

# VALIDATION DU LOGICIEL CIVA UT DANS DES CONFIGURATIONS

## EMISSION/RECEPTION SEPARÉES

Sébastien LONNE<sup>1</sup>, Gwénaél TOULLELAN<sup>2</sup>, Steve MAHAUT<sup>2</sup>, Sylvain CHATILLON<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> EXTENDE, Le Bergson, 15 Avenue Emile Baudot, 91300 Massy, France  
[sebastien.lonne@extende.com](mailto:sebastien.lonne@extende.com)

<sup>2</sup> CEA, LIST, 91191 Gif-sur-Yvette, France  
[gwenael.toullelan@cea.fr](mailto:gwenael.toullelan@cea.fr), [steve.mahaut@cea.fr](mailto:steve.mahaut@cea.fr), [sylvain.chatillon@cea.fr](mailto:sylvain.chatillon@cea.fr)

### RESUME

La modélisation numérique est largement utilisée dans le processus de qualification d'inspections car elle a l'avantage par rapport aux essais expérimentaux de permettre d'évaluer un très large éventail de cas complexes à moindre coût. Dans ce contexte, la fiabilité des modèles permettant la simulation des inspections est d'une grande importance. Pour quantifier le niveau de fiabilité des prévisions fournies par CIVA et déterminer le domaine d'applicabilité des modèles, un travail à long terme de validation expérimentale est réalisé au CEA-LIST en collaboration avec EXTENDE. Ce travail est fondé sur des comparaisons entre des résultats expérimentaux et des prédictions de CIVA effectuées pour des configurations représentatives de problématiques de CND. Dans cette communication, nous présentons des résultats de comparaisons obtenus dans des configurations émission/réception séparées. Une première partie du document est consacrée à la caractérisation d'un capteur de type SE, faisant intervenir deux transducteurs, un en émission et un en réception, séparés par une barrière acoustique. Ce type de capteur est couramment utilisé pour inspecter des matériaux fortement atténuants, ou encore pour détecter des défauts proches de la surface du fait de l'absence d'écho d'interface. La seconde partie de cette communication est consacrée au mode tandem, méthode d'inspection couramment employée pour le contrôle de défauts le long des soudures, en particulier par la méthode de discrimination zonale. Classiquement, une paire de transducteurs mono-élément disposés l'un à la suite de l'autre balaye l'échantillon, un en émetteur et le second en récepteur. Une autre application repose sur l'utilisation d'un transducteur multiéléments dont certains éléments sont utilisés en émission et d'autres à la réception. Les résultats de comparaison entre expériences et simulations obtenus dans ces deux configurations sont présentés.

### INTRODUCTION

Le module de CIVA [1] permettant de simuler des inspections ultrasonores utilise des modèles de calcul du champ rayonné par le transducteur dans la pièce inspectée et d'interaction de ce champ avec les défauts présents dans la pièce et la géométrie de la pièce. Les modèles reposent sur des formulations semi-analytiques et des intégrations numériques [2]. La procédure de caractérisation expérimentale suivie pour évaluer le niveau de fiabilité des prévisions de ces modèles comprend différentes étapes [3] : définir et réaliser des expériences, décrire précisément ces expériences dans CIVA (connaissance précise des paramètres d'entrée), effectuer les calculs avec CIVA et interpréter les résultats de comparaisons entre l'expérience et la simulation.

Dans ce document, nous présentons quelques résultats de comparaison obtenus dans des configurations émission/réception séparées, largement utilisés dans le domaine industriel notamment pour le contrôle par ultrasons de défauts dans les soudures. Pour chacune des configurations présentées, nous décrivons la démarche faite pour déterminer les paramètres d'entrée du code et leurs valeurs afin de s'assurer de la bonne description de l'inspection dans CIVA (prise en compte de tous les paramètres importants de l'inspection et justesse de leur valeur dans CIVA). La plupart des résultats obtenus dans le cadre des validations du module d'inspection ultrasonore de CIVA est disponible sur le site Web EXTENDE [4].

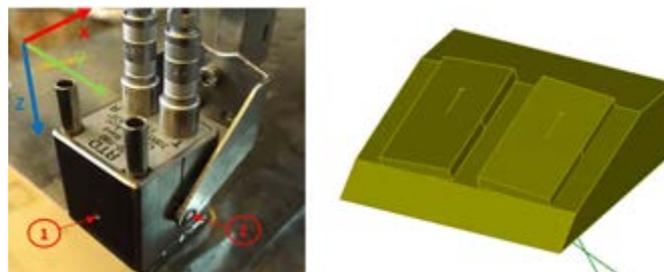
## CARACTERISATION D'UN CAPTEUR ULTRASONORE TYPE SE

Les capteurs SE font intervenir deux transducteurs, un en émission et un en réception, séparés par une barrière acoustique. Ce type de capteur est couramment utilisé pour inspecter des matériaux fortement atténuants, ou encore pour détecter des défauts proches de la surface du fait de l'absence d'écho d'interface.

L'étude de caractérisation expérimentale présentée ci-dessous présente les prédictions de CIVA pour simuler des échos de réflecteurs de référence type trous à fond plat (TFP) avec un capteur SE. Ces réflecteurs sont inspectés avec un capteur dual fonctionnant à 4 MHz et générant des ondes longitudinales à 45° dans un acier inox.

### Description du capteur SE et de la configuration dans CIVA

Les données d'entrée nécessaires à la simulation des capteurs de type SE sont souvent délicates à obtenir (manque d'informations concernant les différents angles des sabots (angle de toit et incidence), écartement des pastilles émettrice et réceptrice, caractéristiques du sabot...). Pour ces raisons, des radiographies du capteur sont parfois nécessaires pour la mesure de ces paramètres. La figure ci-dessous présente une photo du capteur ainsi que sa description 3D sous CIVA après injection des bons paramètres dimensionnels.



*Capteur SE et description du même capteur dans CIVA.*

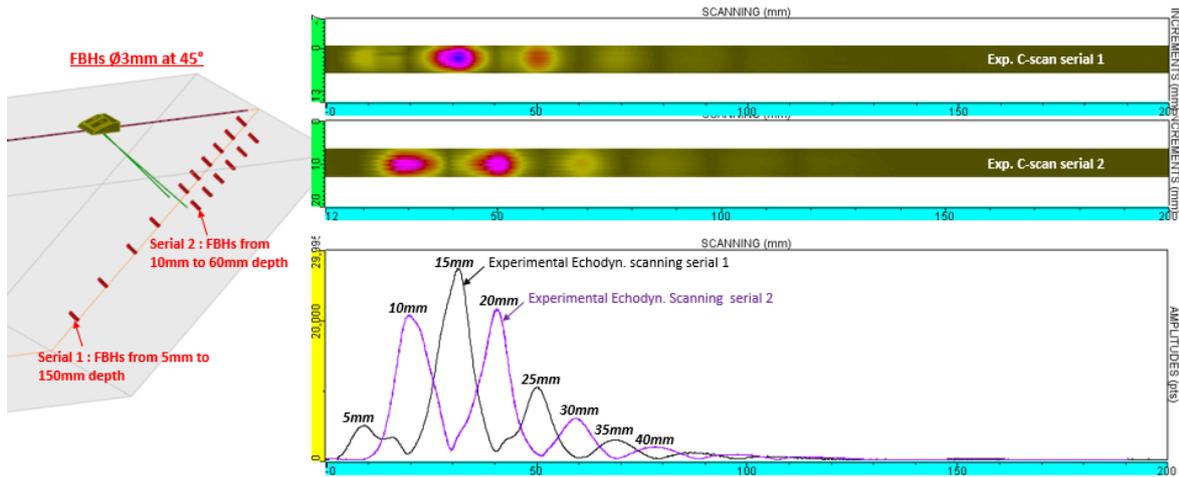
Le capteur SE a été évalué sur des réflecteurs de référence type TFP implantés à différentes profondeurs dans une cale d'étalonnage en acier ferritique.

Pour simuler les échos de TFP, le modèle KIRCHHOFF (noté KIR par la suite) a été utilisé. Deux calculs ont été réalisés :

- Un calcul avec une approximation d'onde plane dans la description du champ lors du calcul de son interaction avec le défaut. Il s'agit du calcul réalisé dans l'implémentation initiale de CIVA.
- Un calcul réalisé avec une description plus précise du champ ultrasonore lors du calcul de l'interaction avec le défaut. Cette option de calcul est disponible depuis CIVA 2016. Dans la suite du document, nous noterons les résultats obtenus avec cette option KIR-COMPLET.

## Acquisitions réalisées

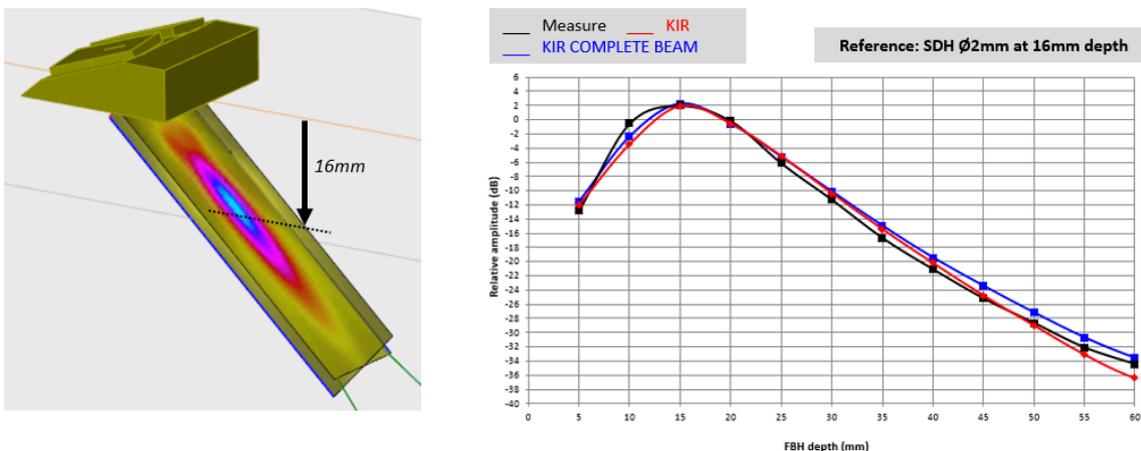
Des acquisitions de type C-scans ont été réalisées avec enregistrement du signal direct issu des réflecteurs TFP. La figure suivante présente les C-scans expérimentaux obtenus sur les deux séries de TFPs. La série 1 correspond aux TFPs localisés entre 5 et 150 mm de profondeur et la série 2 aux TFPs positionnés entre 10 et 60 mm de profondeur. Une superposition des échodynamiques expérimentales des deux séries de TFPs est également affichée. Celle-ci montre une amplitude maximale obtenue sur le TFP à 15 mm de profondeur.



C-scans et échodynamiques balayage expérimentaux obtenus sur les deux séries de TFPs.

## Comparaison des résultats simulation/expérience

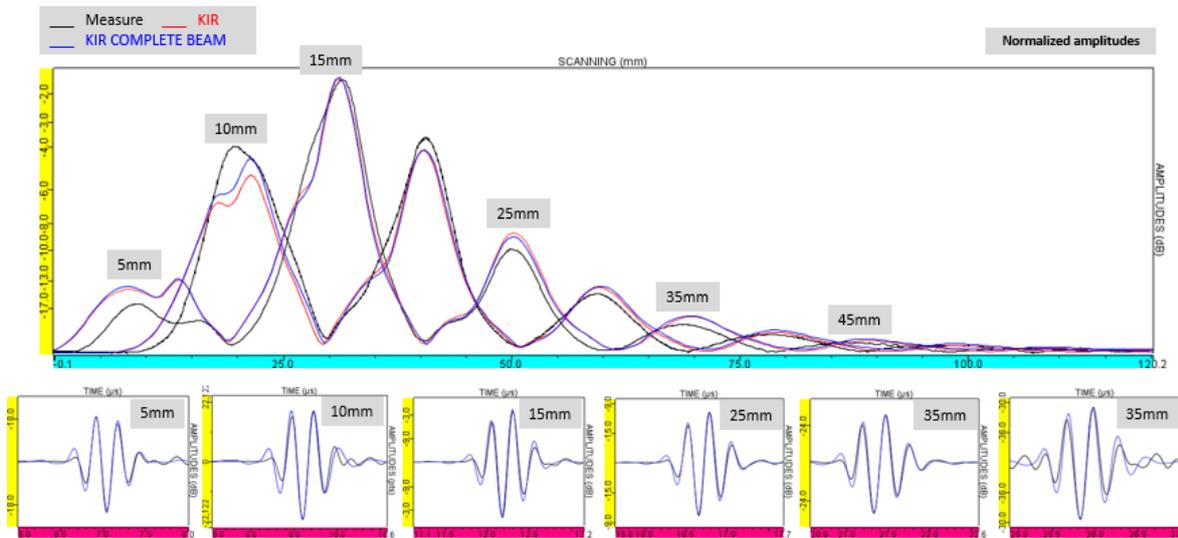
L'évolution des courbes amplitude distance expérimentale et simulée avec les modèles KIR et KIR-COMPLET est présentée sur la figure ci-dessous. Les prédictions d'amplitudes des échos obtenues avec les 2 modèles sont très proches de l'expérience avec cependant une petite amélioration des prédictions aux profondeurs les plus importantes avec le modèle KIR-COMPLET. Les écarts maximum observés entre l'expérience et la simulation sont inférieurs à 2 dB sauf pour la profondeur de 10 mm où nous observons une sous-estimation de l'ordre de 3 dB.



Simulation du champ ultrasonore transmis dans une cale plane en acier. Comparaison des courbes amplitude/profondeur des TFPs expérimentales et simulées avec KIR et KIR-COMPLET. Réf. amplitudes: TGØ2mm à 16 mm de profondeur.

La superposition des échodynamiques et des A-scans présentée sur la figure suivante confirme le très bon accord obtenu entre l'expérience et les prédictions de CIVA sur la forme

des échos et des signaux. Par ailleurs, elle montre le faible désaccord obtenu sur le TFP à 10 mm de profondeur. Notons toutefois que les écarts d'amplitude sont de l'ordre de l'incertitude de mesure évalué à +/-3 dB.



Comparaison des courbes échodynamiques balayage des TFP mesurées et simulées avec KIR, KIR-COMPLET. Superposition de quelques A-scans expérimentaux et simulés avec KIR-COMPLET. Amplitudes normalisées.

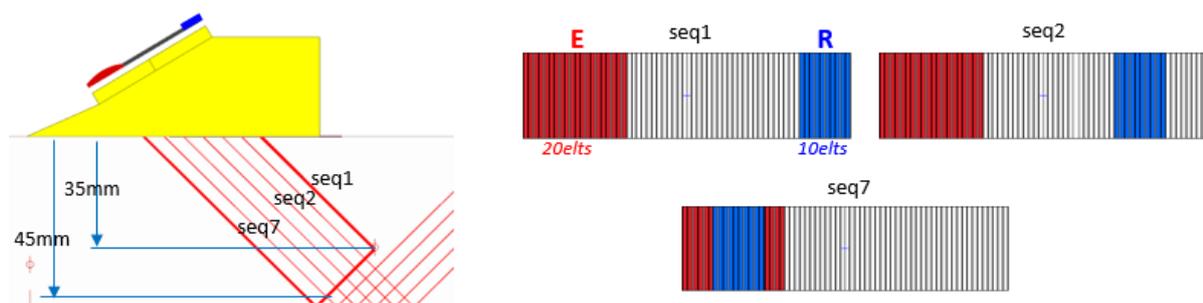
## CONFIGURATION TANDEM

Le mode tandem est une méthode d'inspection couramment employée pour le contrôle de défauts le long des soudures, en particulier dans l'application de la méthode de discrimination zonale ZDM [5].

### Description de la configuration

La configuration tandem évaluée se compose d'un capteur multiéléments linéaire de 64 éléments fonctionnant à 5 MHz et muni d'un sabot T45°. Les paramètres de la barrette multiéléments sont issus du constructeur. Les caractéristiques de son sabot T45° ont été mesurées (géométrie, vitesse, angle d'incidence).

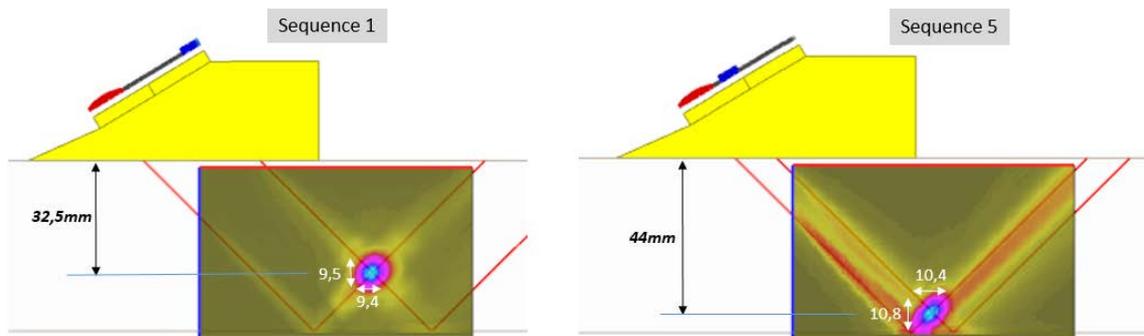
Pour créer la configuration tandem avec le capteur multiéléments, certains éléments de la barrette sont activés en émission tandis que d'autres éléments ne sont actifs que pour la réception. Dans le cas présenté, l'émission est composé de 20 éléments actifs fixes tandis qu'un séquençage électronique de 10 éléments actifs est réalisé en réception afin de modifier la profondeur du point de croisement des axes T formé par les ouvertures émettrice et réceptrice de 32.5 mm à 50 mm de profondeur. Les 7 séquences (seq) ainsi créées sont illustrées sur la figure suivante.



Configuration Tandem avec un capteur multiéléments muni d'un sabot T45°.

Une focalisation par loi de retards électronique est appliquée à l'émission (focalisation T45° à 45 mm de profondeur). Aucune loi de retards n'est appliquée en réception. Les lois de retards utilisées en simulation ont été importées des fichiers d'acquisition.

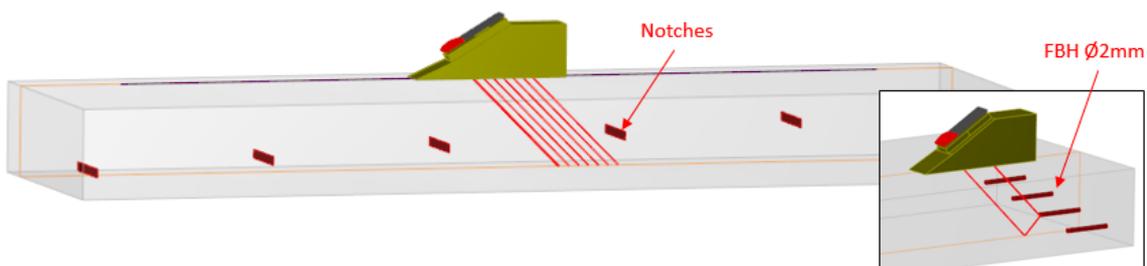
La figure suivante montre un exemple de champ rayonnée en émission/réception pour les séquences 1 et 5, qui correspondent à une profondeur de point de croisement des axes T à 32.5 mm et 44 mm environ. Le champ formé en émission/réception à la profondeur du point de croisement présente une largeur de faisceau selon la verticale de 9.5mm pour la séquence 1 et de 10.8 mm pour la séquence 5.



*Champ ultrasonore transmis dans la pièce en acier ferritique. Capteurs multiéléments 64 éléments 5MHz, séquences 1 et 5, T45°, mode tandem.*

Une maquette spécifique en acier ferritique de 50 mm d'épaisseur a été réalisée afin de disposer de défauts plans à cœur nécessaire à l'évaluation des performances de CIVA à prédire les échos issus d'une configuration tandem. Elle se compose d'entailles électroérodiées de 5 mm de hauteur initiées par la tranche de la pièce et localisées à différents ligaments. Pour l'étalonnage, des TFPs horizontaux disposés à différentes profondeurs ont été usinés sur un des côtés de la maquette. Les entailles et les TFPs ont des profondeurs identiques (milieu des entailles ou axe des TFPs).

Les défauts sont localisés tous les 5 mm de profondeur. Ainsi, en scannant la pièce selon la face A ou la face B comme illustré sur la figure suivante, la profondeur des défauts évolue de 7.5 à 47.5 mm.



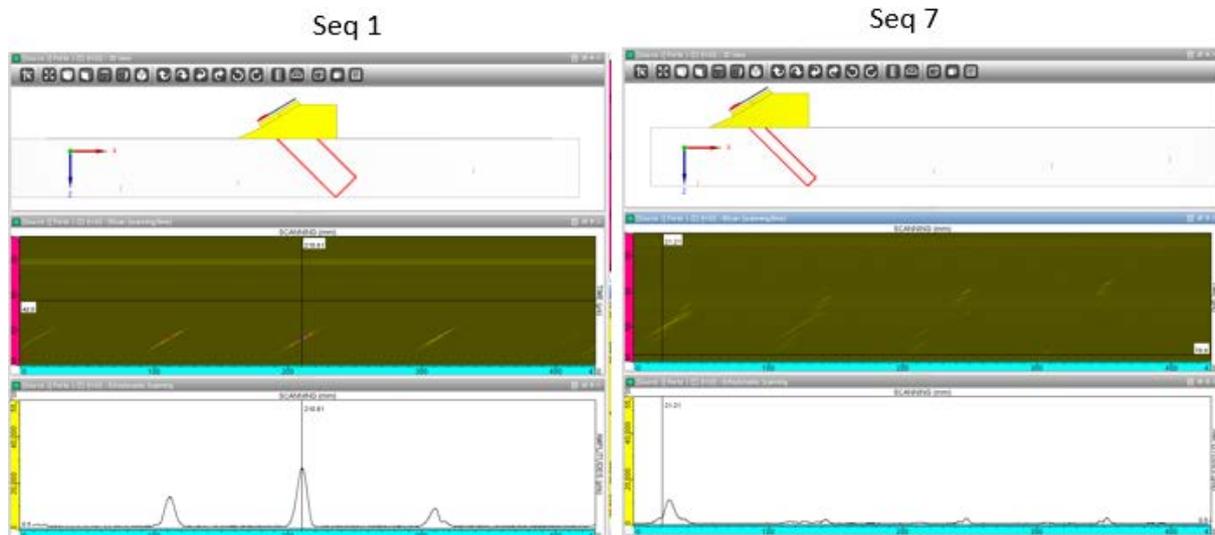
*Maquette usinée pour l'évaluation des performances de CIVA dans une configuration tandem.*

### Acquisitions réalisées

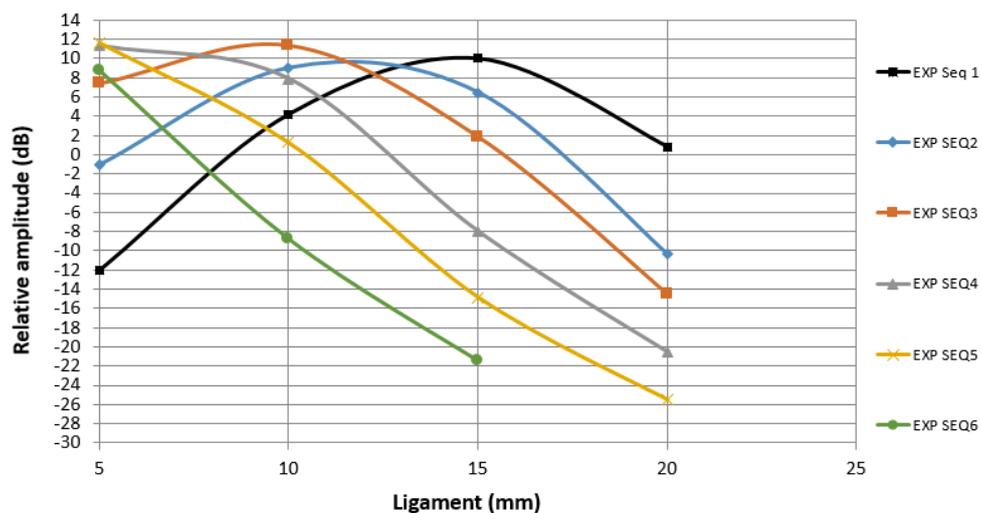
Des acquisitions de type C-scans ont été réalisées avec un enregistrement du signal indirect correspondant au trajet « TrbTdT » issu des défauts (« T » correspond au trajet des ondes T, « rb » au rebond sur le fond et « d » correspond au défaut).

Un exemple de B-scans expérimentaux obtenus pour les séquences 1 et 7 est présenté sur la figure suivante. L'ensemble des courbes amplitudes de détection des entailles expérimentales en fonction de leur ligament est ensuite présenté, obtenues avec le maximum de séquences où les amplitudes sont mesurables (séquences 1 à 6). Les

amplitudes sont référencées par rapport à l'amplitude du TFP à 32.5 mm de profondeur détecté avec la séquence 1. Cette variation montre l'intérêt du mode tandem pour détecter des défauts sur une portion de l'épaisseur de la pièce avec une sensibilité équivalente pour toutes les tranches d'épaisseur.



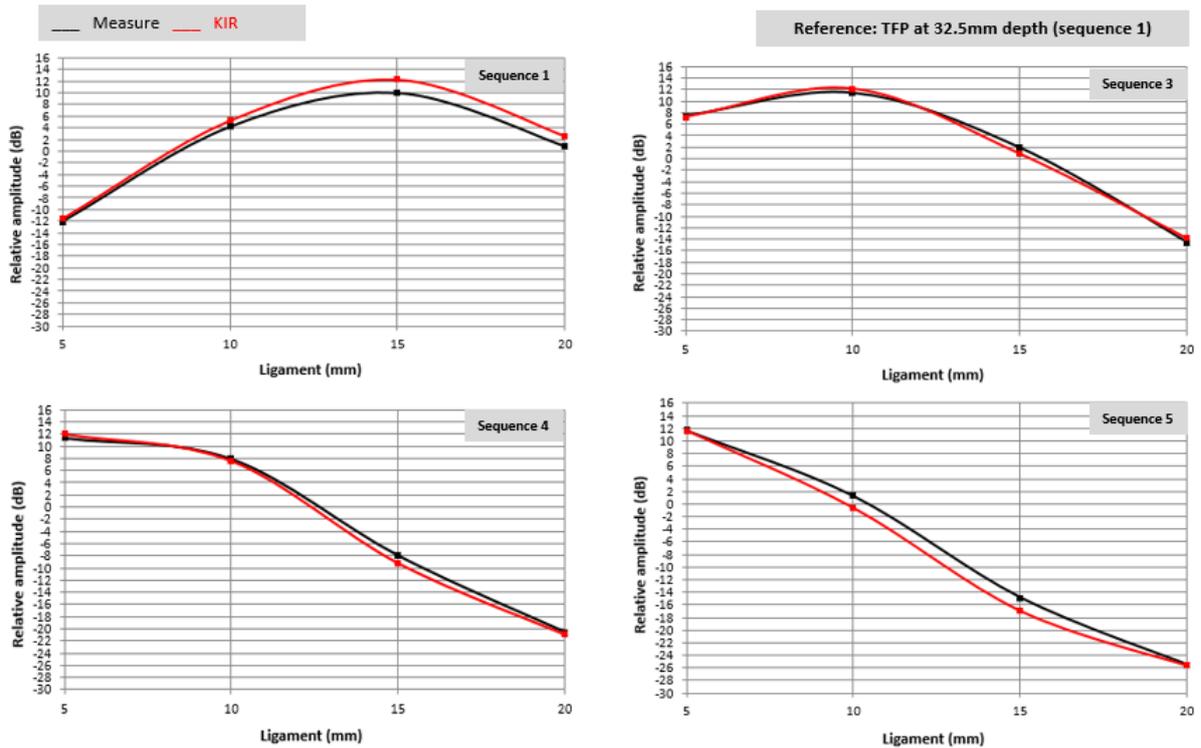
Résultats expérimentaux obtenus sur les entailles. Capteurs multiéléments 5MHz, T45°, séquence 1 et 7, mode tandem.



Courbes amplitude/profondeur des entailles mesurées en fonction de leur ligament et des séquences. Réf. Amplitudes : TFP Ø3mm à 32.5 mm de profondeur détecté avec la séquence 3. Capteurs multiéléments, 5 MHz, mode tandem.

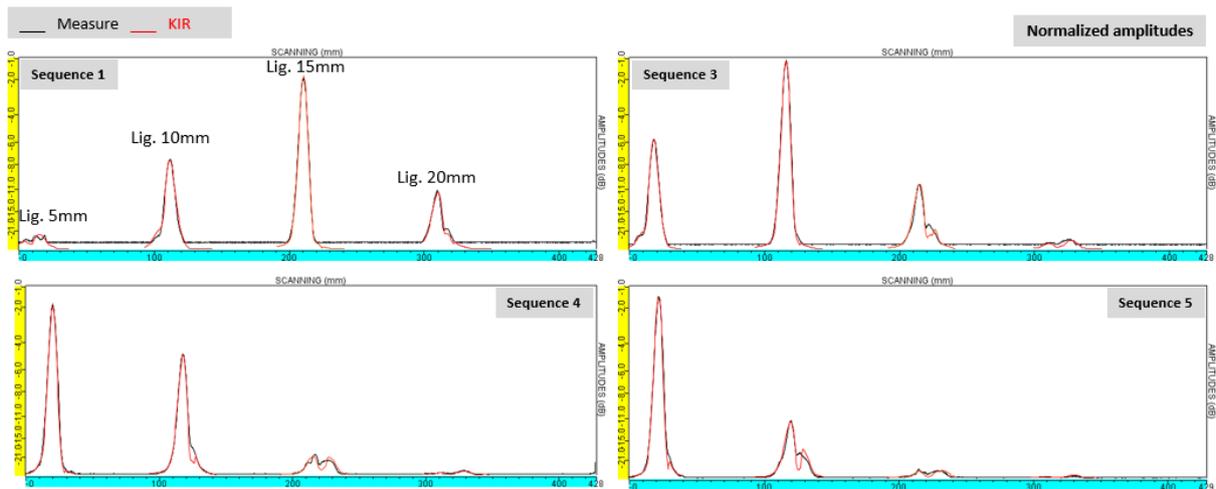
### Comparaison des résultats simulation/expérience

La superposition des courbes amplitudes expérimentales et simulées avec KIR des entailles en fonction de leur ligament et pour quelques séquences est présentée sur la figure suivante. Cette comparaison montre la très bonne capacité de CIVA à prédire les amplitudes quel que soit le ligament des entailles de la cale. Une légère surestimation est cependant visible pour la séquence 1 mais est de l'ordre de 2 dB, soit inférieur à l'incertitude de mesure évalué à 3 dB. Dans la plupart des autres cas, les écarts d'amplitude sont inférieurs à 2 dB.



Comparaison des courbes amplitude/profondeur des entailles mesurées et simulées avec KIR. Capteurs multiéléments, 5MHz, mode tandem.

Une comparaison de courbes échodynamiques expérimentales et simulées des entailles détectées en mode tandem est présentée sur la figure suivante pour quelques séquences. Les amplitudes sont normalisées par rapport à l'amplitude maximale de détection des entailles sur chaque séquence. Une superposition de A-scans obtenus pour la séquence 2 est également affichée sur la figure suivante. Ces superpositions mettent en évidence une très bonne prédiction de la forme des échos et des signaux.



Comparaison des courbes échodynamiques balayage des entailles expérimentales et simulées avec KIR. Amplitudes normalisées. Capteurs multiéléments, 5 MHz, T45°, mode tandem.

## CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons présenté des résultats de comparaisons obtenus dans des configurations émission/réception séparées. Une première partie a été consacrée à la caractérisation d'un capteur type SE, faisant intervenir deux transducteurs séparés par une barrière acoustique. Ce type de capteur est couramment utilisé pour inspecter des matériaux fortement atténuants, ou encore pour détecter des défauts proches de la surface du fait de l'absence d'écho d'interface. Une des grandes difficultés pour valider ce type de transducteur réside dans la connaissance de toutes les données d'entrée nécessaires à la simulation. C'est pourquoi il est parfois nécessaire de réaliser ces mesures à partir de clichés radiographiques (angle d'incidence, angle de toit, dimension des sabots, écartement des pastilles etc...). Les résultats de simulation sont de manière générale en très bon accord avec l'expérience sur l'amplitude à l'incertitude de mesure près (3 dB), sur la forme des échos ainsi que des signaux.

La seconde partie de cette communication a été consacrée à l'évaluation d'échos d'entailles positionnées à différents ligaments en mode tandem. Une configuration faisant intervenir un transducteur multiéléments linéaire 64 éléments au contact T45° a été utilisée. Pour couvrir une portion de l'épaisseur lors du contrôle, les ouvertures émettrice et réceptrice ont été modifiées par séquençage électronique. La configuration tandem multiéléments a ainsi été créée avec 7 séquences permettant de varier la profondeur du point de croisement des ondes T de 32.5 mm à 50 mm. Les comparaisons des résultats expérimentaux avec ceux de la simulation ont montré un très bon accord entre les amplitudes des échos de TFPs expérimentales et prédites par CIVA avec des écarts maximums d'amplitudes globalement inférieurs à 2dB. Les formes des échos ainsi que celles des signaux sur l'ensemble des défauts et séquences évaluées sont également très bien prédites.

## REFERENCES

- [1] CIVA website <http://www-civa.cea.fr>
- [2] Darmon, M, Chatillon, S, "Main Features of a Complete Ultrasonic Measurement Model: Formal Aspects of Modeling of Both Transducers Radiation and Ultrasonic Flaws Responses." Open Journal of Acoustics, 3A (2013)
- [3] Calmon P, Recommendations for the use and validation of NDT simulation, V, IIW Best practice document, IIW 2363-13(2013).
- [4] EXTENDE website <http://www.extende.com>
- [5] Chapuis, B., F. Jenson, P. Calmon, G. DiCrisci, J. Hamilton, and L. Pomié, "Simulation Supported POD Curves for Automated Ultrasonic Testing of Pipeline Girth Welds," Welding in the World, Vol. 58, No. 4, 2014, pp. 433–441.