

ETUDE PAR SIMULATION SUR LA DETECTION DE DEFAUTS DANS UN RESEAU DE RETASSURES

Souad BANNOUF*, Sébastien LONNE*, Fabrice FOUCHER*,
Jérôme DELEMONTÉZ**, Laetitia CHAPPAZ**

*EXTENDE, 15 Avenue Emile Baudot, Le Bergson, 91300 MASSY, contact@extende.com,
www.extende.com

**EDF-Division Technique Générale, 21 AVENUE DE L'EUROPE, 38040 GRENOBLE

RESUME

Cet article retrace l'étude menée conjointement par EXTENDE et la Division Technique Générale d'EDF sur la détection de défauts placés sous un réseau de retassures dans une pièce en acier moulé. Les retassures sont des défauts de fabrication typiques de ce type de pièces qui apparaissent au moment de la solidification du métal. Des mesures expérimentales ainsi que des simulations effectuées sous CIVA ont montré que la présence de telles retassures, positionnées notamment à mi- épaisseur de la pièce, peut conduire à l'ombrage d'éventuels défauts de type plan situés en fond de cette pièce, empêchant potentiellement la détection de ces derniers. Alors que le contrôle conventionnel par monoélément ne permet pas d'assurer la détection, une solution de contrôle multiéléments utilisée dans les mêmes conditions montre qu'il est possible de détecter différentes entailles débouchantes au fond de la pièce étudiée, à condition d'avoir un RSB suffisant. La technologie multiéléments, par ses capacités de déviation et de focalisation, permet de limiter l'impact de l'ombrage mais autorise également la construction d'images par des techniques innovantes telles que la Focalisation en Tous Points (FTP). Cette méthode d'imagerie s'est avérée efficace pour améliorer la détection de l'ensemble des défauts cibles de la pièce.

INTRODUCTION

Les centrales de production hydraulique et thermique classiques d'EDF sont constituées de nombreuses pièces en acier ferritique moulé qui sont soumises à de fortes sollicitations en service. Les modes d'exploitation tels que les contraintes liées à la pression de l'eau et les endommagements par corrosion ou par fatigue thermique et fluage en sont la principale cause (cf. exemple en Figure 1). Ces pièces sont essentiellement inspectées par des Contrôles Non Destructifs (CND) surfaciques exécutés depuis l'intérieur car les contrôles volumiques par ultrasons conventionnels font apparaître des indications révélant des défauts vraisemblablement présents depuis la fabrication. Ces défauts sont considérés comme non évolutifs et non nocifs lorsqu'ils ne sont pas débouchants. Il s'agit pour la plupart de porosités internes comme les retassures (défauts de fabrication typiques de pièces en acier moulé apparaissant au moment de la solidification du métal). La présence des retassures dans la pièce – souvent présentes sous forme de réseaux – peut conduire à un effet d'ombrage d'éventuels défauts (à caractère plan potentiellement nocifs) situés en fond de pièce, empêchant potentiellement leur détection. Dans ce contexte, la Division Technique Générale d'EDF étudie la faisabilité d'un examen par méthode ultrasonore, exécuté depuis la paroi externe, de défauts de type plans et débouchants en paroi interne situés sous un réseau de retassures. Ainsi, EXTENDE a évalué par simulation la faisabilité d'un tel examen non destructif par ultrasons. Les méthodes étudiées vont de l'inspection conventionnelle en monoélément à l'utilisation de la technologie multiéléments, en passant par l'évaluation de

techniques innovantes telles que la Focalisation en Tous Points (FTP). Ce papier fait le point sur les résultats obtenus avec le logiciel de simulation CIVA.

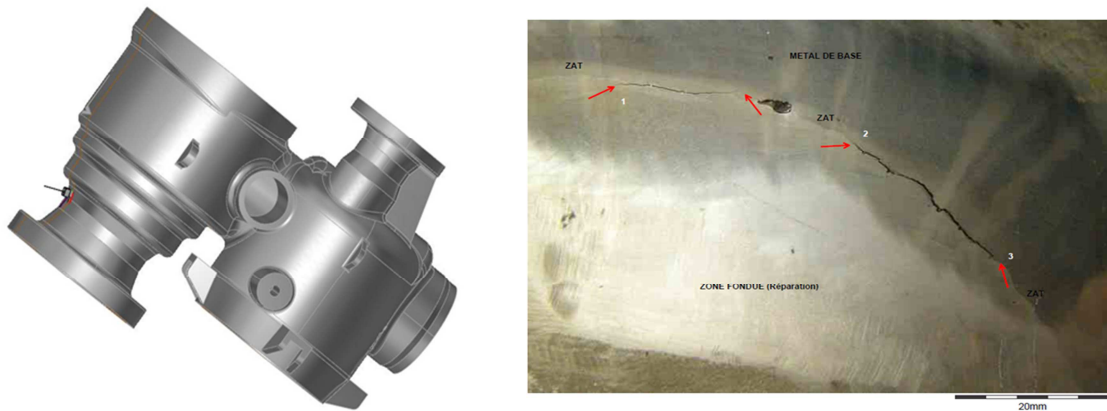


Figure 1 : Exemple d'une pièce en acier moulé par thermique classique – exemple d'endommagement par fluage constaté en paroi interne

PIECE INSPECTEE ET DEFAUTS RECHERCHES

Pièce

La pièce inspectée est, pour simplifier dans un premier temps, une portion de cylindre parfait de dimensions 285x100x70mm et de rayon interne 1400mm. Le matériau considéré est de l'acier ferritique isotrope, sans bruit, où l'atténuation est négligée. Il présente les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique : 7.8g.cm⁻³
- Vitesse ondes longitudinales : 5900m.s⁻¹
- Vitesse ondes longitudinales : 3230m.s⁻¹

L'objectif premier des travaux menés par EXTENDE étant d'étudier la faisabilité d'un contrôle par ultrasons d'une entaille en présence d'un réseau de retassures, les simplifications en termes de géométrie et de matériau restent légitimes.

Défauts

Le défaut cible est une entaille de dimensions 40x10mm ($L \times h$), débouchante en paroi interne. Afin d'étudier différents cas de figure (peu d'ombrage, ombrage par une, deux ou trois retassures), cette entaille a été positionnée en quatre positions vis-à-vis d'un réseau de retassures. Les retassures présentes dans la pièce sont définies en traçant le contour à -6dB d'échos réflecteurs, provenant d'indications de type retassures, relevés sur une acquisition réalisée à EDF-DTG avec un transducteur flexible de type TCI (Traducteur Contact Intelligent) utilisé en mode manuel et de fréquence 2 MHz (cf. Figure 2). Les contours ont été ensuite extrudés sur 20mm dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence; les retassures sont supposées constantes dans ce plan.

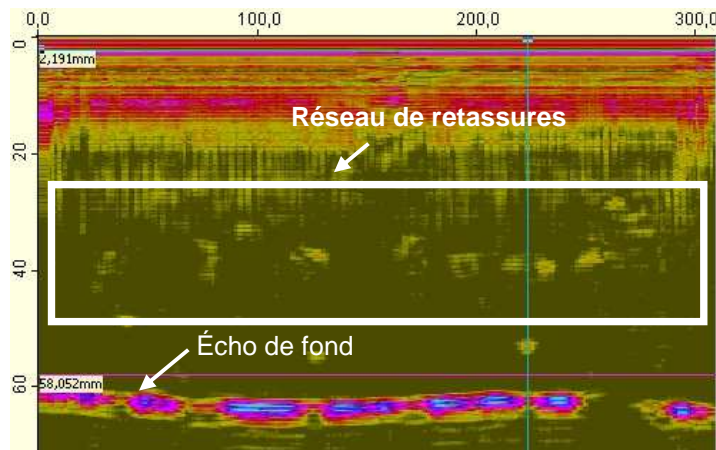


Figure 2 : Bscan illustrant la présence de retassures dans une pièce en acier moulé et utilisé pour le dessin des retassures

Ainsi, 7 retassures sont définies et positionnées à mi-épaisseur de l'échantillon comme illustré en Figure 3. Une huitième retassure est également placée en fond de pièce afin d'étudier l'influence des interactions entre les défauts de fonderie potentiellement présents aux abords de la paroi interne et le défaut cible.

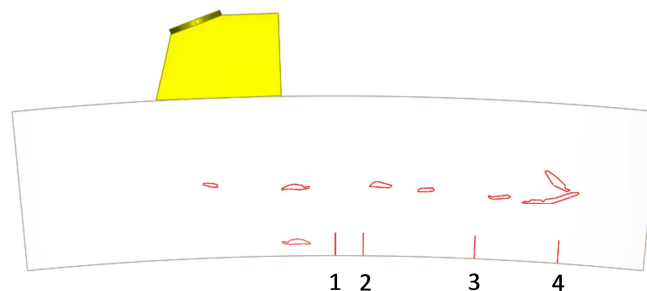


Figure 3 : Positions de l'entaille cible vis-à-vis du réseau de retassures

EVALUATION D'UN CONTROLE ULTRASONORE MONO-ELEMENT

Le capteur utilisé pour évaluer la détection d'entailles débouchantes en présence de retassures à mi-épaisseur est un monoélément OL45°, de fréquence 2MHz, comportant une pastille circulaire de diamètre $\varnothing 24\text{mm}$.

Les amplitudes de détection sont référencées par rapport à l'amplitude d'un TG (trou génératrice) de diamètre $\varnothing 2\text{mm}$, situé à 70 mm de profondeur, et détecté en OL45°.

Les Figures 4 et 5 montrent les Bscans simulés de la détection OL45° d'une entaille pour les positions 1 et 2 dans le réseau de retassures. Pour chaque position, on compare le Bscan simulé avec entaille avec le Bscan simulé sans entaille.

La Figure 4 présente les résultats pour la position d'entaille n°1. La comparaison des Bscans avec et sans entaille permet de constater que pour cette position, l'entaille est bien détectée sous le réseau de retassures. On mesure une amplitude de 0.1 dB par rapport au TG.

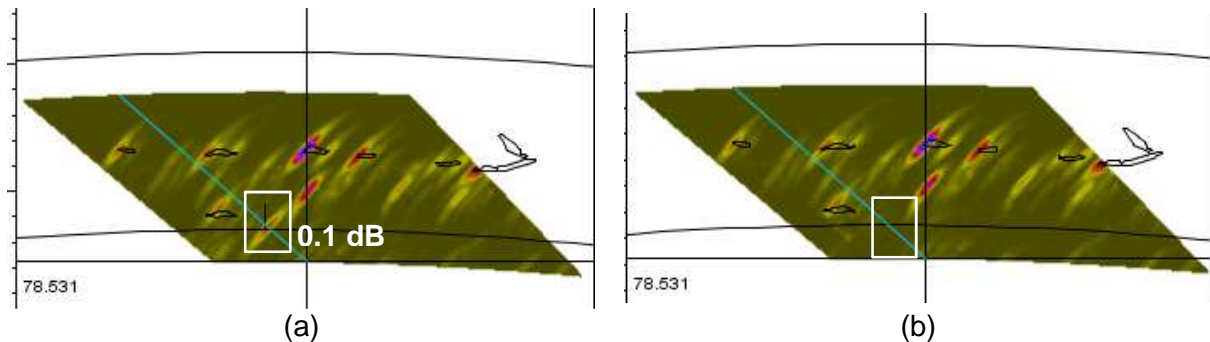


Figure 4 : Détection en OL45 de l'entaille en position 1. (a) bscan avec entaille, (b) Bscan sans entaille

Le réseau de retassures ne pose donc pas de problème de détection en position n°1, ce qui n'est pas le cas pour la position n°2. La Figure 5 montre les Bscans simulés avec et sans entaille pour la seconde position d'entaille. On voit qu'à l'endroit où débouche l'entaille, il n'y a pas d'écho. En revanche, on mesure un très faible écho (-14 dB) dont l'emplacement est décalé par rapport à la position attendue pour l'entaille. La faible amplitude et le mauvais positionnement de l'écho de coin est dû aux retassures qui viennent ombrer l'entaille et dévier le faisceau acoustique.

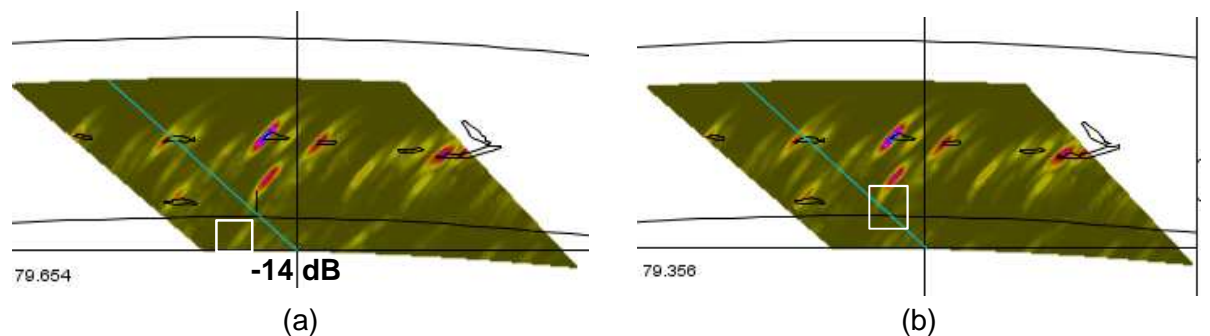


Figure 5 : Détection en OL45 de l'entaille en position 2. (a) bscan avec entaille, (b) Bscan sans entaille

Les résultats de simulation en monoélément OL45° montrent que le défaut plan n'est pas correctement détecté pour toutes les positions d'entaille au sein du réseau de retassures. La présence de ces dernières, positionnées à mi- épaisseur de la pièce, peut conduire à l'ombrage des entailles débouchantes ce qui amoindrit et/ou empêche leur détection.

EVALUATION DE LA TECHNOLOGIE MULTIELEMENTS EN MODE ECHOGRAPHIQUE

L'étude menée avec le capteur à ultrasons monoélément a montré qu'il était impossible avec une solution conventionnelle de garantir la détection d'entaille en paroi interne quelle que soit sa position sous le réseau de retassure. Par conséquent, la technique multiéléments a été testée dans les mêmes conditions pour évaluer ses bénéfices par rapport aux contrôles standards.

Le capteur multiélément utilisé pour les simulations est un capteur contact (48 éléments, pitch 0.8mm) de fréquence centrale 2.25MHz monté sur un sabot OL45° en plexiglass.

L'amplitude de référence correspond à l'amplitude maximale de l'écho d'un TG détecté en ondes L avec une loi de retards permettant une déviation à 45° et une focalisation à 70mm de profondeur. La simulation de l'inspection multiéléments consiste en un balayage

mécanique (pas de 0.05°) auquel est associé un balayage angulaire en ondes L (de 0° à 60° par pas de 2°) focalisé à 70mm de profondeur.

Les Figures 6 et 7 correspondent aux Bscans sectoriels pour lesquels on observe la meilleure détection de l'entaille selon sa localisation sous le réseau de retassures. Pour chaque position, on compare les Bscans simulés avec et sans entaille.

En position 1, la Figure 6 montre que l'entaille est bien détectée avec un angle de 44° . Ce résultat confirme qu'en cette position le réseau de retassures ne nuit pas à la détection du défaut plan. De plus, il a été vérifié que l'angle de 44° est celui permettant la meilleure détection de l'entaille.

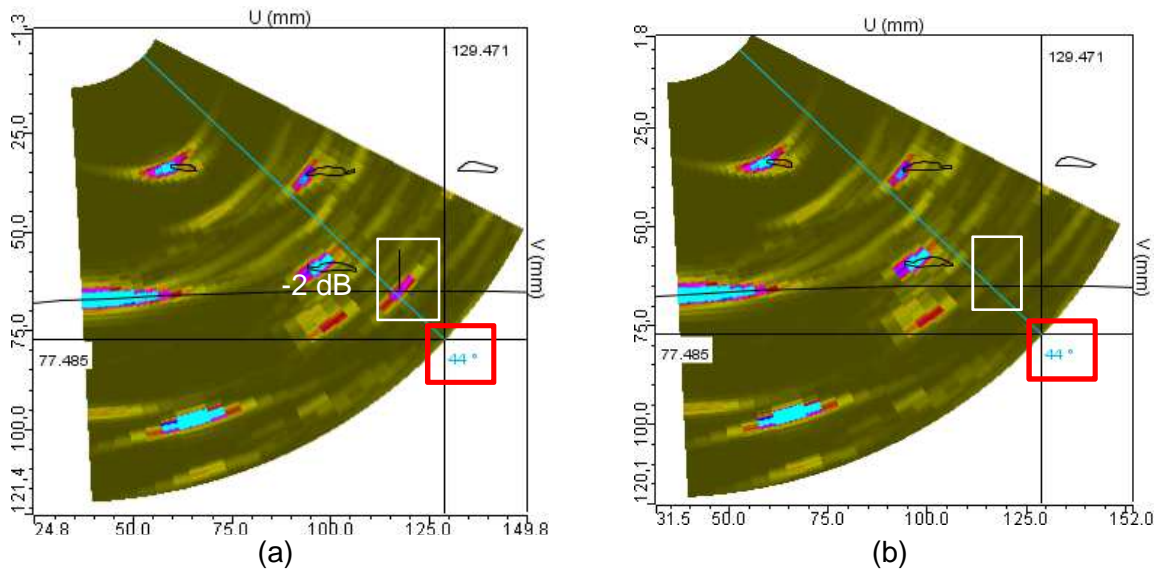


Figure 6 : Bscan sectoriel en position n°1 : (a) avec entaille, (b) sans entaille

La Figure 7 présente les résultats obtenus avec le capteur multiéléments lorsque l'entaille est en position 2. Alors qu'avec un traducteur monoélément le Bscan en $OL45^\circ$ ne permet pas d'observer l'écho de coin de l'entaille, une inspection en balayage angulaire focalisé fait clairement apparaître sur le Bscan un écho de coin. L'angle d'attaque pour lequel cet écho est le mieux observé est 30° . La comparaison avec un Bscan simulé sans entaille confirme qu'il s'agit bien de l'écho du défaut plan.

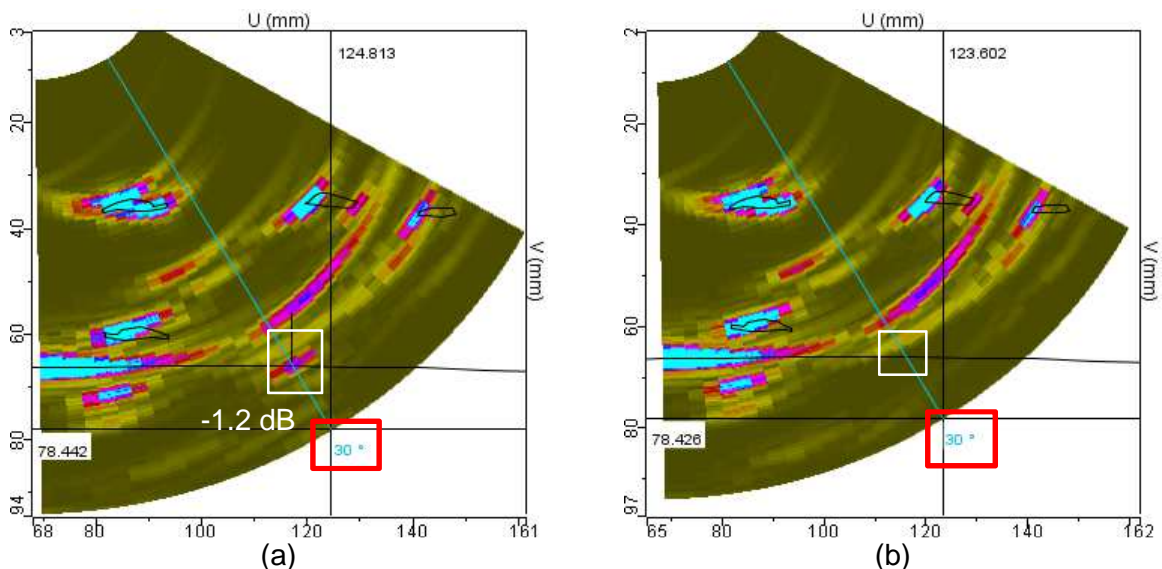


Figure 7 : Bscan angulaire en position n°2 : (a) avec entaille, (b) sans entaille

Une inspection en OL30° semble donc plus adaptée pour détecter l'entaille en position 2. La comparaison du Bscan obtenu en multiéléments focalisés en OL30° avec celui en OL44° (cf. Figure 8) montre que la détection du défaut dépend essentiellement de l'angle d'inspection. En position n°2, l'emplacement de l'entaille par rapport aux retassures n'est pas favorable à l'observation d'un écho de coin en OL45° ce qui explique les résultats obtenus en monoélément.

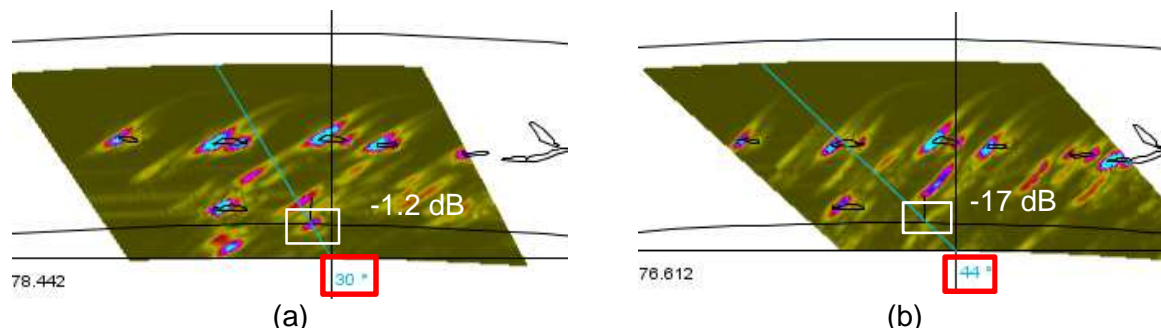


Figure 8 : Comparaison des Bscan en OL30° et OL 44° à la position n°2

Les résultats obtenus avec le capteur multiéléments focalisé montrent qu'il est possible de détecter l'entaille quelle que soit sa position dans le réseau de retassures. Les capacités de déviation angulaire limitent l'impact de l'ombrage en permettant une détection selon des angles d'attaques autres que 45° (par exemple 30° pour la position 2). De plus, la résolution et le positionnement des échos dans la pièce sont améliorés par la focalisation.

APPORT DE L'IMAGERIE PAR FOCALISATION EN TOUS POINTS

La détection de l'entaille avec la technologie multiéléments est assurée pour toutes les positions étudiées mais se limite principalement à l'observation de l'écho de coin, l'écho de diffraction étant trop faible pour être mesuré. En présence de nombreuses retassures et de bruit de structure, il s'avère difficile de s'assurer de l'origine d'un écho (retassure, entaille, grain,...). Pour cela, la Focalisation en Tous Points (FTP) a été évaluée sur sa capacité à améliorer l'identification des défauts.

La Focalisation en Tous Points est une technique de post-traitement disponible dans CIVA qui permet, à l'issue d'une acquisition FMC (Full Matrix Capture), de reconstruire une image de la zone d'intérêt [1,2]. La FMC consiste à exciter le premier élément du capteur et à recevoir avec tous les autres; puis à commuter électroniquement à l'excitation sur l'ensemble de la barrette tout en recevant à chaque fois sur l'ensemble de la barrette. On obtient ainsi une matrice $N \times N$ (avec N = nombre d'éléments de la barrette) contenant l'ensemble des informations obtenues par chaque élément émetteur et récepteur. Le principe de la FTP est de sommer les contributions élémentaires de chaque voie, pour focaliser de l'énergie en tous points de la zone.

Afin d'évaluer l'apport de l'imagerie par FTP sur la détection des entailles sous le réseau de retassures, on simule des acquisitions FMC aux positions qui assurent la meilleure détection en mode échographique. Le transducteur est positionné sur la pièce de sorte que l'angle entre le centre du transducteur et l'entaille soit égal à l'angle de contrôle identifié comme étant le plus adapté en mode échographique. Ainsi, on vérifie que l'entaille reste détectable avec cette méthode d'acquisition.

Les Figures 9(b) et 10(b) correspondent aux reconstructions FTP de l'entaille en mode direct LL. Ce mode de reconstruction est basé sur le calcul de trajets ultrasonores à partir de l'élément émetteur vers un point de la région d'intérêt et le trajet de ce point vers l'élément

récepteur. La comparaison des images FTP avec les Bscans sectoriels effectués aux mêmes positions de capteur (Figure 9(a) et Figure 10(a)) montre que les images sont très proches. On retrouve sur les images FMC-FTP et les Bscans sectoriels les mêmes échos aux mêmes positions.

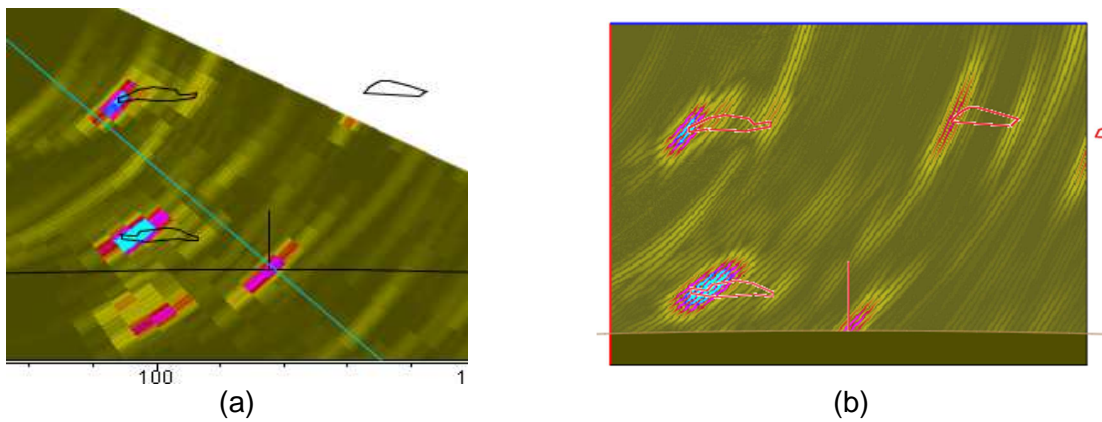


Figure 9 : Reconstruction FTP en mode direct LL de l'entaille en position 1 : (a) image échographique, (b) image FTP

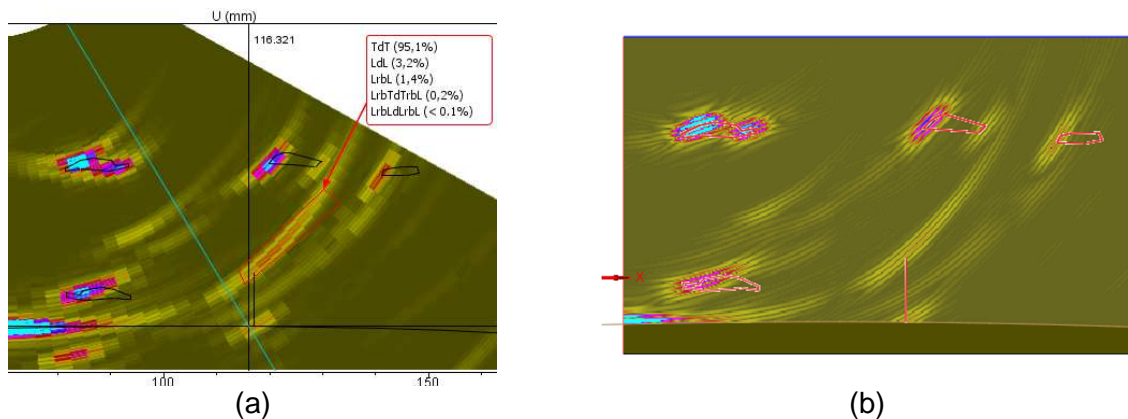


Figure 10 : Reconstruction FTP en mode direct LL de l'entaille en position 2 : (a) image échographique, (b) image FTP

L'imagerie FTP, en plus de fournir des images de haute résolution, présente un autre avantage par rapport à l'imagerie échographique puisqu'elle permet d'imager des défauts selon des trajets plus complexes que les trajets directs « capteur/défaut ». Ainsi, il est possible de prendre en compte le rebond de l'onde sur le fond de pièce avant d'atteindre le défaut. Ce mode de reconstruction est appelé sous CIVA « le mode écho de coin » et s'avère très utile pour l'imagerie de défauts étendus comme les entailles. Dans ce mode de reconstruction, les trajets (en émission ou réception) prennent en compte une seule réflexion sur le fond (avec ou sans conversion de modes) et l'interaction avec le défaut est une réflexion spéculaire.

A priori, il n'est pas évident au premier abord de connaître le mode « écho de coin » (parmi les 9 possibles) qui permettra, en présence de retassures, de reconstruire l'entaille sur toute sa longueur. Cependant, le tracé de rayon de CIVA, bien que ne prenant pas en compte la directivité élémentaire des ondes émises par le capteur, peut aider à trouver un mode pertinent de reconstruction. La Figure 11 montre les trajets effectués par les rayons pour les positions d'entaille n°1 et n°2. Pour la position n°1, le tracé de rayon indique qu'un trajet LLL est possible. Pour la position 2, un trajet TTT est envisageable pour imagier l'entaille.

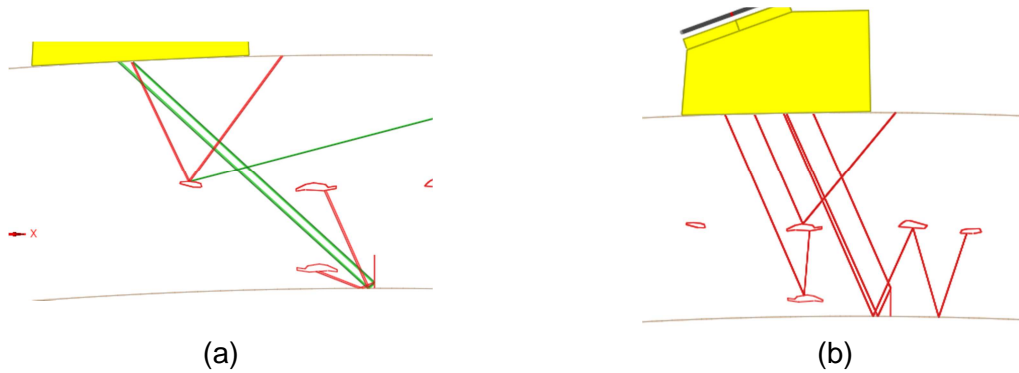


Figure 11 : Tracé de rayons aux différentes positions de capteur : (a) position 1, (b) position 2

Les trajets indiqués par les tracés de rayon sur la Figure 11 sont utilisés pour construire des images FTP en mode écho de coin. Les résultats de ces post-traitements sont présentés sur la Figure 12 pour les positions n°1 et n°2.

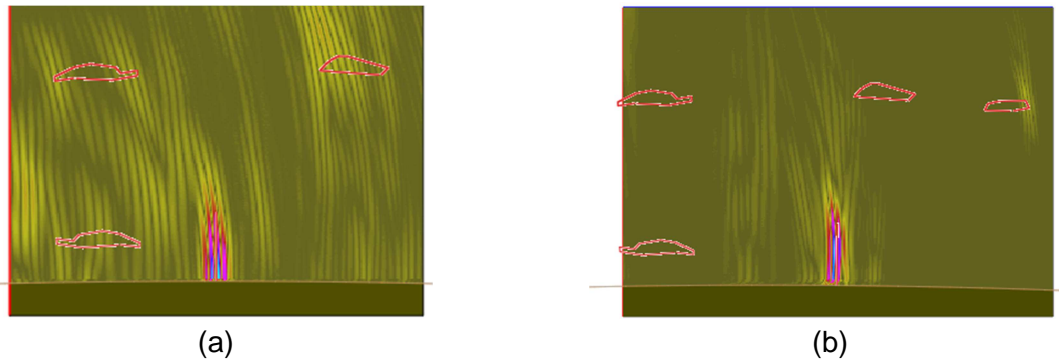


Figure 12 : Images FTP de l'entaille en mode écho de coin. (a) mode LLL - position 1, (b) mode TTT - position 2.

Quelle que soit la position de l'entaille dans la pièce, la reconstruction en mode écho de coin de l'entaille, selon les modes indiqués par le tracé de rayon, permet d'imager le défaut sur toute sa longueur. Contrairement au mode direct, l'entaille ne se distingue plus par ses échos de coin et de diffraction.

La reconstruction selon d'autres modes que ceux indiqués par le tracé de rayon ont été testés. Seuls les modes LLL et TTT aboutissent à une reconstruction correcte de l'entaille. Cependant, lorsque le capteur est positionné près du défaut plan, la dynamique de l'entaille en mode LLL est beaucoup plus faible qu'en mode TTT. C'est le cas de la position n°2 pour laquelle le centre du capteur est situé à 30° de l'entaille. Pour cette position, le mode LLL fait apparaître sous l'ouverture du traducteur un fort artefact de reconstruction qui vient perturber l'image de l'entaille (voir Figure 13(a)).

L'artefact correspond à une reconstruction de l'écho de fond selon le mode LLL. En effet, afin de reproduire au plus près les phénomènes acoustiques, le calcul de l'écho de fond a été pris en compte dans la simulation. L'algorithme d'imagerie synthétique va chercher, pour chaque pixel de la zone à imager, l'amplitude des échos - dont celui du fond - se situant à un temps de vol équivalent à un trajet LLL. Comme une partie de la zone de reconstruction est située sous l'ouverture du traducteur, l'algorithme récupère des informations liées au fond de

la pièce. L'écho de fond étant d'amplitude supérieure à celle de l'entaille, l'artefact apparaît avec une meilleure dynamique sur l'image. Pour confirmer l'origine de l'artefact, une simulation sans calcul de l'écho de fond a été effectuée. L'image obtenue avec le mode LLL est donnée sur la Figure 13(b). Il n'y a plus d'artefact, seulement l'entaille reconstruite sur toute sa longueur et avec une meilleure dynamique. L'origine de l'artefact sur la Figure 13(a) est donc bien l'écho de fond. Il n'apparaît pas en mode TTT car les temps de vols recherchés par l'algorithme pour imager le défaut sont éloignés de ceux de l'écho de fond.

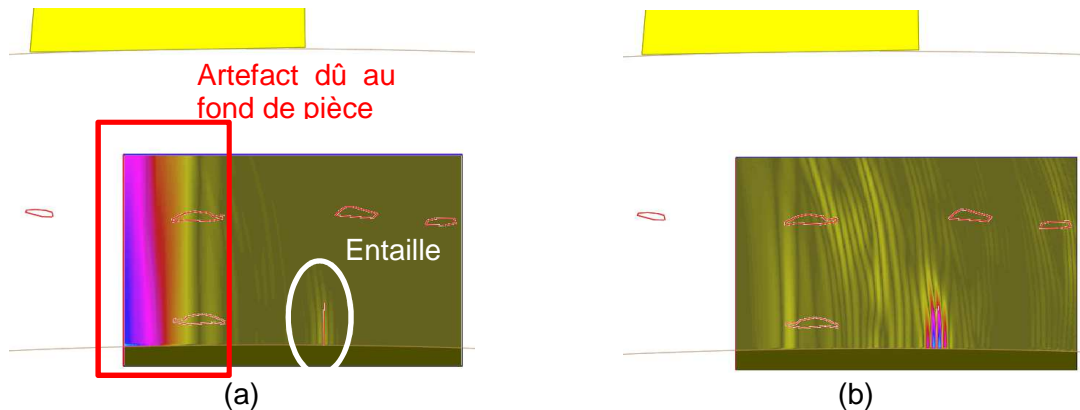


Figure 13 : Reconstruction FTP en mode écho de coin LLL de l'entaille (a) avec simulation de l'écho de fond, (b) sans prise en compte de l'écho de fond

Au vu de ces résultats, il est possible d'affirmer que l'imagerie synthétique donne d'aussi bons résultats que l'échographie standard en reconstruction directe LL. Quant au mode écho de coin, il améliore la détection et l'identification du défaut en l'imageant sur toute sa longueur. De plus, il affranchit l'image des forts échos de retassures présents en mode échographique ou en imagerie directe LL. Il s'agit donc d'une méthode de reconstruction qui assure la détection d'un défaut plan débouchant malgré la présence d'un réseau de retassures situé sur le trajet des ondes ultrasonores et qui permet de lever le doute sur l'origine d'un écho observé en mode direct ou mode échographique.

Cette conclusion reste valable à condition d'avoir un rapport signal / bruit (RSB) suffisant. En effet, avec une acquisition FMC, l'émission avec un élément à la fois réduit l'énergie émise dans le milieu. Si dans les milieux faiblement atténuants la réduction d'énergie impacte peu, elle peut être plus contraignante dans les milieux bruités (dégradation du RSB, réduction de la capacité de détection...) tels que les aciers moulés ferritiques à gros grains.

CONCLUSION

Cet article retrace une étude menée conjointement par EXTENDE et la Division Technique Générale d'EDF dont le but est d'évaluer la faisabilité de la détection d'une entaille débouchant en fond d'une pièce en acier moulé ferritique et située sous un réseau de retassures positionné à mi- épaisseur. En premier lieu, une inspection conventionnelle en monoélément OL45° a été considérée. Les simulations effectuées sous CIVA ont montré que la présence des retassures peut conduire à l'ombrage de défauts de type plan situés en fond de pièce et empêche potentiellement leur détection. L'apport d'une sonde multiéléments « standard » a été ensuite étudiée afin d'évaluer les performances de détection dans les mêmes conditions. Contrairement au contrôle en monoélément, la technologie multiéléments assure la détection de l'entaille pour toutes les positions. Il est possible, avec le même traducteur, de détecter l'entaille selon des angles d'inspection différents de 45°. Cela représente un avantage car cette valeur d'angle n'est pas favorable dans tous les cas de

figures. Les capacités de déviation et de focalisation d'un traducteur multiéléments permettent donc de contrer l'effet de l'ombrage et d'assurer la détection du défaut plan dont la signature acoustique se résume à un écho de coin. Ce dernier pouvant être confondu avec l'écho d'une retassure, la méthode FTP a été évaluée sur les informations supplémentaires qu'elle apporterait sur l'origine d'un défaut. Ainsi, le mode de reconstruction direct LL aboutit à l'obtention d'images très proches des images échographiques. En revanche, le mode de reconstruction « écho de coin » fournit une image où seule l'entaille, imagée sur toute sa longueur, apparaît. Cette méthode de reconstruction permet ainsi d'identifier, sans ambiguïté, la présence de ce défaut malgré le réseau de retassure situé sur le trajet des ondes ultrasonores.

L'ensemble de ces résultats démontre que la détection d'une entaille débouchant en fond de pièce au sein d'un réseau de retassures est possible. Néanmoins, le bruit de structure n'ayant pas été modélisé, ces résultats restent valables à condition d'avoir un rapport signal à bruit suffisant, en particulier pour l'imagerie FTP pour laquelle l'énergie émise par tir est restreinte. Un volet expérimental est à présent nécessaire pour valider l'ensemble de ces résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] C. Holmes, B. W. Drinkwater, Paul D. Wilcox, Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation, *NDT&E International*, 38, 701-711 (2005)

[2] S. Bannouf, O. Casula, C. Prada, Evaluation de méthodes multi-éléments appliquées à des géométries complexes, *Journées COFREND 2011*