

LIEN ENTRE LE BRUIT ULTRASONORE RÉTRODIFFUSÉ ET LA MICROSTRUCTURE DES MATÉRIAUX POLYCRISTALLINS

RELATION BETWEEN ULTRASONIC BACKSCATTERING AND MICROSTRUCTURE FOR POLYCRYSTALLINE MATERIALS

N. Feuilly, O. Dupond, B. Chassignole
EDF R&D – Labo CND
Route de Sens – Ecuelles – 77250 Moret sur Loing
Tél. 01 60 73 74 66

J. Moysan, G. Corneloup
LCND – Université de la Méditerranée
Av. G. Berger – 13625 AIX EN PROVENCE Cedex
Tél. 04 42 93 90 34 – Fax. 04 42 93 90 84

Résumé

Dans le cadre de la maintenance de ses installations électronucléaires, EDF pratique des contrôles ultrasonores afin de s'assurer de l'absence de défauts. Or, la structure des matériaux polycristallins peut dans certaines conditions provoquer un phénomène de diffusion de l'onde ultrasonore qui se traduit par une atténuation et un bruit de structure importants. Des contrôles industriels sur divers composants ont démontré l'importance de ces phénomènes physiques qui peuvent diminuer les performances de ceux-ci.

Dans une première approche, le matériau polycristallin étudié est l'alliage Inconel 600, qui possède une structure isotrope et homogène. Des éprouvettes présentant des tailles de grains différentes ont été caractérisées et analysées expérimentalement, afin de mesurer l'atténuation ultrasonore et le bruit de structure rétrodiffusé.

Les mesures expérimentales montrent l'influence de la taille des grains sur les valeurs d'atténuation et de bruit, et font apparaître un filtrage fréquentiel lorsque la longueur d'onde est de l'ordre du diamètre moyen des grains. Une modélisation par éléments finis du matériau à l'échelle de la microstructure donne des premiers résultats de simulation cohérents avec les valeurs expérimentales obtenues.

Abstract

Within the framework of the maintenance of its nuclear power stations, EDF uses ultrasonic inspections to make sure of the absence of defects. But in some cases, the structure of polycrystalline materials can produce the scattering of the ultrasound wave which results in an important attenuation of the signal and the apparition of structural noise. Industrial inspections on various components demonstrated the importance of these physical phenomena which can lead to decrease the performances of the ultrasonic inspections.

In a first approach, the polycrystalline material studied is the Inconel 600 alloy, which has an isotropic and homogeneous microstructure. Some testing blocks which present different grain sizes, were experimentally characterized and analysed to measure the ultrasonic attenuation and the structural noise. The experimental measures show the influence of the grain size on the values of attenuation and noise, and the creation of a frequency filtering as the wavelength is about the same as the average grain diameter.

A finite elements modelling of the material at a microstructural scale gives first results which are coherent with experimental values.

INTRODUCTION

Dans le cadre de la maintenance de ses installations électronucléaires, EDF pratique des contrôles ultrasonores afin de s'assurer de l'absence de défauts.

Or, la structure des matériaux polycristallins peut dans certaines conditions conduire à un phénomène de diffusion de l'onde ultrasonore qui se traduit par une atténuation et un bruit de structure (partie du signal rétrodiffusé interceptée par le traducteur [mode pulse-écho]) importants. Les contrôles industriels effectués sur divers composants ont démontré l'importance de ce phénomène pouvant éventuellement conduire à des interprétations erronées : les signaux renvoyés par les défauts peuvent être noyés dans les écho de bruit de structure résultant de l'interaction entre l'onde et le matériau.

L'amélioration des performances du contrôle par ultrasons de ces composants passe donc par une compréhension des phénomènes physiques en jeu. Ainsi, il est nécessaire de faire le lien entre les caractéristiques microstructurales des matériaux et les caractéristiques acoustiques du faisceau ultrasonore. Ce travail fait l'objet d'un doctorat mené dans le laboratoire de CND au département Matériaux et Mécanique des Composants (MMC) d'EDF R&D, en partenariat avec le Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND) de l'IUT d'Aix-en-Provence de l'Université de la Méditerranée.

La première partie de la thèse comporte une étude bibliographique recensant les travaux antérieurs menés sur le sujet. Puis, à partir d'un travail expérimental, on se propose d'étudier les paramètres microstructuraux du matériau à l'origine du bruit de structure et de l'atténuation. On cherchera ensuite à modéliser les mécanismes mis en jeu.

Dans une première approche, le matériau polycristallin étudié est l'Inconel 600, qui possède une structure isotrope et homogène.

Le travail s'oriente selon 4 axes :

- ❑ une description des phénomènes ultrasonores intervenants;
- ❑ la présentation de la démarche expérimentale et les premiers résultats obtenus ;
- ❑ la modélisation des mécanismes de propagation du faisceau ultrasonore dans le matériau ;
- ❑ les perspectives envisagées.

IDENTIFICATION DES PHENOMENES PHYSIQUES

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau polycristallin, celle-ci voit son amplitude diminuer [1]. De plus, si le matériau présente des propriétés d'homogénéité, alors et : $\alpha(z, f) = \alpha(f)$

$$A_z = A_0 \cdot e^{-\alpha(f) \cdot z} \quad (1)$$

où A_0 est l'amplitude initiale ;

A_z est l'amplitude à la position z correspondant au temps t ;

$\alpha(f)$ est le coefficient d'atténuation.

Le coefficient d'atténuation α , est liée à la structure du milieu et à son comportement mécanique. Il peut être décomposé en trois contributions : $\alpha = \alpha_a + \alpha_d + \alpha_{div}$ (2)

L'atténuation par absorption, α_a , résulte de la transformation de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Elle est considérée comme négligeable pour les métaux polycristallins.

- les sauts d'impédance sont faibles entre les différentes phases du matériau étudié.

En fait, l'hypothèse de diffusion simple considère qu'une onde diffusée une première fois par un grain ne sera pas perturbée par la suite. Mais les modèles théoriques proposés sont rarement associés à une validation expérimentale. De plus, l'hypothèse de diffusion simple demande à être vérifiée. Enfin, le phénomène de diffusion est généralement traité sous l'angle de l'atténuation et rarement sous l'angle bruit de structure.

Ce travail propose donc d'étudier ce phénomène sous les deux angles en cherchant à les corrélés à la microstructure du matériau, sans a priori sur la diffusion simple ou multiple. On cherchera notamment à isoler les phénomènes de diffusion des autres contributions (divergence,...). Une caractérisation fine du matériau est nécessaire pour proposer un modèle de bruit pertinent. Et l'influence de la fréquence doit aussi être étudiée.

APPROCHE EXPERIMENTALE

Pour se situer dans l'ensemble des domaines fréquentiels possibles, deux solutions sont envisageables : jouer sur la taille moyenne des grains du matériau ou faire varier la bande fréquentielle des traducteurs.

Choix des microstructures étudiées

Nous avons choisi dans un premier temps d'étudier un matériau à structure isotrope et homogène. Il s'agit de l'Inconel 600, sous forme de barre laminée à chaud de diamètre 135 mm et à matrice austénitique. A l'état de réception, la taille moyenne des grains est estimée à 220 μm .

Evolution de la microstructure : paramètre « taille de grain »

Il est possible de faire évoluer la microstructure d'un alliage à partir de traitements thermiques judicieusement choisis. Ainsi, pour l'Inconel 600, l'augmentation de la température de traitement doit permettre d'augmenter la taille de grains du matériau. Pour cet alliage, le grossissement du grain est possible après la mise en solution de l'ensemble des précipités. Conformément au graphique, pour le matériau étudié et pour les traitements allant de 950°C à 1050°C, on observe une disparition des précipités, mais pas d'évolution de la taille de grains. A partir de 1100°C, la taille moyenne des grains augmente (figures 2a et 2b). Le tableau I donne les tailles de grains mesurées pour les températures de traitement appliquées.

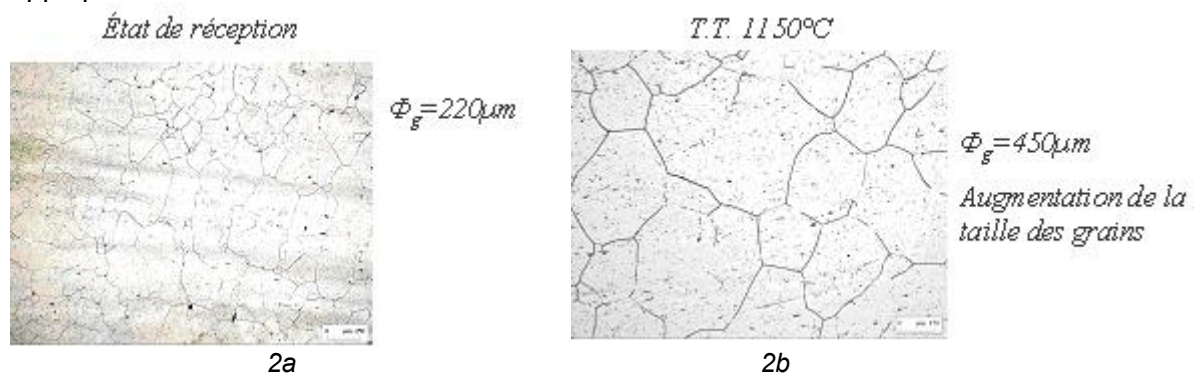


Figure 2 : Micrographies du matériau – a : état de réception ; b : après traitement thermique à 1150°C

Température de traitement (°C)	Indice de taille de grains (d)	Taille moyenne des grains (µm)
Etat de réception	1	220
900 °C	1	220
950 °C	1	230
1000 °C	1	260
1050 °C	1	260
1100 °C	1	270
1150 °C	-0.5	450
1200 °C	-1	520

Tableau I : Tailles de grains mesurées pour les traitements thermiques appliqués

Une analyse EBSD (Electron BackScattered Diffraction) a également été menée sur les échantillons. L'intérêt d'une telle analyse est de définir l'orientation cristallographique en chaque point de mesure. Une cartographie des grains est alors obtenue. Les images montrent que la structure est bien globalement isotrope (figure 3a). Par contre, elle est fortement maclée, à l'état de réception comme aux états traités thermiquement. Un traitement de l'image permet de supprimer ces macles (figure 3b). On retrouve alors la taille moyenne des grains estimée par analyse métallographique.

Les macles sont des défauts d'empilement qui conduisent à des désorientations cristallographiques parfaitement déterminées à l'intérieur du grain. Ces désorientations cristallographiques modifient l'impédance acoustique à l'intérieur des grains, et donc, peuvent intervenir dans le processus de diffusion de l'onde ultrasonore. L'influence des macles a en effet été discutée dans la littérature [10].

Dans le cadre de notre étude, il faudra donc vérifier si les macles doivent être prises en compte dans les modèles.

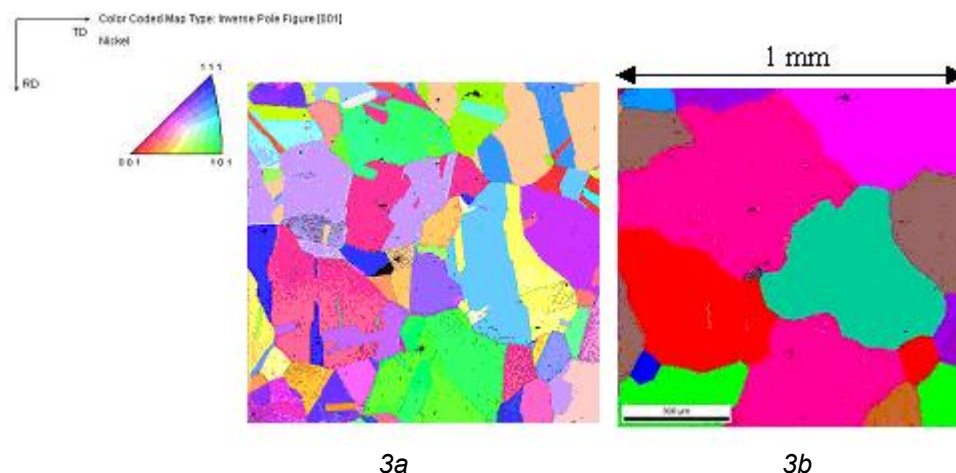


Figure 3 : Images EBSD de la microstructure maclée à l'état de réception – a : macles visibles ; b : seuls les joints de grains sont visibles

Choix des capteurs ultrasonores utilisés : paramètre « fréquence »

Afin de se situer dans l'un ou l'autre des domaines fréquentiels, on peut aussi faire varier la fréquence centrale des capteurs ultrasonores utilisés lors des essais.

Le tableau II donne les caractéristiques des différents capteurs employés lors des mesures expérimentales.

Transducteur	Fréquence centrale (MHz)	Diamètre (mm)	Largeur de bande (%)
V303-SU	1	13	57.4
V306-SU	2.25	13	62.2
V309-SU	5	13	69.8
A309S-SU	5	13	54.4
V310-SU	5	6	76.3
V320-SU	7.5	13	56.5
V311-SU	10	13	54.9

Tableau II : Caractéristiques des transducteurs ultrasonores utilisés

On notera qu'un des transducteurs possède un diamètre différent des autres dans le but d'évaluer un éventuel effet de la divergence du faisceau. L'influence de la largeur de bande fréquentielle est également analysée.

Mise en place d'un banc d'essais

Les essais sont effectués en immersion (on se place au-delà du champ proche) en ondes longitudinales à 0° (figure 4).

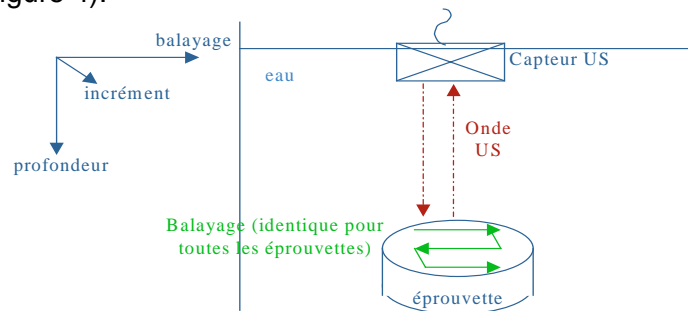


Figure 4 : Schéma du montage expérimental

Pour ces essais, on utilise 2 types d'éprouvettes correspondant aux 2 grandeurs mesurées : atténuation ou bruit de structure.

Mesures d'atténuation

Des éprouvettes traitées thermiquement et de 8 mm d'épaisseur sont utilisées pour obtenir des échos de fond de pièce successifs (figure 5). L'atténuation apparente est alors mesurée à partir de la décroissance en amplitude des échos de fond successifs. Des exemples de résultats sont présentés en figure 6a et 6b.

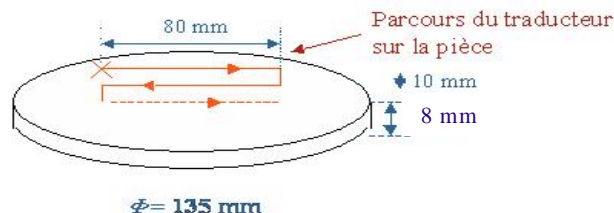


Figure 5 : Eprouvettes utilisées pour les mesures d'atténuation

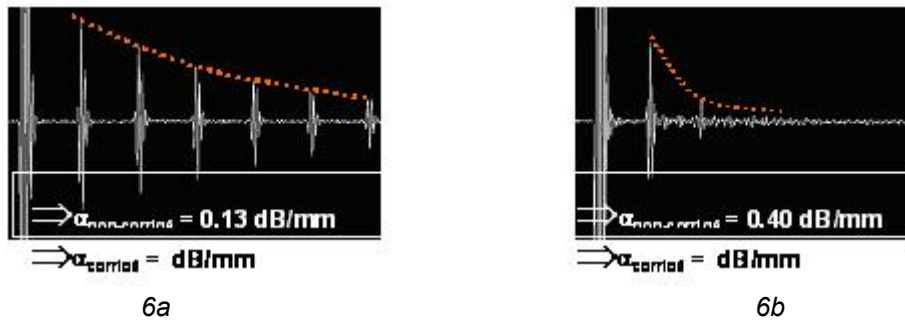


Figure 6 : Evolution des échos de fond successifs pour un contrôle à 5 MHz –
a : matériau à l'état de réception (taille de grains 220 μm) ; b : taille de grains 450 μm

On observe expérimentalement une décroissance exponentielle de l'amplitude des échos de fond successifs. Pour remonter à l'atténuation par diffusion du matériau, il faudra appliquer des corrections à la valeur mesurée à partir de la décroissance des échos successifs. Ces corrections ont pour objet de prendre en compte les coefficients de transmission et de réflexion aux différentes interfaces et la divergence du faisceau en champ lointain.

Les premières mesures expérimentales effectuées montrent :

- l'influence de la taille des grains (l'atténuation augmente avec la taille des grains), comme cela est indiqué sur la figure 6 ;
- un filtrage fréquentiel selon la taille des grains. Par exemple, la fréquence centrale des échos de fond est égale à 2 MHz pour le capteur à 5 MHz lors de l'analyse de l'éprouvette avec une taille de grains de 450 μm .

Mesures de bruit

Pour effectuer des mesures de bruit, des éprouvettes similaires aux précédentes, mais d'épaisseur plus importante (100 mm) sont utilisées.

Des exemples de résultats sont présentés figures 7a et 7b sous forme de représentations de type B, pour des acquisitions au même gain.

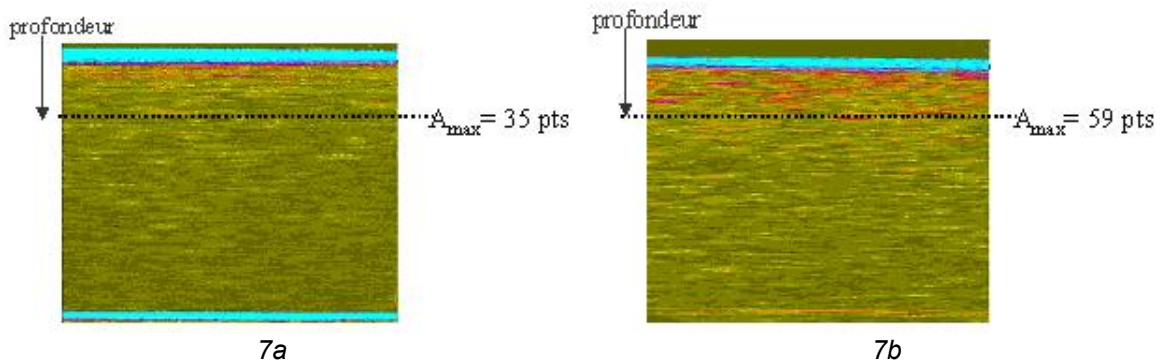


Figure 7 : Exemple de représentations de type B illustrant le bruit de structure mesuré à une fréquence de 5 MHz et au même gain –
a : état de réception (taille de grains 220 μm) ; b : TT 1150°C (taille de grains 450 μm)

Les conclusions sont similaires à celles des mesures d'atténuation : augmentation du bruit de structure avec la taille des grains, et filtrage fréquentiel. Par exemple, pour une fréquence de 5 MHz, à une profondeur de 20 mm et à gains identiques, l'amplitude maximale des échos de bruit est de 35 points pour une taille moyenne de grains de 220 μm et de 59 points pour une taille moyenne de grains de 450 μm

APPROCHE THEORIQUE

Le logiciel ATHENA (développé par EDF R&D) est un outil de simulation numérique utilisant la modélisation par éléments finis pour représenter en 2D la propagation d'un faisceau ultrasonore dans une pièce et l'interaction « faisceau ultrasonore / défaut » [11].

Pour modéliser un matériau isotrope, on attribue au matériau homogène une vitesse de propagation pour les ondes longitudinales et une vitesse de propagation pour les ondes transversales. La figure 8 présente la modélisation du faisceau obtenu avec une telle description.

La divergence du capteur est simulée (avec une approximation 2D). Par contre, cette représentation rend compte partiellement des phénomènes de diffusion. En effet, une atténuation propre à chacun des milieux peut être ajoutée, mais le bruit rétrodiffusé n'est pas simulé.

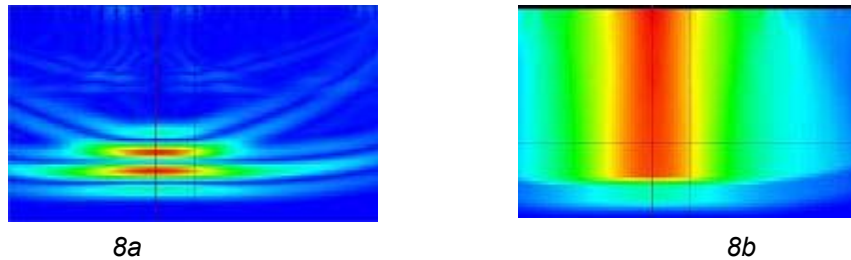


Figure 8 : Représentation d'un faisceau ultrasonore dans un matériau isotrope avec ATHENA à une fréquence de 2.25MHz – a : champ ultrasonore à un « instant t » donné ; b : champ ultrasonore sur une « durée » donnée

Pour modéliser la diffusion de l'onde ultrasonore, nous avons choisi de représenter la structure à l'échelle du grain grâce aux diagrammes de Voronoï [12] (figure 9).



Figure 9 : Exemple de description de la microstructure par des diagrammes de Voronoï (20x10 mm² – taille de grains 500µm)

A chaque cellule de Voronoï, qui modélise un grain, on associe une vitesse OL et une vitesse OT calculées à partir des Cij du monocristal (définis par tirage aléatoire sur l'orientation 3D des grains). Un exemple de champ acoustique obtenu avec une telle description est fourni figure 10a et 10b.

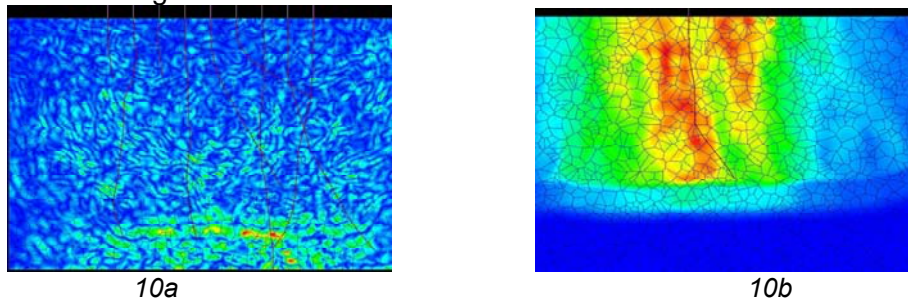


Figure 10 : Représentation d'un faisceau ultrasonore dans un matériau isotrope avec ATHENA+diagrammes de Voronoï à la fréquence 2.25MHz – a : champ ultrasonore à un « instant t » donné ; b : champ ultrasonore sur une « durée » donnée – (maximum d'amplitude en chaque point de calcul)

Avec cette représentation du matériau, on constate sur les résultats de simulation que les ondes sont diffusées par la structure (figure 10a). D'autres déformations du faisceau, telles que des déviations locales (figure 10b), sont également générées.

Les diagrammes de Voronoï représentent alors un outil intéressant pour obtenir la description de la microstructure.

A partir d'une telle description, des calculs d'atténuation apparente ont été menés avec ATHENA à l'aide de la décroissance d'échos de fond successifs. Les résultats obtenus sont présentés figure 11a et 11b.

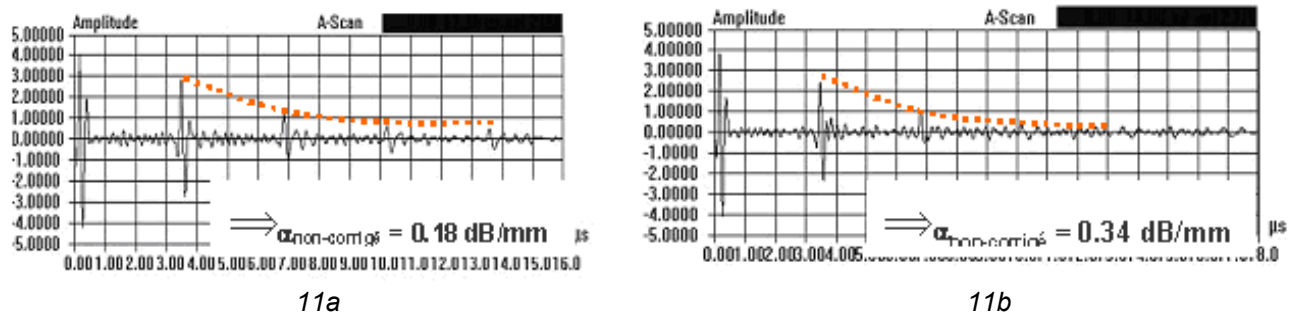


Figure 11 : AScans tirés de la modélisation par diagrammes de Voronoï pour une fréquence de 5MHz – a : taille de grains de 300μm ; b : taille de grains de 500μm

Les valeurs d'atténuation ainsi calculées sont en cohérence avec les valeurs d'atténuation mesurées expérimentalement (figure 6a et 6b).

Néanmoins, l'analyse par simulation doit être poursuivie pour étudier l'influence des différents paramètres de la simulation (structure 2D, taille de maille des éléments finis, distribution de la taille des grains, présence des macles, ...).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une étude sur la diffusion des ondes ultrasonores dans les matériaux polycristallins a été engagée. Différentes éprouvettes en Inconel 600, présentant différentes tailles de grains, ont été caractérisées, et des montages expérimentaux ont été définis afin de remonter d'une part à l'atténuation ultrasonore, et d'autre part au bruit de structure rétrodiffusé dans ces éprouvettes.

Les premiers résultats mettent bien en évidence l'influence de la taille des grains sur les valeurs d'atténuation et de bruit, avec l'apparition d'un filtrage fréquentiel important dans les cas où la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des grains. Les mesures fines de la micrographie (EBSD) permettent de mettre en évidence les distributions des grains et leurs arrangements qui sont certainement la source des modifications du bruit.

L'approche théorique, basée sur une simulation aux éléments finis et une modélisation du matériau à l'échelle du grain, donne des premiers résultats encourageants. En effet, l'atténuation donnée par la simulation est du même ordre que celle mesurée expérimentalement.

Aussi, les perspectives de ce travail sont axées sur la détermination du coefficient par diffusion (correction de l'atténuation apparente, mesures en transmission,...), sur le développement d'une méthode de quantification du bruit et sur une comparaison plus poussée entre les approches expérimentale et théorique.

REFERENCES

- [1] Saniie, J., Wang, T., Bilgutay, N. M., Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84(1), 1988, pp. 400-408
- [2] Papadakis, E. P., Absolute measurements of ultrasonic attenuation using damped non-destructive testing transducers, *Journal of Testing and evaluation*, Vol. 12(5), 1984, pp. 273-279
- [3] Willems, H., Goebbels, K., Characterization of microstructure by backscattered ultrasonic waves, *Metal Science*, Vol. 15, 1981, pp. 549-553
- [4] Hirsekorn, S., Scattering of ultrasonic waves by polycrystals, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 72 (3), 1982, pp. 1021-1031
- [5] Stanke, F. E., Kino, G. S., A unified theory for elastic waves propagation in polycrystalline materials, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75 (3), 1984, pp. 665-670
- [6] Rose, J. H., Ultrasonic backscattering from polycrystalline aggregates using time-domain linear response theory, *Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, 1991, pp. 1677-1684
- [7] Yalda-Mooshabad, I., Margetan, F. J., Thompson, R. B., Monte-Carlo Simulation of ultrasonic grain noise, *Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, 1993, pp. 1727-1734
- [8] Yalda-Mooshabad, I., Margetan, F. J., Thompson, R. B., Margetan, F. J., Influence of texture on backscattered ultrasonic noise, *Materials Science forum* 157 (1), 1994, pp.221-226
- [9] Anxiang Li, Roberts, R., Haldipur, P., Margetan, F. J., Thompson, R. B., Computational study of grain scattering effects in ultrasonic measurements, *AIP Conference proceedings* Vol. 657A, 2003, pp. 117-124
- [10] Matsumoto, S., Kimura, K., *Transactions of national research institute for metals*, Vol. 14(4), 1972, pp. 155-164
- [11] Schumm, A., Chassignole, B., Diaz, J., Duwig, V., Fouquet, T., *Structural Noise in modelisation*, ECNDT, 2006
- [12] Jenson, F., Poidevin, C., Doudet, L., *Modélisation du contrôle ultrasonore dans une structure à gros grains*, Journées COFREND, 2008