



**HAL**  
open science

## Avancees sur la controlabilite ultrasonore des materiaux et des structures

G. Corneloup, C. Gueudre, Ma. Ploix, I. Lillamand, F. Baque

► **To cite this version:**

G. Corneloup, C. Gueudre, Ma. Ploix, I. Lillamand, F. Baque. Avancees sur la controlabilite ultrasonore des materiaux et des structures. Journee COFREND 2017, May 2017, Strasbourg, France. hal-02418144

**HAL Id: hal-02418144**

**<https://hal.science/hal-02418144>**

Submitted on 18 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# AVANCEES SUR LA CONTROLABILITE ULTRASONORE DES MATERIAUX ET DES STRUCTURES

**AUTEUR** CORNELOUP Gilles – Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France,

**COAUTEURS** GUEUDRE Cécile & PLOIX Marie-Aude & LILLAMAND Ivan  
Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France  
BAQUE François - CEA DEN

**CONFERENCIER** CORNELOUP Gilles

## RESUME

La contrôlabilité d'un matériau ou d'une structure peut être définie comme la « facilité » avec laquelle ils peuvent être examinés de façon non destructive, avec un diagnostic fiable. Nos travaux précédents introduisaient la notion de RC-CND, Règles de Conception issues du CND, permettant de faciliter le contrôle des structures. Par exemple, la forme d'un composant, son accessibilité, doivent être anticipées de manière différente si l'on prévoit un contrôle ultrasonore, ou radiographique. Nos recherches actuelles portent sur la nouvelle notion de RE-CND, Règles d'Elaboration issues du CND, qui seraient introduites en amont, dans les spécifications sidérurgiques, afin d'obtenir une qualité « CND » suffisante pour qu'un matériau soit contrôlable, notamment en termes d'atténuation des ondes et de bruit de structure. Les pièces non contrôlables en phase de fabrication (donc rebutées) seraient ainsi évitées, de même qu'en service après endommagement. Nous définissons d'abord la « qualité ultrasonore » d'un matériau (méthode CND la plus utilisée), qui s'appuie sur des mesures fiables des paramètres atténuation et vitesse des ondes, et bruit de structure. Pour cela, nous présentons la complexité de réalisation d'échantillons représentatifs de la microstructure (taille du grain, macles, précipités ...). La hiérarchisation de l'influence des paramètres permet d'avancer dans la compréhension des phénomènes, en vue d'une application industrielle.

## CONTEXTE

Le travail présenté concerne les premiers résultats d'une étude initiée conjointement par les acteurs des contrôles non destructifs et les concepteurs et fabricants (au sens large) de centrales électronucléaires à neutrons rapides, à savoir CEA, EDF, AREVA et le LMA/LCND, réunis en un Groupe de Travail Thématique (GTT).

Un premier constat a permis d'aboutir à la rédaction d'un document qui guide le concepteur pour faire ses choix, prendre les décisions qui tiennent compte de l'ensemble des CND qui seront réalisés au cours de la vie des composants. Par exemple, la forme d'un composant, son accessibilité, doivent être anticipées de manière différente si l'on prévoit un contrôle ultrasonore ou radiographique.

Nous avons intitulé cette démarche « RC-CND » : Recommandations de Conception qui facilitent les CND à venir. Le GTT a ainsi produit fin 2012 une révision de l'Annexe A20 du code RCC-MRx intitulée « Dispositions constructives associées aux visites de surveillance en exploitation », et il a considéré indispensable d'accompagner cette Annexe d'un document (les criteria) qui fournisse les fondements des recommandations, et qui permette de comprendre et justifier les préconisations et solutions apportées avec les moyens techniques de contrôles actuels.



Figure 1 : Le code RCC-MRx de 2012



Le CND et la contrôlabilité  
(support à l'établissement des criteria)

Ce travail a été présenté [1] aux Journées COFREND de Bordeaux (2014) en montrant que, vis-à-vis de la complexité des problèmes posés, le dialogue entre concepteur, fabricant et contrôleur semble être le seul moyen pour trouver le meilleur compromis entre conception et besoin d'inspection en service.

La rédaction des criteria a aussi montré qu'il n'existait pas de document de référence adapté à l'ensemble des explications nécessaires, même si, depuis, l'ouvrage sur « Le contrôle non destructif, et la contrôlabilité des matériaux et structures » [2], est paru et propose quelques réponses. Il y est ainsi démontré que la complexité potentielle des contrôles à venir impose à terme l'introduction (et définition, et validation) d'une notion de type « contrôlabilité des matériaux ». Il s'agirait de préciser la « qualité » du matériau pour qu'il soit contrôlable, c'est-à-dire que ses propriétés (mécaniques, physiques, etc...) permettent la mise en œuvre des différentes méthodes de CND potentielles, et la reproductibilité des mesures.

## DU RC-CND AU RE-CND

Nos recherches ont montré qu'il y avait également un besoin d'étudier, de définir et d'utiliser la notion de « RE-CND », Recommandations d'Elaboration qui facilitent les CND. Ces recommandations (qui pourraient devenir des Règles), seraient introduites en amont, dans les spécifications sidérurgiques, afin d'obtenir une qualité « CND » suffisante pour qu'un matériau soit « contrôlable », notion à définir plus précisément. Les pièces « non contrôlables » en phase de fabrication (donc rebutées), ainsi qu'en service, après endommagement, seraient ainsi évitées.

Cette démarche nous est venue suite à de nombreux travaux sur des matériaux « réels » dont les caractéristiques perturbaient le CND, notamment le contrôle ultrasonore (méthode

CND la plus utilisée). De manière générale, la propagation du faisceau ultrasonore devenait complexe, car on observait des déviations, des divisions, et une forte atténuation des ondes. Un « bruit de structure » apparaissait également, dégradant notamment l'opération de détection. L'origine de ce bruit est la réelle (micro)structure du matériau, qui n'est pas vue comme une structure homogène par l'onde CND interrogatrice.

Par exemple, dans la démarche RE-CND, nous postulons que ce bruit est totalement déterministe (il ne peut donc pas être éliminé par un simple moyennage temporel) car la (micro)structure ne se crée pas de façon aléatoire, mais dépend essentiellement des conditions de solidification (pour les matériaux métalliques), de mélange et de prise (pour les bétons), de mise en place des fibres et de polymérisation (pour les composites), etc. Cependant la loi de génération de ce bruit est souvent trop complexe pour être connue, et une approche statistique est quand même fréquemment utilisée.



Figure 2 : Exemples de textures d'acier inoxydable austénitique (centrifugé, moulé statique) photos EDF

Et comme on ne dispose pas actuellement de documents (normes, ...) adaptés à ces situations complexes (matériaux hétérogènes, ...), il est souvent simplement préconisé de réaliser des étalons « similaires ».

## ETAT DE L'ART

Les différents travaux menés au LMA/LCND nous ont permis d'identifier les paramètres « matériaux » influents (d'ordre 1) sur le contrôle par ultrasons. Ceux-ci dépendent notamment du rapport entre la longueur d'onde et la taille des hétérogénéités et semblent classiquement provenir de la taille des grains, et de la texture morphologique et/ou cristallographique. Ils ont permis de mettre au point le modèle MINA [3] qui prédit la microstructure d'une soudure multipasses d'acier inoxydable austénitique, réalisée à l'électrode enrobée.

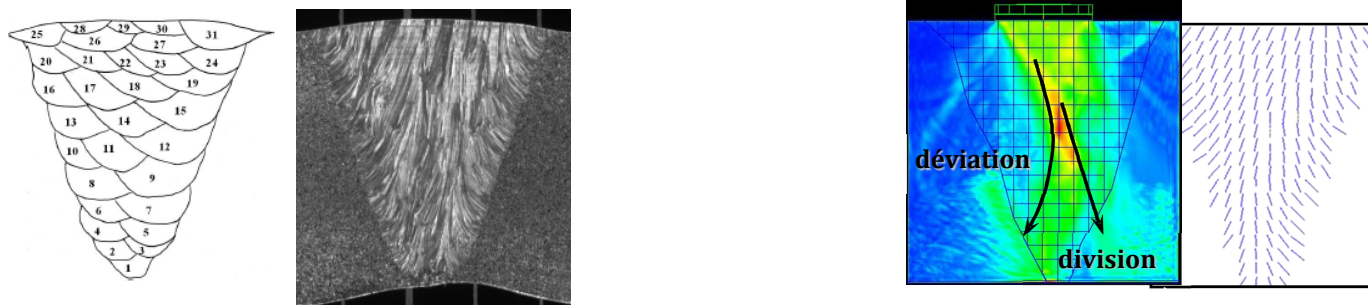


Figure 3 : Préviation via MINA de la microstructure, donc simulation ultrasonore possible

Suite à notre retour d'expérience, confortés par une bibliographie riche et dense [4-8], nous postulons que d'autres effets, considérés a priori d'ordre 2, comme les contraintes internes, les inclusions, les précipités aux joints de grains, les macles et les dislocations (notamment si elles polygonisent), peuvent avoir, dans certaines configurations, des effets non négligeables. L'aspect cumulatif des effets de ces paramètres peut notamment être important.

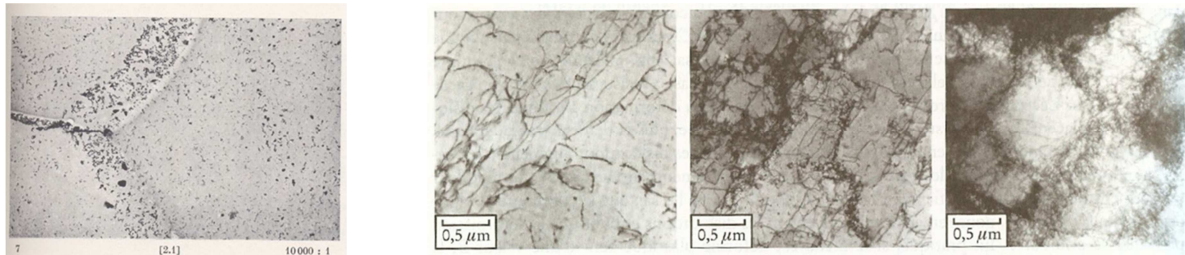


Figure 4 : Précipités aux joints de grains, et polygonisation de dislocations

L'étude de l'influence de ces paramètres permettra de proposer des solutions dans les cas complexes de contrôle.

## DEMARCHE ADOPTEE

On attend de ce travail, en regard d'une structure élaborée, une prévision de son potentiel de contrôlabilité ultrasonore. Et éventuellement, en cas de difficulté annoncée, des solutions de traitements mécaniques et/ou thermiques pour agir sur l'élaboration et donc sur cette structure.

Notre démarche va consister à analyser et comprendre les différents mécanismes d'interaction de l'onde ultrasonore avec la microstructure du matériau, en mesurant de façon indiscutable leurs effets. Il s'agit, dans un premier temps, de réaliser des étalons pour lesquels on a réussi à faire varier les paramètres un à un. Puis il faudra, dans un second temps, mesurer par des méthodes classiques mais robustes, les atténuations et vitesses des ondes, et les bruits associés.

Plusieurs traducteurs sont utilisés afin de faire varier la fréquence des ondes utilisées dans une gamme classique pour les CND (0,5 à 9MHz).

L'emploi de méthodes ultrasonores plus complexes sera envisagée si la compréhension de l'influence des paramètres en dépend.

## DEFINITION ET REALISATION DES PREMIERS ETALONS

Deux types de matériaux sont utilisés, des étalons « académiques » permettant d'aborder les problèmes un par un, et des étalons « industriels » représentatifs de la complexité à venir.

Ainsi des pièces en alliage de magnésium AM60 vont nous permettre de modifier, via des traitements thermiques (TTH) adaptés, le taux de précipités.

Des échantillons de cuivre pur, soumis à des essais de traction, vont nous permettre d'aborder l'influence de l'écroutissage, donc des dislocations, et des textures cristallographique et morphologique.

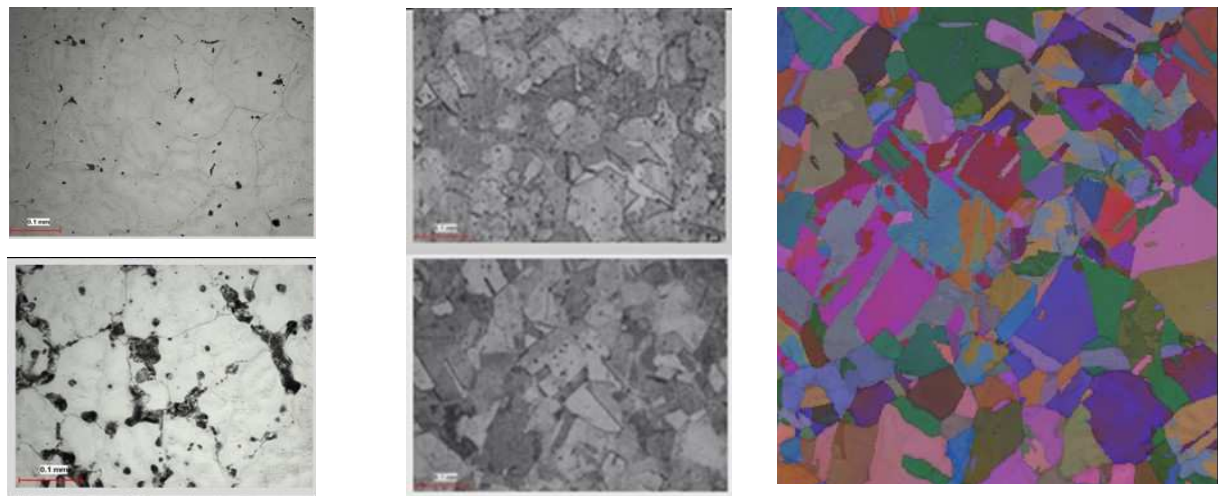


Figure 5 : Influence des précipités, et de l'écroutissage. Analyse EBSD associée

Des pièces en acier austénitique de type X10 CrNiMo 15-15 ont été prélevées sur un rond forgé, et ont subi différents traitements mécaniques (laminage, etc..) et/ou thermiques (hypertrempe, etc...) afin de mettre en évidence, et/ou d'accentuer, la taille des grains, et/ou le maillage, et/ou la densité de dislocations, et/ou le taux de précipités.

Etalon	Traitement(s)	Commentaires
1	Brut de réception	Taille de grain standard
2	Hypertempé	Taille de grain moyenne
3	Hypertempé	Taille de grain très élevée
4	Brut de réception + écroui 23% par laminage à froid	Maillage + dislocations
5	Brut de réception + écroui 62% par laminage à froid	Fort maillage + forte densité de dislocations
6	Brut de réception + écroui par laminage à froid + hypertempe	Taille de grain fine
7	Brut de réception + écroui par laminage à froid + vieilli	Précipitation fine de TiC

Tableau 1 : Etalons hypertempés, écrouis, et écrouis suivi d'un TTH

## PREMIERS RESULTATS

Les mesures de vitesse de groupe sont obtenues par chronométrie classique et les vitesses de phase sont déduites des valeurs spectrales. Les atténuations sont obtenues de façon classique en comparant les amplitudes spectrales des multiples échos réfléchis ou transmis. Comme les acquisitions ultrasonores sont réalisées en écho et en transmission, avec un balayage synchronisé des deux capteurs, sur toute la surface de l'échantillon, on obtient pour chaque pièce, chaque fréquence de traducteur, des cartographies en vitesse et en atténuation.

Les premiers résultats expérimentaux sur les différentes pièces (magnésium, cuivre, AIM1) montrent des résultats intéressants, qu'il est encore prématuré d'interpréter totalement. Il a été mis en évidence des confirmations de la bibliographie, notamment concernant la taille des grains, mais aussi des points particuliers, comme l'influence des dislocations. Par exemple, les résultats sur le cuivre montrent une augmentation de l'atténuation en fonction de la fréquence. Ce résultat, logique, est à confronter avec l'évolution de l'atténuation en fonction de l'érouissage (taux de dislocations en hausse), ainsi qu'avec la diminution de la vitesse de phase, dans les deux mêmes cas.

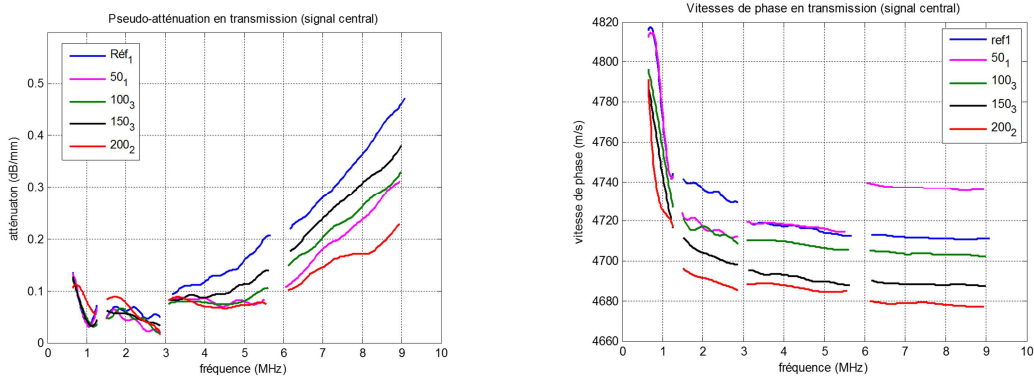
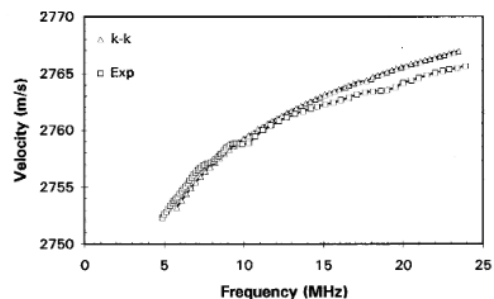
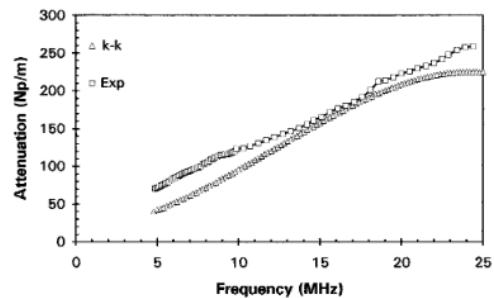
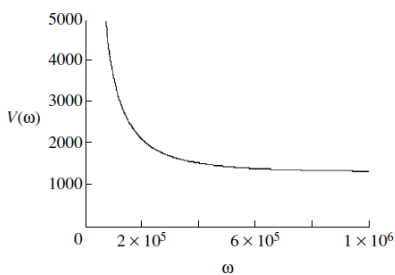


Figure 6 : Evolutions de l'atténuation et de la vitesse de phase, en fonction du taux de dislocations et de la fréquence

Cette évolution de la vitesse, en fonction du taux de dislocations, est relatée dans la bibliographie de deux manières différentes, voire apparemment contradictoires. Si la vitesse est supposée reliée directement au taux de dislocations, elle diminue [9][10], et si elle est reliée indirectement au mode d'atténuation (donc par absorption), elle augmente selon la dépendance de Kramers-Krönig [11] :



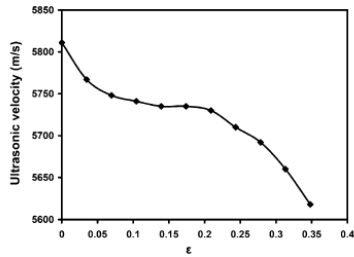


Figure 7 : Contradictions entre les résultats bibliographiques. A gauche, en haut [9], en bas [10], à droite [11]

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Chaque matériau possède des propriétés (physiques, mécaniques, ...) qui autorisent, ou interdisent l'emploi de tel ou tel technique CND, comme par exemple conducteur/isolant, magnétique/amagnétique, etc..., et qui limitent aussi le diagnostic, comme le bruit de structure ultrasonore selon la taille des grains, ou le bruit de structure électromagnétique (Courants de Foucault) selon le taux d'austénite (amagnétique) dans une structure ferritique.

La contrôlabilité du matériau (vis-à-vis d'une méthode de CND) pourrait ainsi être demandée dès l'approvisionnement des matières, auprès du « sidérurgiste », et le cas échéant, on pourrait lui proposer des solutions (comme des traitements mécaniques et/ou thermiques) pour améliorer cette contrôlabilité.

Nos travaux sont en cours et vont compléter les règles déjà édictées pour la conception [12]. Ils feront l'objet de communications et/ou publications dès que les résultats auront été validés, et permettront de proposer aux « élaborateurs » de matériaux et/ou de structures, des recommandations pour rendre les CND à venir plus faciles et performants.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Corneloup, G., Gueudré, C., Ploix MA, Augem JM, Sibilo J., Lebarbe T., Baqué F., Recommandations de Conception issues du CND (RCC-MRX), Congrès COFREND 2014, Bordeaux
- [2] Corneloup, G., Gueudré, C., Le contrôle Non Destructif et la contrôlabilité des matériaux et des structures, Editeur Presses Polytechniques Universitaires Romandes PPUR, 2016, 299 pages
- [3] Corneloup G., Gueudré C., Ploix M.-A., Bakhti S., Chassignole B., Prédiction de la description de l'anisotropie de soudures austénitiques multipasses pour leur contrôle ultrasonore, Congrès COFREND 2014, Bordeaux
- [4] Stanke F.E., Kino G.S., A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials, Journal of the Acoustical Society of America, 1984, Vol.75, No. 3, p. 665-681
- [5] Zeng F., et al., Ultrasonic attenuation due to grain boundary scattering in pure Niobium, J. Nondestruct.Eval, (2010), pp 93-103



- [6] Mutlu I., Oktay E., Ekinci S., Characterization of Microstructure of H13 Tool Steel Using Ultrasonic Measurements, Russian Journal of NDT, 2013, Vol.49, n°2, pp.112-120
- [7] Palanichamy P. et al., Microstructural characterization of fatigue and creep-fatigue damaged 316L(N) stainless steel through ultrasonic measurements, Procedia Engineering, 6th International Conference on Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Interaction, Elsevier, 55 (2013), pp. 154-159
- [8] Kumaran S.M., Evaluation of precipitation reaction in 2024 Al–Cu alloy through ultrasonic parameters, Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process., Vol.528, n°12 (2011), pp. 4152-4158.
- [9] Behjati P. et al., Ultrasonic characterization of strain hardening behavior in AISI 316L austenitic stainless steel, Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 2011, Vol.42A, n°3, pp.543-547
- [10] Erofeev V.I., Romashov V.P., Effect of dislocations on the dispersion and damping of ultrasound in solids, Technical Physics Letters, 2002, Vol.28, n°3, pp.218-220
- [11] Zellouf D. et al., Ultrasonic spectroscopy in polymeric materials. Application of the Kramers–Kronig relations, Journal of Applied Physics, 1996, Vol.80, n°5, pp.2728-2732
- [12] Inspection specifications leading to extended ASTRID Design rules, Int Conf. FR17, Yekaterinburg, Russie, IAEA-CN-245-277, F. Baqué, R. Marlier, JM. Augem, G. Corneloup, MA. Ploix, C. Gueudré