

Journées COFREND 2017 Conférences scientifiques et techniques

Référence de la communication : ME.1.B.3

ETUDE DE FAISABILITE DE LA CARACTERISATION PAR FMC/FTP DE DEFAUTS PLANS DANS UNE SOUDURE CIRCULAIRE

Souad BANNOUF¹, Sébastien LONNE¹, Loïc DE ROUMILLY², Christophe GIBERT²

¹ EXTENDE, 15 Avenue Emile Baudot, Le Bergson, 91300 MASSY, France

² EDF CEIDRE, 2 Rue Ampère, 93206 Saint-Denis, France

RESUME

Cet article rapporte les résultats obtenus par EXTENDE lors d'une étude de faisabilité sur l'apport de la Focalisation en Tous Points (FTP) en termes de caractérisation de défauts plans dans une pièce cylindrique présentant une soudure. La caractérisation d'entailles électro-érosées dans une pièce soudée et de profil interne complexe est évaluée par simulation. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats issus de la mise en œuvre expérimentale et montrent un bon accord. L'application de la procédure de caractérisation sur des fissures provoquées dans des coupons montre également des résultats convaincants. La détection et la caractérisation des défauts plans et débouchant en fond de pièce s'avèrent être possibles en reconstruisant une image FTP en mode direct LL de la zone à contrôler. Une image FTP reconstruite avec un mode écho de coin adapté à la géométrie de la pièce et à la position du traducteur permet, sous certaines conditions détaillées dans ce papier, de confirmer et compléter la caractérisation du défaut.

1 - INTRODUCTION

Les assemblages soudés que l'on trouve dans les circuits des Centres Nucléaires de Production d'Électricité présentent des géométries variées, prises en compte dans l'établissement des performances des Examens Non Destructifs réalisés en service. En cas de détection d'une indication, des gestes de discrimination artefacts/défauts, voire de dimensionnement de défauts, doivent être réalisés à titre d'expertise ; chaque situation est traitée au cas par cas. Certaines géométries, qui limitent l'accès des traducteurs d'un seul côté de la soudure, peuvent conduire à des limitations en termes de couverture de zone ou de caractérisation par exemple.

Pour traiter de manière plus générique ces situations, EDF CEIDRE a souhaité investiguer dans un contexte de veille technologique l'intérêt de la technique FTP (Focalisation en Tous Points) pour permettre la discrimination artefact/défaut et le dimensionnement de défaut dans

ces configurations. L'imagerie FTP est une technique de post-traitement implémentée dans le logiciel de simulation et d'analyse CIVA et dans certains systèmes d'acquisitions multiéléments, qui permet, à l'issue d'une acquisition Full Matrix Capture (FMC) de reconstruire une image dans une zone d'intérêt. EXTENDE a donc étudié les performances de la technique FTP pour évaluer son pouvoir de discrimination artefact/défaut et le dimensionnement en hauteur de fissures de fatigue thermique dans des soudures circulaires présentant un accès restreint pour les transducteurs.

2 - PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE ADOPTEE

La connaissance du profil d'une pièce contrôlée par ultrasons est nécessaire pour comprendre les signaux reçus que cela soit lors de contrôles conventionnels ou multiéléments. Sans elle, des difficultés dans l'interprétation des résultats peuvent exister. Dans la configuration étudiée, c'est la géométrie du fond de l'assemblage soudé qui est complexe (présence d'un cordon de soudure et de pentes de délardage). A cela s'ajoutent des problèmes d'accessibilité sur la surface de la pièce. La Figure 1 illustre la configuration géométrique dans laquelle cette étude a été menée.

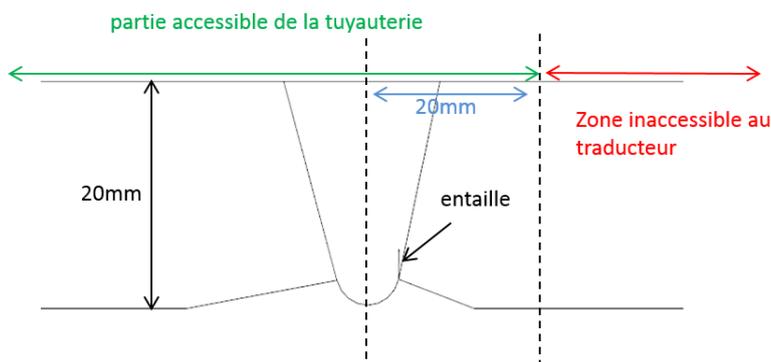


Figure 1 : Schéma de la soudure circulaire dans la maquette usinée

La présence du cordon de soudure est problématique car elle devient une source d'artefacts. Ces échos indésirables peuvent compliquer la détection du signal d'une indication en bord de cordon et nuire à sa caractérisation, c'est à dire à sa classification comme défaut « volumique » ou « non volumique », mais également à son dimensionnement. La connaissance du profil interne est la première condition pour permettre la discrimination artefact/défaut en particulier sur des images UT multiéléments classiques ou issues de l'imagerie par FTP.

Pour évaluer la faisabilité et les performances de caractérisation de la méthode FMC/FTP, des simulations avec le logiciel CIVA ont été effectuées. L'optimisation des paramètres de contrôle et les options de post-traitement ont également été anticipées par simulation. Des essais expérimentaux ont été effectués sur la plateforme GERIM 2. Les résultats post-traités dans CIVA ont été ensuite confrontés aux résultats de simulation pour validation.

3 – CONCEPTION DE LA METHODE DE CONTROLE

3.1 - Maquettes à disposition

La maquette utilisée pour l'évaluation des performances de la méthode FMC/FTP est une pièce cylindrique en acier ferritique faiblement allié et dont les propriétés matériau sont :

- Vitesse des ondes longitudinales : 5900 m/s
- Vitesse des ondes transversales : 3230 m/s
- Masse volumique : 7.8 g/cm³

Cette pièce comprend plusieurs entailles électro-érodées de hauteur comprise entre 1.5 mm et 8 mm le long des pentes de délardage.

Des essais ont également été effectués sur des coupons de même diamètre. Ils présentent tous une fissure de fatigue thermique. La Figure 2 schématise le profil réel des coupons ainsi que la position de la fissure présente.

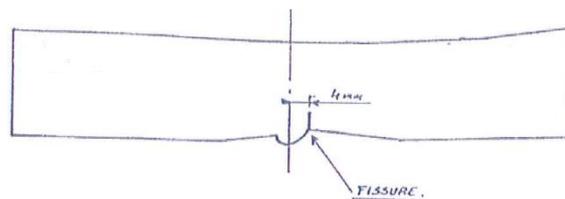


Figure 2 : Schéma d'un coupon fissuré réel

Ces pièces sont vrillées et leur surface n'est pas parfaitement plane. Le fond des coupons est aussi de géométrie complexe. Le cordon de soudure est très irrégulier ; sa profondeur varie le long de l'extrusion de la pièce. Globalement, on peut affirmer que la géométrie des coupons est 3D comme on peut le constater sur la photographie de la Figure 3.



Figure 3 : Photographie d'un coupon fissuré. Le vrillage et l'irrégularité du profil sont clairement visibles.

L'examen de la soudure de ces pièces est effectué au contact en utilisant tout l'espace disponible sur la surface de la pièce avec comme seule contrainte la limite de 20mm du côté où est initiée l'entaille ou la fissure (cf. Figure 1). On suppose que la restriction d'accès est située du côté où est initié le défaut.

3.2 - Capteur/système retenu

Un capteur composé de 64 éléments (pitch 0.6mm) et de fréquence 5MHz a été utilisé pour le contrôle. Ses caractéristiques (ouverture, fréquence, pitch) ont été choisies pour tenir compte des restrictions d'accès sur la pièce, de son épaisseur mais également de la taille des défauts cibles et de la divergence du champ émis.

Ce traducteur a été utilisé avec un système d'acquisition MultiX de chez M2M, disponible sur la plateforme GERIM2, pour sa capacité à pouvoir enregistrer des signaux élémentaires d'une acquisition FMC. L'enregistrement de ces signaux est nécessaire pour pouvoir reconstruire l'image FTP en utilisant un profil CAO 2D complexe puisque les systèmes d'acquisition portatifs actuels intégrant l'imagerie FTP en temps réel ne permettent pas encore de telles reconstructions.

3.3 - Méthode d'inspection

La Focalisation en Tous Points est une technique de post-traitement disponible dans CIVA qui permet, à l'issue d'une acquisition FMC, 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 émission et en réception en tous points de la zone.

En un point de focalisation P , l'amplitude $A(P)$ de l'image est donnée par :

$$A(P) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N k_{nm}(T_{nm}^P)$$

où T_{nm}^P représente le temps de vol inter-éléments entre la paire d'éléments ($n ; m$) et le point P . Le calcul des temps de vol selon la procédure décrite ci-dessus est spécifique au mode de reconstruction dit *direct*. D'autres modes de reconstructions peuvent être utilisés en imagerie FTP à l'instar du mode dit *indirect* et du mode *écho de coin*. Ces modes de reconstructions sont disponibles dans le logiciel CIVA et prennent en compte les multiples trajets ultrasonores et les éventuelles conversions de modes lorsque les défauts sont localisés à proximité d'une interface de la pièce inspectée. Le mode *écho de coin* 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.

3.4 - Apprentissage du profil

L'imagerie par FTP requiert une connaissance précise du profil de la pièce sur laquelle a été effectuée l'acquisition. Il s'agit d'une donnée d'entrée cruciale pour la bonne reconstruction des données. Pour l'imagerie en mode *écho de coin*, la connaissance du profil complet (surface et fond) est requise.

Dans CIVA, il est possible de reconstruire localement le profil de pièces sur lesquelles une acquisition FMC a été effectuée. Nous avons donc utilisé les outils CIVA pour vérifier la concordance entre le profil théorique et celui reconstruit. La comparaison montre une assez bonne concordance. Quelques écarts ont tout de même été relevés, ils sont indiqués sur la Figure 4.

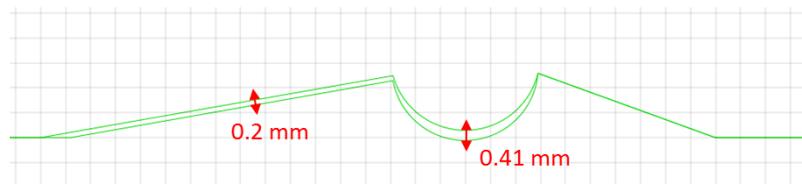


Figure 4 : Différences entre le profil théorique de la maquette Stratus et celui obtenu expérimentalement par reconstruction de profil.

Les écarts étant inférieurs à la longueur d'onde, on peut considérer les deux profils comme identiques. La différence sur l'image en mode *écho de coin* devrait être non significative.

Le profil réel des coupons fissurés présente une géométrie 3D complexe. Les outils de reconstruction de profil de CIVA ne fournissent qu'une description approchée de la géométrie de la pièce sans prendre en compte les effets 3D. Dans le modèle, nous avons considéré un contact parfait entre la pièce et le traducteur. Le fond a été reconstruit par imagerie FTP en utilisant cette approximation. L'extrusion cylindrique du profil est constante (pas de prise en compte des variations de profil sur la largeur de la pièce).

4 - RESULTATS

4.1 - Caractérisation d'une indication par imagerie FTP en mode direct

L'imagerie FTP en mode *direct* permet d'aboutir à des images « classiques » d'un défaut, autrement dit, les échos reconstruits ressemblent à ceux que l'on peut observer sur un Bscan issu d'un scan sectoriel, balayage électronique... Ainsi, sur une image FTP en mode *direct*, un défaut plan débouchant en fond de pièce est caractérisé *a minima* par un écho de diffraction au sommet et, selon la position du traducteur par rapport au défaut, un écho de diffraction basse ou une rupture de l'écho de fond.

En plaçant l'ouverture du traducteur au-dessus de la zone à imager, un défaut plan débouchant en fond de pièce cause une rupture de l'écho de fond qui n'existerait pas avec un défaut volumique de dimension inférieure à la largeur du champ.

Pour évaluer la capacité à mener une discrimination artefact/défaut, la comparaison a été réalisée par simulation entre l'image FTP d'une pièce comportant une inclusion sphérique de diamètre 0.5mm et celle obtenue en présence d'un défaut plan. La comparaison montre que l'impact sur l'écho de fond n'est pas le même (Figure 5). En présence de l'entaille, l'écho de fond est perturbé à l'endroit où débouche l'entaille tandis qu'en présence de l'inclusion l'écho de fond reste inchangé.

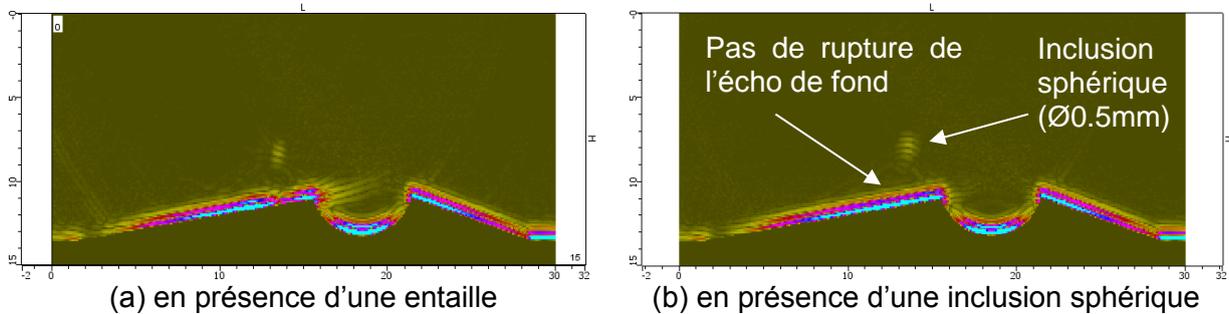


Figure 5 : Images FTP simulées (a) en présence d'une entaille de hauteur 3mm, (b) en présence d'une inclusion sphérique de diamètre 0.5mm et à une hauteur de 3mm

La Figure 6 présente les images FTP expérimentales en mode LL de deux entailles de hauteur 3 mm et 1.5 mm lorsque l'ouverture du capteur est située au-dessus des défauts. Les images montrent qu'à l'endroit où débouchent les entailles, l'écho de fond est interrompu. Par ailleurs, à l'aplomb de la rupture se trouve un écho de diffraction à une distance égale à la hauteur du défaut.

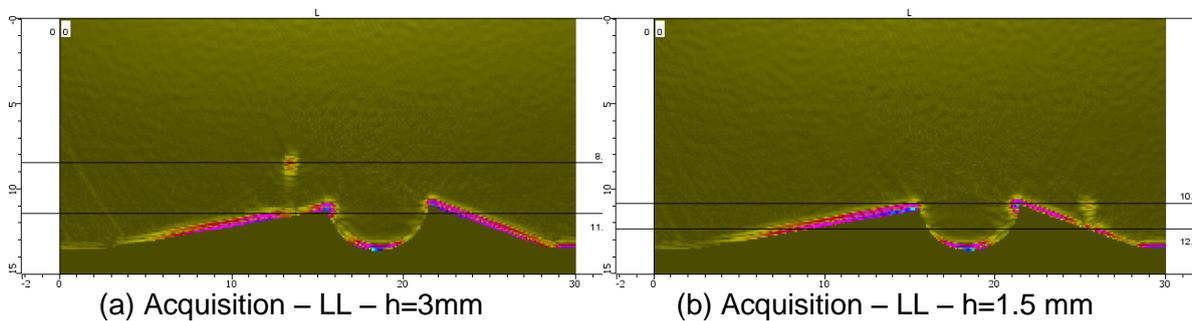


Figure 6 : Images FTP expérimentales en mode LL (a) d'une entaille de hauteur 3mm, (b) d'une entaille de hauteur 1.5 mm

Au vu de ces résultats, la rupture de l'écho de fond associée à la présence d'un écho à l'aplomb de la discontinuité peut être interprétée comme une indication de la présence d'un défaut plan débouchant. Il est possible de vérifier cette hypothèse en imageant de nouveau la même zone d'intérêt mais pour une autre position de transducteur. L'ouverture du transducteur doit être placée au-dessus de la pente de déladage opposée à celle où la rupture de fond se produit (Figure 7). En présence d'un défaut plan, l'image FTP en mode LL montrera 2 échos : l'écho de diffraction au sommet et un écho de diffraction basse à l'endroit de la rupture de l'écho de fond.

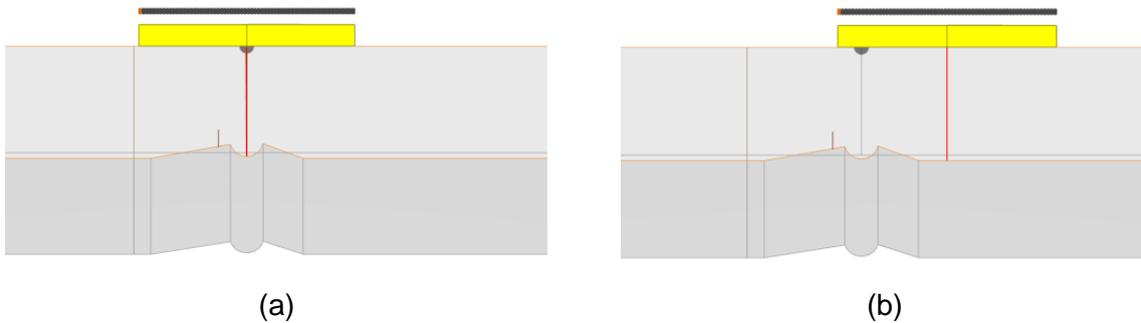


Figure 7 : Positionnement du traducteur par rapport à l'entaille (a) capteur au-dessus de la zone contenant le défaut à imager, (b) capteur décalé par rapport à la zone d'intérêt

La Figure 8 présente l'imagerie FTP en mode LL des entailles de la Figure 6 après avoir éloigné l'ouverture du traducteur de la zone où sont initiées les entailles. Les résultats simulés sont comparés aux résultats expérimentaux. On observe un très bon accord entre simulation et expérience. Les images montrent la présence d'un écho de fond et les deux échos caractéristiques d'un défaut plan débouchant (écho de diffraction haute et écho de diffraction basse).

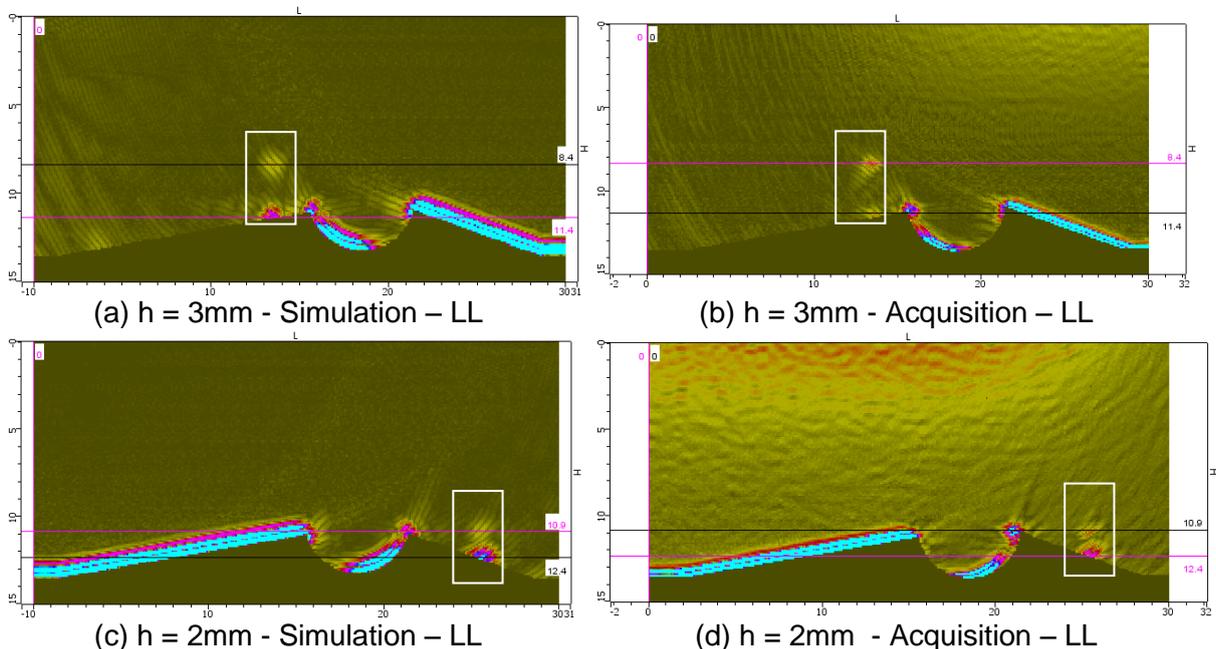


Figure 8: Images FTP en mode direct LL d'une entaille (a) simulée, $h=3\text{mm}$, (b) expérimentale $h=3\text{mm}$, (c) simulée, $h=1.5\text{ mm}$, (d) expérimentale $h=1.5\text{ mm}$

Le dimensionnement d'une indication imagée selon le mode LL est obtenu en mesurant la distance entre le maximum des deux échos caractéristiques de l'entaille. Que cela soit en simulation ou expérimentalement, le dimensionnement des entailles est très bon (cf. Tableau 1). La hauteur retrouvée en mesurant l'écart entre les deux échos donne précisément la dimension réelle du défaut compte tenu de l'erreur sur la mesure ($\pm 0.2\text{mm}$). Cette erreur est liée à la résolution de la grille de reconstruction (0.1mm).

Tableau 1 : Résultats d'analyse sur l'entaille n°1 et n°2

N° entaille	Hauteur théorique (mm)	Hauteur LL en simulation (mm)	Hauteur LL expérimentale (mm)
1	3	3	3
2	1.5	1.5	1.4

Après avoir évalué les performances de caractérisation de l'imagerie FTP en mode LL sur des défauts artificiels de type entailles électro-érodées, nous avons étudié par l'expérience les capacités de la méthode à imaginer un défaut « vrai » de type fissure de fatigue.

Les images FTP en mode LL d'une fissure de fatigue sont présentées sur la Figure 9. Les deux images sont obtenues pour deux positions de traducteur : (a) avec l'ouverture du traducteur au-dessus de la fissure, (b) en décalant l'ouverture par rapport à la fissure. Comme pour les entailles, on arrive à distinguer les indices caractéristiques de la présence d'un défaut plan débouchant : rupture de l'écho de fond et présence d'un écho de diffraction lorsque que l'ouverture du traducteur couvre la position du défaut et présence d'un écho de diffraction haute et basse lorsque que l'ouverture est décalée.

Si l'on mesure l'écart entre le maximum de l'écho de diffraction haute et celui de l'écho de fond ou de de de diffraction basse on arrive à estimer très précisément la hauteur de la fissure. Sur les différents coupons fissurés étudiés, la hauteur mesurée est égale à la hauteur théorique du défaut à $\pm 0.2\text{mm}$.

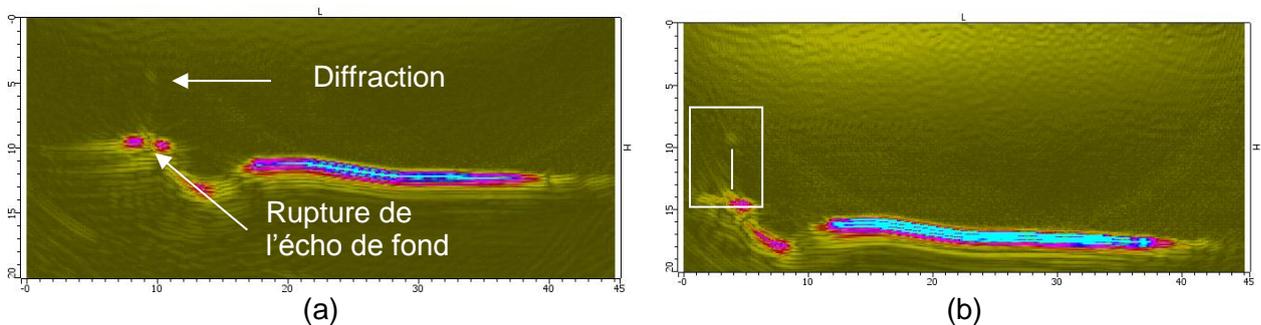


Figure 9 : Images FTP en mode LL d'une fissure de fatigue dans un coupon de géométrie complexe

La détection et la caractérisation de « vraies » fissures de fatigue est donc possible via FTP en mode *direct* LL pourvu que le niveau de bruit soit suffisamment faible (ce qui est le cas ici dans l'acier ferritique à la fréquence considérée).

4.2 - Caractérisation à partir d'une image FTP reconstruite selon le mode écho de coin

Bien que les indices précédemment cités tendent à attester de la présence d'un défaut plan débouchant, il est possible de confirmer le caractère plan de l'indication grâce à une reconstruction FTP en mode *écho de coin*.

L'imagerie FTP en mode *écho de coin* d'un défaut plan permet de l'imager sur toute sa hauteur. Cependant, il n'est pas possible de connaître *a priori* le mode de reconstruction en *écho de*

coin optimal qui permet d'imager l'entaille sur toute sa longueur. En effet, on peut difficilement prédire si un mode impliquant des ondes L seules, des ondes T ou encore des conversions de mode sera le plus performant pour imagier le défaut. L'utilisation du tracé de rayon peut aider à le déterminer mais il reste nécessaire de tester plusieurs autres modes possibles car le tracé de rayon n'est qu'une approche géométrique qui ne tient pas compte de la directivité des éléments.

Dans la configuration étudiée, c'est le mode LTdT qui a été jugé comme étant le plus adapté à la reconstruction en mode *écho de coin*. Ainsi, la reconstruction selon ce mode des entailles 1 et 2 de la Figure 8 donne le résultat sur la Figure 10. Les résultats expérimentaux obtenus par post-traitement sont très proches des résultats simulés avec CIVA. Les entailles sont imagées sur toute leur hauteur confirmant ainsi la nature non-volumique des indications. Par ailleurs, on observe quasiment les mêmes artefacts de reconstruction. Ces artefacts sont associés à des trajets ultrasonores non physiques utilisés lors de la reconstruction en mode *écho de coin*.

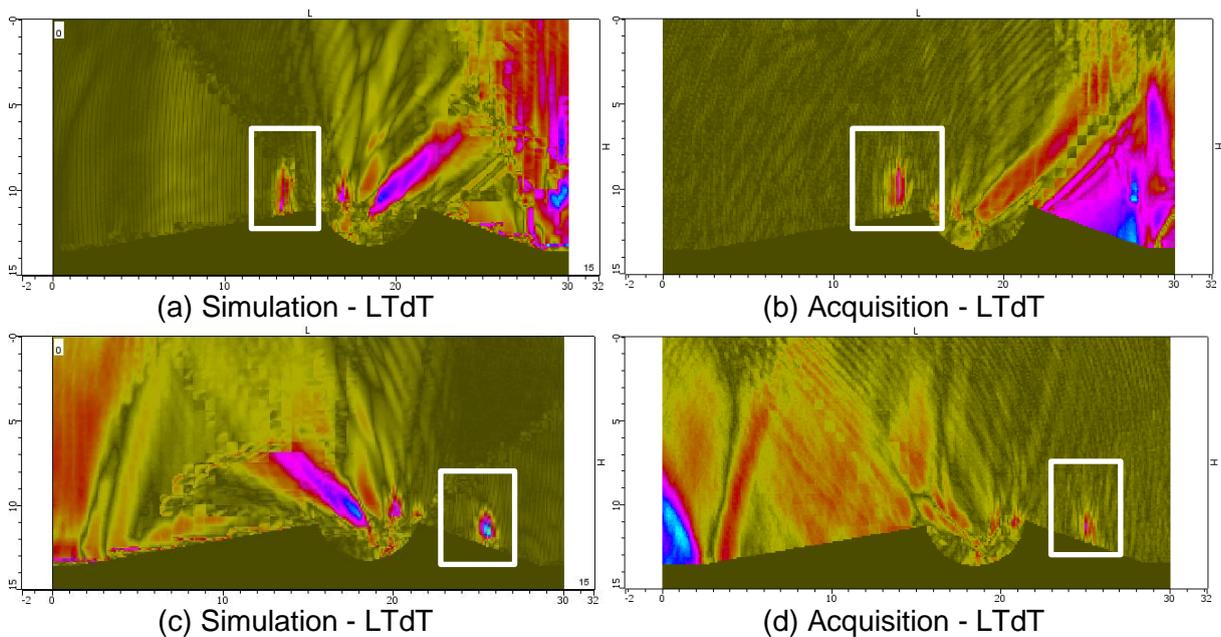


Figure 10 : Images FTP en mode *écho de coin* LTdT d'une entaille (a) simulée, $h=3$ mm, (b) expérimentale $h=3$ mm, (c) simulée, $h=1.5$ mm, (d) expérimentale $h=1.5$ mm

Le dimensionnement d'une indication non volumique en mode *écho de coin* peut être *a priori* effectué par une mesure de la hauteur à -6 dB. Le dimensionnement sur l'image expérimentale LTdT donne 2.8mm pour l'entaille 1, et 1.7 mm pour l'entaille 2. On sous-estime de 0.2mm la hauteur de l'entaille n°1 qui est haute réellement de 3 mm et on surestime de 0.2 mm la hauteur de l'entaille n°2 qui mesure normalement 1.5mm. Les résultats obtenus sur l'ensemble des entailles étudiées montrent que le dimensionnement est un peu moins précis en mode LTdT mais reste satisfaisant compte tenu de l'incertitude de la mesure. On souligne que la mesure de la hauteur à -6 dB sur les images FTP n'est pas pertinente dans toutes les configurations. Elle s'avère imprécise lorsque le défaut atteint une hauteur qui dépasse la taille du faisceau ultrasonore équivalent au mode utilisé pour la reconstruction. Dans ce cas de figure, on sous-estimerait la hauteur de l'indication.

Dans les configurations étudiées telles qu'un défaut plan débouche sur des délardages proches de la cuvette formée par un cordon de soudure, le positionnement du traducteur peut avoir un impact fort en imagerie *écho de coin*. Selon sa position, les artefacts de reconstruction causés par l'écho de fond peuvent perturber la lecture de la signature acoustique d'une indication. Par exemple, lorsque l'ouverture du traducteur est située au-dessus du cordon de soudure, la signature d'un défaut plan à proximité de la cuvette peut se « noyer » dans l'artefact de reconstruction lié à l'écho de fond. Il devient alors plus difficile de visualiser ou de caractériser l'indication. La Figure 11(a) illustre ce problème avec une entaille de hauteur 8mm.

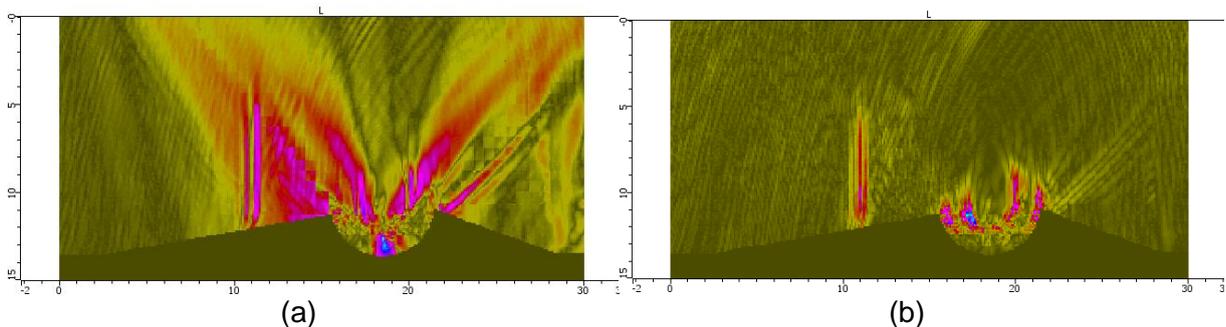


Figure 11 : Image reconstruite selon le mode LTdT d'une entaille de hauteur 8mm. Le traducteur est situé au-dessus de l'entaille et (a) aucun filtrage d'artefact n'est appliqué (b) un filtrage d'artefact est appliqué

Une première solution consiste à décaler l'ouverture du traducteur de la zone où l'on soupçonne la présence d'un défaut plan. Comme on peut le voir sur les images de la Figure 10, l'artefact du côté de l'entaille disparaît. Une autre solution est d'utiliser l'option de filtrage d'artefact proposée dans CIVA 2016. Cette option permet de filtrer les artefacts causés par l'écho de fond dans les reconstructions en mode *écho de coin*. Le filtrage repose sur l'élimination des trajets sans sens physique. L'option filtre les trajets associés aux angles θ entre la direction à l'émission et à la réception qui sont environ égaux à 180° en appliquant la fonction de pondération suivante [3] :

$$f(\theta) = \cos^2(\theta/2) = \frac{1 + \cos(\theta)}{2}$$

L'option de filtrage des artefacts de CIVA 2016 permet alors une plus grande souplesse vis-à-vis du positionnement du traducteur par rapport à la géométrie du fond et la zone à imager. Sur la Figure 11(b) on constate que, sans avoir à décaler le traducteur, l'application du filtrage d'artefacts permet d'éliminer la signature de l'écho de fond mal reconstruit. L'image de l'entaille est alors plus visible et il est ainsi plus facile de la caractériser.

Nous avons évalué expérimentalement la caractérisation d'une vraie fissure par imagerie FTP en mode *écho de coin*. Pour rappel, les résultats en mode LL sont reportés sur la Figure 9. La même fissure imagée en mode LTdT donne les images de la Figure 12.

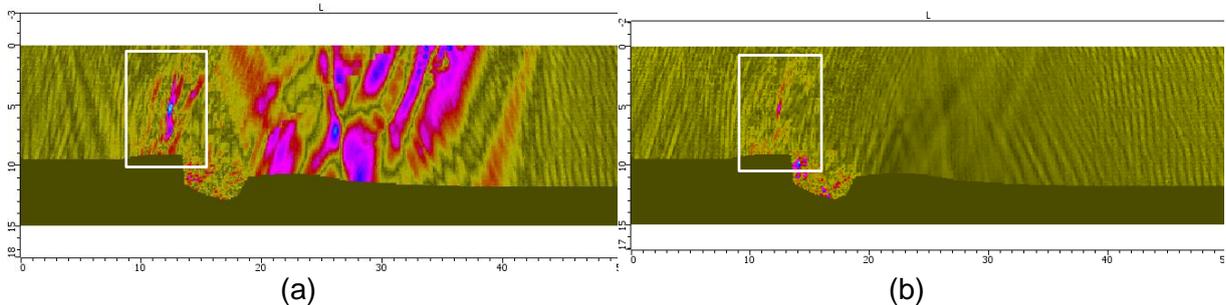


Figure 12 : Images LTdT d'une fissure de fatigue thermique (a) sans filtrage des artefacts, (b) avec filtrage des artefacts

Sur les images de la Figure 12 on observe une signature acoustique laissant penser à celle d'un défaut plan. Cette indication reste visible que l'on applique ou pas le filtrage des artefacts. Elle est située à la même position que les échos imagés en mode *direct* et l'orientation et la taille de la signature acoustique semble coïncider avec la vraie fissure dont une photographie est donnée sur la Figure 13.

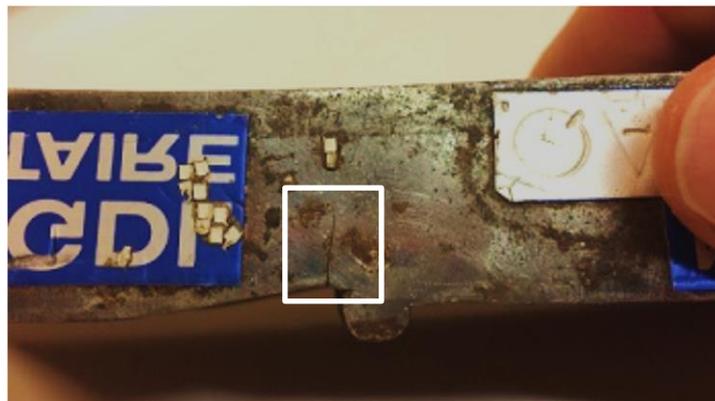


Figure 13 : Photographie de la fissure de fatigue d'un coupon contrôlé expérimentalement.

En revanche, on constate que l'image LTdT de la fissure est moins nette et franche que celle d'une entaille usinée. La raison principale est associée à la géométrie du coupon qui est vrillé (cf. Figure 3). L'approximation 2D du profil du coupon qui est en réalité 3D ainsi que le couplage non-optimal entre la surface du traducteur et la pièce lors de l'acquisition ont un fort impact sur la reconstruction. Tout de même, ces images montrent que la caractérisation d'une fissure reste possible bien que plus délicate.

5 - CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer qu'il était possible de mettre en place à l'aide du logiciel de simulation et d'analyse CIVA une méthodologie utilisant les ressources de l'imagerie FMC/FTP pour rendre possible la détection et la caractérisation de fissures de fatigue thermique. Le choix du positionnement et des modes de reconstruction a été confirmé et validé par les essais expérimentaux menés à l'issue de l'étude de simulation.

La détection du défaut se fait en reconstruisant une image selon le mode *direct* LL. En présence du défaut plan, la détection est assurée si l'on observe :

- Un écho de diffraction
- Une rupture de l'écho de fond si l'ouverture du traducteur couvre la zone où se situe le défaut cible
- Un écho de diffraction basse au pied du défaut si l'ouverture du traducteur ne couvre pas la zone où est initié le défaut

La caractérisation d'un défaut plan débouchant en fond de pièce peut se faire via l'image obtenue en mode *direct* LL ou via l'image obtenue en mode *écho de coin* approprié. La complémentarité des deux images permet de conforter le diagnostic de caractérisation du défaut. La nature non-volumique d'une indication peut être confirmée :

- Avec le mode *direct* LL de telle sorte à observer en plus de l'écho de diffraction, une rupture de l'écho de fond.
- Avec le mode *écho de coin* adéquat : en présence d'un défaut plan et à condition de maîtriser la géométrie de la pièce inspectée, il est possible de reconstruire en post-acquisition le défaut sur sa hauteur levant tout doute sur la nature non-volumique du défaut.

Par ailleurs, les simulations et les essais effectués lors de l'étude ont montré que la mesure de hauteur du défaut est plus précise en mode *direct* LL. Mesurer la distance entre l'écho de diffraction et l'écho de fond ou de coin permet d'évaluer très précisément la hauteur du défaut plan (entailles et vraies fissures). Il est également possible, dans le cas présent, de le dimensionner un défaut plan débouchant en effectuant une chute à -6 dB de sa signature acoustique sur l'image FTP en mode *écho de coin*.

EDF CEIDRE dispose désormais du mode opératoire rédigé par EXTENDE. Il pourra être mis en œuvre pour test en atelier en utilisant les recommandations matérielles et opératoires de ce document.

Enfin, on souligne que les résultats simulés avec CIVA sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux. Les outils disponibles dans CIVA comme la reconstruction de profil et le filtrage des artefacts ont montré leur capacité à améliorer la qualité des images reconstruites mais aussi à améliorer la caractérisation des indications relevées. La simulation et le post-traitement d'acquisitions FMC sous CIVA peuvent donc être utilisés pour prédire les résultats mais également pour étudier les paramètres influents sur cette méthode.

6 - REFERENCES

- [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]. Souad Bannouf, Développement et optimisation de méthodes d'imagerie synthétique pour le contrôle non-destructif par ultrasons de composants industriels complexes, Thèse de l'Université Paris 7, 2013



- [3]. Ekaterina Iakovleva, Sylvain Chatillon, Philippe Bredif, and Steve Mahaut, Multi-Mode TFM imaging with artifacts filtering using CIVA UT forwards models, AIP Conference Proceedings 1581, 72 (2014);