

MODÉLISATION DU CONTRÔLE ULTRASONORE DANS UNE STRUCTURE À GROS GRAINS MODELING OF ULTRASONIC TESTING IN A COARSE GRAIN STRUCTURE

F. Jenson⁽¹⁾, C. Poidevin⁽¹⁾ et L. Doudet⁽²⁾

⁽¹⁾ CEA-LIST - CEA Saclay, Bâtiment 611, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél : 01 69 08 63 84 - Fax : 01 69 08 75 97

⁽²⁾ EDF R&D MMC, 77 818 Moret sur Loing cedex
Tél : 01 60 73 60 09

Résumé

La structure métallurgique des composants en acier austénoferritique moulé-centrifugé rend leur contrôle par ultrasons très difficile. Plus particulièrement, la présence d'une macrostructure formée de grains de tailles centimétriques entraîne une forte dégradation du champ transmis et limite les performances des contrôles.

Une modélisation de cette macrostructure s'appuyant sur les diagrammes de Voronoï est proposée dans ce document. Cet outil mathématique fournit de bonnes représentations qualitatives de structures équiaxes ou colonnaires. En associant cette représentation de la macrostructure aux fonctionnalités existantes dans CIVA, notamment celles permettant de simuler le champ transmis dans une pièce hétérogène, nous montrons que certains phénomènes physiques à l'origine des difficultés de contrôle peuvent être modélisés. C'est le cas des effets de distorsion du champ en amplitude et en phase apparaissant lors de la propagation ultrasonore dans une structure à gros grains. Des comparaisons entre résultats de simulations et données expérimentales sont également présentées.

Abstract

The metallurgical structure of centrifugally cast austenitic-ferritic stainless steel components makes it difficult to ultrasonically inspect them. The centimeter-size grains forming the macrostructure strongly affect the transmitted field and thus limit inspection capabilities. A modeling of this macrostructure based on the Voronoï diagrams is proposed in this document. This mathematical tool provides good qualitative representations of equiaxed and columnar structures. By combining the Voronoï diagrams with existing CIVA functionalities such as the transmitted field computation in a heterogeneous medium, it is shown that some important physical phenomena at the source of inspection difficulties may be modeled. It is the case of field distortions in phase and amplitude occurring during the field propagation in a coarse grain structure. Comparisons of simulated results with experimental data are also proposed in this paper.

INTRODUCTION

Les aciers austénoferritiques moulés par centrifugation ont pour particularité de présenter une structure complexe constituée notamment de macrograins de tailles centimétriques pouvant être de formes équiaxes ou colonnaires. Cette structure entraîne une dégradation du faisceau ultrasonore liée à des phénomènes de distorsions en amplitude et en phase. Cette altération de la cohérence du faisceau est à l'origine de fortes limitations des performances des contrôles ultrasonores. Ainsi, l'amplitude des échos spéculaires provenant de défauts étendus tels que des entailles est sensiblement réduite. De plus, la macrostructure variant dans un même composant, un défaut détecté dans une certaine zone ne le sera plus dans une zone adjacente.

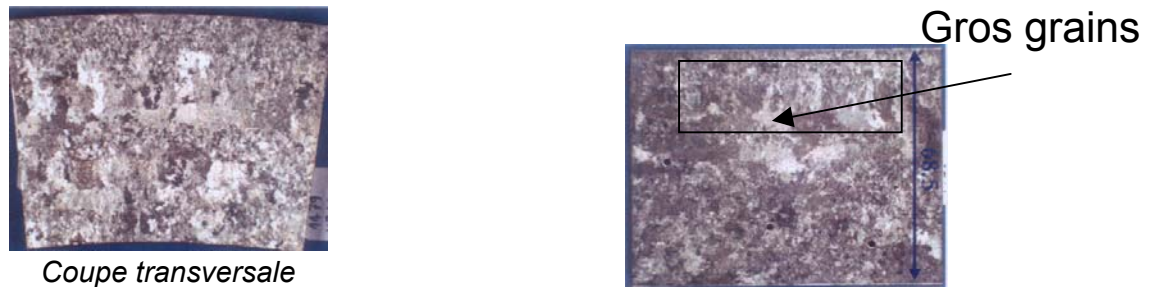


Figure 1 : Macrographies réalisées sur un coupon en acier moulé centrifugé. Des zones à très gros grains sont observables.

Des travaux ont été engagés dans le cadre d'une collaboration CEA/ EDF, afin de développer des outils au sein du logiciel d'expertise en CND CIVA qui permettent de simuler un contrôle dans un acier à gros grains. Ces travaux ont débuté par la réalisation d'essais expérimentaux dans des conditions volontairement simplifiées (mesure de l'écho de géométrie sur le fond de la pièce, cartographies du champ transmis) afin d'identifier au mieux les phénomènes physiques mis en jeu. Une approche ainsi que les outils qui lui sont associés ont ensuite été sélectionnés et implémentés dans le logiciel afin de simuler le plus fidèlement possible les phénomènes observés. L'approche retenue est basée sur l'utilisation d'un outil mathématique, les diagrammes de Voronoï, permettant de créer des structures synthétiques donnant une bonne représentation qualitative de la structure métallurgique à gros grains typiquement observée dans les aciers moulés centrifugés. Ces outils ont ensuite été testés par comparaison de résultats de simulations avec les données expérimentales acquises dans les configurations décrites précédemment. Ce document présente également une discussion détaillée des approximations faites dans le cadre de cette approche

CAMPAGNE D'ESSAIS DANS DES CONFIGURATIONS SIMPLIFIÉES

Des essais ont été réalisés sur un coupon en acier austénoferritique moulé-centrifugé dont la macrostructure est présentée figure 1. Leur objectif était de caractériser au mieux les phénomènes physiques mis en jeu lors de la propagation ultrasonore dans un acier à gros grains. Deux configurations ont été retenues : la mesure en L0 de l'écho de géométrie sur le fond du coupon et la réalisation de cartographies du champ transmis en L0, L30 et L45. Ces essais ont été réalisés en immersion avec un capteur grande ouverture, focalisé et de fréquence centrale 1 MHz. Dans le cas des cartographies, un récepteur formé d'un capteur plan surmonté d'un cône en plexiglas a également été utilisé.

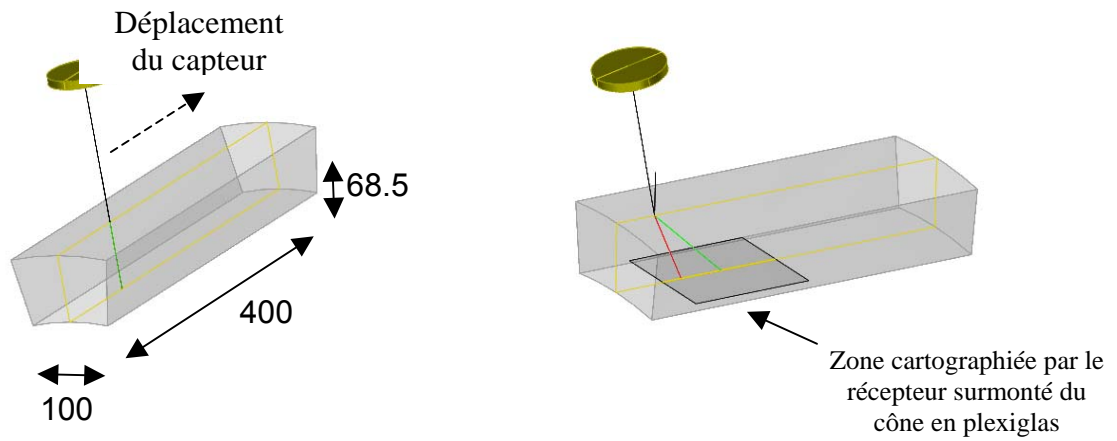


Figure 2 : Illustration des essais réalisés sur un coupon en acier moulé centrifugé. Le coupon a été extrait d'une pièce cylindrique dont le rayon externe vaut 417 mm.

Des cartographies réalisées dans une configuration en L45 et pour cinq différentes positions de l'émetteur sont présentées sur la figure ci-dessous. Une cartographie de référence a également été réalisée sur une pièce en acier ferritique supposée homogène et isotrope, et dont la géométrie est proche de celle du coupon en acier moulé centrifugé.

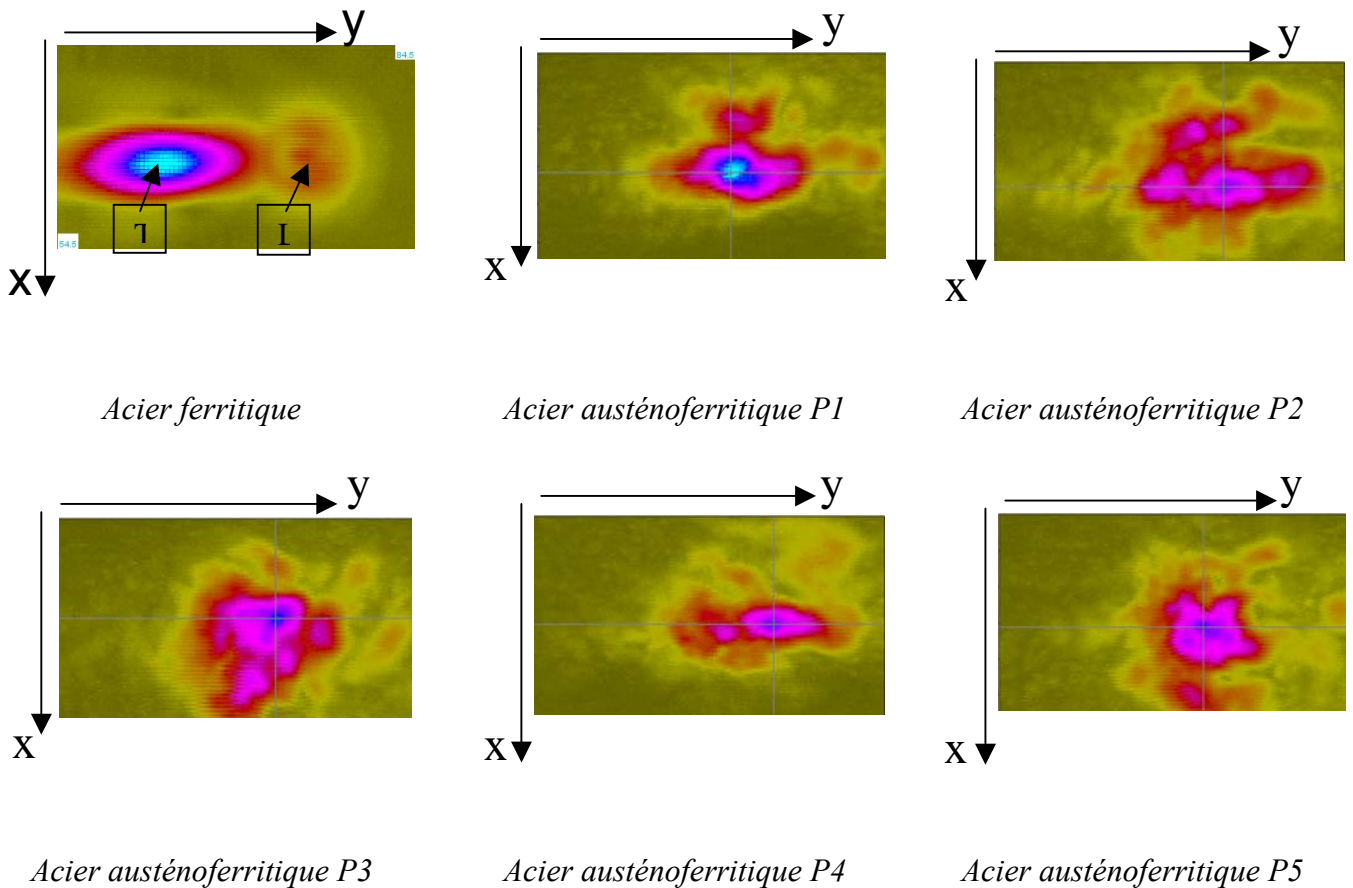


Figure 3 : Mesure du champ transmis en L45 au travers du coupon en acier moulé centrifugé pour cinq différentes positions de l'émetteur et également au travers d'une pièce homogène en acier ferritique d'épaisseur comparable. Les cartographies ont pour dimensions 55*100 mm².

Le champ transmis est fortement dégradé puisque la forme de la tache mesurée sur la pièce de référence en acier ferritique n'est plus reconnaissable sur les cartographies réalisées sur le coupon en acier moulé. Plus particulièrement, les composantes transverses du champ ne sont plus observables ce qui reflète leur forte atténuation au sein du coupon. La position du

maximum du champ transmis peut également varier de plusieurs millimètres d'une cartographie à l'autre.

L'écho de fond mesuré lors du balayage du traducteur selon la direction axiale de la maquette-est présenté sur la figure ci-dessous.

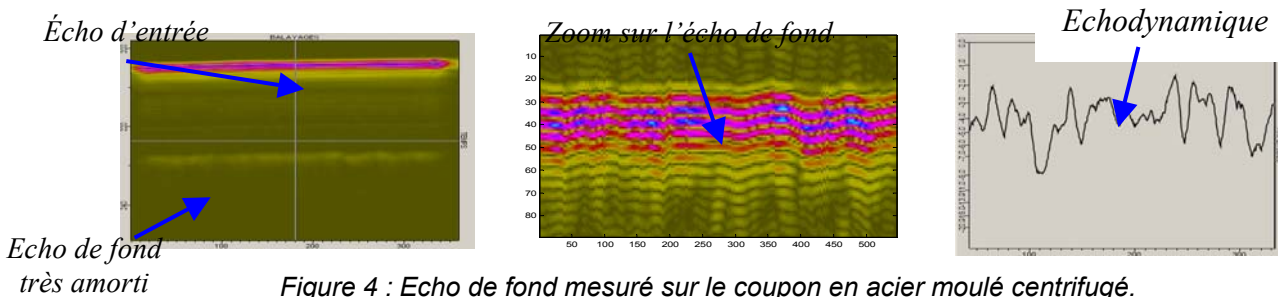


Figure 4 : Echo de fond mesuré sur le coupon en acier moulé centrifugé.

Des fluctuations de l'amplitude et du temps de vol de l'écho sont observables lors du déplacement du capteur. Ces résultats expérimentaux illustrent l'impact de cette structure métallurgique à gros grains typiquement observée dans un acier moulé centrifugé, sur la propagation des ultrasons. En effet, un macrograin ayant des propriétés élastiques anisotropes, une dispersion de la vitesse des ondes longitudinales (V_L) existe au sein du milieu et pour une direction de propagation fixée. Ces fluctuations de V_L sont dues aux aléas de l'orientation de la structure cristallographique interne des macrograins. Ainsi, les différentes portions du champ incident vont se propager à des vitesses différentes suivant l'orientation des macrograins qu'elles vont rencontrer sur leur parcours. Cette dispersion des vitesses va donc se traduire par une modulation en phase et en amplitude du champ transmis. Contrairement aux cartographies de champ, l'écho de géométrie sur le fond de la pièce peut être caractérisé par des paramètres quantitatifs qui sont simples à évaluer. Par exemple, l'écart-type des valeurs prises par l'amplitude de l'écho pour les différentes positions du capteur permet de caractériser les fluctuations de cette grandeur. De plus, l'évaluation de l'amplitude de l'écho de fond moyennée sur l'ensemble des positions du capteur permet de caractériser les pertes dues notamment à l'interaction du champ incident avec la structure complexe du matériau. Pour cela, il est nécessaire de mesurer l'écho de fond sur une pièce de géométrie équivalente, mais qui doit être homogène et isotrope afin de compenser au mieux les pertes dues à la divergence naturelle du faisceau.

IMPLEMENTATION DES DIAGRAMMES DE VORONOÏ DANS LE LOGICIEL CIVA

La structure particulière à gros grains des aciers moulés peut être représentée qualitativement en exploitant un outil mathématique appelé diagramme de Voronoï. Ces diagrammes permettent de partitionner l'espace en polyèdres convexes, les cellules de Voronoï. Une illustration d'un diagramme équiaxe est donnée sur la figure suivante.

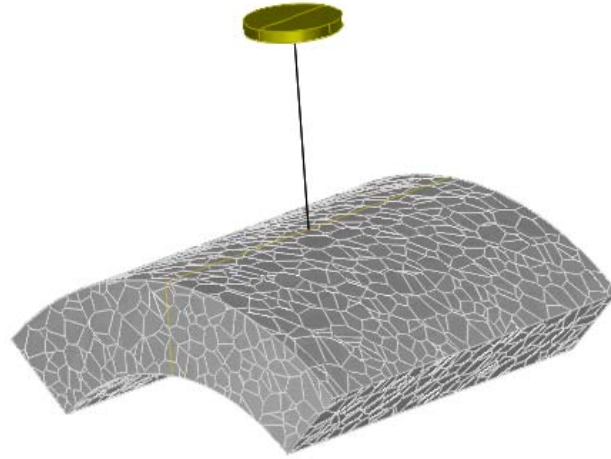


Figure 5 : Diagramme de Voronoï équiaxe dans une pièce de géométrie cylindrique.

Diverses fonctionnalités ont été implémentées dans le logiciel de simulation en CND CIVA. Celles-ci regroupent notamment le développement d'une interface homme-machine permettant de paramétrer les diagrammes et de définir les propriétés élastiques attribuées aux macrograins. Les propriétés élastiques ainsi que la densité de masse sont définies pour chaque cellule du diagramme de Voronoï. Dans l'approche adoptée ici, le choix a été fait d'attribuer aux cellules des propriétés élastiques isotropes. De plus, seule la vitesse longitudinale de l'onde varie (notée V_L). La vitesse de chaque cellule est générée aléatoirement suivant une distribution uniforme dont la moyenne et la largeur (contrôlée par le paramètre ΔV_L) sont définies pour chaque simulation.

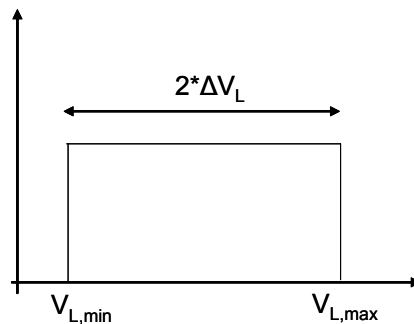


Figure 6 : Distribution de probabilité uniforme caractérisant la vitesse longitudinale aléatoire attribuée à chacune des cellules de Voronoï

Ces fonctionnalités permettent également de définir, outre des diagrammes équiaxes, des diagrammes dont la forme des cellules est de type colonnaire ou encore dont la taille moyenne des cellules varie au sein d'un coupon, comme c'est illustré sur la figure ci-dessous.

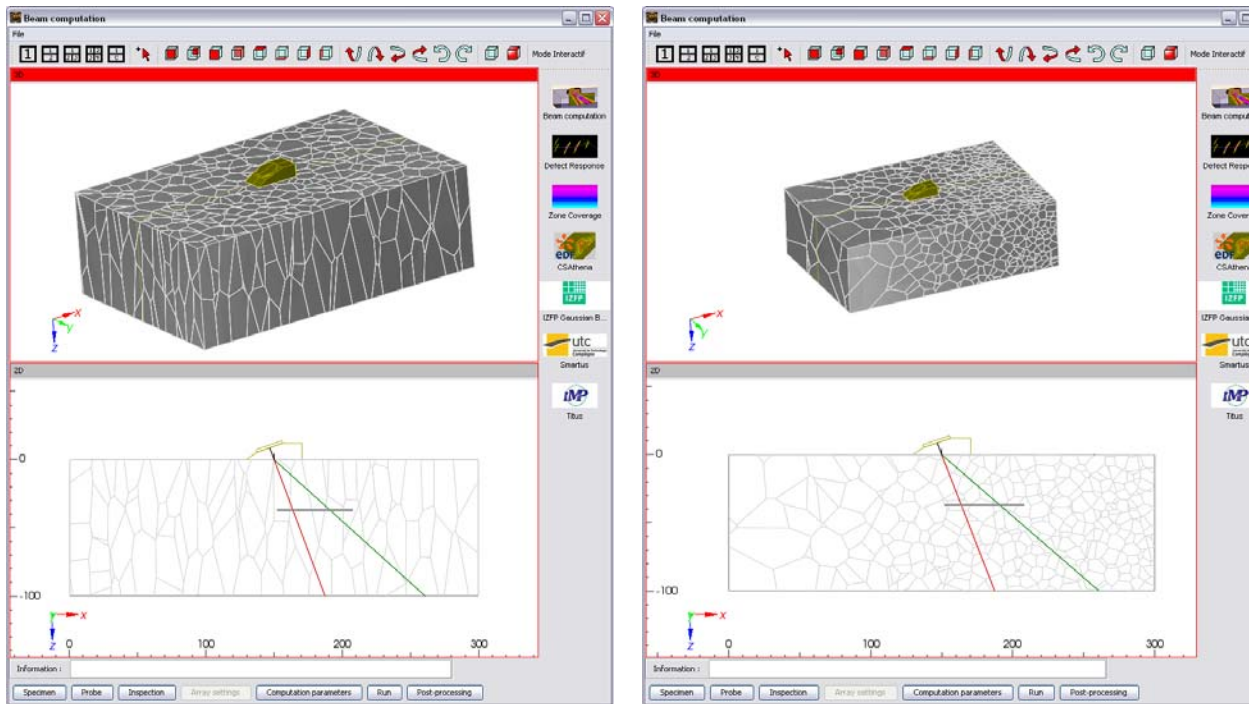


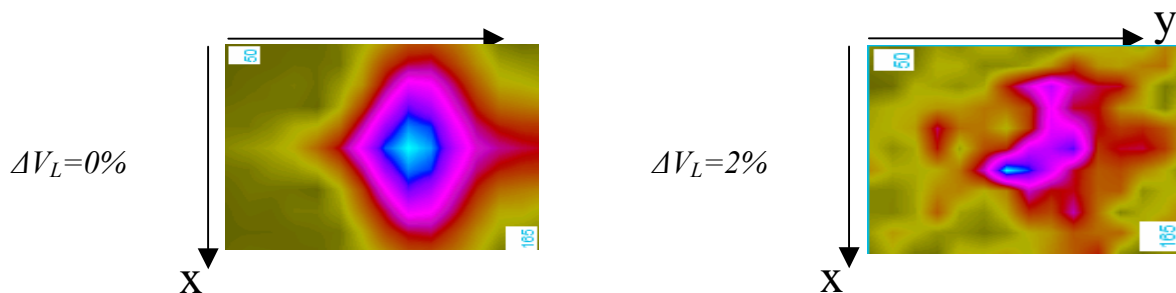
Figure 7 : Diagrammes de Voronoï obtenus par dilatation dans une direction de l'espace (à gauche) et par génération de la position des sites des cellules à partir d'une distribution non uniforme (à droite).

SIMULATION DES ESSAIS

Les configurations de contrôle décrites précédemment, *i.e.* la mesure de l'écho de géométrie sur le fond de la pièce et les cartographies du champ transmis, ont été simulées sur des pièces constituées d'une structure Voronoï. L'objectif ici est de reproduire, au moins qualitativement, les phénomènes de distorsion du champ observés expérimentalement.

Simulation du champ transmis au niveau du fond de la pièce

Des simulations du champ transmis ont été réalisées pour trois différents angles d'incidence : L0, L30 et L45. Le diamètre moyen des macrograins dans le coupon n'étant pas connu, il a été fixé arbitrairement à 11 mm. A ce diamètre moyen et étant données les dimensions du coupon, des diagrammes de Voronoï contenant 1000 cellules ont été calculés. La figure ci-dessous montre les résultats des simulations dans la configuration en L45 et pour différentes valeurs du paramètre ΔV_L .



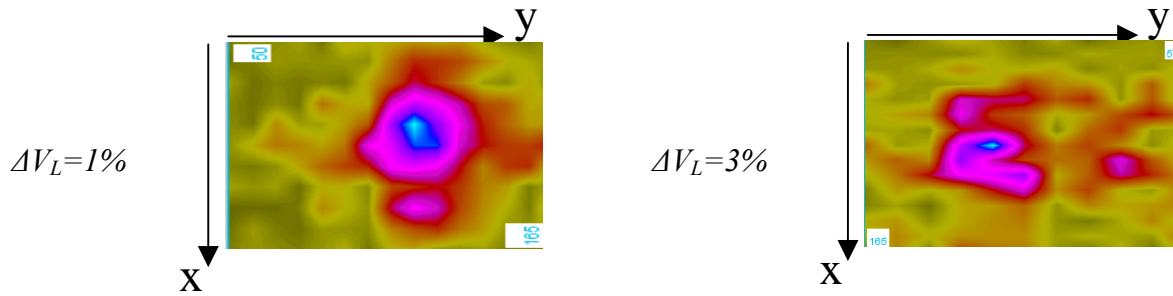


Figure 8 : Simulation du champ transmis en L45 pour différentes valeurs du paramètre ΔV_L . Les cartographies ont pour dimensions 55*100 mm².

Pour rappel, le paramètre ΔV_L traduit la dispersion des vitesses longitudinales dans la macrostructure. Une valeur nulle de ce paramètre correspond donc au cas d'une pièce homogène, même si celle-ci est construite en utilisant un diagramme de Voronoï contenant de nombreuses cellules. On observe dans ce cas particulier que le champ calculé dans la pièce n'est pas perturbé ce qui signifie que le bruit numérique qui aurait pu apparaître lors d'un calcul de champ à travers un très grand nombre de milieux (1000 cellules dans ce cas) reste ici très faible. La mesure du champ transmis au niveau du fond de la pièce donne une bonne illustration qualitative des effets de la macrostructure sur le champ. Les modulations en amplitude observées sur les cartographies expérimentales sont ici bien reproduites dès que les fluctuations de la vitesse longitudinale sont non nulles. Cependant, il est difficile de construire des paramètres quantitatifs à partir de ces mesures et donc de faire des comparaisons précises entre simulations et expériences. Comme nous allons le voir par la suite, il est plus aisé de caractériser l'écho de géométrie sur le fond de la pièce.

Simulation de l'écho de géométrie sur le fond de la pièce

L'écho de géométrie sur le fond de la pièce mesuré dans une configuration en L0 à 1 MHz a été simulé pour différentes valeurs du paramètre ΔV_L et de la taille moyenne des grains. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus pour $\Delta V_L=0, 1, 3$ et 7% et une taille moyenne des cellules de 12 mm.

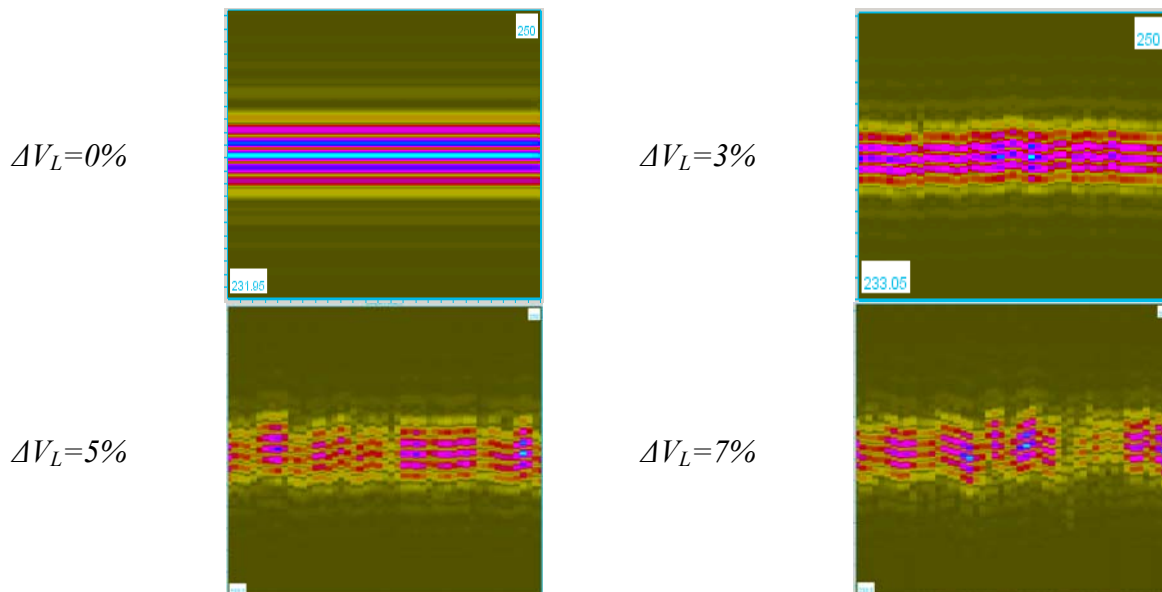


Figure 9 : Simulation de l'écho de fond dans une configuration en L0 à 1MHz.

De nouveau, la valeur $\Delta V_L=0\%$ correspond au cas d'une pièce homogène construite à partir d'un diagramme de Voronoï (de 1500 cellules dans ce cas) avec une vitesse de propagation

constante sur l'ensemble des cellules. On observe dans ce cas un écho parfaitement cohérent avec une absence totale de bruit numérique. Les fluctuations intercellulaires de la vitesse longitudinale augmentant, on observe une perte de cohérence de l'écho de fond. Celle-ci se traduit par des fluctuations aléatoires en amplitude et en temps de vol. Ces résultats reproduisent qualitativement ce qui était observé sur les données expérimentales.

ETUDE DE VARIATIONS SUR LES PARAMETRES DE LA SIMULATION

Plusieurs paramètres quantitatifs permettent de caractériser l'écho de fond. Le premier de ces paramètres est l'amplitude maximale de l'écho moyennée sur l'ensemble des positions du capteur. Cette amplitude moyenne est ensuite corrigée des effets de divergence du faisceau. Cette correction, approximative, est appliquée en mesurant l'écho de fond sur une pièce homogène non atténuante de géométrie équivalente à la pièce inspectée. Dans notre cas, il s'agit d'une pièce plane en acier ferritique d'une épaisseur de 65 mm. L'amplitude moyenne est ainsi donnée en dB et reflète les pertes dues à l'interaction du champ avec la structure constituant le matériau, par rapport à l'amplitude que l'on aurait obtenue dans un matériau homogène de même épaisseur. Le second paramètre traduit les fluctuations en amplitude de l'écho de fond. Il est obtenu en calculant l'écart-type des valeurs maximales de l'amplitude de l'écho mesurées pour l'ensemble des positions du capteur. L'écart-type est ensuite donnée en pourcentage de la valeur moyenne. Le tableau ci-dessous indique les valeurs déterminées à partir des mesures expérimentales.

Fréquence de la mesure	1 MHz
Amplitude moyenne de l'écho de fond	-20,7 dB
Variabilité de l'écho de fond	14,80%

Figure 10 : Estimations expérimentales des deux paramètres à partir de l'écho de fond mesuré à 1 MHz sur le coupon U746-4.

Les figures ci-dessous donnent les résultats d'une étude de variations où le paramètre ΔV_L et le rayon moyen des grains sont modifiés par pas afin d'en observer l'impact sur les grandeurs caractéristiques de l'écho de fond décrites précédemment.

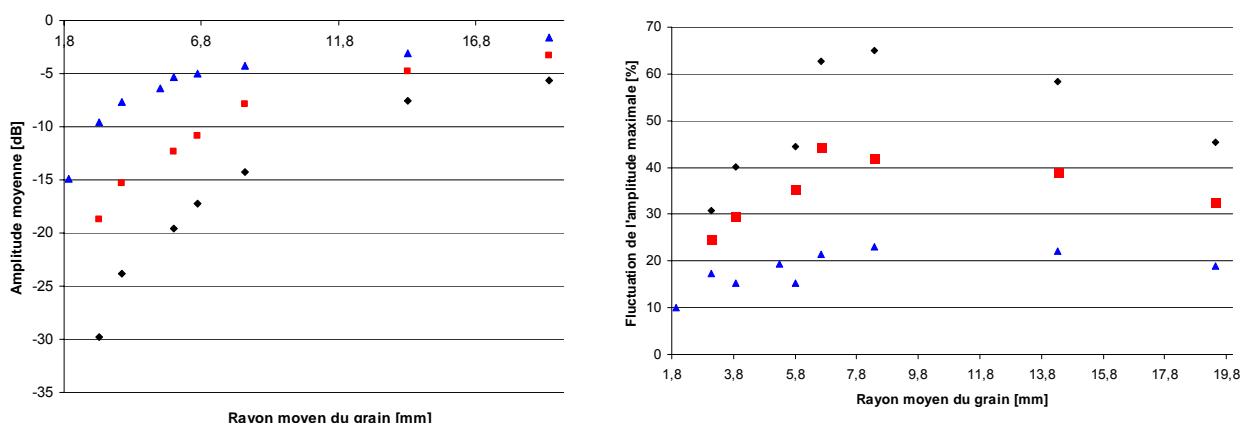


Figure 11 : Amplitude moyenne (à gauche) et fluctuations (à droite) de l'écho de fond pour trois différentes valeurs de ΔV_L (3%-en bleu, 5%-en rouge et 7%-en noir) et en fonction du rayon moyen des cellules de Voronoï.

On observe que l'amplitude moyenne de l'écho de fond décroît lorsque la taille moyenne des grains devient plus petite. Ce résultat est logique si on considère que plus les grains sont petits, plus le nombre d'interfaces à franchir par l'onde pour atteindre le fond de la pièce est

grand. Chaque franchissement d'interface occasionnant des pertes par réflexion, des grains plus petits se traduisent par des pertes plus importantes. Si ce raisonnement est probablement valable dans le domaine géométrique (lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus petite que la taille des grains), il ne l'est plus dans les domaines de Rayleigh et stochastique. On observe également que la perte d'amplitude augmente avec ΔV_L ce qui semble intuitif puisqu'une augmentation de ce paramètre doit refléter des propriétés anisotropes plus marquées au niveau d'un macro-grain et donc des pertes par réflexions aux interfaces entre les grains plus importantes. La figure ci-dessus montre également l'impact des paramètres de la simulation sur les fluctuations en amplitude de l'écho de fond. Dans ce cas, on observe une tendance « en cloche » avec l'augmentation de la taille des grains. Ce résultat est également assez intuitif puisque d'un côté les fluctuations doivent être nulles lorsque les grains deviennent très petits par rapport à la longueur d'onde et d'un autre côté, les fluctuations sont également nulles lorsque la taille des grains devient très grande et comparable à la taille du spécimen. On doit donc passer par un maximum localisé quelque part entre ces deux extrémités. Finalement, on observe que les valeurs expérimentales des deux paramètres, -20,7 dB pour l'amplitude moyenne de l'écho et 14,8 % pour les fluctuations autour de cette amplitude moyenne, peuvent être reproduites pour certaines valeurs des paramètres en entrée de la simulation. De ce point de vue, les résultats de la simulation sont raisonnables au regard des données expérimentales. Cependant, des données supplémentaires concernant les propriétés matérielles et les tailles réelles des macrograins présents dans le coupon sont nécessaires pour discuter plus précisément de la validité des valeurs attribuées aux paramètres en entrée du modèle (taille moyenne des cellules, diagramme équiaxe et valeur du paramètre ΔV_L).

CONCLUSION

De nouvelles fonctionnalités ont été implémentées au sein du logiciel CIVA. Elles permettent de définir un diagramme de Voronoï dans une pièce plane ou cylindrique et de calculer le champ transmis dans cette macrostructure ainsi que son interaction avec un défaut (le fond de la pièce est vu comme un défaut étendu lors d'un calcul d'écho de géométrie). Les diagrammes de Voronoï fournissent de bonnes représentations qualitatives de structures à gros grains telles que celles fréquemment rencontrées dans les aciers moulés austéno-ferritiques. Ces nouvelles fonctionnalités ont été exploitées afin de simuler des configurations expérimentales simplifiées pour lesquelles des acquisitions avaient été réalisées. Ces simulations ont permis de reproduire qualitativement la dégradation du champ observée sur les cartographies réalisées au niveau du fond de la pièce. Il a également été possible de reproduire les modulations en amplitude et en temps de vol visibles sur l'écho de géométrie provenant du fond de la pièce. Une étude de variation des paramètres en entrée de la simulation (taille moyenne des cellules et paramètre ΔV_L) a montré qu'il était possible de reproduire certaines propriétés intuitives de l'écho de fond. De plus, l'introduction de paramètres descriptifs pour cet écho (perte d'amplitude moyenne et fluctuations d'amplitude notamment) a permis une comparaison quantitative entre simulation et expérience. Outre des études complémentaires de validation prévues dans un avenir proche, ces nouvelles fonctionnalités offrent des perspectives très intéressantes, tant du point de vue de la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors de la propagation ultrasonore dans une structure à gros grains que du point de vue de l'optimisation des méthodes de contrôle par la simulation. Rappelons ici que certains phénomènes physiques intervenant lors d'un contrôle sur un acier moulé ne sont pas pris en compte dans cette approche. C'est notamment le cas du bruit de structure qui peut avoir un niveau élevé dans les aciers moulés austéno-ferritiques et ainsi gêner fortement la détection des défauts ou encore induire de fausses détections. Dans la perspective d'optimiser un contrôle ultrasonore par la simulation, la prise en compte de tels phénomènes en plus des effets de distorsions en amplitude et en phase du champ transmis est indispensable.