

TRAITEMENT NUMERIQUE DES CONTROLES ULTRASONORES DE COMPOSANTS PRESENTANT UN BRUIT DE STRUCTURE FORT ET HETEROGENE

DIGITAL PROCESSING FOR ULTRASONIC CONTROLS OF COMPONENTS GENERATING A STRONG AND HETEROGENEOUS STRUCTURAL NOISE

Nicolas PAUL¹ – Michel FOATA² – Paul KASSIS¹

¹EDF R&D PRISME, 6 quai Watier, 78401 Chatou

²EDF CEIDRE SEND, 2 rue Ampère, 93206 Saint-Denis
prenom.nom@edf.fr

RESUME

On s'intéresse aux examens non destructifs par technique Ultrasonore de pièces complexes générant un bruit de structure (BdS) fort et hétérogène sur la zone examinée. Un premier cas d'application de contrôle ultrasonore TOFD (Time Of Flight Diffraction) des pénétrations de fond de cuve (PFC) des réacteurs nucléaires à eau pressurisée est présenté.

Lors d'un contrôle ultrasonore, les phénomènes de diffusion multiple des ondes acoustiques aux joints de grains rendent plus difficile la discrimination entre le BdS et un éventuel défaut recherché. Cette difficulté est sensiblement renforcée lorsque ce BdS apparaît hétérogène sur la zone d'examen, du fait de conditions de placage évolutives ou d'une répartition hétérogène des tailles de grain.

Des méthodes de traitement numérique du signal ont été conçues, brevetées [1] [2] puis intégrées dans un logiciel EDF « CORUS » par EDF R&D en collaboration avec EDF CEIDRE afin de faciliter l'analyse de telles acquisitions. L'hétérogénéité du BdS est gérée via un coefficient de normalisation local qui permet d'homogénéiser intégralement les acquisitions. Des filtres spatiaux sont ensuite utilisés pour réduire la variabilité des valeurs prises par le bruit de structure sur un C-scan et ainsi améliorer la détectabilité des défauts.

CORUS a été testé avec succès sur des acquisitions issues de maquettes et sur de nombreuses PFC à bruit de structure fort. Le gain en rapport signal sur bruit (RSB) varie de 6 à 14 dB selon la profondeur des défauts.

Les algorithmes utilisés ne se limitent cependant pas à aux contrôles TOFD des PFC, ils peuvent s'appliquer à tous types de matériaux hétérogènes contrôlés, et l'approche pourrait être adaptée pour d'autres techniques ultrason.

ABSTRACT

This work focuses on non-destructive examinations using ultrasonic waves on complex materials generating an important and heterogeneous structural noise on the examined area. A first application of TOFD (Time Of Flight Diffraction) on Pressurised Water Reactor's vessel



penetration tubes is described here.

During an ultrasonic examination, multiple diffusion of the ultrasonic waves on the grain boundaries makes the discrimination between structural noise and a potential defect intricate. The difficulty of the diagnostic can moreover be increased when the structural noise appears to be inhomogeneous on the examined area, which can be caused by evolutive coupling conditions or by a heterogeneous repartition of the size of the grains.

In order to ease the analysis of these acquisitions, EDF R&D in collaboration with EDF CEIDRE has designed and patented numerical processing methods embedded in the EDF software « CORUS ». The heterogeneity of the structural noise is handled via a local normalisation coefficient which allows to fully homogenize the acquisitions. Spatial filters are then applied to reduce the variability of the values taken by the structural noise on a C-scan, thus increasing the defects' detectability.

CORUS has been successfully tested on several acquisitions from replicas and from many real vessel penetration tubes presenting an important structural noise. The gain in terms of signal-to-noise ratio varies from 6 to 14 dB in function of the defects' depth.

The algorithms which are used here are not only relevant for TOFD examinations of vessel penetration tubes, they can also be applied to the examination of every kind of heterogeneous materials. This work could also be adapted to other ultrasonic waves control methods.

INTRODUCTION

Lors du contrôle ultrasonore d'un matériau, en fonction de la fréquence utilisée et des dimensions caractéristiques de sa microstructure, des phénomènes de diffusion multiple des ondes acoustiques aux joints de grains peuvent devenir significatifs. Ces échos multiples génèrent dans l'enregistrement un signal ultrasonore appelé « bruit de structure » (BdS) qui peut compliquer sensiblement l'analyse des acquisitions. Ce bruit de structure possède la même signature temporelle (et donc la même signature spectrale) que le signal généré par les défauts plans généralement recherchés en ultrasons. Il est donc difficile de distinguer un écho résultant d'un défaut des échos correspondants au bruit de structure. Les méthodes « classiques » de traitement du signal (fenêtrage, filtrage, ondelette) ne sont ainsi pas pertinentes pour éliminer ce type de bruit. La figure ci-après montre un exemple d'ascan mesuré par un procédé TOFD sur une maquette représentative d'une Pénétration de Fond de Cuve REP 900MWe en Inconel 600 (PFC, voir annexe A) générant un bruit de structure fort.

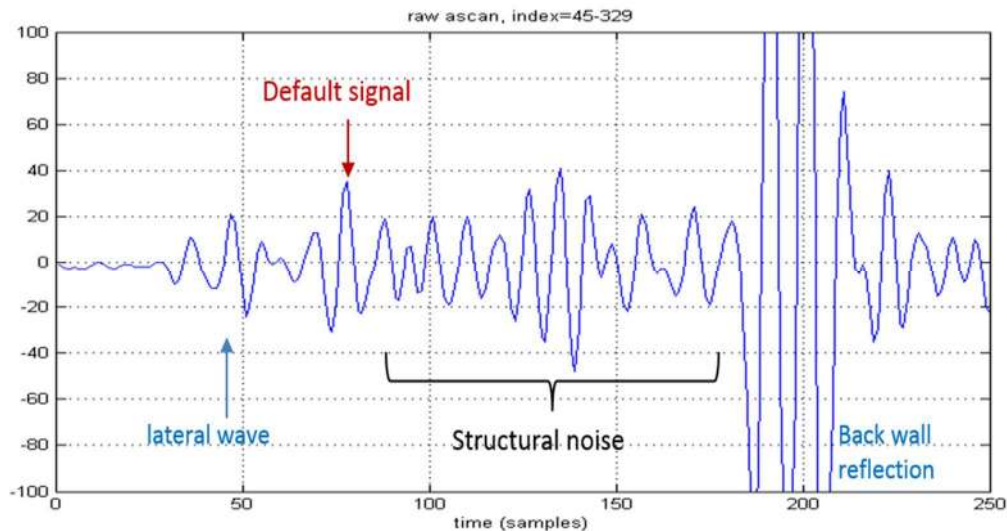


Figure 1 :A-scan obtenu au voisinage d'une entaille externe dans une maquette de pénétration de fond de cuve REP représentative d'un bruit de structure fort ; l'écho du défaut possède une amplitude inférieure à l'amplitude du bruit de structure

L'approche proposée ici consiste à renforcer le contraste des signaux représentatifs des défauts recherchés, grâce à des traitements permettant dans un premier temps d'éliminer du signal des variations sans pertinence pour la recherche des défauts, mais fortement sensibles à certaines caractéristiques de la pièce examinée (déformation, hétérogénéité microstructurale) ou à certaines caractéristiques de la méthode de contrôle (forme du champ acoustique). Des filtres spatiaux sont ensuite utilisés pour réduire la variabilité des valeurs prises par le bruit de structure sur un C-scan et ainsi améliorer encore la détectabilité des défauts.

ANALYSE DU BRUIT DE STRUCTURE

Hétérogénéités spatiales

Le bruit de structure (BdS) apparaît couramment hétérogène sur la zone d'examen, du fait de conditions de placage évolutives ou d'une répartition hétérogène des tailles de grain. La Figure 2 ci-dessous illustre les variations du niveau de signal reçu sur différentes zones de la PFC. Sur les zones à bruit de structure élevé et à placage parfait (rectangle noir) le niveau de bruit moyen observé est 8 dB supérieur au niveau observé sur les zones subissant une dégradation de placage (ellipses orange).

Ces zones à faible signal moyen mesuré ne doivent pas être considérées comme des zones à faible bruit de structure. La structure granulaire est similaire au reste de la PFC, mais la dégradation du placage de la sonde a entraîné la chute du niveau d'insonification.

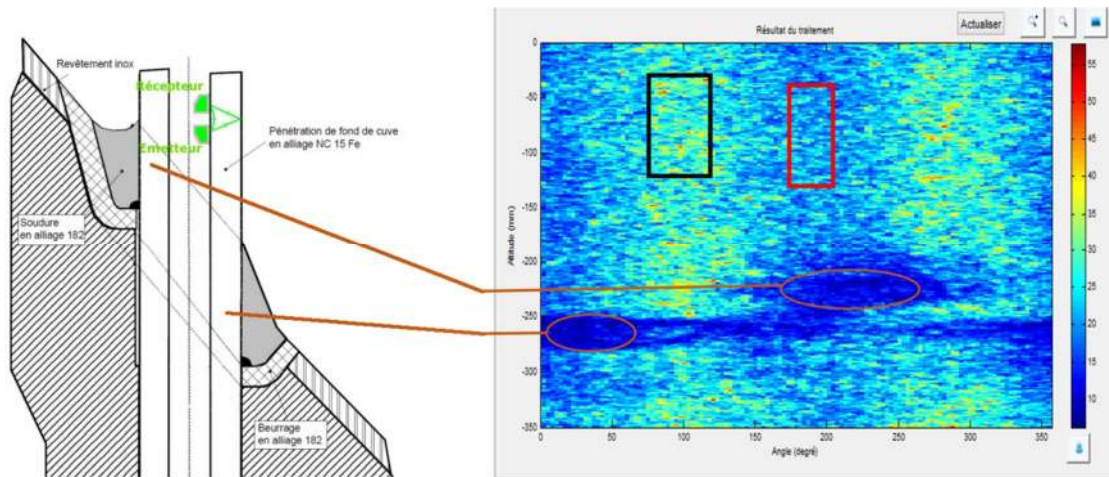


Figure 2 : C-scan d'un contrôle TOFD sur une PFC ; les zones repérées par les ellipses orange correspondent à une baisse d'insonification due à une dégradation du placage de la sonde (déformation de la paroi interne due à la soudure en paroi externe) ; des variations effectives du niveau de bruit de structure sont observées en dehors de la zone soudée : dans le rectangle noir, le niveau de bruit est deux fois supérieur au niveau de bruit dans le rectangle rouge. Ces variations sont vraisemblablement dues à un zonage de la microstructure liée au laminage de la barre dont est issue la pénétration.

Hétérogénéité temporelle

La Figure 3 montre un exemple de D-scan observé sur une PFC contrôlée par une sonde TOFD. On s'aperçoit que le niveau moyen du bruit de structure dépend du temps de vol considéré. Cette observation est confirmée par l'évolution temporelle de l'écart-type du BdS, également représentée Figure 3. Sur les premiers instants l'écart-type du BdS est une fonction croissante du temps. Cette dépendance est liée à la fois à la profondeur de pseudo-focalisation de la sonde mais également au fait qu'il existe plus de multi-trajets correspondants à un temps total de propagation élevé que de multi-trajets correspondant à un temps de propagation faible. Dans un second temps l'écart-type diminue du fait de l'atténuation des ondes propagées.

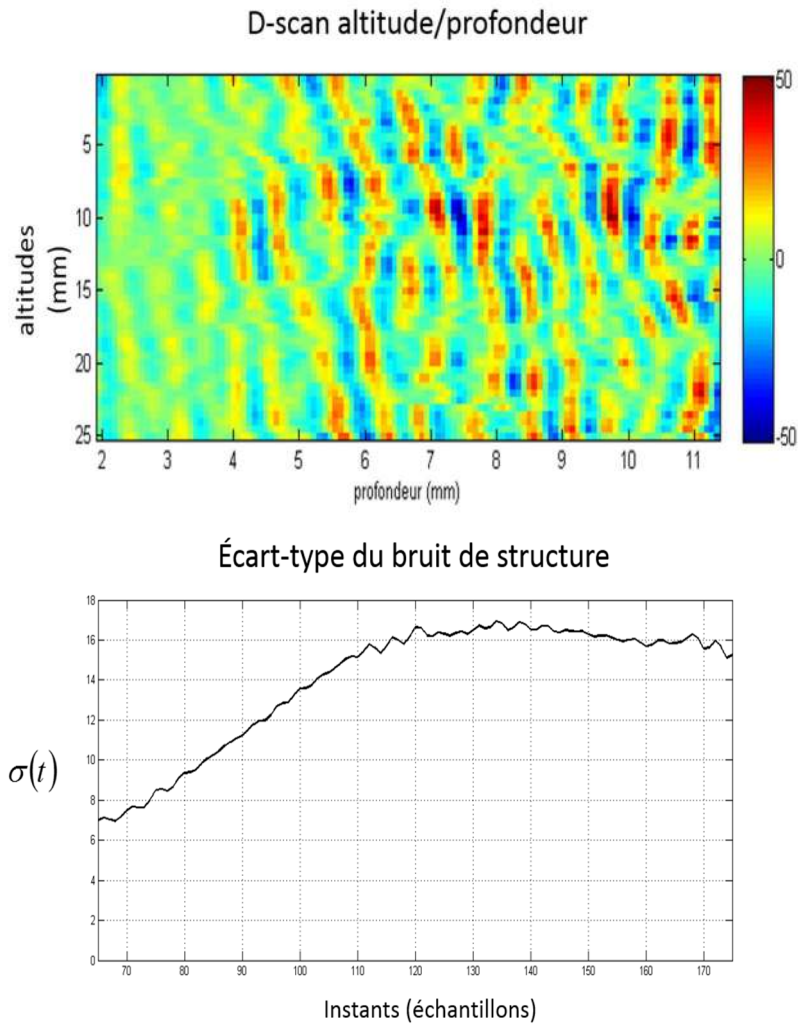


Figure 3 : extrait de D-scan sur PFC bruitée et évolution temporelle de l'écart-type du bruit de structure (calculé sur l'ensemble de la zone examinée de la PFC)

TRAITEMENTS DES SIGNAUX

On notera $ascan(x, t)$ l'amplitude du signal A-scan reçu à un instant t pour une position x de la sonde. Pour notre application de contrôle d'un composant cylindrique par sa paroi interne (PFC, annexe A), x est le vecteur des deux coordonnées (*altitude*, *angle*) de la sonde TOFD.

Suite à l'analyse statistique du bruit de structure présentée au paragraphe précédent nous choisissons de modéliser $ascan(x, t)$ en explicitant des termes représentatifs des variations liées aux hétérogénéités temporelles et spatiales évoquées. On introduit ainsi trois coefficients :

- $\sigma(t)$ représentatif de l'hétérogénéité temporelle,
- $p(x)$ représentatif des variations de la qualité du placage, donc de l'insonification
- $g(x)$ représentatif des variations de la taille des grains.

L'écart-type du BdS pour une position et un instant donné est noté $\gamma(x, t)$:

$$\gamma(x, t) = \sigma(t).p(x).g(x)$$

et $ascan(x, t)$ modélisé par :

$$ascan(x, t) = \sigma(t).p(x).g(x).ascan_{homogène}(x, t)$$

$$ascan(x, t) = \gamma(x, t).ascan_{homogène}(x, t)$$

où $ascan_{homogène}(x, t)$ correspond à l'A-scan qui serait reçu conditions idéales :

- niveau du bruit de structure indépendant de l'instant d'arrivée
- qualité du placage constant
- taille des grains / structure du matériau constante

En l'absence de défaut, les amplitudes de signal peuvent être considérées comme des variables aléatoires ayant pour écart-type $\gamma(x, t)$. En présence d'un défaut, les amplitudes du signal vont s'éloigner sensiblement de cet écart-type. Ainsi nous proposons d'effectuer la détection des défauts non pas sur les signaux brutes $ascan(x, t)$ mais sur les signaux homogénéisés $ascan_{homogène}(x, t) = ascan(x, t) / \gamma(x, t)$.

Les traitements proposés consistent à estimer ces trois coefficients $\sigma(t).p(x)$ et $g(x)$ pour calculer $ascan_{homogène}(x, t)$ à partir de $ascan(x, t)$ [1] [2].

Homogénéisation Spatiale

Deux sources d'hétérogénéités spatiales doivent être corrigées : les variations du placage de la sonde $p(x)$ et les variations des tailles de grains $g(x)$.

Pour corriger les variations de placage, nous proposons d'utiliser les puissances mesurées sur l'onde latérale. L'onde latérale est une onde exploitée en TOFD qui arrive en premier sur le capteur récepteur en suivant le trajet le plus rapide, le long de la surface d'entrée.

La Figure 4 montre la forte corrélation entre les chutes d'insonification observées sur la zone de diffraction et les chutes de puissances observées sur l'onde latérale. $p(x)$ peut être ainsi calculé selon :

$$p(x) = \sqrt{\frac{1}{N_{OL}} \sum_{t \in \text{onde latérale}} ascan(x, t)^2}$$

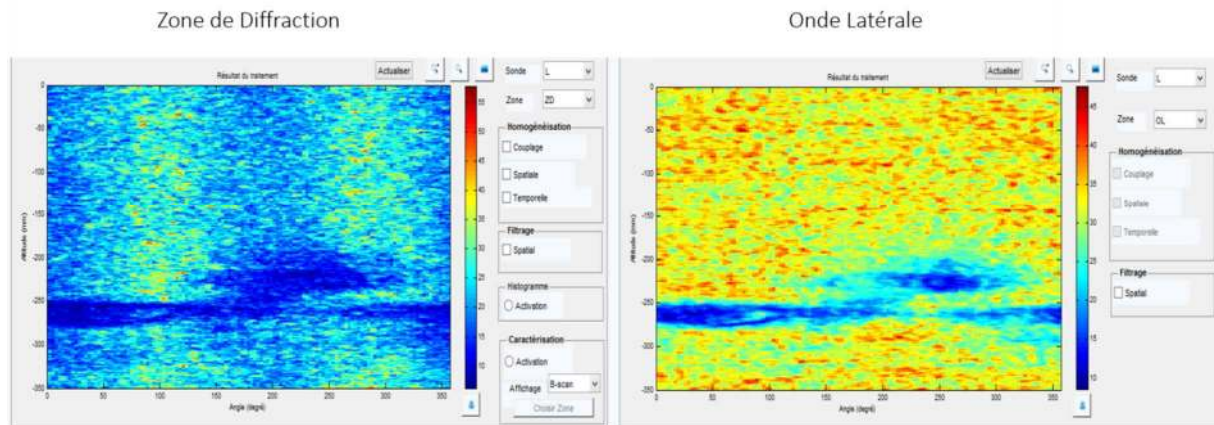


Figure 4 : contrôle TOFD d'une PFC bruitée ; C-scan de la zone de diffraction et C-scan des puissances reçues sur l'onde latérale

La Figure 5 montre l'effet de la normalisation par $p(x)$. Ce traitement permet de rehausser les zones subissant des dégradations de placage.

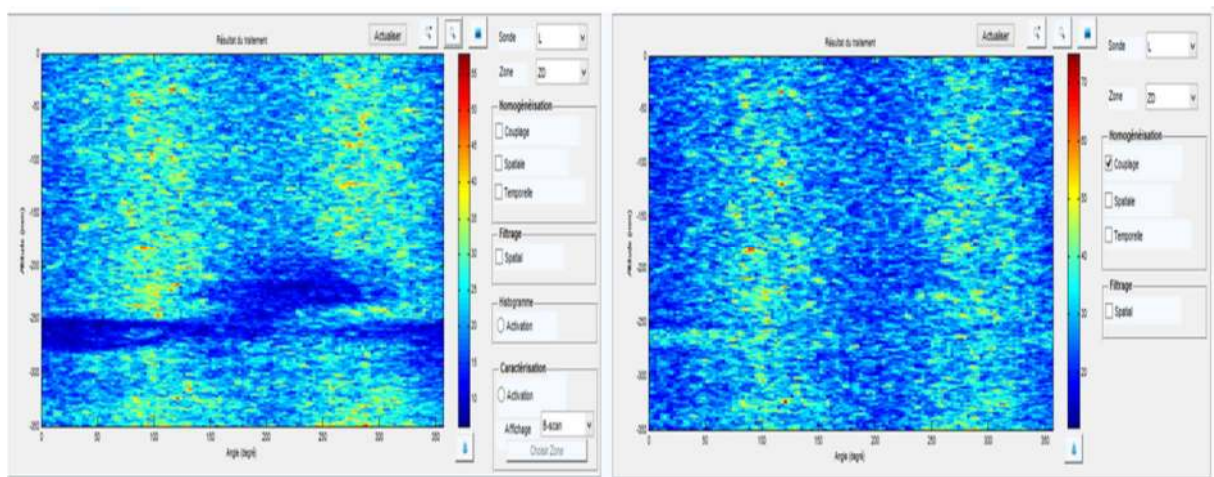


Figure 5 : contrôle TOFD d'une PFC bruitée, C-cscan sur la zone de diffraction avant traitement (gauche) et après homogénéisation du placage (droite)

Du fait de son court trajet en surface de la pièce, l'onde latérale est peu influencée par la microstructure dans le volume de la pièce inspectée. Ainsi, l'hétérogénéité spatiale qui correspond à la variation de la microstructure du matériau (tailles moyennes des grains) subsiste après la normalisation par $p(x)$. Elle entraîne une variation lente du niveau moyen de bruit de structure. Ainsi un filtrage spatial du C-scan, typiquement un filtre linéaire passe-bas, permet d'estimer ces variations lentes (Figure 6) :

$$g(x) = \text{filtre spatial} \left\{ \frac{ascan(x, t)}{p(x)} \right\}$$

Du fait du caractère local des défauts recherchés, les indications très locales qu'ils génèrent dans l'enregistrement ne sont pas prises en compte par $g(x)$, et donc préservée par le traitement d'homogénéisation.

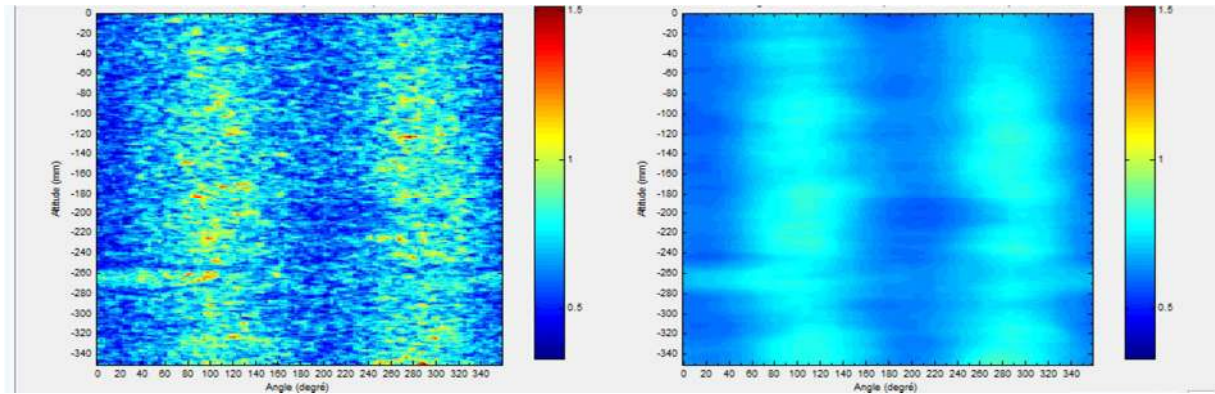


Figure 6 : contrôle TOFD d'une PFC bruitée : C-scan après homogénéisation du placage (gauche) et son filtrage linéaire basse-pas (droite) pour obtenir une estimation des variations de niveau moyen du bruit de structure ($g(x)$)

La Figure 7 illustre l'effet conjoint des deux homogénéisations spatiales. Ce traitement, qui permet de compenser numériquement les variations d'insonification et de structure du matériau, permet d'obtenir une distribution quasi-stationnaire du bruit de structure observé : la moyenne et l'écart-type du BdS ne dépendent plus de la position de la sonde. Cette homogénéisation est particulièrement appréciable pour la détection de défaut dans les zones faiblement insonifiées, ou à leur limite pour lesquelles une amplification moyenne du signal de 6 dB est obtenue (observé lors des tests sur de nombreuses PFC fortement bruitées).

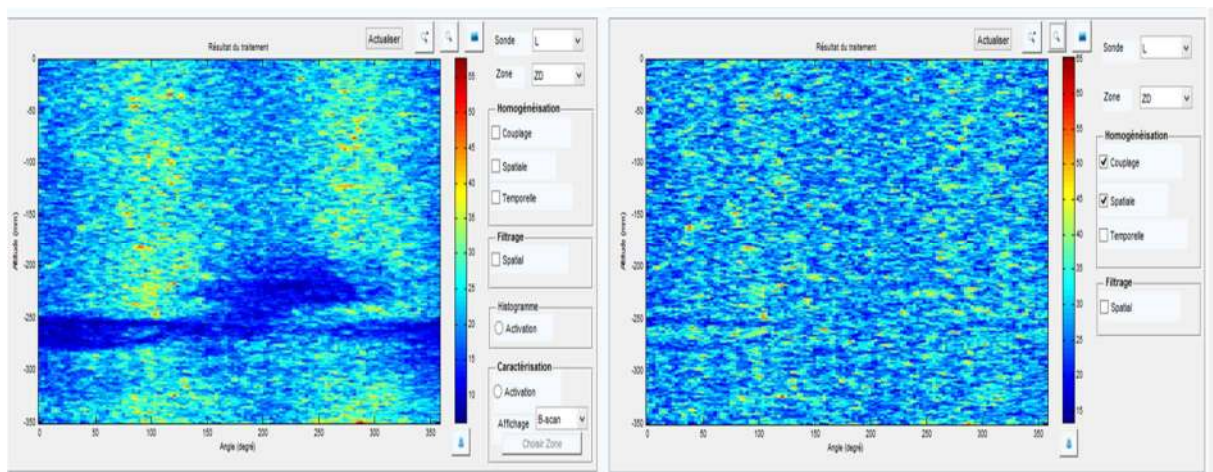


Figure 7 : contrôle TOFD d'une PFC bruitée : C-scan avant traitement (gauche) et après homogénéisation spatiale (droite)

Homogénéisation Temporelle

Pour un temps de vol donné t , l'écart-type du bruit de structure peut être calculé par la formule suivante :

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N_x} \sum_x ascan(x, t)^2}$$

où N_x désigne le nombre total de position de mesures. Un exemple d'allure de $\sigma(t)$ est donné Figure 3. La Figure 8 montre les résultats de l'homogénéisation temporelle sur des acquisitions

effectuées sur une maquette représentative d'une PFC à bruit de structure fort, au voisinage d'une entaille circonférentielle externe profonde. Avant traitement, l'entaille n'est pas distinguable du bruit de structure. Après traitement elle apparaît clairement à la fois sur le C-scan et sur le D-scan. Le traitement permet en effet de faire ressortir à tout temps de vol les amplitudes en écart par rapport au niveau moyen de BdS attendu au temps de vol considéré. Dans l'exemple ci-dessous, le BdS attendu au temps de vol de l'indication est très faible. Ainsi, le signal de l'entaille, à la différence des échos légèrement plus profond d'amplitude similaire ne doit pas être assimilé à du BdS.

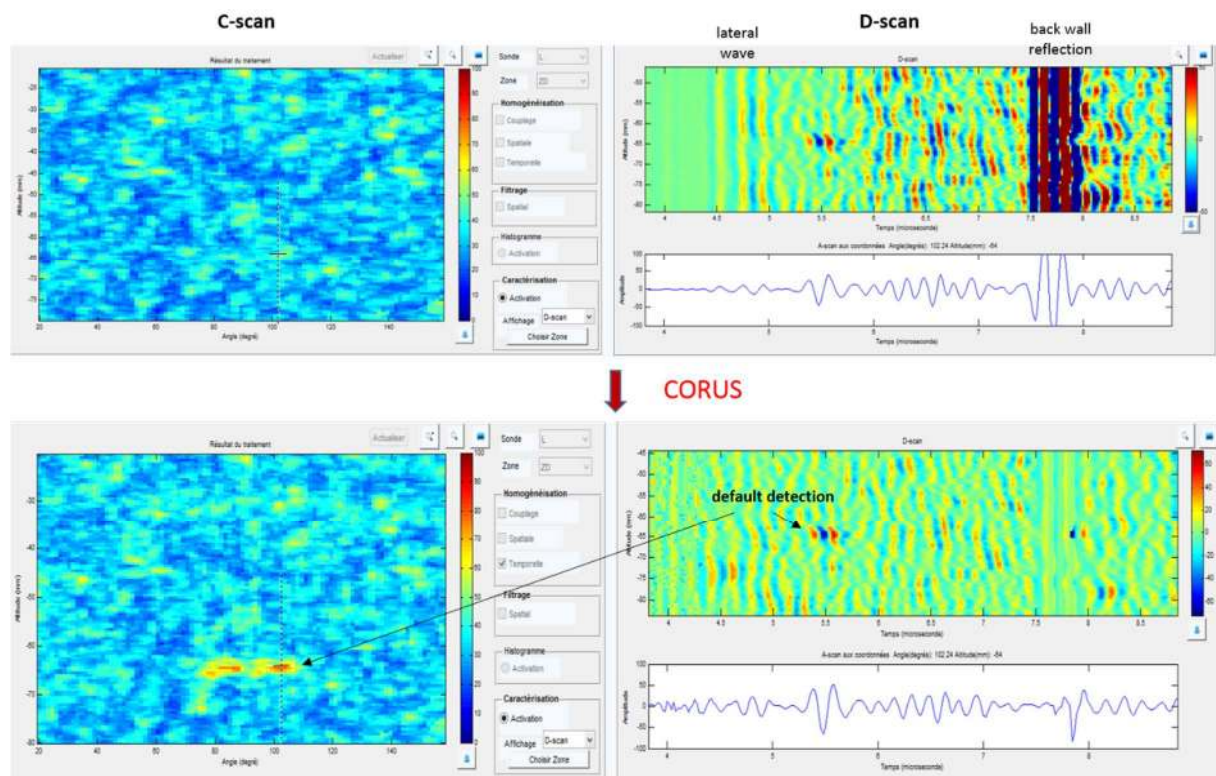


Figure 8 : contrôle TOFD d'une maquette de PFC à bruit de structure fort, au voisinage d'une entaille circonférentielle externe profonde -. En haut : C-scan et D-scan non traités ; En bas : C-scan et D-scan après homogénéisation temporelle des A-scans.

Après les procédures d'homogénéisation, des méthodes classiques de filtrage d'image peuvent être utilisées sur les C-scan pour rehausser les contrastes entre les défauts et le bruit de structure résiduels. La Figure 9 ci-dessous montre les C-scan obtenus après les différents traitements, au voisinage de deux entailles longitudinales externes sur une maquette représentative d'une PFC à fort bruit de structure. L'entaille peu profonde (à droite des C-scan) est clairement visible avec ou sans traitement. Un gain de 6 dB est obtenu sur l'entaille externe profonde (située à gauche des C-scan).

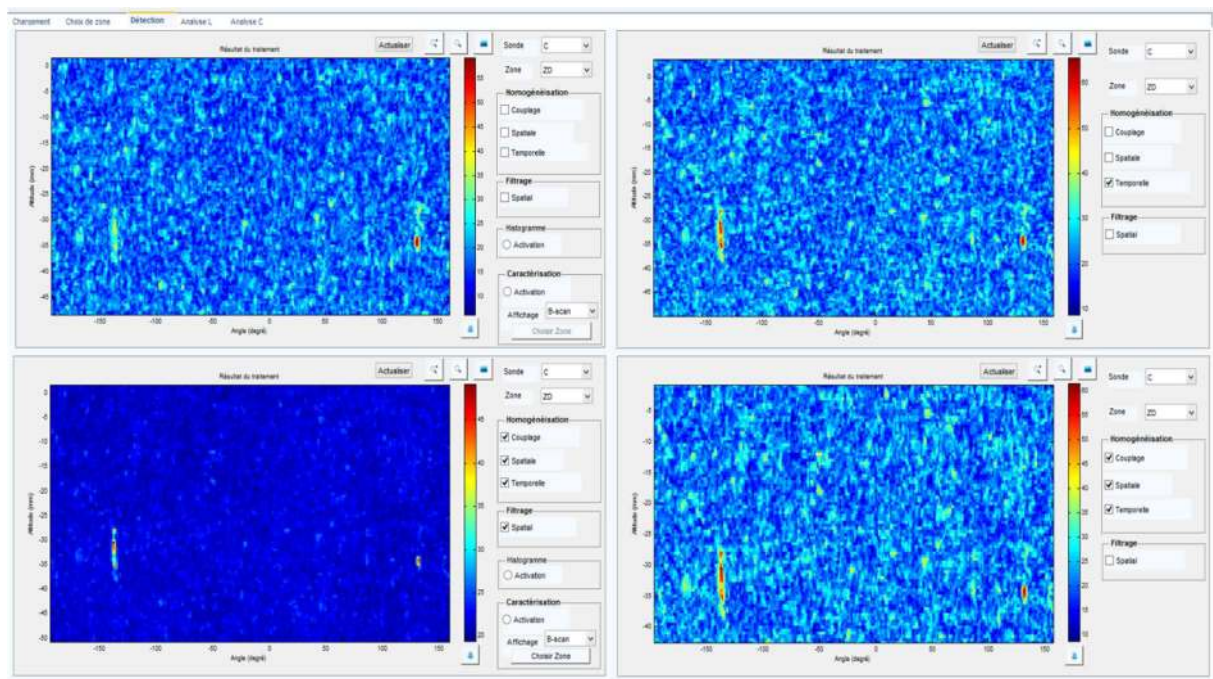


Figure 9 : contrôle TOFD d'une maquette de PFC à fort bruit de structure au voisinage de deux entailles longitudinales externes : C-scan brute (haut, gauche), après homogénéisation temporelle des A-scans (haut, droite), puis homogénéisation spatiale (bas, droite) puis filtrage spatial (bas, gauche)

CONCLUSION

On s'intéresse à l'analyse et au traitement numérique des contrôles ultrasonores de pièces complexes présentant un bruit de structure (BdS) fort et hétérogène sur la zone examinée.

Des méthodes de traitement numérique du signal ont été conçues, brevetées [1] [2] puis intégrées dans un logiciel EDF « CORUS » par EDF R&D en collaboration avec EDF CEIDRE afin de faciliter l'analyse de telles acquisitions. Les traitements consistent principalement à calculer un coefficient de normalisation local qui permet d'homogénéiser spatialement et temporellement les acquisitions. Des filtres spatiaux sont ensuite utilisés pour réduire la variabilité des valeurs prises par le bruit de structure sur un C-scan. Ces deux étapes permettent ainsi améliorer la détectabilité des défauts.

Un premier cas d'application de contrôle ultrasonore TOFD (Time Of Flight Diffraction) des pénétrations de fond de cuve (PFC) des réacteurs nucléaires à eau pressurisée a été présenté. Sur cette application l'homogénéisation spatio-temporelle des acquisitions permet un gain en rapport signal sur bruit compris entre 6 et 14 dB selon la profondeur des défauts recherchés.

Les algorithmes utilisés ne se limitent cependant pas à aux contrôles TOFD des PFC, ils peuvent s'appliquer à tous types de matériaux hétérogènes contrôlés, et l'approche pourrait être adaptée pour d'autres techniques ultrasonores.

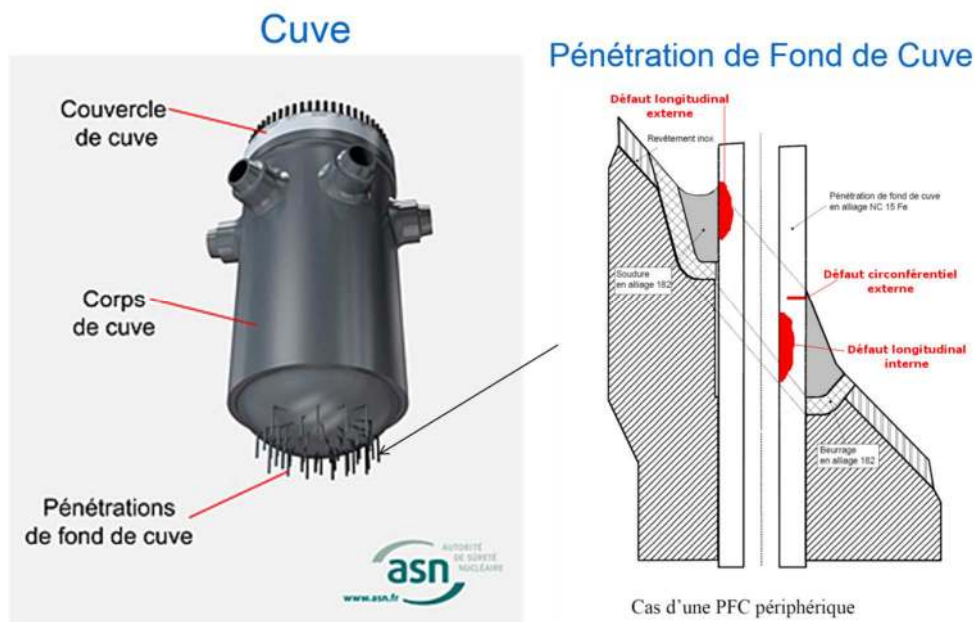
REFERENCES

[1] Nicolas PAUL, Paul KASSIS « Mesure d'hétérogénéité de surface », EDF Patent FR1654708, 25/05/2016

[2] Nicolas PAUL, Pierre-Louis FILIOT « Procédé de détection et de Caractérisation par ultrasons de défauts dans un matériau hétérogène », EDF Patent FR1461602, 27/11/2014

ANNEXE A : PENETRATIONS DE FOND DE CUVE

Les pénétrations de fond de cuve (PFC) des réacteurs nucléaires à eau pressurisée sont des composants cylindriques soudées au fond de la cuve et permettant la mesure de flux de neutroniques pendant le fonctionnement du réacteur. Ces composants font l'objet d'un contrôle régulier pendant les arrêts de tranche.



Des contrôles ultrasonores TOFD sont systématiquement réalisés lors des visites décennales d'un réacteur. Les acquisitions sont, effectuées sur la paroi interne de la PFC. L'interprétation des enregistrements peut être compliqué par la présence de « bruit de structure », lié à la structure granulaire de la PFC.

La présence d'une soudure (sur la paroi externe) complique également la tâche de l'analyste :

- la soudure (sur la paroi externe) crée des déformations géométriques (sur la paroi interne) qui entraîne des chutes de placage et donc d'insonification de la PFC.
- La soudure supprime l'écho de fond pour certaines altitudes de la sonde. Pour ces positions l'écho de fond n'est donc pas utilisable pour la détection de défaut en paroi externe.