

CFA/VISHNO 2016

La problématique du contrôle ultrasonore des matériaux anisotropes - Exemple d'application sur une soudure en acier inoxydable en 316L

D. Flotté, S. Bittendiebel et S. Yaacoubi

Institut de Soudure Association, 4 Bvd Henri Becquerel, Espace Cormontaigne, 57970
Yutz, France
s.yaacoubi@isgroupe.com



LE MANS

La recherche de propriétés mécaniques particulières, le besoin d'allègement des structures conduit dans de nombreux domaines à utiliser des matériaux aux propriétés anisotropes vis-à-vis des ultrasons. Le contrôle de tels matériaux ou d'assemblages réalisés avec ceux-ci génèrent des problèmes spécifiques nécessitant une approche innovante pour la mise au point du contrôle. Deux démarches sont ici présentées. L'utilisation préférentielle de l'une ou l'autre dépend de l'homogénéité du matériau. Dans le cas des matériaux composites pouvant être considérés comme homogènes macroscopiquement, une approche par simulation numérique est proposée. Dans le cas des soudures d'aciers austénitiques, une approche expérimentale est indispensable, ces assemblages étant très hétérogènes vis-à-vis de la propagation des ultrasons. Deux approches sont possibles. La première est basée sur une analyse expérimentale des propriétés acoustique de la zone fondue : vérification de l'homogénéité, recherche de la fréquence de travail et déformation du faisceau au travers de la zone fondue. Cette approche est adaptée aux structures très grossières. Pour des structures plus fines, une approche sur un bloc de référence est en général suffisante. Un exemple sur une soudure de 50 mm en 316L est présenté. La procédure de contrôle a été entièrement définie à partir du bloc de référence.

1 Contrôle ultrasonore des structures anisotropes

L'amélioration des propriétés mécaniques, de la tenue à la corrosion, le besoin d'allègement des structures, conduit dans de nombreux domaines à l'emploi de matériaux nouveaux ou adaptés pour les besoins d'une application spéciale.

L'optimisation d'un produit peut donc conduire à l'emploi de matériaux composites pour les nouvelles générations d'appareils à pression, à employer des revêtements en acier inoxydable sur les composants offshore, et des liaisons bimétalliques en centrale nucléaires, ... Un composant est donc souvent constitué d'assemblages multi-matériaux à travers un design optimisant les ratios entre caractéristiques (mécaniques, tenue à la corrosion, au fluage...) et le coût des matériaux et de la fabrication.

Les évolutions actuelles des réglementations, des directives, etc., vont amener le fabricant et l'exploitant à limiter l'emploi de techniques de contrôle non destructif basées sur les rayonnements ionisants. Les méthodes de contrôle volumiques traditionnelles référencées par les codes et les normes sont :

- la radiographie X, à source γ Ir, Se ou Co,
- le contrôle par ultrasons,

L'émission acoustique, qui peut également être classée dans les méthodes de contrôle volumique, très employée pour certaines applications (contrôle d'équipements sous pression, ...) nécessite la mise sous contrainte du composant inspecté. Dans le cadre du remplacement de la méthode par rayonnement ionisant, la méthode de contrôle par ultrasons s'impose donc souvent comme la meilleure alternative.

La méthode ultrasonore peut être mise en œuvre via diverses techniques qui exploitent en termes de détection les phénomènes de :

- réflexion spéculaire : la plus employée à l'heure actuelle dans l'industrie ;
- diffraction d'ondes ultrasonores en extrémités de défauts ;
- conversion de modes ;
- masques ;
- ...

L'exploitation de ces phénomènes nécessite la propagation d'ondes volumiques dans le composant

inspecté avec des modes vibratoires de compression et / ou de cisaillement.

L'utilisation de ces techniques dans le cas de matériaux comme les aciers faiblement alliés constitue le quotidien du contrôleur par ultrasons. La réflexion spéculaire à l'aide d'ondes de compression en incidence droite ou d'ondes de cisaillement en incidence oblique est la technique la plus pratiquée. Toutefois l'exploitation de phénomène de diffractions tend à se généraliser au travers de la technique TOFD (Time Of Flight diffraction Technique) et multiéléments (dite Phased array). Les autres techniques sont plutôt réservées à des procédures spécifiques d'expertises.

Les techniques multiéléments s'inscrivent progressivement dans le paysage industriel. Elles constituent un moyen d'utiliser simultanément plusieurs des phénomènes cités précédemment.

Le contrôle d'un composant contenant un ou plusieurs matériaux dont certains présentant des caractéristiques d'anisotropie constitue une singularité notoire pour le contrôleur et requiert une approche totalement spécifique. Cette approche peut être expérimentale ou basée sur de la simulation numérique.

2 Approche numérique – Cas d'un composite carbone-carbone

Lorsque le matériau peut être considéré comme macroscopiquement homogène, il est possible de modéliser son comportement ultrasonore. C'est par exemple le cas des matériaux composites constitués de couches filamenteuses noyées dans une résine. Il est alors possible de définir une matrice d'élasticité applicable sur le volume complet du matériau.

2.1 Courbe des lenteurs

Le composite étudié est un matériau orthotrope. Sa matrice d'élasticité est du type ci-après :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Cela conduit à la courbe des lenteurs de la figure 1. Sur cette figure, la flèche bleue représente l'axe cristallographique. Une forte variation de vitesse selon la direction de propagation est observée, celle-ci étant maximale parallèlement à l'axe cristallographique. L'orientation par rapport aux axes de calcul est donc primordiale. Elle a été choisie pour retrouver par calcul une valeur de vitesse de propagation des ondes longitudinales perpendiculairement à la surface d'accès compatible avec la mesure expérimentale.

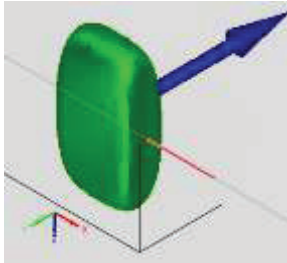


Figure 1 : Surface des lenteurs d'un matériau composite orienté dans le repère de calcul

2.2 Calcul du champ ultrasonore

Il est alors possible de calculer le champ acoustique d'un transducteur et les échos observables en provenance du fond. En changeant les paramètres de calcul, on peut orienter le choix du transducteur (fréquence, bande passante et diamètre) pour optimiser la performance. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel CIVA avec les paramètres suivant :

- Fréquence : 0,25 MHz, 0,5 MHz, 1 MHz,
- Diamètre transducteur : 13 mm, 25 mm,
- Bande passante transducteur (BW) : 50%, 100%.

Les figures 2 à 4 présentent des exemples de résultats pour trois jeux de paramètres différents.

Le calcul permet d'obtenir le diamètre du faisceau à une profondeur donnée comme le montre la figure 5.

L'analyse des différents résultats des calculs (présentés ici de manière partielle) permet alors de définir le transducteur optimal (ici la recherche de délaminage dans toute l'épaisseur) qui correspond à une fréquence de 0,5 MHz, 13 mm de diamètre et présentant une bande passante de 100%.

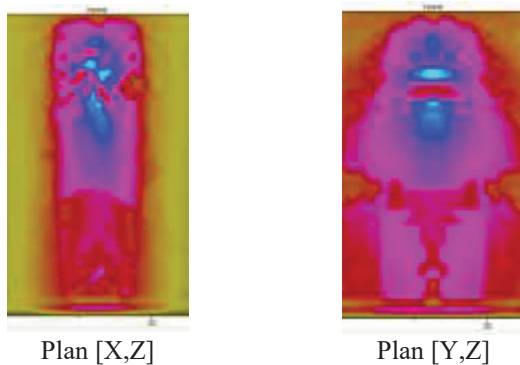


Figure 2 : calcul du champ ultrasonore pour un transducteur 0,5 MHz, Ø13 mm, BW 100%

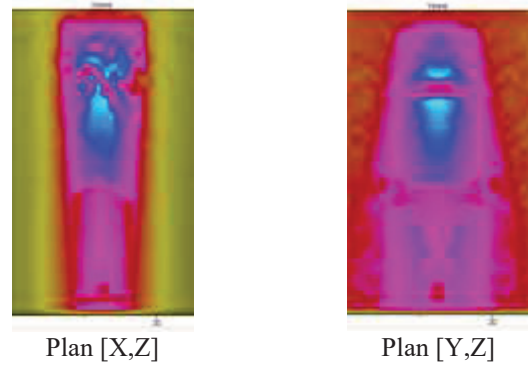


Figure 3 : calcul du champ ultrasonore pour un transducteur 1 MHz, Ø13 mm, BW 100%

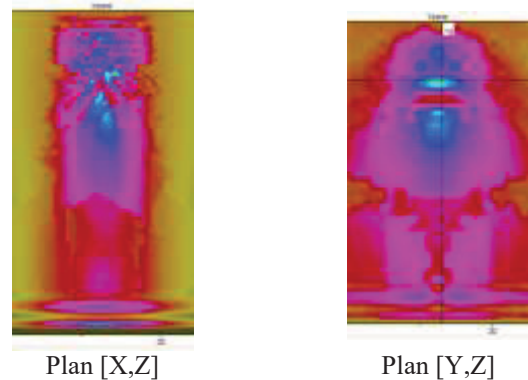


Figure 4 : calcul du champ ultrasonore pour un transducteur 0,5 MHz, Ø13 mm, BW 50%

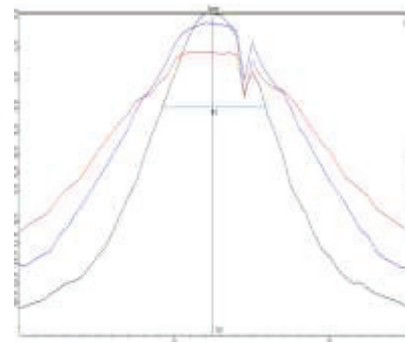


Figure 5 : largeur du faisceau à -6 dB pour un parcours de 39 mm pour un transducteur Ø13 mm
noir : 1 MHz, bleu : 0,5 MHz, rouge : 0,25 MHz

2.3 Réponse d'un défaut

Une fois le transducteur défini, il est possible de calculer, toujours à l'aide de CIVA la réponse ultrasonore d'un défaut. Dans le cas des composites, le défaut recherché par un contrôle ultrasonore à 0° est le délaminage. Les calculs ont été réalisés pour des délaminages de 5 mm, 10 mm et 20 mm de diamètre à une profondeur de 20 mm dans un composite épais. Le transducteur utilisé est celui défini par le calcul précédent. Le résultat du calcul est présenté en figure 6. L'image du défaut apparaît clairement sur l'imagerie de type B-Scan qui se traduit par une diminution de l'amplitude de l'écho de fond. Dans le cas du délaminage de 5 mm, l'atténuation de l'écho de fond est difficilement perceptible. Elle est quasi-totale pour le délaminage de 20 mm (non présenté ici).

Une différence est toutefois à noter par rapport à un contrôle réel. Dans le calcul, on suppose le matériau homogène alors que généralement les différents plis d'un matériau composite génèrent chacun un écho. La détection n'est alors assurée que lorsqu'une atténuation de l'écho est observable. Ceci conduit à dire qu'un défaut de 5 mm n'est pas détectable.

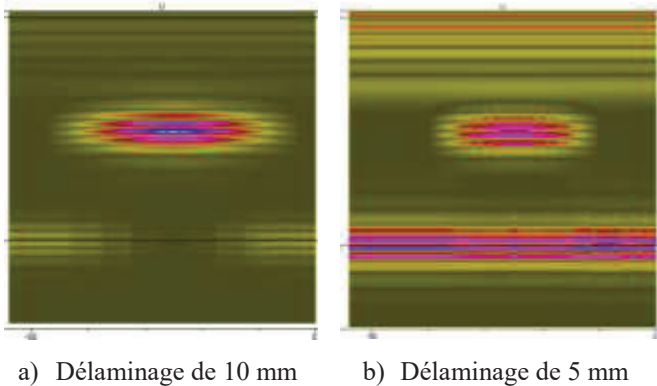


Figure 6 : B-Scan calculé pour un délaminage à une profondeur de 20 mm

3 Approche expérimentale - Cas des soudures en acier austénitique à structure grossière

Dans le cas des soudures en acier austénitiques, la présence de structures de solidifications basaltiques rend la zone fondue inhomogène et anisotrope. De même, le matériau de base peut aussi être inhomogène et anisotrope vis-à-vis des ultrasons. Dans ces conditions, la simulation numérique pour préparer un contrôle ultrasonore n'est pas suffisante pour définir les conditions optimales pour un contrôle ultrasonore. Une approche expérimentale est nécessaire. Cette approche expérimentale comprend au minimum les étapes suivantes :

- Vérification de l'homogénéité du métal de base.
- Définition de la fréquence de travail.
- Estimation de la déformation du faisceau ultrasonore au travers du milieu traversé et en particulier de la zone fondue.

3.1 Vérification de l'homogénéité du métal de base

La première étape pour vérifier la contrôlabilité d'une soudure austénitique est de vérifier l'homogénéité du métal de base. En effet, la sensibilité du contrôle ultrasonore étant généralement définie par l'amplitude des signaux recueillis, l'atténuation dans le matériau de base, importante dans le cas des aciers austénitiques, doit être la plus homogène possible, dans tous les cas et ne pas excéder une variation de 6 dB dans les conditions du contrôle (fréquence et parcours ultrasonore) et ce dans toutes les directions de propagations.

Pour faire cette vérification, une méthode relativement simple de mise en œuvre est de réaliser sur un cube de dimension représentative de la soudure à contrôler une cartographie de type C-Scan de l'amplitude de l'écho de fond de chaque face. Un exemple est donné en figure 7.

Dans ce cas, l'homogénéité constatée est préjudiciable à la mise en œuvre d'un seuil de notation standard.

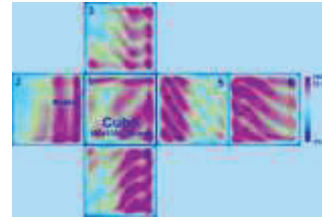


Figure 7 : C-Scan sur l'écho de fond d'un cube en 316L à une fréquence de 2 MHz

3.2 Définition de la fréquence de travail

Dans les matériaux homogènes isotropes, l'atténuation augmente avec la fréquence suivant une puissance de la fréquence de travail (f , f^2 ou f^4 en fonction du rapport entre la taille des grains et la longueur d'onde ultrasonore). Ceci n'est plus vrai pour les matériaux inhomogènes. Il est donc utile de mesurer sur une plage de fréquence suffisamment large l'atténuation en fonction de la fréquence.

Plusieurs méthodes pour obtenir cette courbe sont envisageables. L'Institut de Soudure a développé une procédure basée sur la mesure comparative de la fonction de transfert entre les systèmes suivant :

- Générateur de fonction + transducteur émetteur très large bande + propagation dans l'eau + réflexion sur un disque en nitrure de silicium + propagation dans l'eau + transducteur récepteur très large bande + appareil de mesure.
- Générateur de fonction + transducteur émetteur très large bande + propagation dans l'eau + transmission à travers le matériau à contrôler + propagation dans l'eau + transducteur récepteur très large bande + appareil de mesure.

Dans ces conditions, la seule différence entre les deux systèmes est la propagation dans le matériau. En effet, le disque en nitrure de silicium est poli au micron et de dimension supérieure au faisceau ultrasonore. La réflexion sur celui-ci ne change pas le contenu fréquentiel du faisceau ultrasonore. Le signal en sortie du générateur de fonction est un burst d'une sinusoïde (5 à 10 alternances) dont on fait varier la fréquence sur toute la plage de mesure (1 MHz à 12 MHz) avec un pas de 100 kHz. En sortie, on mesure l'amplitude du signal reçu. Pour isoler la fonction de transfert du matériau à contrôler, donc l'atténuation de celui-ci en fonction de la fréquence, il suffit de faire le rapport des deux mesures avec les deux systèmes.

Nous pouvons remarquer que dans les trois mesures présentées sur la figure 8 (métal de base et à travers la zone fondue d'une soudure à deux positions différentes le long de cette soudure), la variation de l'atténuation n'est pas régulière avec la fréquence. Des minimums d'atténuation sont observés. Dans le métal de base, l'atténuation atteint un minimum à 5 MHz. Pour le contrôle de la soudure, une fréquence de 2,75 MHz ou légèrement supérieure à 4 MHz serait donc préférable à une fréquence de 2 MHz.

3.2 Déformation du faisceau ultrasonore au travers de la zone fondue

Une autre étape pour la préparation du contrôle des soudures anisotrope est la mesure de la déformation du

faisceau au travers de la zone fondue. Cette mesure donnera une indication sur les possibilités d'envisager le contrôle.

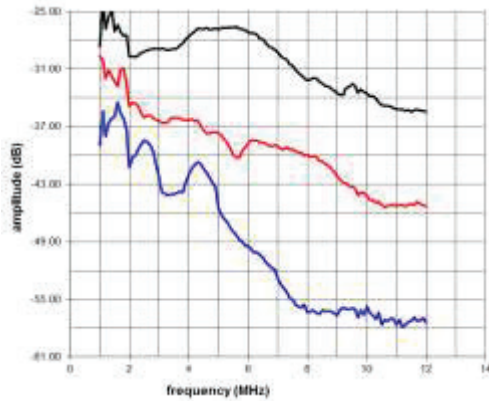


Figure 8 : courbe de transfert en onde L pour une soudure en 316L (noir : métal de base ; rouge : à travers la soudure, position 1 bleu : à travers la soudure, position 2)

Si le faisceau observé est très perturbé au travers de la zone fondue, la possibilité d'assurer le contrôle pourra être remise en cause.

Pour réaliser cette mesure, le dispositif expérimental donné en figure 9 peut être utilisé. Son principal avantage est qu'il n'utilise que des moyens ultrasonores classiques. Son inconvénient majeur est qu'il impose de travailler en immersion. Il est à noter que celle-ci peut être locale. Cette mesure peut aussi se faire au bond si l'accès sur les deux faces n'est pas possible.

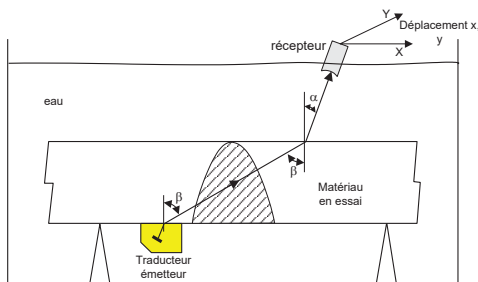


Figure 9 : dispositif expérimental pour la mesure de la déformation du faisceau

Un exemple de résultat est donné en figure 10 pour un traducteur d'ondes L réfractées. Le faisceau d'ondes L est peu perturbé. On pourra alors considérer le contrôle comme étant envisageable avec ce traducteur.

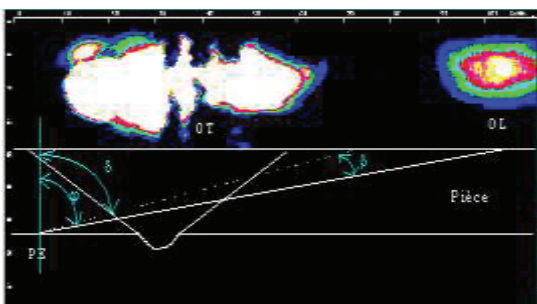


Figure 10 : forme du faisceau ultrasonore après traversée de la zone fondue
PE : point d'émergence ; OT : ondes transversales ; OL :

ondes longitudinales ; δ : angle dans le métal de base ; φ : angle dans la zone fondue ; β : angle de réfraction

4 Approche expérimentale simplifiée- Cas des soudures en acier austénitique à structure relativement fine

Dans le cas d'une soudure en acier austénitique à structure relativement fine, l'approche expérimentale peut être simplifiée. Un développement de la procédure sur un bloc de référence soudé dans les mêmes conditions que les soudures qui seront à contrôler est la méthode la plus employée industriellement. Nous présentons ici un exemple réalisé sur une soudure en 316L de 48 mm d'épaisseur.

4.1 Description de la soudure

Dans le cadre de la collaboration ITER, un tokamak nommé JT-60SA doit être construit au Japon. Parmi les éléments constitutifs de cet équipement, il y a neuf bobines supraconductrices dites toroïdales fournies par GE Power. Ces bobines sont destinées à confiner le plasma. Elles seront mises en œuvre par le CEA, le client final.

Les bobines sont contenues dans des boîtiers réalisés en acier austénitique 316L (TF Coil de la Figure). Les dimensions de ces boîtiers (plus de 7 m de hauteur et 4,6 m de large) imposent de les réaliser en plusieurs tronçons qui sont assemblés par soudage. Chaque bobine est constituée de 3 tronçons et de 2 soudures transverses à contrôler par bobine.

Le plan du chanfrein de la soudure ainsi qu'une photographie après polissage et attaque chimique d'une des faces du bloc de référence ayant servi au développement du contrôle sont présentés sur la figure 12. Les parois ont une épaisseur de 50 mm. La soudure présente de ce fait une structure complexe.

Le contrôle ultrasonore doit respecter les exigences de l'ASME VIII section 7.5.5. Ceci impose la recherche d'une solution de contrôle encodé. Nous ne parlons ici que du contrôle du volume.

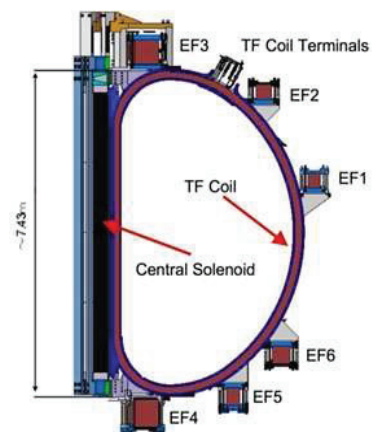


Figure 11 : géométrie des bobines toroïdales du projet JT60 en position d'utilisation

Pour le contrôle du volume des soudures transversales, du fait de la structure de la zone fondue et de l'anisotropie du matériau, une technique ultrasonore classique n'est pas exploitable. Une technique utilisant des moyens innovants

aussi bien du point de vue ultrasonore que mécanique a dû être développée.

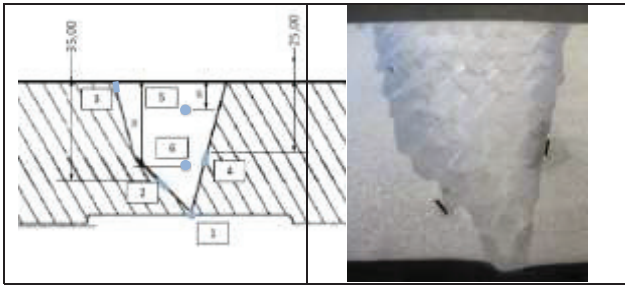


Figure 12 : plan du chanfrein et implantation des défauts de référence et photographie du bloc de référence avec les défauts 2 et 4 (les défauts 1, 3, 5 et 6 sont dans d'autres plans de coupes)

4.2 Le choix du transducteur

Pour le transducteur, le retour d'expérience de l'Institut de Soudure a montré que l'utilisation d'un transducteur multiélément de relativement basse fréquence utilisé en ondes L réfractée et associé à une focalisation était la solution optimale[1]. Des essais préliminaires avaient montré que, malgré une structure relativement fine de la zone fondue, une fréquence ultrasonore de 5 MHz était trop élevée. Notre choix s'est alors orienté vers une fréquence de 2,25 MHz. Pour permettre une certaine focalisation, nous avons retenu un transducteur de 32 éléments avec une surface active totale de 54,4x20 mm² et une limite champ proche/champ lointain de 670 mm.

Ce transducteur est monté sur un sabot optimisé pour générer des ondes longitudinales à 55° dans de l'acier faiblement allié.

4.3 Le choix de la configuration

Du fait de la nature du matériau et du métal fondu dans la zone de liaison, il a été nécessaire :

- de focaliser le faisceau ultrasonore pour diminuer l'influence du bruit de structure.
- d'avoir une énergie en émission suffisante pour contrebalancer la forte atténuation dans la soudure.

De plus, un balayage sectoriel est nécessaire pour avoir le bon angle d'attaque du faisceau par rapport aux défauts et à la structure de la soudure (c'est-à-dire à la fois le ou les angles de chanfrein et la structure métallurgique de la zone fondue).

Pour répondre à l'ensemble de ces points, une focalisation en angle et en profondeur est donc programmée sur un système multiéléments parallèle.

L'ensemble de ces paramètres (transducteur + configuration) permet la détection de l'ensemble des défauts implantés dans le bloc de référence. Toutefois deux problèmes subsistent pour rendre l'application de ces paramètres utilisables en condition de chantier :

- Le rapport signal sur bruit reste insuffisant.
- La détection des défauts nécessite pour chaque défaut un positionnement différent par rapport à l'axe de la soudure ; ce qui est incompatible avec les systèmes mécaniques utilisés sur site.

Pour répondre à ces contraintes, un bras articulé à 3 degrés de liberté a été utilisé. Ce type de bras permet de reproduire les déplacements d'un contrôle manuel avec, en plus, du fait du logiciel d'acquisition utilisé, la possibilité d'accumuler les informations provenant de plusieurs points d'acquisition et correspondant à un seul point donné dans le volume de la pièce. Ceci permet d'augmenter notablement le rapport signal sur bruit observé sur la cartographie obtenue (C-Scan concaténé).

Pour le contrôle du volume et de la pénétration, les rafales suivantes ont été définies :

- Contrôle en ondes longitudinales (rafale 1):
 - Une première fenêtre d'acquisition permettant l'enregistrement des échos ultrasonores provenant du volume.
 - Une deuxième fenêtre d'acquisition permettant l'enregistrement des échos ultrasonores provenant du fond.
- Contrôle du fond à l'aide d'une onde rampante au fond (rafale 2). Celle-ci est générée par conversion de mode à partir d'un balayage sectoriel en onde transversale entre 30° et 35° et cela sans focalisation.

Le résultat sur le bloc de référence pour le contrôle du volume est donné en figure 13.

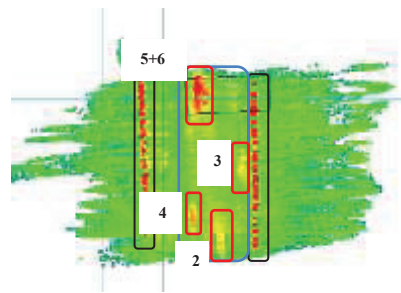


Figure 13 : C-Scan concaténé obtenu sur le bloc de référence (en rouge les défauts avec leur n° dans le bloc, en bleu la zone soudée, en noir l'usinage en fond de bloc)

Les essais réalisés sur ce bloc ont confirmé que la détection des défauts n'était possible que par l'accumulation des informations sur l'image car le rapport signal sur bruit observé sur les signaux A-Scans est toujours inférieur à 6 dB pour les défauts plans du bloc.

4.4 Résultats obtenus lors du contrôle d'une soudure

La figure 14 donne le résultat du contrôle sur la soudure S45 de la bobine C10. Sur cette soudure, une indication est détectée sur pratiquement toute la longueur de la soudure. Le S-Scan permet de situer cette indication à 35 mm de profondeur en bord de chanfrein. Pour cette indication, le rapport signal sur bruit observé est supérieur à 10 dB.

Les critères applicables pour ces soudures ne permettent pas d'accepter cette indication qui présente à la fois une longueur et une hauteur trop importante. Une réparation était donc obligatoire. Ce défaut a été confirmé visuellement lors de l'affouillement réalisé en vue de la réparation.

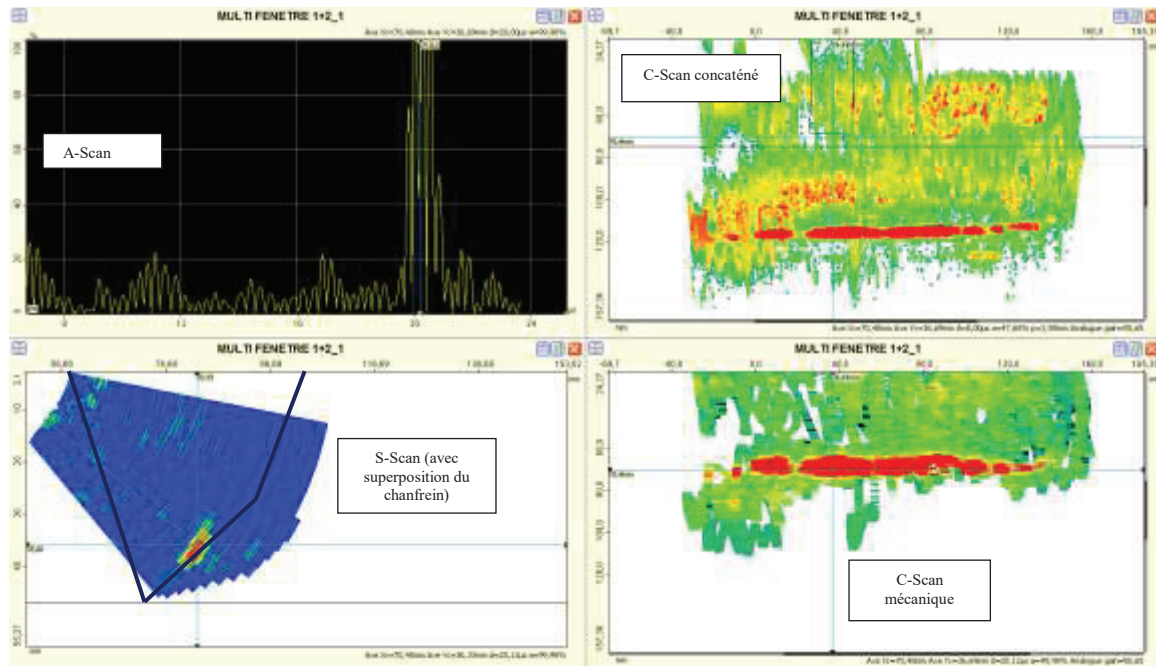


Figure 14 : acquisition sur la soudure S45 de la bobine C10
présence d'une indication en bord de chanfrein

5 Conclusion

Trois démarches peuvent donc être mises en place pour le contrôle ultrasonore des structures anisotropes. Le choix de ces démarches est essentiellement conditionné par la nature des matériaux en présence et leur degré d'anisotropie.

Dans le cas des composites, une certaine homogénéité est présente ce qui permet de mettre en « équation » l'anisotropie du matériau. Ceci n'est pas le cas sur des soudures en acier inoxydable où il n'est pas possible d'avoir une connaissance a priori de l'anisotropie. Une approche expérimentale est alors nécessaire.

La complexité de l'approche expérimentale dépendra du degré d'anisotropie de la soudure. Un développement simplifié est cependant possible quand la structure de la zone fondue n'est pas trop grossière.

Les approches présentées ici ne sont toutefois pas les seules possibles. Dans tous les cas, l'approche devra être adaptée au problème rencontré, tout particulièrement dans le cas de l'approche expérimentale. En effet dans ce cas un choix doit être effectué entre une démarche complexe (caractériser acoustiquement la zone fondue) ou simplifiée (utilisation d'un bloc de référence représentatif).

Dans l'hypothèse d'un contrôle multi-matériaux anisotrope, on pourra toutefois s'appuyer sur les approches proposées pour effectuer une étude de contrôlabilité.

Remerciement

Les auteurs remercient GE Power pour l'autorisation de publication de cet article.

Références

- [1] D. Flotté, D. Chauveau, New approach to optimise the ultrasonic testing of austenitic welds, World Conference on Nondestructive Testing, Roma (Italy) 15-21 October 2000