

L'IMPORTANCE DU BRUIT DE STRUCTURE DANS L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE

THE IMPORTANCE OF THE STRUCTURE NOISE IN THE NON DESTRUCTIVE EXAMINATION FIELD

J. MOYSAN, G. CORNELOUP, C. GUEUDRE
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
E-mail : joseph.moysan@univmed.fr

Résumé

Le bruit de structure correspond aux échos formés par la partie de l'onde diffusée par la structure du matériau. Il affecte le potentiel de diagnostic en diminuant le rapport signal sur bruit. La prise en compte du bruit dans les méthodes d'évaluation non destructives est une thématique importante qui connaît un regain d'intérêt grâce aux progrès de la modélisation. Nous rappelons que bruit et seuil sont indissociables le plus souvent dans les démarches de validation de l'intégrité mécanique par des méthodes non destructives. Le bruit a d'abord été étudié au LCND à travers le développement de méthodes de détection automatique. La modélisation du bruit de structure a fait ensuite l'objet de plusieurs travaux qui ont démontré la capacité d'utiliser le bruit comme indicateur ultrasonore pour caractériser les matériaux. Nous indiquons ensuite quels progrès sont attendus grâce à de nouveaux développements dans la modélisation du bruit.

Abstract

The Structure Noise refers to the backscattered echoes from the texture of the material. It affects the confidence in the diagnosis by reducing the signal-to-noise ratio. The Structure Noise becomes an important subject of interest again thanks to progresses in modelling. We remind that noise and threshold are more often non-separable in NDT methods developed to verify mechanical integrity. In the LCND laboratory, the noise has been firstly studied during the development of automatic detection methods. The structure noise modelling has then studied. Results proved the capability of using noise to new ultrasonic indicator to characterize material. Afterwards we indicate what kind of progresses are expected thanks to new modelling approaches.

INTRODUCTION

Le bruit est parfois un obstacle important à la mise en œuvre des méthodes d'inspection ultrasonore. Le bruit dit de structure est un bruit lié aux hétérogénéités des matériaux à une échelle plus petite que la longueur d'onde. Ce bruit est donc le plus souvent lié à un matériau anisotrope et/ou hétérogène. La difficulté première pour la modélisation du contrôle ultrasonore a été de rendre compte des phénomènes de déviation du faisceau ultrasonore pour prédire la propagation des ondes dans de tels matériaux. Les progrès de la modélisation de la propagation dans des matériaux complexes y compris dans la description de l'interaction avec les défauts et les progrès dans la prise en compte de l'atténuation ont permis la création de codes de simulations performants comme les outils développés dans la plateforme Civa [1] ou le code éléments finis Athéna [2]. Il est donc désormais possible d'envisager de continuer la modélisation en intégrant une description du bruit de structure. Cette problématique est étudiée par plusieurs équipes en France à travers notamment deux programmes de recherche dans lesquels le Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND) est fortement impliqué. Le premier programme est développé dans le cadre du Groupement de Recherche du CNRS 2501 (Étude de la propagation ultrasonore en milieux non-homogènes en vue du contrôle non destructif) dans le thème Bruit de Structure. Le second programme est le projet ANR SISTAE (Simulation et STATistiques pour les Essais non destructifs) dont l'objectif est de développer la modélisation notamment des courbes de probabilité de détection.

Dans une première partie nous resituons le contexte de la validation de l'intégrité mécanique. Si le bruit est un des paramètres déterminants dans les méthodes de probabilité de détection, il ne peut être dissocié le plus souvent de la notion de seuil. Le choix du seuil est donc déterminant. Nous rappelons les développements par le LCND de méthodes automatiques de détection avec des très faibles rapports signal à bruit. La modélisation du bruit de structure a fait l'objet de plusieurs études qui ont démontré la capacité d'utiliser le bruit comme indicateur ultrasonore pour la caractérisation des matériaux. Nous indiquons ensuite quels progrès sont attendus dans la modélisation du bruit grâce à des travaux en partenariats avec le CEA et EDF.

LE CONTEXTE : VALIDATION DE L'INTEGRITE MÉCANIQUE

L'intégrité mécanique concerne les domaines de la conservation de la résistance, de la solidité, de l'aptitude à soutenir les charges, les efforts mécaniques. Elle évalue les risques de rupture, de défaillance des composants mécaniques. En fin de vie se pose aussi la question de la requalification éventuelle de l'intégrité des structures [3]. La détection de défauts, leur caractérisation et leur dimensionnement est indispensable à ce processus d'évaluation. Une grande partie des travaux se concentre sur les fissures qui sont les défauts les plus dangereux par leur aptitude à se propager et par la difficulté de leur mise en évidence lors des contrôles. La mécanique de la rupture probabiliste permet de faire le lien entre les mesures non destructives et la validation de l'intégrité mécanique. Pour ce type de calculs il est très important de connaître la fiabilité des mesures non destructives [4].

La fiabilité des mesures est souvent associée à la probabilité de détection. Deux grandes approches sont utilisées pour obtenir les courbes de probabilité de détection : une approche expérimentale sur des pièces représentatives des défauts recherchés qui permettra ensuite par interpolation de déduire les courbes de probabilité et une approche de modélisation complète de la détection du défaut en tenant compte de la distribution du bruit. Une des

présentations les plus détaillées des efforts nécessaires à la modélisation d'une courbe POD modélisée est décrite par Thompson [5]. Les applications concernent le titane et les aciers. La figure 1 reprend la démarche générale. Elle illustre la transdisciplinarité de la caractérisation non destructive puisque huit modèles sont utilisés pour construire les distributions des amplitudes du bruit et d'un défaut \mathbf{d} décrit par ses paramètres $\mathbf{p}(\mathbf{d})$. Les liens doivent être établis entre la mécanique et les matériaux (C_{ij}), la mécanique et l'électricité (transducteur) et la mécanique et la propagation des ondes (élastodynamique).

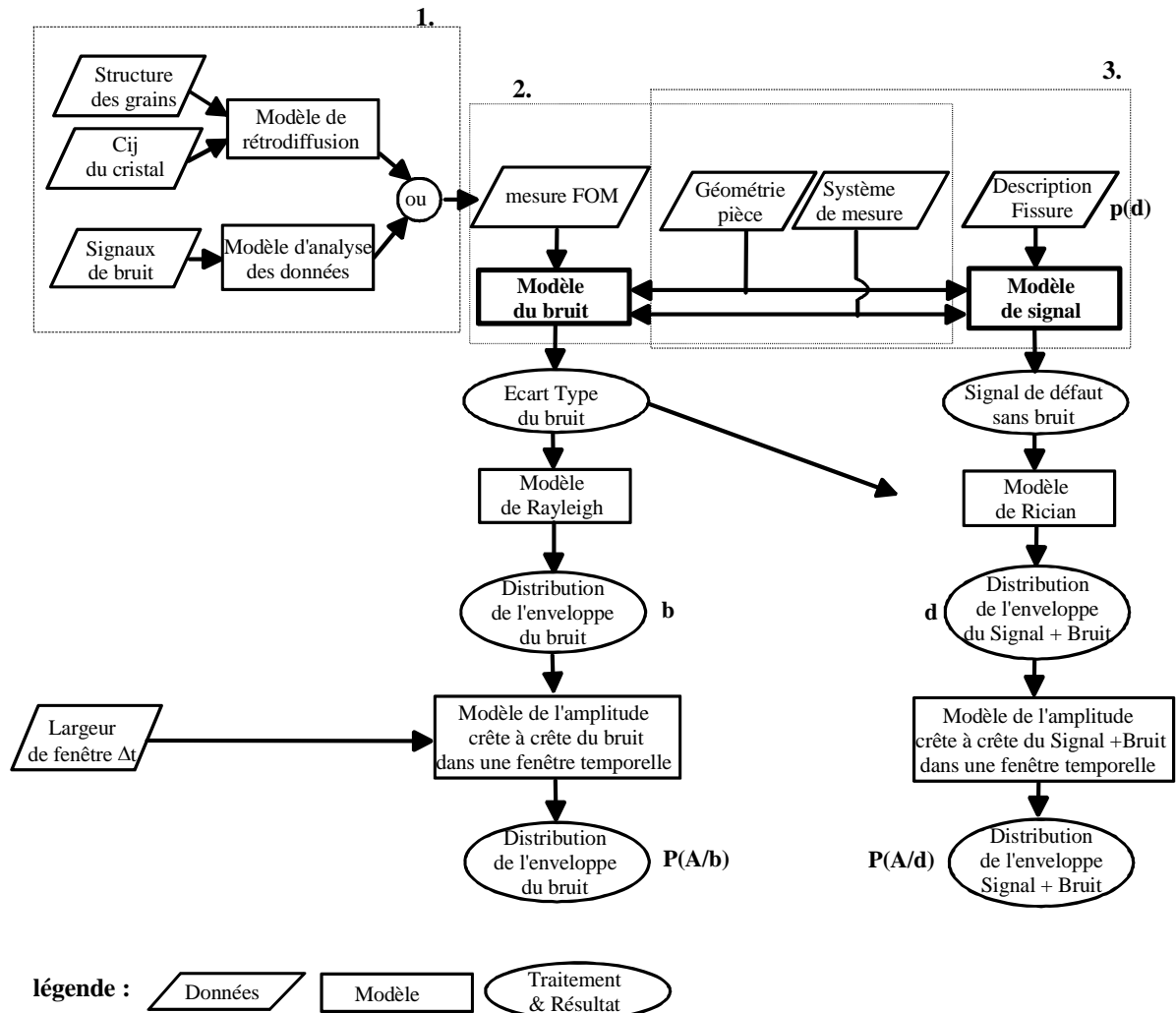


Figure 1. Démarche pour établir les distributions des amplitudes du bruit et du défaut

La connaissance du bruit (partie 1) est issue des modélisations de la texture des matériaux ou de l'analyse des signaux expérimentaux. La FOM (Figure of Merit) est une mesure de la capacité du matériau à générer du bruit. La géométrie et le système de mesure sont pris en compte pour le modèle de bruit et le modèle de signal de défaut (parties 2 et 3). La description statistique du bruit suit un modèle de Rayleigh pour de tels matériaux tandis que la description des amplitudes d'un signal contenant du bruit et un défaut suit une loi de Rician. La largeur de la fenêtre d'analyse est prise en compte pour obtenir les distributions des amplitudes des enveloppes des signaux de bruit $P(A/b)$ et celles des signaux de défauts $P(A/d)$.

Pour un seuil de détection fixé il est alors possible de calculer les courbes de probabilité de fausses alarmes (PFA), de détection (POD) et de non détection (PND). La courbe POD est l'intégrale de la distribution $P(A/d)$ de la valeur du seuil jusqu'à la valeur d'amplitude maximale (zone hachurée sur la figure 2)

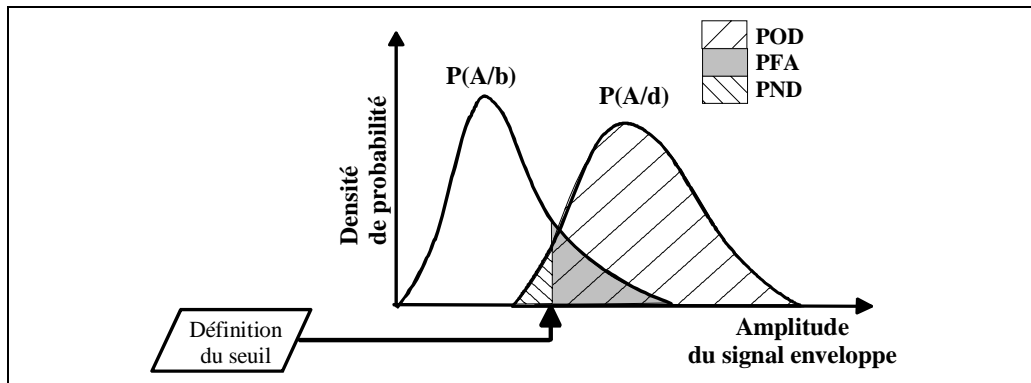
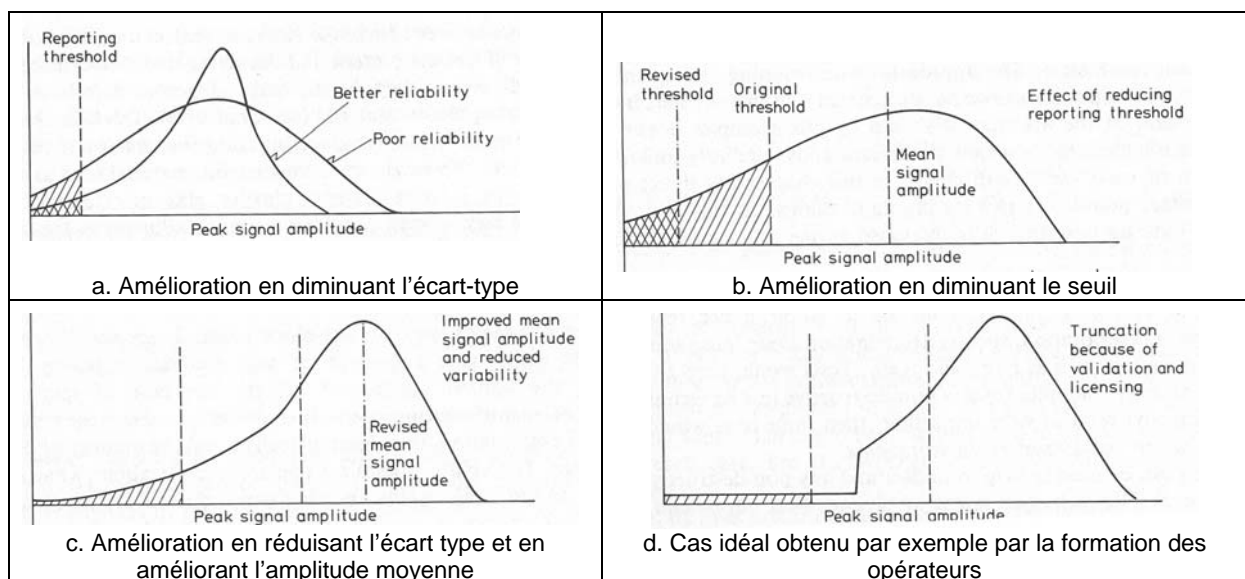


Figure 2. Calcul des probabilités à partir des modèles et de la définition du seuil.

LE BRUIT ET LA PROBABILITE DE DETECTION : LE ROLE DU SEUIL

Comme le montre la figure 2 précédente le choix du seuil de détection a une influence considérable sur les résultats du contrôle. Les courbes POD traduisent la variabilité de l'amplitude du signal ultrasonore qui ne dépend pas seulement de la taille du défaut mais de son orientation, de sa rugosité, de sa forme ainsi que de l'homogénéité, de l'anisotropie et de l'atténuation du matériau. L'intérêt d'avoir un seuil bas est de réduire les risques de laisser des défauts dans les composants, a contrario le risque de fausses alarmes et de faux rejets est augmenté.

Il est préférable de choisir un seuil pas trop bas tout en diminuant l'écart type des signaux mesurés et en augmentant la valeur moyenne du signal (figure 3c) [4]. Ceci oblige à des progrès dans la compréhension des phénomènes physiques mis en œuvre pour optimiser la procédure de contrôle.



(En ordonnée la fréquence d'apparition des défauts.

La surface hachurée représente les défauts non détectés.)

Figure 3. Rôle du seuil sur l'amélioration de la fiabilité du contrôle non destructif.

Avec un apprentissage qui supprime les erreurs des opérateurs Silk pense qu'il est possible de réduire drastiquement les risques de laisser un défaut dangereux. La sélection du seuil se fait essentiellement par le jugement de l'opérateur ou par une connaissance a priori.

Dans ce contexte des démarches de seuillage automatique sont aussi intéressantes à étudier. De plus une question se pose : peut-on seuiller sur d'autres paramètres que l'amplitude du signal ultrasonore ? Nous rappelons dans le paragraphe suivant deux méthodes développées au LCND pour répondre à ces questions.

DETECTION AUTOMATIQUE AU DESSUS DU NIVEAU DE BRUIT

Limite de détection en seuillage automatique sur des images bruitées simulées

Une méthode de seuillage automatique basée sur l'histogramme bidimensionnel de l'image (matrice de co-occurrence) a été développée au LCND [6]. Afin de tester les limites de cette méthode vis-à-vis du bruit des images simulées ont été utilisées. Comme la méthode de seuillage se base sur la distribution globale des amplitudes de pixels nous avons cherché à recréer un histogramme de même type que l'image réelle. Pour cela la distribution gaussienne généralisée a été employée [7]. La loi est donnée par:

$$p(i) = Ke^{-\left(\frac{|i|}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

Les valeurs de K, α et β ont été choisies pour approcher au mieux un histogramme réel. Pour chaque image BSCAN artificielle le maximum du bruit et son écart type sont calculés. Le signal de défaut est modélisé par une sinusoïde multipliée par une fonction de Hamming suivant les deux directions de l'image. Dans l'exemple donné en figure 6 plusieurs images ont été créées avec un défaut d'amplitude maximum à 214 et un bruit croissant (α varie de 5 à 1,2 et β de 1 à 0,37, K reste voisin de 0,1). Le seuil croît avec la valeur du bruit maximum jusqu'à une limite où la méthode de seuillage automatique ne donne plus de bons seuils [8].

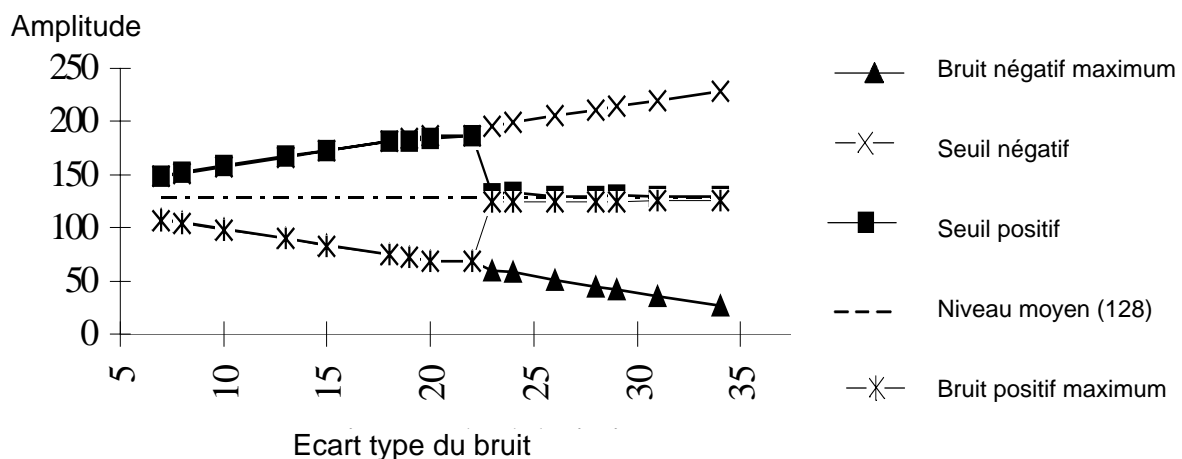


Figure 4. Evolution des seuils en fonction du bruit sur une image BSCAN de synthèse.

Sur ce type d'image le rapport de détection (Rapport Signal sur Bruit), défini comme la valeur maximale du défaut sur valeur maximale du bruit, est de 1,6. Cependant il ne s'agit pas de la limite minimale de détection pour chaque signal composant le défaut. Comme les valeurs

des seuils évoluent comme le bruit tant que la méthode reste valide, la méthode seuille très bien les signaux de plus faible rapport signal sur bruit liés au signal de défaut maximal qui lui doit atteindre dans cette simulation un RSB de 1,6. L'image correctement seuillée de plus faible RSB est donnée en figure 5. Le bruit de cette image a une distribution en niveaux d'amplitudes similaire aux images ultrasonores mais a le défaut de ne pas prendre en compte la continuité du bruit d'une image ultrasonore d'acier. La courbe échodynamique (5c) montre l'évolution de l'amplitude du défaut dans l'image. L'image est bien seuillée(5b) même pour des signaux de faible RSB individuel (figure 5d, défaut indiqué par la flèche). La méthode s'adapte pour un seuillage global sur un volume 3D de données ultrasonores.

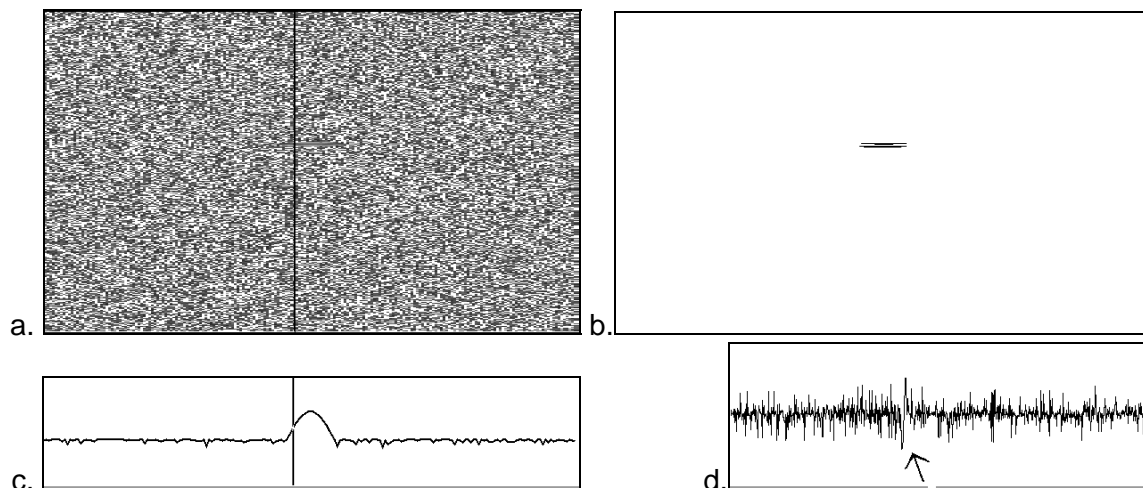


Figure 5. Résultats sur une image artificielle.

Détection automatique à partir de critères non basés sur la seule amplitude

Dans certains cas un seuil d'amplitude peut s'avérer trop juste à cause d'un rapport signal à bruit très faible (proche de un). Par exemple dans une étude menée au LCND sur la qualité inclusionnaire des aciers à roulements à l'aide d'ultrasons haute-fréquence (50-80 MHz) les courbes POD classiques montrent les limites d'un système à seuil pour les très petits défauts.

La figure 6 a été obtenue en combinant l'analyse d'images sur des surfaces polies à des profondeurs différentes et les cartes ultrasonores [9-10]. Elle montre que pour les petits défauts, la probabilité de détection ultrasonore même avec un transducteur haute fréquence est faible. D'autres solutions peuvent être imaginées si on choisit de définir un seuil à partir d'autres paramètres que l'amplitude.

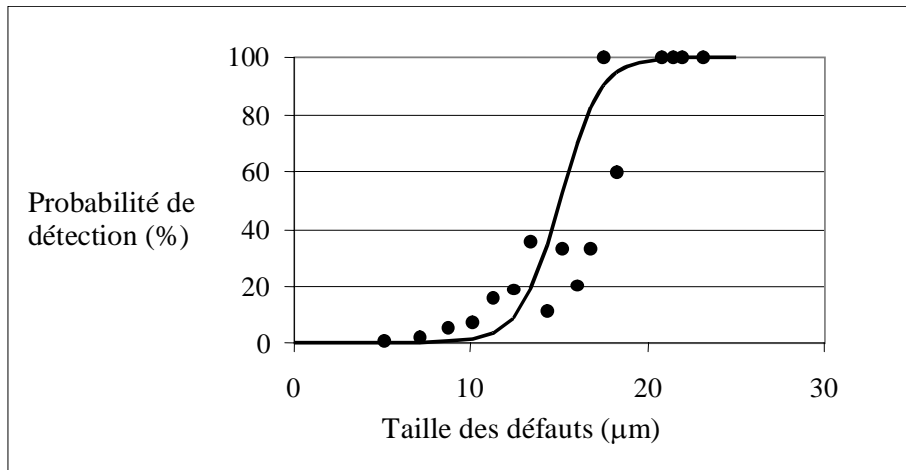


Figure 6. Variation de la probabilité de détection en fonction de la taille des défauts [10].

Une idée développée dans les travaux du LCND avec la méthode DTVG est de travailler sur des seuils liés à des propriétés qui ne soient pas liées à l'amplitude. La première propriété est le paramètre DT (Delta Temporel) qui mesure en quelque sorte la longueur du signal utile. La figure 7 représente par exemple un histogramme de la valeur du paramètre DT, la bimodalité de cet histogramme permet de définir un seuil de décision fiable et robuste adapté à une méthode de traitement automatique [9].

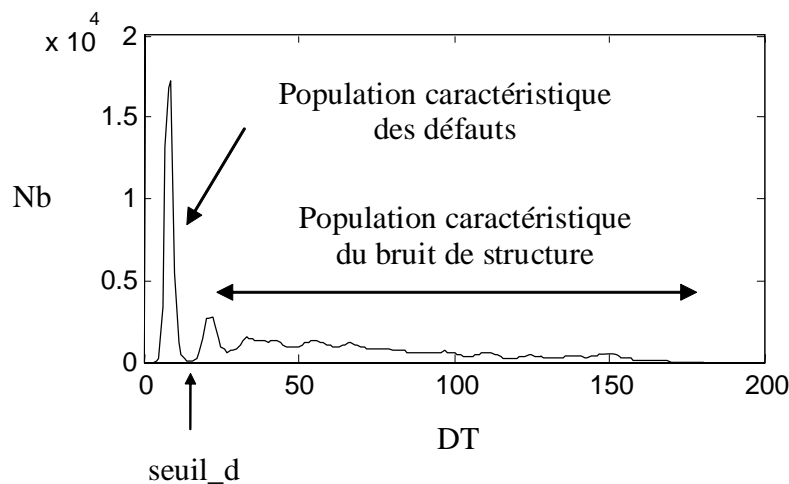


Figure 7. Histogramme du critère DT [9].

MODELISATION DU SIGNAL BRUITE

La modélisation du signal du bruit généré par le matériau s'est d'abord appuyée sur des descriptions statistiques. Un premier modèle capable de représenter le signal de bruit reçu par un transducteur lorsque celui-ci interroge un domaine particulier d'un échantillon a été proposé par Saniie [12]. Il s'agit d'un modèle de type convolution souvent utilisé auparavant pour représenter la réponse d'un défaut lorsqu'on connaît la réponse impulsionnelle d'un transducteur. Le modèle est proposé pour un matériau polycristallin isotrope insonifié en incidence normale par un transducteur droit travaillant en émission/réception. Dans ses travaux, Darmon a fait le point sur les modèles de bruit de structure et a proposé un générateur de bruit [13].

Les approches classiques considèrent que la taille du grain est petite devant la longueur d'onde (régime de diffusion de Rayleigh). Chaque grain est vu comme un diffuseur isolé dans un milieu environnant homogène. Il diffracte une certaine quantité d'énergie selon son volume et sa différence d'impédance acoustique moyenne avec le milieu qui l'entoure. Sa position spatiale dans l'échantillon se traduit par un retard temporel. Le faisceau incident ayant un diamètre donné et la durée d'observation étant fixée, le signal reçu correspond à l'inspection d'un volume V contenant un nombre fini de diffuseurs M . Au cours de sa propagation dans la pièce, l'onde incidente voit son énergie décroître suite à la diffusion. Ce comportement est pris en compte par une pondération temporelle de l'amplitude sous forme d'une exponentielle décroissante faisant intervenir le coefficient de diffusion intrinsèque au matériau. Le signal peut donc être exprimé par l'expression (2) suivante.

$$r(t) = e^{-\alpha_d \cdot C \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^M \sigma_{dk} \cdot e^{j\omega(t-\tau_k)} \quad (2)$$

La réponse impulsionnelle du traducteur est assimilée à un pulse large bande dont le spectre d'amplitude est de forme gaussienne. Si la position et le volume des diffuseurs sont supposés indépendants, leur loi de répartition est identique dans tout le volume V . En considérant le nombre de diffuseurs dans V comme grand, l'amplitude et la phase possèdent respectivement une distribution de Rayleigh et une distribution uniforme. L'enveloppe du signal réel de bruit possède alors une distribution de Rayleigh pondérée par une exponentielle décroissante faisant intervenir l'atténuation par diffusion. L'enveloppe du signal rétrodiffusé peut donc caractériser un matériau tout comme une mesure d'atténuation. Deux études ont été menées au LCND sur ce sujet. Tout d'abord une démonstration de la variabilité du bruit en fonction de l'incidence a été montrée [13], puis une seconde étude a souligné la sensibilité à l'endommagement thermique dans les bétons [14].

Des travaux sont en cours au sein du LCND avec des partenariats de thèses avec le CEA et EDF. Un premier travail est de chercher à mieux décrire l'interaction avec le réflecteur en modélisant notamment la réponse fréquentielle et en tenant compte aussi du type d'onde afin par exemple de pouvoir simuler le bruit lorsqu'il y a deux types d'ondes dans le matériau. L'objectif est de pouvoir améliorer le générateur de bruit du logiciel Civa en augmentant les possibilités de paramétrage tout en améliorant le sens physique des paramètres. Une des problématiques est de pouvoir relier le bruit avec l'atténuation [15]. Un second travail concerne la recherche d'une meilleure compréhension du réflecteur d'un point de vue micrographique. Les premiers résultats montrent l'influence de la taille des grains sur les valeurs d'atténuation et de bruit. Une approche théorique, basée sur une simulation aux éléments finis et une modélisation du matériau à l'échelle du grain, permet de simuler des valeurs d'atténuation du même ordre que celle mesurée expérimentalement [16].

CONCLUSION

Le bruit de structure est un champ de recherche prometteur pour les méthodes ultrasonores. Pouvoir modéliser ce bruit en fonction du matériau sera une étape déterminante dans les progrès des outils de simulation. Le défi à relever est encore grand avant de pouvoir relier bruit et atténuation dans un domaine de fréquences large pour des matériaux dont la description devient de plus en plus fine. Relever ce défi permettra de considérer alors le bruit comme une « empreinte digitale » de l'état du matériau.

Références

- [1] Lhémy A., Calmon P., Lecoeur-Taïbi I., Raillon R., Paradis L., Modelling tools for ultrasonic inspection of welds, NDT&E International, 2000, 33 : 499-513.
- [2] Becache E., Joly P., Tsogka C., An analysis of new mixed finite elements for the approximation of wave propagation problems, SIAM J Numer Anal, 37 (2000) 1053-84.
- [3] Rouhan R.A; Schoefs F, Labeyrie J., Approche probabiliste du contrôle non destructif des structures pétrolières pour l'évaluation de leur intégrité mécanique, (Probabilistic analysis of non-destructive testing of offshore structures for evaluating their mechanical integrity) , RFM- Revue-francaise-de-mécanique, 2000, 4 : p 235-241
- [4] Silk M.G., Stoneham A.M., Temple J.A.G., The reliability of non-destructive inspection. Assessing the assessment of structures under stress, Bristol, Adam Hilger, 1987
- [5] Thompson R.B., Margetan F. J., Use of elastodynamic theories in the stochastic description of the effects of microstructure on ultrasonic flaw and noise signals, Wave Motion, 2002, 36 : 347-365
- [6] Corneloup G., Moysan J., Magnin I.E., Bscan image segmentation by thresholding using cooccurrence matrix analysis, Pattern Recognition, 1996, Vol. 29, n°2, pp 281-296
- [7] Robini M.C., Magnin I.E., Benoit-Cattin H., Baskurt A., Two-Dimensional Ultrasonic Flaw Detection based on the Wavelet Packet Transform, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1997, 44: 1382-1394
- [8] Moysan J., Corneloup G., Guerault F., Roy O., Development of a new method for the inspection of 3D volume of ultrasonic data, Review of Progress in Quantitative Non Destructive Evaluation, Plenum Press, New York, 1995, Vol. 15, pp 875-882
- [9] Gueudré C., Moysan J., Merchi F., Henault E., Corneloup G., Traitement numérique d'images ultrasonores de haute fréquence pour la caractérisation inclusionnaire d'aciers à roulements, Matériaux et Techniques, n° 3-4, 2003, p 35-40
- [10] Auclair G., Daguier P., Appropriate techniques for internal cleanliness assessment, Bearing Steel Technology, ASTM STP 1419, J.M. Beswick, Eds., American Society for Testing Materials International, West Conshohocken, PA, 101-112, 2002
- [11] Saniie J., Wang T., Bilgutay N.M., Statistical evaluation backscattered ultrasonic grain signals, J. Acoust. Soc. Am., 1988, Vol. 84, pp 400-408
- [12] Darmon M., Etude de l'interaction ondes-rélecteurs en vue de la caractérisation et la différenciation de défauts métallurgiques, thèse de doctorat, Acoustique physique, Université Paris 7, 2002
- [13] Moysan J., Corneloup G., Ultrasounds Back-Scattering Measurements for New Anisotropy Indicator Construction, 15th World Conference on Non destructive Testing, 15-21 October, Roma, 2000
- [14] Chaix J.F., Garnier V. Corneloup G., Concrete damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves, NDT&E International, 2003, 36 : 461-469
- [15] Dorval V., Jenson F., Corneloup G., Moysan J., Modélisation du bruit et de l'atténuation ultrasonore à partir d'un modèle physique d'interaction, Actes congrès COFREND 2007, Toulouse
- [16] Feuilly N., Dupond O., Chassignole B., Moysan J., Corneloup G., Lien entre le bruit ultrasonore rétrodiffusé et la microstructure des matériaux polycristallins, Actes congrès COFREND 2007, Toulouse