

**MODÉLISATION DU BRUIT ET DE L'ATTÉNUATION
ULTRASONORES À PARTIR D'UN MODÈLE PHYSIQUE
D'INTERACTION**
*PREDICTION OF ULTRASONIC NOISE AND ATTENUATION USING A
PHYSICAL MODEL*

V. DORVAL⁽¹⁾, F. JENSON⁽¹⁾, G. CORNELOUP⁽²⁾, J. MOYSAN⁽²⁾

(1) CEA-LIST

Bat. 611 point courrier 120, CEA Saclay – 91191 GIF sur YVETTE CEDEX
Tél. 01 69 08 62 50 – Fax. 01 69 08 75 91
E-mail : vincent.dorval@cea.fr

(2) LCND, Université de la Méditerranée, IUT Aix-en-Provence

LCND, IUT Avenue Gaston Berger – 13 625 AIX EN PROVENCE CEDEX
Tél. 04 42 93 90 38 – Fax. 04 42 93 90 70
E-mail : gilles.corneloup@univmed.fr

Résumé

L'interaction d'une onde ultrasonore avec la microstructure d'un matériau se traduit par une perte d'amplitude du champ lors de sa propagation ainsi que par la redirection d'une partie de l'énergie du champ dans toutes les directions de l'espace. Ces phénomènes, appelés atténuation et bruit de structure, sont responsables d'une perte de sensibilité lors d'un contrôle non destructif. Actuellement, la modélisation de ces phénomènes par le logiciel de simulation en contrôle non destructif CIVA se fait de manière heuristique, i.e par des approches empiriques distinctes. Améliorer cet aspect du logiciel permettrait de mieux prédire les performances d'un contrôle dans des matériaux bruités. L'intégration à ce logiciel d'un modèle physique permettant d'estimer le bruit et l'atténuation est ici discutée. Ce modèle permet de calculer des grandeurs caractéristiques du milieu telles que la section efficace différentielle de diffusion ainsi que l'énergie totale diffusée à partir de certaines propriétés du matériau (constantes élastiques, taille moyenne de grain). Ces grandeurs sont ensuite utilisées en entrée d'algorithmes spécifiques permettant la simulation du bruit de structure et de l'atténuation. Des résultats de simulation obtenus avec ces outils sont comparés à des données expérimentales.

Abstract

The interaction between an ultrasonic wave and the microstructure of a material induces a loss of amplitude and the redirection of the energy in all directions of space. Those phenomena, known as attenuation and structural noise, cause a loss of sensitivity in NDT. At present, the software for NDT simulation CIVA predicts those phenomena using distinct empirical methods. Improving these features of the software would allow for a better prediction of detection performances in noisy materials. This presentation discusses the integration of a forward model of noise and attenuation into the CIVA software. The selected model enables to compute characteristic properties of the medium such as the differential scattering cross-section and the total scattered energy as a function of some material properties (elastic constants, mean grain size). The computed values are used as an entry for specific algorithms dedicated to modeling of structural noise and attenuation. Simulation results are compared to experimental data.

INTRODUCTION

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau polycristallin, une partie de l'énergie qu'elle transporte est diffusée dans toutes les directions de l'espace par les cristallites individuelles. Cette interaction du champ avec la microstructure du matériau se traduit par une atténuation du faisceau transmis dans le milieu et par la mesure de signaux appelés bruit de structure. Lors du contrôle ultrasonore de certains matériaux, ces phénomènes peuvent devenir importants et masquer des signaux provenant de défauts localisés dans le milieu.

Le logiciel d'expertise en CND CIVA propose des outils permettant de prendre en compte le bruit de structure et l'atténuation lors de la simulation d'une configuration de contrôle. Les deux phénomènes sont pris en compte par des approches distinctes : l'atténuation est calculée par l'application d'un filtrage fréquentiel sur les signaux simulés et le bruit de structure est obtenu grâce à un algorithme appelé « générateur de bruit » qui lui est dédié. Actuellement ces approches nécessitent une phase d'ajustement des paramètres en entrée de l'algorithme à partir de données expérimentales de référence pour le générateur de bruit, et la connaissance au préalable d'une expression pour le coefficient d'atténuation valide pour le milieu d'intérêt dans le cas de l'application du filtre d'atténuation.

Le travail de thèse présenté ici a pour objectif d'acquérir une meilleure connaissance des mécanismes à l'origine de l'atténuation et du bruit de structure. Il devrait également permettre de développer des outils simples d'utilisation et prédictifs de ces phénomènes afin d'aider à la conception de contrôles de matériaux bruités et à l'interprétation de résultats.

Une description détaillée des fonctionnalités actuellement proposées dans le logiciel CIVA est donnée dans cette communication. Un modèle théorique permettant de relier la diffusion ultrasonore aux propriétés de la microstructure est ensuite présenté. L'implémentation de ce modèle au sein des outils de simulation existants doit permettre d'évaluer le bruit de structure et l'atténuation directement à partir des propriétés matérielles et ainsi d'éviter la phase d'ajustement des paramètres décrite précédemment.

SIMULATION DU BRUIT DE STRUCTURE ET DE L'ATTENUATION AVEC LE LOGICIEL CIVA 9

Le logiciel CIVA propose des outils permettant de prendre en compte les phénomènes de bruit de structure et d'atténuation lors de la simulation d'un contrôle par ultrasons. Une description rapide de ces fonctionnalités est présentée ici.

Modélisation de l'atténuation

La prise en compte de l'atténuation est faite au travers de la loi de Beer-Lambert qui permet de relier l'amplitude du champ en un point de calcul du milieu à l'amplitude du champ en absence d'atténuation :

$$u = u_0 \cdot e^{-\alpha(\omega)d}$$

Avec d la distance de propagation de l'onde entre l'interface d'entrée et le point de calcul et $\alpha(\omega)$ un paramètre appelé coefficient d'atténuation et qui reflète uniquement les propriétés d'atténuation du milieu. L'expression ci-dessus peut être vue comme un filtre fréquentiel dépendant à la fois du temps de propagation de l'onde dans le milieu (au travers de la distance d) et des composantes fréquentielles ω de l'onde. Les résultats classiques de la littérature distinguent plusieurs régimes d'atténuation auxquels correspondent différentes expressions pour le coefficient d'atténuation α . Ces régimes sont définis par les rapports

entre la longueur d'onde incidente λ et la taille moyenne des grains D constituant la microstructure :

- Domaine de Rayleigh : $\lambda \gg D$, $\alpha = C_1 \cdot D^3 \cdot \omega^4$
- Domaine stochastique : $\lambda \sim D$, $\alpha = C_2 \cdot D \cdot \omega^2$
- Domaine de diffusion : $\lambda \ll D$, $\alpha = C_3$

Afin de prendre en compte ces différents régimes, plusieurs expressions fonctionnelles sont proposées à l'utilisateur. Par exemple, la dépendance fréquentielle du coefficient

d'atténuation peut être décrite par une loi de puissance : $\alpha(\omega) = \alpha_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^n$, où les paramètres

$\alpha_0 = \alpha(\omega_0)$ et n doivent être spécifiés par l'utilisateur et donc connus de celui-ci, ce qui est rarement le cas dans la pratique.

Modélisation du bruit

Le générateur de bruit de CIVA positionne un ensemble de diffuseurs ponctuels (ou points diffractants) aléatoirement dans le matériau. Chacun de ces diffuseurs est caractérisé par un coefficient de diffusion dont la valeur est également attribuée aléatoirement.

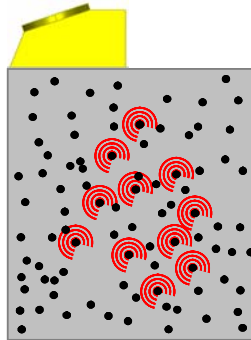


Figure 1 : Représentation schématique du principe du générateur de bruit de CIVA. Les contributions provenant de l'interaction entre le champ incident et chacun des points diffractant positionné dans le volume sont calculées et sommées. La position des points diffractant est conservée lors du déplacement du capteur

Le modèle utilisé pour le calcul de signaux bruités est similaire à celui de Gustafsson et Stepinski [1]. La réponse d'un ensemble de diffuseurs à un pulse ultrasonore $S(t)$ est donnée par la somme des contributions individuelles de chaque diffuseur. Dans le domaine fréquentiel, l'expression du signal bruité est donnée par :

$$V(\omega) = \sum_{k=1}^K A_k \omega^2 \exp[-\alpha(\omega)\tau_k] \exp(-j\omega\tau_k) C_k S(\omega)$$

A_k désignant le coefficient de diffusion d'un diffuseur, τ_k le temps du trajet émetteur-diffuseur-récepteur, et C_k l'amplitude du champ à la position du diffuseur. Le terme en ω^2 de cette expression décrit la dépendance fréquentielle moyenne des coefficients de diffusion correspondant à la diffusion dans le régime de Rayleigh. Les coefficients A_k sont tirés aléatoirement suivant une distribution de probabilité gaussienne centrée en zéro. On retrouve également dans cette expression le filtre d'atténuation exprimé temporellement. Dans le cadre de cette approche, un « modèle de bruit » est déterminé par deux paramètres : la densité de points diffractant et la largeur de la gaussienne définissant la distribution des coefficients de diffusion. Ces deux paramètres doivent être ajustés de façon à reproduire le bruit observé sur une configuration expérimentale de référence.

Transposabilité des modèles de bruit et d'atténuation

L'intérêt principal de cette approche réside dans le fait que le couple de paramètres en entrée du générateur de bruit peut être utilisé pour simuler le bruit de structure dans d'autres configurations de contrôle. Cette « transposabilité » des paramètres est possible dans les limites imposées par les hypothèses du modèle de bruit. Ces paramètres étant supposés refléter des caractéristiques intrinsèques du matériau, ils sont indépendants de la géométrie de la pièce inspectée ainsi que de l'angle de contrôle et de la divergence du faisceau. Ils sont également supposés être indépendants de la fréquence dans la mesure où la bande passante du traducteur utilisé reste contenue dans le domaine de Rayleigh (grains petits par rapport à la longueur d'onde).

Par contre les coefficients d'atténuation et de diffusion fixés ne sont valables que pour un type d'onde (L ou T). Les coefficients de diffusion ne sont également valables que pour un angle de diffusion. Cependant, quand un même traducteur est utilisé pour l'émission et la réception cela ne pose généralement pas de problème car la grande majorité du bruit provient de phénomène de rétrodiffusion (ou diffusion à 180°). Il n'y a donc qu'un angle de diffusion à considérer dans ce genre de cas, et le modèle reste valide.

En résumé, les paramètres fixés d'après une mesure sont transposable à d'autres géométries, angles de contrôle, divergences du capteur, et, dans le domaine de Rayleigh, à d'autres fréquences. Par contre une mesure faite en onde L ne permet pas de simuler par la suite le bruit et l'atténuation d'un contrôle en onde T. De plus, le bruit peut être mal estimé si différents angles de diffusion interviennent.

L'introduction d'un nouveau modèle physique de diffusion devrait permettre de dépasser ces limites de transposabilité et également de se passer d'une mesure de référence.

MODELE DE DIFFUSION

Principe

Le modèle choisi pour améliorer le générateur de bruit est basé sur la démarche proposée par Rose [2]. Dans le cadre de ce modèle, un métal est décrit comme une juxtaposition de monocristaux anisotropes, qui diffèrent les uns des autres par leur orientation cristallographique, leur forme et leur taille. On considère que la diffusion est due aux variations d'orientation entre les monocristaux.

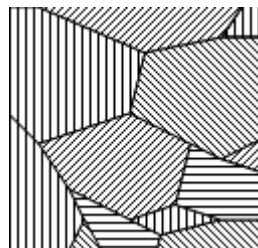


Figure 2 : Description de la microstructure prise en compte dans le modèle de diffusion

On ne cherche pas à calculer l'énergie diffusée pour une configuration précise : on calcule, en fonction de propriétés statistiques de la microstructure, des grandeurs moyennes. Il est ainsi possible de calculer l'énergie diffusée en moyenne dans une direction donnée par un volume élémentaire du milieu. Le calcul est basé sur l'approximation de Born : le champ incident est supposé être très peu perturbé par les inhomogénéités de la microstructure (le modèle n'est donc pas valable pour des grains très grands par rapport à la longueur d'onde

ou pour des grains caractérisés par de forts facteurs d'anisotropie). De plus il s'agit d'un modèle de diffusion simple : la diffusion multiple n'est donc pas prise en compte.

Expression de l'énergie diffusée

Les expressions théoriques utilisées dans ce travail sont issues d'un article de Margetan et al. [3]. η est défini comme la fraction de l'énergie incidente diffusée en moyenne par un volume élémentaire dans une direction donnée. Cette quantité est également appelée section efficace différentielle de diffusion par unité de volume. Elle s'écrit :

$$\eta_{inc \rightarrow dif}(\theta) = \frac{\omega^4}{(4\pi\rho)^2 v_{dif}^5 v_{inc}^3} \langle \delta C_{ijkl} \delta C_{mnpq} \rangle_{Or} \pi D^3 \left[1 + \frac{(\Delta k(\theta))^2 D^2}{4} \right]^{-2}$$

inc et *dif* sont les types des ondes incidente et diffusée (longitudinal, transverse horizontale ou transverse verticale), et θ l'angle de diffusion. Cette expression prévoit pour l'énergie diffusée une dépendance par rapport à la pulsation (ω), aux vitesses des ondes incidente et diffusée (v_{inc} et v_{dif}), à la densité du matériau (ρ), à la dimension des monocristaux (D), à une moyenne sur les constantes élastiques qui reflète l'anisotropie des monocristaux ($\langle \delta C_{ijkl} \delta C_{mnpq} \rangle_{Or}$), et à l'écart entre les nombres d'ondes des ondes incidentes et diffusées (Δk).

Le calcul de η à partir des propriétés matérielles permet une estimation à la fois du bruit et de l'atténuation. Le bruit est déterminé par le η correspondant à l'onde incidente provenant de l'émetteur ultrasonore et à l'onde diffusée vers le récepteur. L'atténuation peut être calculée à partir de l'énergie totale diffusée : la sommation de η sur toutes les directions et sur tous les types d'ondes diffusées correspond à l'énergie perdue par l'onde incidente lorsqu'elle traverse un volume élémentaire, ce qui permet de calculer son coefficient d'atténuation.

Comparaison avec un modèle d'atténuation de référence

Le domaine de validité de notre modèle peut être estimé en comparant ses résultats avec ceux d'un modèle d'atténuation de référence (par exemple, celui développé par Stanke et Kino [4]) :

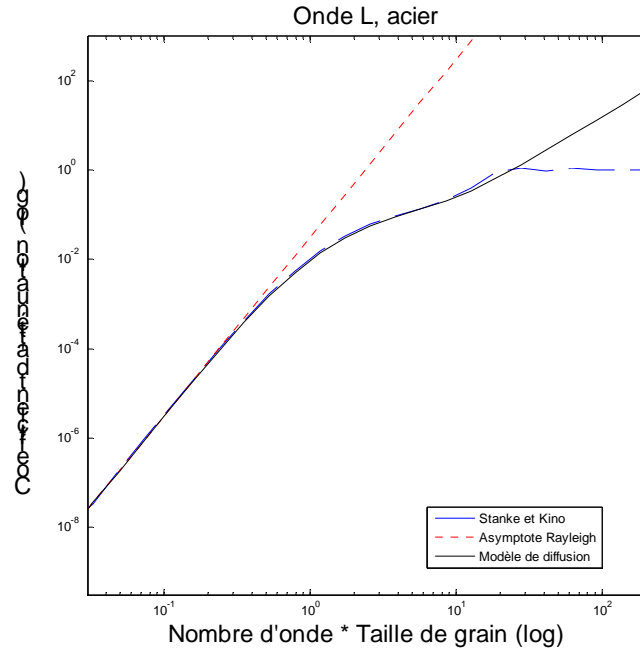


Figure 3 : Atténuation calculée par différents modèles

Cette comparaison indique que notre modèle reste valable pour le calcul de l'atténuation sur une plage de fréquence large, dépassant le domaine de Rayleigh.

Intégration du modèle au logiciel CIVA

Ce modèle a été intégré à une version de développement du logiciel CIVA. Le coefficient d'atténuation n'est plus défini directement par l'utilisateur, mais calculé à partir des propriétés du matériau *via* le modèle de diffusion. Concernant la simulation du bruit de structure, le principe des diffuseurs ponctuels répartis aléatoirement a été conservé. Mais leur réponse à une onde incidente est maintenant déterminée en fonction des propriétés du matériau et des types d'onde. De plus, la dépendance fréquentielle de leur réponse est plus complexe que précédemment et la variation de cette réponse par rapport à l'angle de diffusion est prise en compte.

Cette nouvelle approche présente plusieurs avantages par rapport à la précédente. Des mesures de référence ne sont plus nécessaires pour fixer des paramètres « empiriques » d'atténuation et de bruit en entrée des algorithmes. De plus, le bruit simulé devrait être valide sur une plage fréquentielle plus étendue. Il est par ailleurs maintenant possible de simuler des contrôles où coexistent des ondes longitudinales et transversales. Dans ce cas, plusieurs coefficients de diffusion doivent être calculés en fonction des composantes incidentes et diffusées ainsi que des conversions de modes mises en jeu.

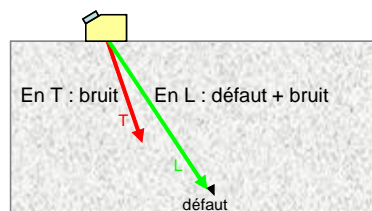


Figure 4 : Exemple de configuration où des ondes L et T se propagent simultanément

Il est également possible de simuler des configurations de contrôle pour lesquels plusieurs angles de diffusion interviennent. C'est le cas, par exemple, pour des configurations avec des transducteurs à émission-réception séparés (tandem, TOFD).

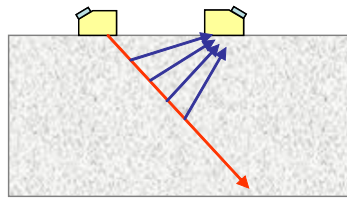


Figure 5 : Exemple de configuration avec émetteur et récepteur séparés

CAS D'APPLICATION : BRUIT DE STRUCTURE FAISANT INTERVENIR DES CONTRIBUTIONS DE TYPE « ECHOS DE COIN »

Une surintensité du bruit de structure est parfois observée au niveau de la face opposée au transducteur. Elle peut s'avérer gênante lorsque l'on cherche à détecter des défauts localisés sur cette face. Afin de modéliser correctement ce phénomène, il est nécessaire de prendre en compte les variations angulaires du coefficient de diffusion car plusieurs angles interviennent en raison du phénomène « d'échos de coin » (trajets faisant intervenir une réflexion sur le fond de la pièce). Comme illustré sur la figure ci-dessous, ces échos font intervenir les grains de la microstructure du matériau qui sont proches du fond de la pièce.

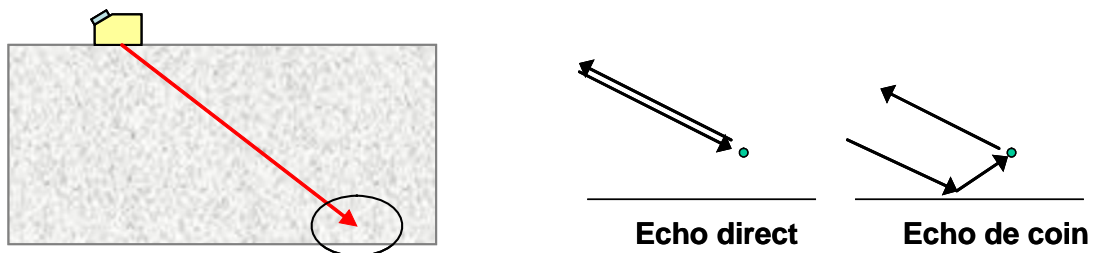


Figure 6 : Différents types d'échos intervenant lors de la simulation du bruit de structure au niveau du fond de la pièce

Les capacités du modèle de diffusion à prendre correctement en compte les variations angulaires du coefficient de diffusion ont été évaluées en simulant la configuration décrite sur la figure ci-dessous.

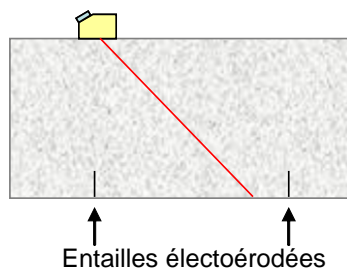


Figure 7 : Simulation d'un contrôle en T45 à 5 MHz

La dimension des grains du matériau du cas étudié n'étant pas connue, elle a été estimée en ajustant le niveau de bruit simulé provenant du milieu de la pièce (*i.e.* ne faisant intervenir que des échos directs) au niveau de bruit évalué expérimentalement dans la même configuration. La figure suivante donne une comparaison d'un bscan mesuré avec un bscan

simulé en exploitant le nouveau modèle. Une surintensité du bruit de structure est observable pour des temps de vol correspondant à des trajets proches du fond de la pièce.

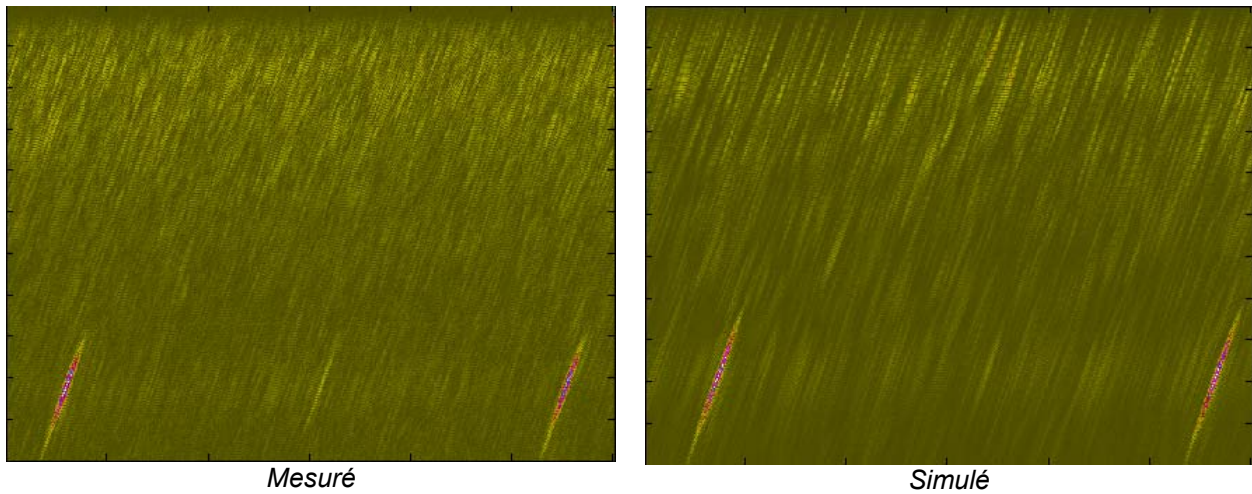


Figure 8 : B-scans mesuré et simulé pour une pièce bruitée avec 2 défauts de référence (entailles électroérochées) localisé en fond de pièce

Afin d'évaluer précisément l'apport d'une modélisation de la variation angulaire du coefficient de diffusion, le cas d'une diffusion isotrope (coefficient de diffusion indépendant de l'angle) a également été simulé. La figure suivante permet de comparer la mesure avec les simulations exploitant les deux modèles. Le bruit est tracé en fonction du temps et est moyenné sur les pas de déplacement du capteur (en dehors des positions où les échos de défauts apparaissent). Le bruit provenant du fond de la pièce est observé pour des temps de vol proches de 23 microsecondes.

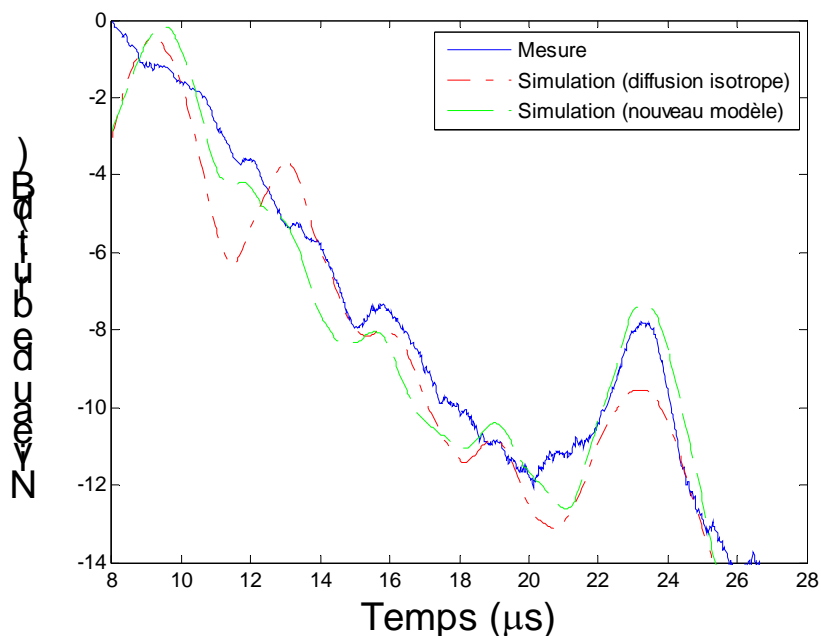


Figure 9 : Evolution temporelle obtenue expérimentalement et par la simulation avec les deux modèles

On constate que la prise en compte de la variation angulaire du coefficient de diffusion permet de mieux prédire le niveau de bruit en fond de pièce.

CONCLUSION

La simulation de l'atténuation et du bruit de structure par le logiciel CIVA se fait actuellement par des méthodes empiriques distinctes. Les travaux présentés montrent que cette approche peut être améliorée en reliant les algorithmes existant à un modèle d'interaction onde-microstructure.

Cette nouvelle approche doit permettre de se passer des mesures expérimentales de référence qui étaient jusqu'à présent nécessaire pour ajuster les paramètres d'entrée du générateur de bruit et du filtre d'atténuation. De plus, elle permet de simuler le bruit lorsque des composantes L et T coexistent et de tenir compte de la dépendance angulaire du coefficient de diffusion.

La capacité du modèle à prévoir le bruit en fonction des paramètres de la microstructure reste à valider. Des micrographies et des mesures de bruit seront réalisées sur les mêmes pièces. Les niveaux de bruit prévus par le modèle en fonction des tailles de grain données par les micrographies seront comparés aux mesures expérimentales. Les mesures effectuées incluront des configurations faisant intervenir à la fois des ondes L et T.

Par la suite, ce travail de thèse pourra également porter sur l'application de l'approche présentée ici à des matériaux particuliers à microstructure complexe, sur l'amélioration du modèle de diffusion ou de l'algorithme de génération de bruit, ou sur l'étude d'éventuelles autres sources de bruit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Gustafsson, M.G., Stepinski, T., Studies of split spectrum processing, optimal detection and maximum likelihood amplitude estimation using a simple clutter model, *Ultrasonics*, Vol. 35, 1997, pp. 31-52
- [2] Rose, J.H., Ultrasonic backscatter from microstructure, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, 1992, pp. 1677-1684
- [3] Margetan, F.J., Linxiao Yu, Thompson R. B., Computation of grain noise scattering coefficients for ultrasonic pitch/catch inspections of metals, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 24, 2005, pp. 1300-1307
- [4] F. E. Stanke F.E., Kino G. S., A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75, 1984, pp. 665-681