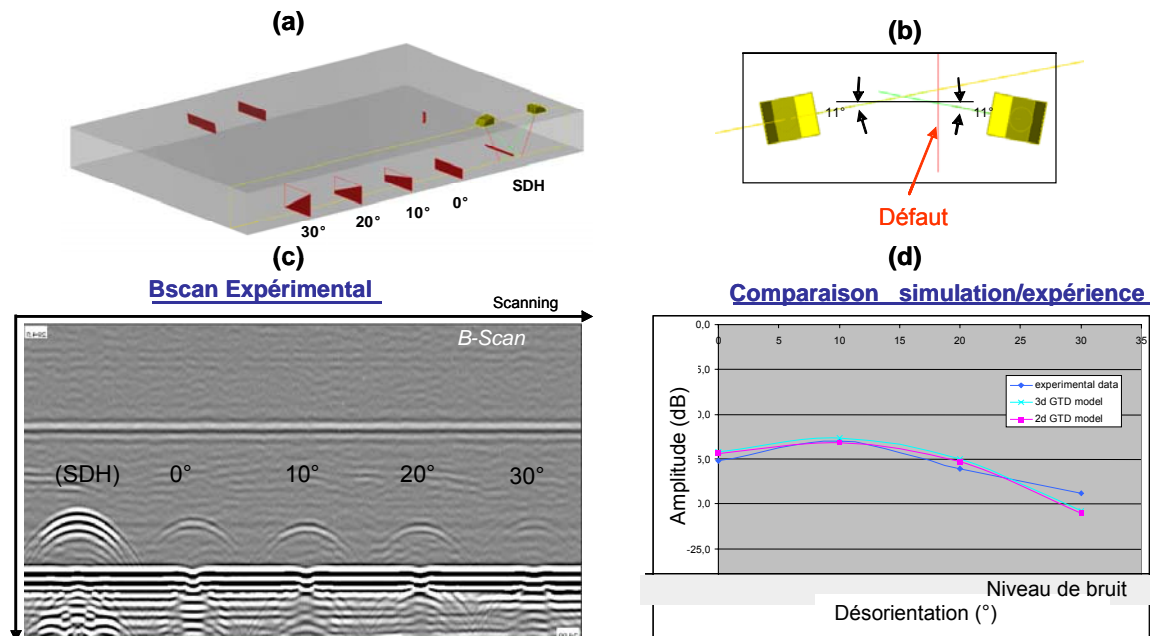


Figure 7: Description de la configuration TOFD adaptée à la détection du défaut désorienté de 10°. Résultats expérimentaux et simulés

3.1.4 Effet du skew du défaut

D'autres essais expérimentaux ont été réalisés pour déterminer l'effet de l'angle skew des défauts sur leur sensibilité en détection. Les acquisitions ont été réalisées sur une maquette plane contenant un défaut plan rectangulaire débouchant en surface interne en utilisant la paire de transducteurs décrite dans le paragraphe précédent. Les transducteurs sont positionnés en vis-à-vis avec des plans de contrôle confondus. Un angle skew de 0 à 30° est appliqué aux deux capteurs (Cf. *Figure 8*)

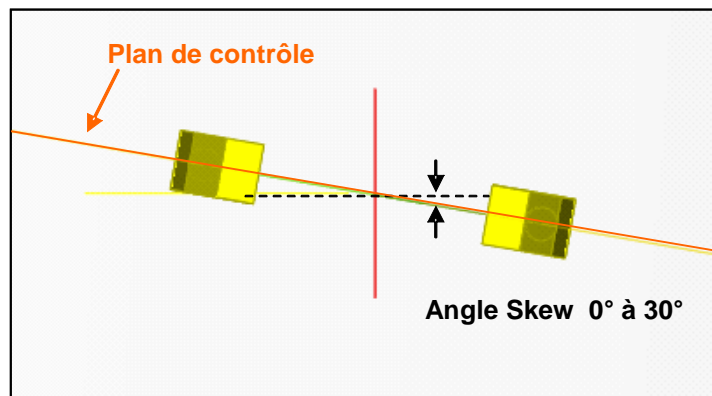


Figure 8: Configuration TOFD avec un angle skew

Les résultats expérimentaux et simulés sont présentés sur le graphique suivant et montrent d'une part un effet négligeable de l'angle skew sur l'amplitude des échos de diffraction et d'autre part une bonne prédiction des résultats expérimentaux par la simulation avec un écart maximal de l'ordre de 2 dB pour le modèle GTD 2D projeté et de 1 dB pour le modèle GTD 3D.

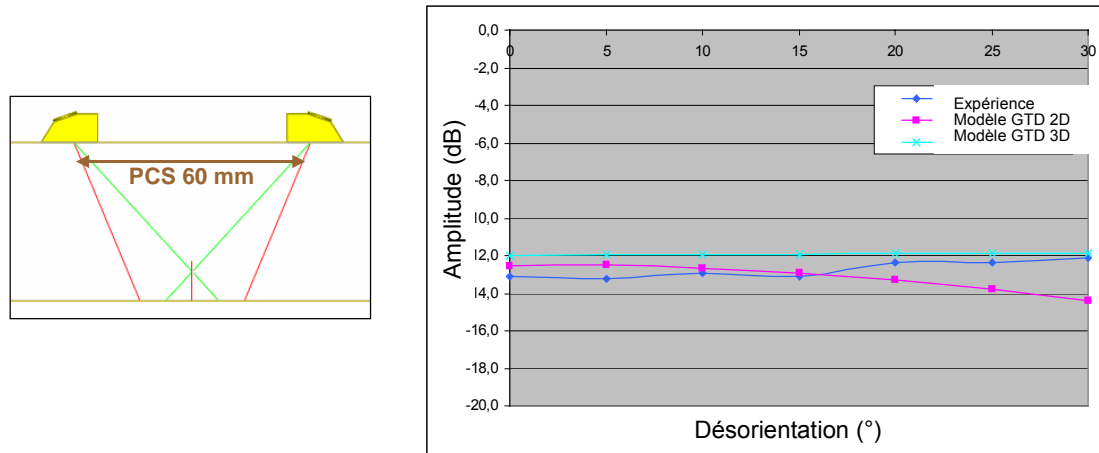


Figure 9: Effet de l'angle skew du défaut sur l'amplitude de l'écho de diffraction. Expérience et simulation

3.2 Inspection TOFD sur des piquages

3.2.1 Inspection de la zone de raccordement interne

Le module de calcul TOFD a été utilisé pour évaluer les possibilités de détection et de caractérisation de défauts situés dans la zone du cône interne de raccordement. Le piquage est composé de deux cylindres, le cylindre secondaire qui nous intéresse ici est composé d'une partie cylindrique et d'une partie conique sur laquelle sont positionnés une paire de capteurs identiques. Ces derniers sont fixés sur un bras mobile permettant les déplacements en translation et en rotation le long et autour de l'axe de la tuyauterie secondaire. Les transducteurs ont été pré-orientés de telle sorte que les faisceaux longitudinaux se croisent au niveau du fond de la tuyauterie primaire.

La Figure 10 présente un Bscan expérimental et le Bscan simulé correspondant à un balayage de 380° autour du cône de raccordement. La simulation reproduit correctement à la fois les échos de diffraction des défauts positionnés à 90° (perpendiculaire à l'axe primaire) et à 180° (suivant l'axe primaire) mais aussi l'effet de « vague » de l'écho de fond qui est dû à la selle de cheval du piquage et qu'on visualise sur le résultat expérimental. Il s'agit en fait d'une variation en temps de vol : le temps de vol le plus long est obtenu quand le plan de contrôle contenant les deux capteurs est parallèle à l'axe de la tuyauterie primaire alors que le temps de vol le plus court est obtenu quand le plan de contrôle est perpendiculaire à l'axe de la tuyauterie primaire. Un bon accord existe entre les résultats expérimentaux et simulés en termes de temps de vol des échos de diffraction et de l'écho de fond et aussi en termes d'amplitude relatives.

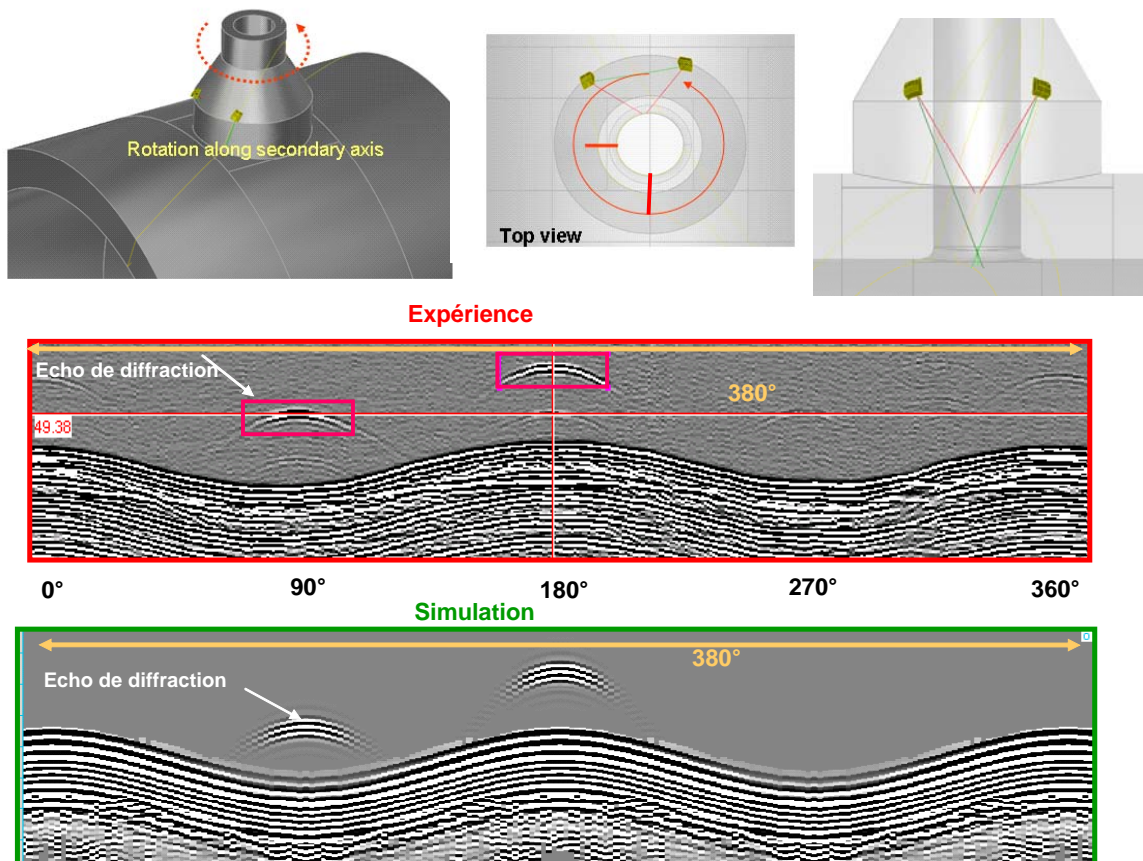


Figure 10: Inspection TOFD de la zone de raccordement interne depuis le cône de raccordement

3.2.2 Inspection de la zone conique

Le module de simulation TOFD a de même été utilisé pour évaluer les possibilités de détection et de caractérisation de défauts situés sous le cône de raccordement. Pour cela une paire de capteurs identiques a été positionnée sur le cône à la même hauteur (Y). Pour que les faisceaux nominaux des ondes L soient contenus dans le même plan (plan de contrôle perpendiculaire au défaut) le même angle skew a été appliqué à chacun d'entre eux (Cf. Figure 11). La séparation angulaire a été optimisée pour que le point de croisement des ondes L se situe au niveau du sommet du défaut recherché. Un déplacement en rotation autour du cône est alors appliqué de part et d'autre du défaut recherché (défaut semi-elliptique débouchant en surface interne de la tuyauterie secondaire). Ce défaut a été décrit dans CIVA à l'aide de l'outil CAO.

L'onde latérale n'est pas prise en compte dans cette étude.

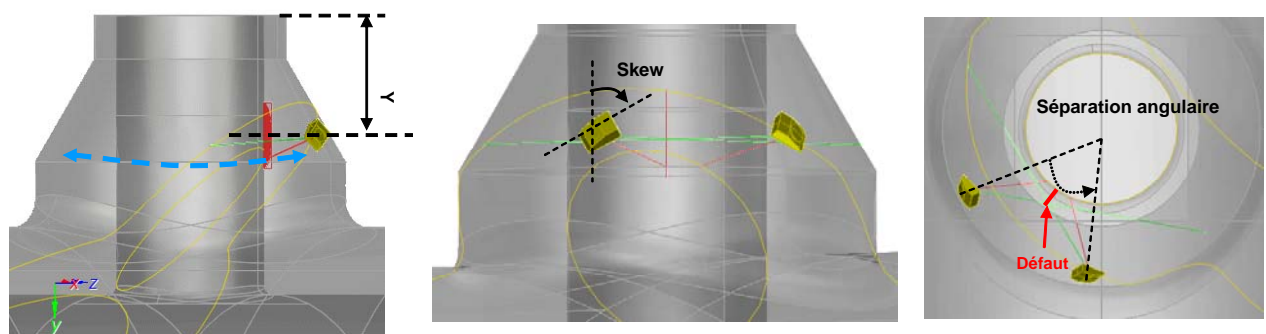


Figure 11: Configuration de contrôle TOFD pour un défaut situé sous le cône de raccordement

La figure suivante montre les résultats expérimental et simulé obtenus pour la configuration de contrôle décrite plus haut. On note un très bon accord en termes de temps de vol et de déphasage des signaux: l'écho de diffraction du sommet du défaut est en phase avec l'écho de fond ce qui est correctement simulé par CIVA. De plus le rapport d'amplitude entre l'écho de fond et l'écho de diffraction est correctement prédit par CIVA.

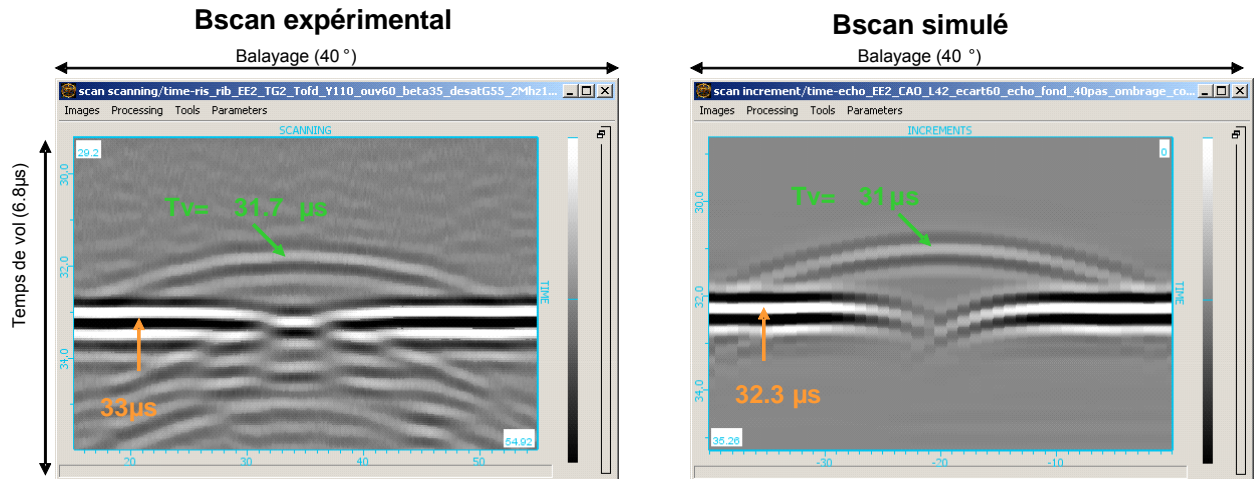


Figure 12: Inspection TOFD de la zone conique. Comparaison expérience/simulation

4- CONCLUSION

Un module de simulation des inspections TOFD a été introduit dans CIVA. Les développements réalisés prennent en compte les différents phénomènes physiques observés lors d'un contrôle TOFD : l'onde latérale, l'écho de fond, les échos diffractés par des défauts rectangulaires ou complexes (défauts plans de contour défini par CAO) et les phénomènes d'ombrage. Des simulations sur des pièces planes ou cylindriques ont été comparées à des résultats expérimentaux ou issus de la littérature. Une étude complète sur l'effet de la désorientation (skew, désorientation,...) des défauts par rapport aux capteurs a été réalisée. Des validations ont de même été réalisées sur des configurations plus complexes comme les piquages. Dans tous les cas, un bon accord entre les résultats expérimentaux et simulés a été observé, en particulier en termes de temps de vol des différents échos détectés (onde latérale, écho de diffraction écho de fond). Ce paramètre est très souvent exploité en TOFD pour le dimensionnement des défauts. Ces développements sont disponibles dans la version CIVA 9.

REFERENCES

- [1] <http://www-civa.cea.fr>
- [2] Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic time-of-flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaw', British Standard, BS7706, 1993.
- [3] Silk, M.G. et Lidington, B.H., Defect Sizing using an Ultrasonic Time Delay Approach, British Journal of NDT, 1975.
- [4] Červený, V., *Theory of Seismic Head Waves*, University of Toronto Press, 1971.

- [5]. Raillon, R et Lecœur-Taïbi, I, Transient Elastodynamic Model for Beam Defect Interaction. Application to NonDestructive Testing, *Ultrasonics*, Vol 38, 2000, pp 527-530.
- [6]. Ogilvy, J. A. et G Temple, J.A., Diffraction of Elastic Waves by Cracks: Application to Time-Of-Flight Inspection, *Ultrasonics*, Vol 7, November 1983, pp 259-269.
- [7]. Achenbach J.D. et Gantesen A.K., Edge Diffraction in Acoustics and Elastodynamics, in *Low and High Frequency Asymptotics*, édité par V K and VV Karadan, Elsevier Vol 2, 1986 , pp 335-401.