



Contribution à l'inspection d'échantillons de fabrication additive métallique par ondes de Rayleigh au moyen d'une méthode ultrasons-laser

Célia Millon

► To cite this version:

Célia Millon. Contribution à l'inspection d'échantillons de fabrication additive métallique par ondes de Rayleigh au moyen d'une méthode ultrasons-laser. Acoustique [physics.class-ph]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2018. Français. NNT : 2018CNAM1195 . tel-01962224

HAL Id: tel-01962224

<https://theses.hal.science/tel-01962224>

Submitted on 20 Dec 2018

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.

ÉCOLE DOCTORALE Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Laboratoire commun de métrologie LNE, Cnam

THÈSE

Présentée par :

Célia MILLON

Soutenance le : **27 novembre 2018**

Pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline : Chimie théorique, physique, analytique / **Spécialité** : Lasers, nanosciences et métrologie

Contribution à l'inspection d'échantillons de fabrication additive métallique par onde de Rayleigh au moyen d'une méthode ultrasons-laser

THÈSE dirigée par :

OBATON Anne-Françoise

Ingénieure de recherche, LNE, Cnam

RAPPORTEURS :

JENOT Frédéric

AUBRY Pascal

Professeur, CNRS, Université Polytechnique Hauts-de-France, IEMN

Directeur de recherche, CEA – DEN

JURY :

PEYRE Patrice

CHIGAREV Nikolay

VANHOYE Arnaud

CAMPAGNE Benjamin

FRECHARD Jonathan

Président du jury

Examineur

Co-encadrant

Membre invité

Membre invité

Directeur de recherche, CNRS, ENSAM, PIMM

Ingénieur de recherche, CNRS, Université du Maine, LAUM

Ingénieur de recherche, CEA - DRT

Ingénieur de recherche, Airbus-Group Nantes

Ingénieur R&D, BeAM

À la mémoire de mon grand-père, Marcel Hiesse,

et de mon ami, Medhi Hammadouche,

‘Success consists of going from failure to failure without loss of enthusiasm.’
Winston Churchill

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire Instrumentation et Capteur (LIC) au sein du Département Imagerie Simulation pour le Contrôle (DISC). Je remercie Mme Clarisse Poidevin, chef du DISC, de m'avoir accueilli au département et M. François Cartier, chef du LIC, pour ses encouragements, son optimisme et son pragmatisme qui m'ont été forts utiles pour tenir le cap. Cette thèse a été encadrée par Anne-Françoise Obaton qui m'a fait confiance pendant trois années pour mener à bien ce projet.

J'ai tenu à ce que ce travail soit rapporté par M. Pascal Aubry, chercheur dans le domaine de la fabrication additive et M. Frédéric Jenot, spécialisé en ultrasons-laser. Je les remercie pour les échanges scientifiques que nous avons pu avoir et le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à la relecture éclairée de mes travaux. Je remercie messieurs Patrice Peyre et Nikolay Chigarev d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour la pertinence de leur remarque. Je remercie Jonathan Frechard, pour l'ensemble des pièces qu'il m'a fournies, et pour toutes les explications qu'il a pu me fournir sur le procédé de déposition métallique par laser; ainsi que Benjamin Campagne pour sa précieuse expérience en ultrasons-laser.

Je remercie M. Arnaud Vanhoye, co-encadrant de cette thèse, pour m'avoir formée avec indulgence. Ensemble, nous avons initié les travaux en ultrasons-laser au laboratoire, ce qui n'a pas toujours été facile. Nous avons appris à nous connaître et à travailler ensemble; ce manuscrit est le fruit de notre collaboration dont nous avons patiemment dessiner les contours.

Je remercie M. Jérôme Laurent, qui a su suscité chez moi la curiosité nécessaire pour apporter les derniers résultats de cette thèse. Sans lui, ces travaux n'auraient pas eu la même teneur. Il sait réveiller les âmes de chercheurs comme personne et transmettre l'amour de ce métier si rigoureux mais définitivement grisant. J'espère qu'on pourra un jour partager une tarte aux myrtilles au col du Béal, en souvenir de nos rires et de nos échanges scientifiques du bureau 055.

Je remercie mes collègues du LIC pour leur soutien quotidien, dans mes états d'euphorie comme dans mes remises en question : Jean-Baptiste Boy, Laura Pucci, Guillaume Daniel, Gwenaël Toullelan, Natalia Sergeeva-Chollet, Frédéric Nozais, Sébastien Robert, Julien Albertini, David Roué, Thomas Desrez et Adrien Stolidi. Merci à Lucas Méraet et Corentin Ménard qui ont toujours répondu à mes questions les plus naïves avec beaucoup de bienveillance et je ne peux leur souhaiter qu'une thèse à la hauteur de leur gentillesse et de leur humilité. Je remercie également mes collègues thésards : Paul Zabbal, Olivier Jacquet, Andrii Kulakovskiy, Guillaume Cousin, Tom Druet, Bastien Clausse, Olivier Andreau pour nos échanges scientifiques et nos levés de coude.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mes relecteurs : Lucile Mery, Sylvie Métrope, Tilda Passat, Anne Teyssandier, Corentin Ménard, François Cartier, Olivier Andreau, Jean-Paul Garandet et mon père.

Ma seconde famille, la coloc' : Mathilde Cormier, Delphine Lapouge, Baptiste Launai, Virgile Berson, Simon Bastide, Arnaud Balestro, Aymeric Léonard, Luc Lecade et Jonathan Roussel, a été présente quotidiennement pour éponger mes déceptions, refaire le monde et partager mes rires. Je n'oublierai pas nos nombreuses parties d'échecs, et tous les repas que vous m'avez préparés pendant les semaines de rédaction ! Cette famille a le pouvoir de calmer les esprits les plus tourmentés, et de conférer la force utile aux plus grands combats. Du plus profond de moi : merci.

Je tiens tout particulièrement à ce paragraphe, dédié à ceux qui ont commencé par partager les bancs de la fac avec moi : Mehdi Hammadouche, Tristan Gouriou, Lilian Chambragne, Nazim Khelia, Pierre Dosmas, Mohamed Al Mufti ; puis, qui, au fil des années, sont devenus mes amis et mes confidents. Mehdi n'est plus là pour lire tout ça et j'ai une pensée émue pour lui aujourd'hui.

Merci à mes amis de m'avoir soutenu durant cette thèse et plus particulièrement Tilda Passat et Laura Dijols.

Mes derniers remerciements et non des moindres, sont pour ma famille. Merci à ma mère, Sylvie Millon, pour les milles et un mots qui apaisent mes tempêtes et m'a donné la force de finir cette thèse. Merci à mon père, Pierre Millon, d'avoir financé mes études et de me rappeler jour après jour qu'il faut laisser s'exprimer nos bribes de folie. Je n'oublie pas Flore, ma petite sœur, qui sait, comme personne, balayer mes doutes d'un grand revers d'humour. Merci à Dominique et Rémi Roche, qui m'ont appris que la simplicité et l'authenticité étaient les clés des relations humaines les plus enrichissantes.

Enfin, j'ai une dernière pensée lorsque j'écris cette page, pour mon grand-père avec lequel j'ai usé les parquets des Arts et Métiers, du Palais de la découverte, et du laboratoire de Marie Curie. J'étais une petite fille lorsqu'il m'a dit qu'il fallait travailler pour accomplir ses rêves. Il a cru en moi comme personne d'autre ne l'avait fait. Aujourd'hui, j'ai accompli un de mes rêves: celui de ne jamais cesser d'apprendre et d'être curieuse.

Table des matières

Remerciements.....	7
Introduction générale.....	2
1. Contrôles <i>in situ</i> du procédé de déposition métallique par laser (DML) : limites et besoins	7
1.1. Introduction	7
1.2. Technologie du procédé de fabrication additive par déposition métallique par laser (DML).....	7
1.2.1. Caractéristiques du bain de fusion induit par DML	8
1.2.2. Caractéristiques de la microstructure	8
1.3. Principaux facteurs à l'origine de défauts en DML	11
1.3.1. Qualité des poudres métalliques.....	11
1.3.2. Stratégie de fabrication.....	12
1.3.3. Gaz de transport des poudres et gaz dans l'enceinte de fabrication	12
1.4. Instabilités des paramètres et défauts en DML.....	13
1.4.1. Influence des paramètres opératoires sur le bain de fusion et principaux défauts engendrés	13
1.4.2. Variation de la microstructure	14
1.4.3. Variation des contraintes résiduelles	15
1.4.4. Variation de la dureté	15
1.4.5. Instabilités géométriques des cordons	15
1.4.6. Principaux défauts rencontrés en DML	16
1.5. Contrôles <i>in situ</i> du procédé de fabrication additive par DML.....	18
1.5.1. Environnement	18
1.5.2. Bain de fusion	21
1.5.3. Effets thermiques et contrôle de la microstructure	23
1.5.4. Porosités et fissurations	25
1.6. Conclusion.....	28
2. Inspection de défauts par onde de Rayleigh engendrée par ultrasons-laser (UL) : état de l'art	30
2.1. Introduction	30
2.2. Rappels sur la propagation des ondes élastiques	30
2.2.1. Propagation de l'onde de Rayleigh	30
2.2.2. Interactions ondes-matières.....	32
2.2.3. Mises en œuvre d'un contrôle ultrasonore	33
2.3. Principe d'un contrôle ultrasonore.....	34
2.3.1. Génération d'onde élastique par effet photo-thermique	35
2.3.2. Directivités de l'onde Rayleigh.....	37
2.3.3. Contenu spectral de l'onde de Rayleigh.....	39
2.3.4. Détection des ondes engendrées par laser impulsif.....	40
2.3.5. Configuration de contrôle.....	41
2.4. Contrôles non destructifs par onde de Rayleigh induite par laser.....	42
2.4.1. Détection et caractérisation des défauts surfaciques	43
2.4.2. Détection et caractérisation des défauts sub-surfaciques.....	48
2.5. Conclusion.....	52
3. Optimisation de la génération de l'onde de Rayleigh	55
3.1. Introduction	55
3.2. Limites de détection du dispositif ultrasons-laser.....	55
3.2.1. Caractéristiques du dispositif TECNAR	55
3.2.2. Contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh	56
3.2.3. Inspection de défauts usinés et évaluation des limites de détection du dispositif TECNAR.....	60
3.3. Optimisation de la bande spectrale et effet des dimensions de la tâche focale	62

3.3.1. Modèle heuristique	62
3.3.2. Validation numérique	62
3.3.3. Validation expérimentale	63
3.4. Amélioration du dispositif optique pour la génération d'onde de Rayleigh haute fréquence	69
3.4.1. Génération	69
3.4.2. Détection	71
3.4.3. Validation expérimentale du dispositif	72
3.5. Conclusion	75
4. Détection et caractérisation de défauts usinés par le dispositif optimisé	78
4.1. Introduction	78
4.2. Évaluation des performances de détection du nouveau dispositif expérimental	78
4.2.1. Configuration génération-détection fixes	79
4.2.2. Caractérisation d'un échantillon issu du procédé DML	79
4.3. Détection des trous génératrice et entailles	82
4.3.1. Sur surface polie	83
4.3.2. Sur surface rugueuse	87
4.4. Caractérisation des défauts	91
4.4.1. Domaine temporel	92
4.4.2. Domaine spectral	94
4.5. Conclusion	102
5. Détection de porosités réelles par méthodes de corrélation	104
5.1. Introduction	104
5.2. Échantillons comportant des défauts réels	105
5.2.1. Variations du « hatch » dans des pièces en acier 316L	105
5.2.2. Dégradation de la qualité de la poudre dans des pièces en inconel 718	107
5.2.3. Diffraction de l'onde de Rayleigh par les rugosités de surface et les porosités sub-surfaciques	108
5.3. Degré de ressemblance	110
5.3.1. Échantillons en acier 316L	111
5.3.2. Échantillons en inconel 718	113
5.4. Caractérisation du taux de porosités par Analyse en Composantes Principales (ACP)	115
5.4.1. Principe de l'ACP	115
5.4.2. ACP dans l'acier 316L	117
5.4.3. ACP dans l'inconel 718	122
5.5. Conclusion	127
Conclusion générale	131
Références bibliographiques	134
Annexes	I
Annexe A Micrographies des échantillons fabriqués par le procédé DML	II
A. Échantillons en acier 316L	II
B. Échantillons en inconel 718	IV
Annexe B Études exploratoires sur les effets de la rugosité et de la porosité sur l'onde de Rayleigh	VII
A. Atténuation de l'onde de Rayleigh engendrée par les rugosités de surface	VII
B. Vitesse des ondes de Rayleigh en fonction du taux de porosités	IX

Résumé

L'objectif de cette thèse est de contribuer à la détection de défauts dans des pièces réalisées par le procédé de fabrication additive de déposition métallique par laser (DML), en vue d'un contrôle *in situ*. Le contrôle *in situ* envisagé porte sur les derniers cordons déposés par le procédé (acier 316L et Inconel 718), pour lesquels des porosités et fissures peuvent apparaître ($\sim 100 \mu\text{m}$). L'inspection est effectuée par méthode ultrasons-laser (UL), c'est-à-dire tout optique et non intrusive (régime thermoélastique). Le procédé DML engendre une microstructure dite à gros grains et des rugosités de surface qui rendent le contrôle ultrasonore plus délicat. En effet, ces caractéristiques microstructurales provoquent la diffusion des ondes élastiques dans le milieu. Ce travail de thèse participe donc à la compréhension de ces phénomènes et de leurs influences pour mieux détecter des défauts subsurfaciques dont les dimensions sont proches des longueurs d'ondes acoustiques. Ainsi, l'inspection en surface a été optimisée par la conception d'un montage optique, permettant de favoriser la génération de l'onde de Rayleigh, par une ligne source laser fine ($\sim 200 \mu\text{m}$) et présentant des fronts raides. Ainsi, le contenu spectral de l'onde a été augmenté vers les hautes fréquences, c'est-à-dire jusqu'à 10 MHz. La longueur d'onde de Rayleigh (λ_R) a pu être ainsi diminuée à une valeur proche de celle des défauts recherchés, de l'ordre de $700 \mu\text{m}$. Ensuite, les limites de ce dispositif ont été mises en évidence sur des pièces fabriquées par le procédé DML. Ces pièces comportent des défauts usinés, des entailles et des trous génératrice dont les dimensions sont inférieures à λ_R , leur surfaces est rugueuse (diffraction multiple de l'onde de Rayleigh). Puis, l'inspection de défauts réels subsurfaciques est étudiée. Ces défauts sont créés soit par une variation d'un des paramètres du procédé, le hatch (distance inter-cordon), ou encore par l'utilisation d'une poudre métallique de mauvaise qualité. En dégradant volontairement ces paramètres, les échantillons présentent alors des taux de porosités (Φ) pouvant s'étendre de 0,5% à 10%. Enfin, deux méthodes de corrélations ont été exploitées pour discriminer les taux de porosités : à travers l'étude du degré de ressemblance et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La première méthode, simple et rapide à mettre en œuvre, ne permet cependant pas de distinguer les taux de porosités. En revanche, l'ACP indique qu'il est possible de discriminer tous les défauts. Pour finir, des tests préliminaires ont été effectués afin de montrer qu'il est possible d'effectuer des mesures par méthode UL sur surface rugueuse, tout en conservant un bon rapport signal sur bruit, et ce sans moyenner les signaux, au cours d'un déplacement robotisé.

Mots clés : ultrasons-laser, fabrication additive, onde de Rayleigh, rugosité, porosités

Abstract

This thesis contributes to the detection of flaws in laser metal deposition (LMD) additive manufacturing process samples towards an *in situ* control of the process. The *in situ* control foreseen concerns the last layers deposited by the process (316L and Inconel 718 steel) for which porosities and cracks may appear ($\sim 100 \mu\text{m}$). The inspection is performed by laser-ultrasonics (LU), an all-optical and non-invasive technic. Experiments are conducted in thermoelastic mode. The LMD process gives rise to coarse grain microstructure and surface roughness, which make the control tricky. Indeed, those characteristics generate scattering elastic waves. Thus, this work contributes to the better comprehension of those phenomena and their effects of the detection on subsurface flaws which dimensions are close to the acoustic wavelength. Surface inspection has been optimized by designing an optical setup, improving the Rayleigh wave generation by using a thin laser line source ($\sim 200 \mu\text{m}$). Hence, the spectral content has been increased until it reaches 10 MHz, that is to say a wavelength equals to $700 \mu\text{m}$ (λ_R). Then, the limits have been brought out through the inspection of LMD samples. Those samples include sided drilled holes and notches which dimensions are less than λ_R , on rough surface (multiple scattering of Rayleigh wave). Moreover, real subsurface flaws inspections have been studied. The flaws have been created by the instability of one of the process parameter: the hatch (distance between each layer), or by a bad powder quality. By intentionally deteriorating those parameters, the samples, then, have porosity rate (Φ) with ranging from 0.5% to 10%. Finally, two correlation methods have been studied to discriminate porosity rate: through the study of the normalized cross correlation function and by Principal Component Analysis (PCA). The first method, simple and fast to implement, does not allow distinguishing the porosity rates. Nevertheless, the PCA indicates that it is possible to discriminate all the flaws. Finally, preliminary tests have been carried out to show that LU measurements is feasible on rough surfaces, while keeping a good signal-to-noise ratio, without averaging, during an automated displacement.

Keywords : laser ultrasonics, additive manufacturing, Rayleigh wave, roughness, porosities

Introduction générale

Introduction générale

Contexte et objectifs

Depuis les années 90, les procédés de fabrication additive métallique permettent d'élaborer une pièce par ajouts successifs de matière à partir d'un modèle numérique. Ils sont en plein essor et permettent de fabriquer des pièces complexes, certaines irréalisables par des méthodes de fabrication conventionnelles. La technologie de Dépôt Métallique par Laser (DML) est un de ces procédés ; elle consiste à générer un bain de métal liquide par fusion laser, puis de projeter un jet de poudre métallique en direction de ce bain. La solidification suite au refroidissement du bain crée un cordon de matière.

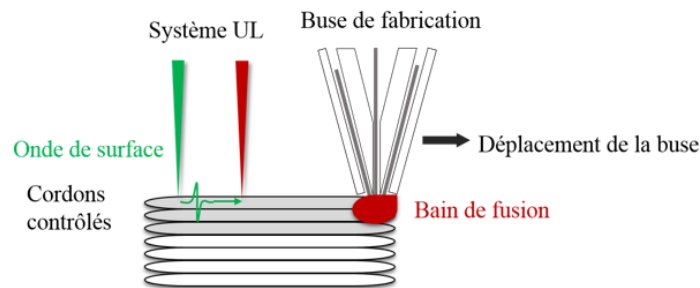
Deux des principaux enjeux de la fabrication additive sont d'assurer la reproductibilité des pièces et d'en garantir les propriétés mécaniques en sortie de fabrication. La technologie est multi-physique ; elle met en jeu des phénomènes thermiques, fluidiques et chimiques complexes gouvernés par des paramètres opératoires tels que le diamètre du faisceau ou la puissance du laser. Leurs réglages sont inter-dépendants et doivent être finement ajustés et optimisés pour assurer la maîtrise de la structure finale. De plus, les facteurs pouvant influencer sur les propriétés mécaniques ou fonctionnelles finales de la pièce sont multiples : contraintes résiduelles, microstructure, formations de porosités, de fissurations. Ainsi, il est difficile de garantir l'état final de la pièce. Ce constat constitue un verrou technologique pour le développement du procédé DML au sein de l'industrie pour des raisons de fiabilité du procédé mais également pour des raisons économiques. Le contrôle *in situ*, c'est-à-dire en cours de fabrication, contribue d'une part à la compréhension du procédé, et d'autre part, à corriger la fabrication lorsque la qualité de la pièce n'est pas optimale.

Les contrôles *in situ* se sont d'abord portés sur le bain de fusion à l'aide de caméras optiques et thermiques. Ils ont permis d'approfondir la compréhension des liens entre les défauts et les paramètres machines et également d'initier les premières boucles de rétroaction. Mais le contrôle du bain de fusion ne suffit pas pour assurer l'intégrité finale de la pièce, puisque des phénomènes à l'origine de défauts ne sont pas détectables au niveau du bain. Il reste encore des inconnues relatives à la formation des défauts de type porosités et fissurations qui peuvent être engendrés lors du refroidissement de la pièce. Le développement d'autres techniques d'inspection s'avère nécessaire pour compléter le contrôle du bain de fusion.

Le contrôle non destructif (CND) est défini comme un ensemble de méthodes permettant d'inspecter une partie d'un matériau ou d'un système sans l'altérer. Il regroupe différentes techniques utilisant les rayons X, les courants de Foucault, les ultrasons, Le CND est couramment employé par les industriels depuis le début du XX^{ème} siècle. Il est devenu indispensable lors de la fabrication, de l'assemblage ou de la maintenance de pièces dans des secteurs de pointes tels que l'aéronautique, le nucléaire ou le domaine médical. Ces techniques pourraient donc être adaptées au contrôle *in situ* de la fabrication additive.

Pour assurer un CND *in situ* des procédés de fabrication additive, l'inspection, sans contact, ne doit pas perturber le procédé de fabrication. Elle doit également être robuste à un état de surface rugueux et à une pièce portée à haute température. Les ultrasons laser (UL) consistent à engendrer et à détecter des ondes ultrasonores au moyen de lasers. Ils présentent donc l'avantage d'effectuer des contrôles à distance, sans contact mécanique et dans une large bande de fréquences. Ils constituent donc un candidat potentiel au contrôle *in situ* du procédé DML. Cette méthode de contrôle a déjà été éprouvée dans le cadre de contrôles industriels, par exemple au sein d'Airbus avec le contrôle de pièces en matériaux composites. En 2013, le projet INTRAPID a initié des recherches pour évaluer la pertinence des UL pour l'inspection *in situ* de pièces fabriquées par le procédé DML. Cette thèse s'inscrit donc dans la continuité de ces travaux.

Une configuration pertinente pour le contrôle *in situ* du procédé DML consiste à suivre la buse de fabrication portant les jets de poudre et le faisceau laser de fabrication. Le contrôle porte sur les dernières couches de matériaux déposées et consiste à exploiter une onde surfacique, l'onde de Rayleigh (cf. figure ci-dessous).



Inspection in situ du procédé DML : le système suit la buse de fabrication, il engendre une onde surfacique afin de contrôler les derniers cordons construits.

Plusieurs auteurs ont axé leurs recherches en ce sens et ont montré la faisabilité d'un contrôle sur des pièces fabriquées par le procédé DML, polies et comportant des défauts usinés isolés.

Cependant, un contrôle *in situ*, implique de pouvoir contrôler des pièces dont l'état de surface est rugueux et présentant des défauts réels, c'est-à-dire aux contours irréguliers et potentiellement multiples. Cette thèse poursuit donc les travaux initiés et a pour but de contribuer au développement du contrôle *in situ* du procédé DML.

L'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments concernant la détection de défauts submillimétriques, par onde de Rayleigh induites par ultrasons-laser, dans des échantillons réalisés par le procédé DML, présentant un état de surface brut, en vue d'un contrôle *in situ*.

Organisation du manuscrit

Cette thèse est divisée en cinq chapitres.

Le **chapitre 1** consiste, dans un premier temps, à identifier les principales caractéristiques des pièces produites par le procédé DML (anisotropie, état de surface par exemple) qui pourront impacter un contrôle acoustique. Ensuite, la description du procédé DML et de l'intercorrélation de ces paramètres opératoires les plus influents visent à détailler le milieu engendré par la fabrication selon cette technologie. Puis, nous nous intéresserons aux phénomènes de formations des défauts au sein des pièces. Enfin, un état de l'art des contrôles *in situ* existants est dressé afin de donner les avantages d'un contrôle par ultrasons laser par rapport aux technologies déjà existantes.

Après avoir identifié les dimensions des défauts d'intérêt, le **chapitre 2** se concentre sur les caractéristiques (amplitude et fréquence) des ondes de Rayleigh nécessaires à l'inspection de ces derniers dans notre application. Le principe d'un contrôle par ultrasons-laser est détaillé afin d'identifier les paramètres influant sur la génération et la détection de l'onde de Rayleigh. Puis, à travers l'état de l'art, les différentes configurations possibles pour une inspection, au moyen de ces ondes seront décrites ainsi que l'exploitation de données possibles pour caractériser des défauts surfaciques et sub-surfaciques.

Les travaux de cette thèse ont été initiés avec un dispositif optique dont on montera les limites dans le **chapitre 3**. Puis, à travers une étude expérimentale et le développement d'un modèle heuristique, une quantification des dimensions des tâches focales laser au regard des fréquences des ondes engendrées est donnée. Enfin, le nouveau dispositif optique, conçu et développé dans le cadre de cette thèse pour optimiser la détection des défauts de nos applications, est présenté.

Le **chapitre 4** vise à évaluer les performances de détection du dispositif réalisé. Dans un premier temps, la caractérisation par UL du milieu engendré par le procédé DML. Puis, à partir de l'inspection de défauts usinés, représentatifs des défauts réels, les limites de détection du système, sur surface polie et rugueuse sont données. Enfin, des méthodes de caractérisation des défauts seront discutées. Ce chapitre constitue une preuve de concept de la méthode avant d'en étudier les performances sur la détection de défauts réels au chapitre suivant.

Les défauts réels ont été créés en dégradant volontairement un paramètre du procédé DML et en utilisant de la poudre de mauvaise qualité. Cette dégradation intentionnelle de la fabrication induit des porosités au sein des pièces. Le **chapitre 5** a pour objectif de développer deux méthodes de traitements de données, basées sur la corrélation des signaux : par l'intercorrélation et l'analyse en composantes principales. Ces deux méthodes sont susceptibles de mettre en évidence le caractère poreux d'une pièce dont l'état de surface est brut.

Chapitre 1

Besoins et limites des contrôles in situ du procédé de déposition métallique par laser

1. Contrôles <i>in situ</i> du procédé de déposition métallique par laser (DML) : limites et besoins	. Erreur ! Signet non défini.
1.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Technologie du procédé de fabrication additive par déposition métallique par laser (DML)	Erreur !
Signet non défini.	
1.2.1. Caractéristiques du bain de fusion induit par DML	Erreur ! Signet non défini.
1.2.2. Caractéristiques de la microstructure	Erreur ! Signet non défini.
1.3. Principaux facteurs à l'origine de défauts en DML	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1. Qualité des poudres métalliques	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Stratégie de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3. Gaz de transport des poudres et gaz dans l'enceinte de fabrication	Erreur ! Signet non défini.
1.4. Instabilités des paramètres et défauts en DML	Erreur ! Signet non défini.
1.4.1. Influence des paramètres opératoires sur le bain de fusion et principaux défauts engendrés	Erreur ! Signet non défini.
1.4.2. Variation de la microstructure	Erreur ! Signet non défini.
1.4.3. Variation des contraintes résiduelles	Erreur ! Signet non défini.
1.4.4. Variation de la dureté	Erreur ! Signet non défini.
1.4.5. Instabilités géométriques des cordons	Erreur ! Signet non défini.
1.4.6. Principaux défauts rencontrés en DML	Erreur ! Signet non défini.
1.5. Contrôles <i>in situ</i> du procédé de fabrication additive par DML	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1. Environnement	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2. Bain de fusion	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3. Effets thermiques et contrôle de la microstructure	Erreur ! Signet non défini.
1.5.4. Porosités et fissurations	Erreur ! Signet non défini.
1.6. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

1. Contrôles *in situ* du procédé de déposition métallique par laser (DML) : limites et besoins

1.1. Introduction

Le procédé de Déposition Métallique par Laser (DML) nécessite la mise en œuvre de différentes technologies telles que l'apport de poudre métallique, la fusion par laser et des systèmes de déplacements de trois à cinq axes. Ainsi, plusieurs phénomènes physiques sont mis en jeu : métallurgiques, thermiques, thermochimiques et mécaniques dont l'intercorrélation n'est pas toujours évidente. La fiabilité, la robustesse et la répétabilité du procédé DML sont difficiles à maîtriser du fait de sa complexité, et il devient essentiel de comprendre les interdépendances de l'ensemble des paramètres pour connaître l'origine de l'apparition de non-conformités. Aussi, un certain nombre de contrôles sont aujourd'hui à l'étude, notamment les contrôles *in situ* (c'est à dire en cours de fabrication). Ils ont pour objectifs de détecter les défauts, voire de les corriger au moyen de boucles de rétroaction agissant sur les paramètres du procédé et d'aider à la compréhension de leurs mécanismes de formation.

Ce chapitre détaille le principe de la technologie DML, et notamment les principaux facteurs pouvant influencer la génération de défauts, ainsi que les moyens de contrôle *in situ*, permettant de mettre en évidence ces non-conformités.

1.2. Technologie du procédé de fabrication additive par déposition métallique par laser (DML)

La première étape du procédé consiste à concevoir la pièce numériquement par ordinateur (Conception Assistée par Ordinateur, CAO). La pièce peut être créée de sorte à minimiser la quantité de matière nécessaire à son élaboration, c'est l'optimisation topologique. La géométrie de la pièce est ensuite maillée numériquement en fines strates, qui définissent le nombre de couches de déposition nécessaires à la fabrication.

Le procédé DML requiert l'utilisation d'un faisceau laser (par exemple, de type Nd :YAG, émettant dans l'infrarouge) et d'un approvisionnement en poudre métallique pouvant être agencés selon plusieurs configurations [1]. L'une d'entre elles repose sur la technologie de « Construction Laser Additive Directe » (CLAD) développée par le centre de transfert technologique Irepa Laser : une buse supporte en son centre un faisceau laser, ce dernier est entouré des jets de poudre apportant la matière métallique. Cette buse, dite coaxiale, associée à une machine cinq axes supportant la pièce en cours de fabrication (cf. Figure 1-1-a), permet de construire des pièces de géométrie variable. Elle est aujourd'hui commercialisée par la société française BeAM. C'est autour de cette technologie que cette thèse s'inscrit. Ce dispositif permet, d'avoir un ensemble de stratégies de fabrication, c'est-à-dire un agencement des cordons les uns par rapport aux autres, pour concevoir une pièce selon les propriétés structurales et mécaniques souhaitées.

Il y a deux modes d'interactions laser-matière : le premier se produit lors du passage de la poudre dans le faisceau laser, où la poudre est portée à haute température ; le deuxième se produit dans le bain de fusion, formé par l'interaction du faisceau laser avec le substrat, générant un bain de fusion.

Le substrat se résume au support métallique lors de la dépose de la première couche, puis il est constitué des différents cordons déposés. Le schéma de principe du procédé est présenté sur la Figure 1-1-b.

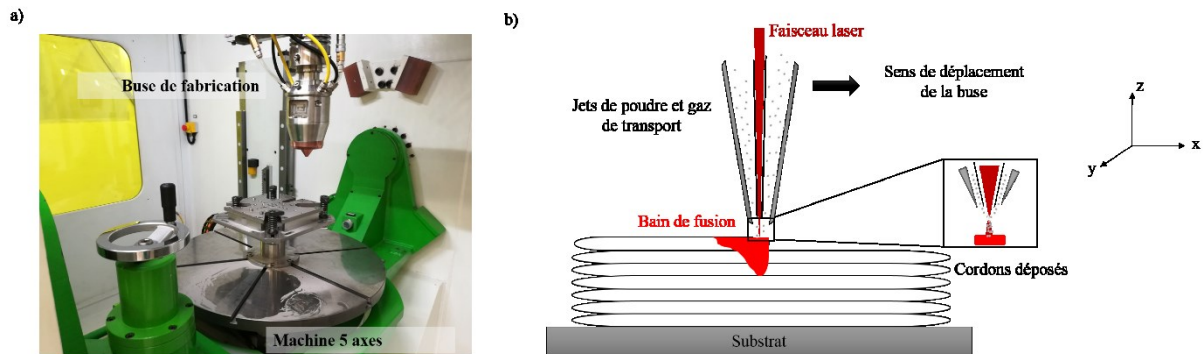


Figure 1-1: (a) Enceinte de la machine de fabrication BeAMmachines montrant la buse de fabrication et la machine 5 axes permettant de mouvoir la pièce. (b) Principe du procédé DML : la buse de fabrication supporte les jets de poudre et le faisceau laser, leur interaction induit un bain de fusion métallique à l'origine des cordons de matière.

La fabrication peut s'opérer dans une enceinte remplie de gaz inerte, le plus souvent, elle se fait sous protection locale de gaz neutre.

1.2.1. Caractéristiques du bain de fusion induit par DML

Le bain de fusion est la région de fusion du métal, à l'interface laser/substrat, recevant les grains de poudre préalablement chauffés par le faisceau laser. Il est le siège de phénomènes thermiques, fluidiques et chimiques. Les gradients thermiques du bain induisent des variations de densité et des gradients de tension superficielle à sa surface, responsables de déplacements de la matière, c'est l'effet Marangoni [2]. Ces mouvements de convection le déforment et lui confèrent donc, en partie, sa morphologie.

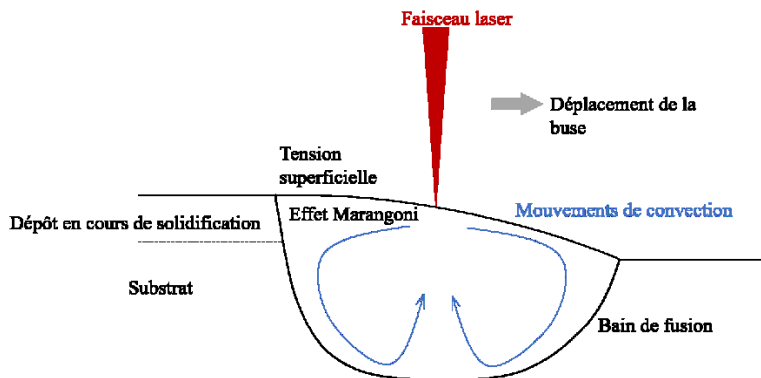


Figure 1-2 Mouvements de convection au sein du bain de fusion du procédé DML.

Ce bain de fusion s'étend en profondeur sur plusieurs cordons ; le procédé induit la re-fusion d'un à trois cordons préalablement déposés : c'est la zone refondue. En dessous de celle-ci, les cordons sont de nouveau soumis à des gradients de température importants : c'est la zone affectée thermiquement. La forme du bain fondu, associée à sa solidification rapide, fige la géométrie du dépôt.

1.2.2. Caractéristiques de la microstructure

La formation de la microstructure est dépendante du matériau considéré, les généralités énoncées ci-après sur la microstructure concernent les aciers.

Le bain se solidifie avec des vitesses de refroidissement supérieures à 10^3 K/s [1] avec une spécificité à l'interface solide-liquide, où il existe une zone de sur-fusion, siège d'une solidification dendritique¹. La solidification laisse alors place à une microstructure affectée par l'ensemble de l'histoire thermique de la pièce. Plus les vitesses de refroidissement sont lentes et plus la compétition entre les grains qui a lieu lors de leur croissance, peut se faire ; cela conduit à une structure à gros grains.

- **Morphologie et orientation des grains**

Les grains s'orientent selon le gradient thermique maximal lors du refroidissement, ils suivent alors une croissance colonnaire et prennent une forme allongée [3]. Proche du substrat, du fait de la dissipation thermique, la solidification est plus rapide ; la microstructure n'a alors plus d'orientation privilégiée : la structure est équiaxe [4]. Les grains colonnaires ont une longueur comprise entre quelques micromètres et quelques millimètres et confèrent l'anisotropie des propriétés mécaniques de la pièce [1].

- **Texture**

La texture est l'orientation préférentielle des cristaux au sein du matériau. En DML, elle dépend essentiellement de la stratégie de fabrication. Pour une stratégie de fabrication unidirectionnelle (le sens de déplacement de la buse est toujours le même), la texture sera fibreuse. Pour une stratégie en aller-retour, la texture sera cubique. La Figure 1-3, tirée de la publication de Dinda *et al.* [5], montre les images par diffraction des électrons radiodiffusées de ces deux textures (ou EBSD, abréviation de « Electron Backscatter Diffraction ») et leur figure de pôle associée. L'imagerie EBSD permet de mesurer l'orientation cristalline d'un matériau. Une figure de pôle est une représentation de la texture et elle montre la distribution des plans cristallographiques dans le matériau.

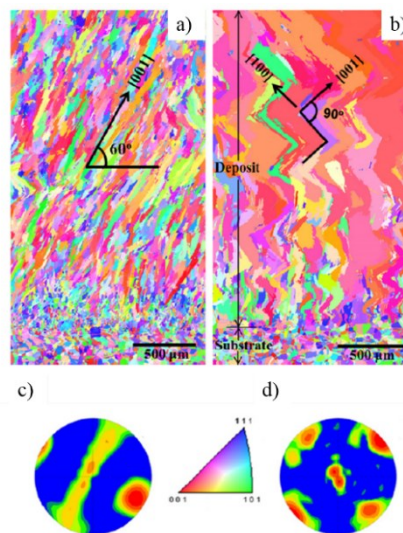


Figure 1-3 (a) Cartographie cristalline d'une pièce réalisée avec une stratégie unidirectionnelle. (b) Cartographie cristalline d'une pièce réalisée avec une stratégie bi-directionnelle. (c) Texture fibreuse associée à la stratégie unidirectionnelle. (d) Texture cubique obtenue par la stratégie bi-directionnelle, tirée de [5].

La pièce est plus texturée sur Figure 1-3-a, où la dépose des cordons est monodirectionnelle, que sur la Figure 1-3-b, où la dépose est bidirectionnelle (en aller-retour). La texture résulte de l'apparition d'une nouvelle phase cristalline (c'est la germination), puis de sa croissance. La croissance

¹ Les dendrites sont des cristaux ramifiés, ils apparaissent lors de la solidification

est due d'une part, au gradient thermique et, d'autre part, à la croissance épitaxiale² reposant sur l'interface avec le grain précédent [5].

- **Caractéristiques de l'état de surface**

L'état de surface de la pièce en DML comporte un certain nombre de particularités. Tout d'abord, la superposition des cordons lui confère un profil périodique sur ses faces. Il est déterminé par la largeur, la hauteur des cordons, et l'espacement entre les cordons (« hatch » en anglais). La Figure 1-4 montre une pièce fabriquée par une machine BeAM avec un état de surface brute. Les rugosités du profil de la surface sont d'autant plus importantes que la largeur et la hauteur du cordon sont élevées [6,7]. La stratégie de fabrication joue également un rôle dans l'agencement des cordons entre eux et donc sur l'état de surface comme le souligne, par exemple, Rombouts *et al.* [6].

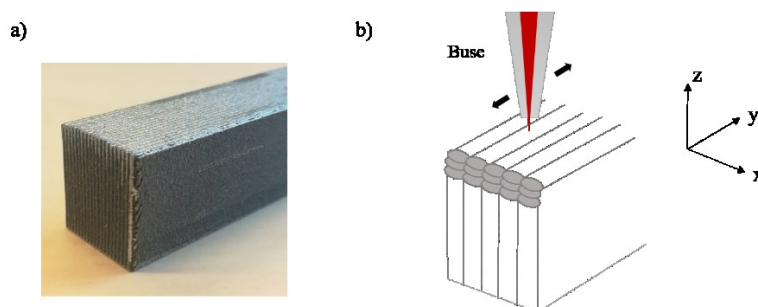


Figure 1-4 (a) Pièce en acier 316L dont l'état de surface est brut après fabrication. (b) Dépose des cordons illustrant l'origine du profil de l'état de surface

En plus de ce profil, des agrégats de poudre, partiellement fondus, peuvent être éjectés lors de la fabrication et adhérer à la surface. Ils participent à la rugosité des pièces élaborées par fabrication additive [2].

Caractéristiques essentielles du procédé DML identifiées en vue d'un contrôle *in situ*.

Le bain de fusion est le cœur du procédé DML : les gradients thermiques et la solidification qui y prennent place, influencent toute l'histoire thermique de la pièce et conditionnent la géométrie des cordons.

La microstructure d'une pièce réalisée par le procédé DML présente une structure équiaxe à sa base puis une structure colonnaire. Les grains croissent selon la direction des gradients thermiques et sont d'autant plus grands que la vitesse de solidification est faible. Les grains sont colonnaires à l'échelle d'un cordon du fait du gradient thermique et la croissance épitaxiale est à l'origine de la structure colonnaire à l'échelle de plusieurs cordons.

L'état de surface d'une pièce de fabrication additive présente un profil sinusoïdal dont la période spatiale correspond à la largeur d'un cordon. Sur ce profil viennent s'ajouter des agrégats de poudre partiellement fondus.

L'histoire thermique de la pièce, sa solidification et donc sa microstructure sont intimement liées aux dimensions et aux gradients de température du bain de fusion. C'est pourquoi, comme nous le verrons par la suite, le suivi du bain de fusion est un élément clé du contrôle *in situ*.

² La croissance épitaxiale est la croissance dans une direction privilégiée

1.3. Principaux facteurs à l'origine de défauts en DML

Peyre *et al.* [7] indiquent quatre paramètres principaux qui influencent la quantité de matière et l'énergie apportée au bain de fusion :

- le débit massique de poudre (1 g/mn à 10 g/mn),
- la vitesse de déplacement de la buse (0,1 m/mn à 1 m/mn),
- le diamètre du faisceau laser (0,2 mm à 5 mm),
- la puissance du laser (100 W à 3 kW).

À ces paramètres, s'ajoutent des facteurs influençant la fabrication de la pièce de façon plus globale :

- la taille et la morphologie des grains de poudres métalliques,
- la stratégie de fabrication,
- les gaz acheminant la poudre jusqu'au bain de fusion (gaz de transport) et gaz dans l'enceinte de fabrication.

1.3.1. Qualité des poudres métalliques

La qualité de la poudre métallique est primordiale pour une fusion homogène permettant d'assurer, notamment, une bonne cohésion entre les grains et entre les cordons.

La poudre métallique est communément obtenue par atomisation gazeuse ou atomisation sous eau (il existe d'autres procédés que nous ne détaillerons pas ici mais on pourra se référer à [1]). Le principe de ces deux techniques est proche : le métal fondu, contenu dans un creuset chauffé par induction, s'écoule par une ouverture sous forme de filament. Des jets de gaz atomiseurs (Argon par exemple) ou des jets d'eau dirigés vers le filament induisent une fragmentation du métal en un nuage de gouttelettes qui se sphéroïdisent sous l'effet de la tension de surface si la trempe n'est pas trop rapide (atomisation au gaz). Ces gouttelettes se solidifient et tombent dans un bac de récupération. La qualité d'un échantillon de poudre est donnée par la sphéricité et le diamètre des grains. La plupart des poudres utilisées en DML sont produites par atomisation gazeuse, on se concentrera donc dans la suite du paragraphe, sur les poudres issues de cette technologie.

Les grains de poudre sont plus ou moins sphériques : ils peuvent présenter des excroissances, appelées satellites. Or, la **sphéricité** d'un grain joue essentiellement sur la coulabilité de la poudre [8], c'est-à-dire son aptitude à former un écoulement régulier. Plus la surface du grain de poudre est régulière, moins les forces de frottements entre les grains seront importantes et plus la poudre s'écoulera de façon homogène en sortie de la buse. La coulabilité assure un jet de poudre continu interagissant avec le faisceau laser.

Le **diamètre des particules** dépend du débit de gaz utilisé lors de l'atomisation gazeuse : la taille des particules diminue quand le débit du gaz augmente. Tous les grains de poudre n'ont pas strictement le même diamètre : la polydispersité en fonction de leur diamètre suit approximativement une Gaussienne centrée sur le diamètre moyen. Pour le procédé DML, les poudres ont une granulométrie comprise entre 20 μm et 150 μm .

La **composition chimique** de la poudre, et notamment sa teneur en oxygène, joue également un rôle dans le procédé puisqu'elle peut induire des grains de poudre infondus entre les cordons et modifier la microstructure. Une variation de la composition chimique peut modifier l'évolution de la viscosité avec la température (généralement, la viscosité diminue avec la température) et induire une variation du courant de Marangoni, lui-même modifiant les dimensions du cordon [9].

Enfin, il est possible que du gaz soit piégé au sein même des grains de poudre lors de l'atomisation gazeuse [1]. Ce gaz, libéré pendant le processus de fusion, peut alors induire des porosités au sein de la pièce [8]. Comme nous le verrons par la suite, ce n'est pas la cause la plus courante de porosités au sein d'un matériau.

1.3.2. Stratégie de fabrication

La stratégie de fabrication est l'ensemble des déplacements de la buse et de la pièce permettant de créer un motif de dépôt des cordons (cf. Figure 1-5). Elle est définie par l'espacement entre les cordons, et l'incrément en Z (cf. Figure 1-1 pour l'orientation) de la buse de fabrication.

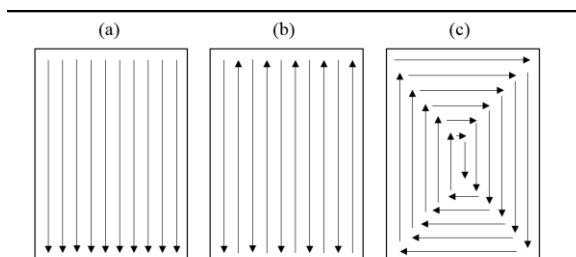


Figure 1-5 Motifs de stratégies de fabrication (a) unidirectionnelle, (b) aller-retour, (c) en spirale. Les flèches indiquent le sens de déplacement de la buse de fabrication.

La stratégie de fabrication joue un rôle sur l'ensemble des gradients thermiques dans la pièce, et donc sur le refroidissement, et sur la formation de la microstructure [10]. Le choix de cette stratégie au regard de la géométrie de la pièce peut engendrer des contraintes thermomécaniques résiduelles [11].

1.3.3. Gaz de transport des poudres et gaz dans l'enceinte de fabrication

Les principaux matériaux utilisés pour le procédé DML, comme l'acier ou le titane, ont une température de fusion relativement importante (supérieure à 1500°C). De fait, les réactions d'oxydation en surface de la pièce et dans le bain de fusion peuvent apparaître puisque la cinétique de réaction augmente par rapport à un milieu à température ambiante. Pour prévenir cette oxydation, les gaz inertes sont indispensables. Cependant, il peut arriver que les taux de gaz inertes et d'oxygène varient dans l'enceinte pendant la fabrication, provoquant une oxydation de la surface d'où la présence de capteurs. En conséquence, la machine est équipée de capteurs permettant de contrôler la teneur en gaz. La pression des gaz de transport, acheminant la poudre des distributeurs jusqu'en sortie de la buse, modifie le débit massique de poudre.

Facteurs pouvant influencer le procédé DML en vue d'un contrôle *in situ*

- Les paramètres opératoires : débit massique de poudre, diamètre et puissance du laser et vitesse de déplacement de la buse,
- La qualité, la distribution en taille et la composition des grains de poudre,
- La stratégie de fabrication choisie en fonction des propriétés mécaniques et structurales souhaitées de la pièce, notamment le « hatch », l'incrément de la buse de fabrication, et le type de motif choisi,
- La présence de gaz prévenant l'oxydation dans l'enceinte de fabrication.

Une description précise et complète des paramètres du procédé et de leurs variations n'est pas aisée compte tenu de leur diversité et des interactions entre tous les processus physiques. L'objectif est ici de décrire les mécanismes qui peuvent engendrer les défauts auxquels on s'intéressera et pour lesquels on décrira les principaux contrôles mis en œuvre. On choisit de décrire les perturbations du procédé aux différentes échelles et stades de la fabrication : tout d'abord sur le bain de fusion et plus

spécifiquement sur les variations de la microstructure et les propriétés mécaniques qu'elles engendrent (dureté, contraintes résiduelles), puis, sur les dimensions des cordons.

1.4. Instabilités des paramètres et défauts en DML

Le débit massique de poudre, la puissance et le diamètre du faisceau laser, ainsi que la vitesse de déplacement de la buse affectent la quantité de matière et l'énergie délivrée au bain de fusion. Ainsi, des instabilités de ces paramètres engendrent une modification des dimensions et des gradients de température du bain liquide. De fait, ces paramètres agissent sur l'histoire thermique globale de la pièce, pouvant impacter les dimensions géométriques des cordons et ainsi changer fondamentalement l'état des contraintes résiduelles et l'état microstructural de la pièce. On se propose d'aborder les principaux liens entre les paramètres opératoires et les caractéristiques du bain de fusion.

1.4.1. Influence des paramètres opératoires sur le bain de fusion et principaux défauts engendrés

Pour un diamètre constant, plus la **puissance laser** est importante, plus la dilution, c'est-à-dire le taux de re-fusion du substrat par rapport à la quantité de matière déposée, est grande [12]. Aussi, les dimensions de la zone refondue et de la zone affectée thermiquement sont plus importantes ; et les refontes successives modifient la microstructure. Par ailleurs, la microstructure est également modifiée par une faible puissance laser susceptible de provoquer un manque de fusion de la poudre [8] : les grains de poudre infondus dissipent la chaleur et modifient les gradients thermiques. Le choix de la puissance est donc un compromis entre une quantité d'énergie suffisante pour fondre la poudre et une re-fusion modérée.

L'augmentation du **diamètre du faisceau**, à puissance laser constante, diminue la densité de puissance surfacique délivrée à la pièce, ainsi, avec l'augmentation du diamètre du faisceau, la largeur du bain croît [13]. *A contrario*, si le diamètre du faisceau diminue, à puissance égale, le diamètre du bain de fusion diminue mais sa hauteur augmente : les zones refondues et affectées thermiquement croissent autour du bain [14].

À **débit massique** plus élevé, le flux d'énergie nécessaire à la fusion de l'ensemble des particules augmente. Comme l'énergie du faisceau laser est répartie de manière relativement homogène sur la poudre, par conservation d'énergie et à puissance constante, il en résulte une poudre portée à moins haute température et potentiellement une fusion incomplète de celle-ci [13].

L'augmentation de la **vitesse de déplacement de la buse**, quant à elle, diminue le temps d'interaction entre le faisceau laser, la poudre et le bain de fusion. Si le temps d'interaction est moindre, la quantité d'énergie délivrée à la pièce s'en trouve altérée et la température du bain de fusion diminue.

Les variations de vitesse de déplacement de la buse, du débit massique de poudre, du diamètre et de la puissance du laser induisent des perturbations thermiques, des variations de la quantité de matière reçue et des modifications géométriques du bain.

Moins fréquemment, la **composition chimique du bain** peut être modifiée. Les poudres sont souvent des alliages (acier 316L, titane TA6V, ...) et les différents éléments chimiques sont plus ou moins volatils. La vaporisation peut alors être sélective et certains éléments chimiques légers sont évaporés préférentiellement. Ils ne participent que partiellement à la composition du bain.

Ces perturbations qui touchent directement le bain de fusion sont susceptibles d'induire l'apparition de **porosités**. Ces porosités peuvent être dues à des écarts de flux convectifs qui provoquent la formation de pièges de gaz. Elles ont un diamètre de quelques dizaines de micromètres et sont plutôt sphériques puisque le gaz est piégé dans le bain. Les porosités peuvent également être induites par un manque de fusion du fait d'un manque de pénétration du bain [15]. Ces porosités ont généralement une forme irrégulière.

1.4.2. Variation de la microstructure

Les variations de microstructure peuvent affecter la forme et la dimension des grains [16]. L'orientation des gradients thermiques donne l'orientation de la croissance des grains (cf. Figure 1-6) et les vitesses de refroidissement conditionnent, entre autres, la longueur des grains. Tous les paramètres opératoires qui influent sur le bain jouent un rôle dans la solidification et la formation de la microstructure.

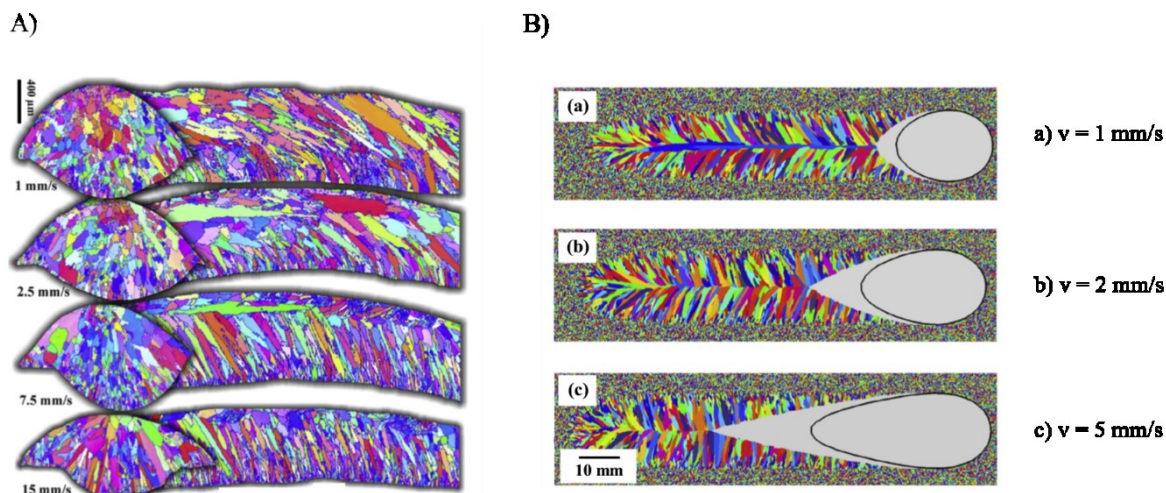


Figure 1-6 A) Images obtenues par EBSD montrant la modification de l'orientation des grains en fonction de la vitesse de déplacement de la buse [4], et B) Images obtenues par simulation montrant la modification du spot laser et des grains en fonction de la vitesse de déplacement de la buse, extrait de [17].

En solidification colonnaire, on observe parfois des fissures dans les pièces élaborées. La Figure 1-7 présente ce mécanisme de fissuration à chaud.

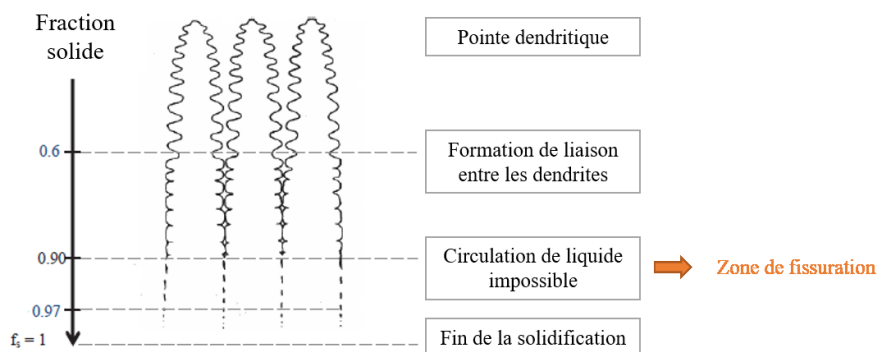


Figure 1-7 Zone de fissuration à chaud lors du processus de solidification dendritique.

Lors du processus de solidification, des dendrites³ se forment au sein du liquide qui circule dans un premier temps facilement entre elles. Au cours de l'avancée de la solidification, les dendrites rentrent en contact les unes avec les autres et forment un réseau solide. Lorsque le liquide ne peut plus circuler entre les dendrites et donc ne plus accommoder les déformations, la zone devient sensible à la fissuration : le réseau solide n'a pas encore coalescé et ne possède pas les caractéristiques mécaniques suffisantes pour résister à de fortes sollicitations dues aux refroidissements [18]. Le mécanisme de fissuration est déclenché par la libération de contraintes résiduelles.

³ Cristal ramifié

1.4.3. Variation des contraintes résiduelles

Les gradients thermiques au sein du bain affectent la croissance et l'orientation des grains ; ils engendrent des contraintes résiduelles au sein de la pièce. La plupart du temps, ces contraintes n'altèrent pas la qualité finale de la pièce [19]. Néanmoins, si elles deviennent trop importantes, elles peuvent conduire à des mécanismes de fissurations à froid. L'ordre de grandeur et la forme du profil de la contrainte résiduelle dépendent : de la hauteur de la pièce, des propriétés des matériaux, de la stratégie de fabrication et des paramètres du procédé [20]. Wang *et al.* [21], par exemple, mesurent la contrainte résiduelle par diffraction de neutrons. Ils observent qu'une vitesse de déplacement élevée de la buse soumet la pièce à de forts gradients de température qui contraignent fortement la pièce en cours d'élaboration : la contrainte selon la direction perpendiculaire au sens de déplacement de la buse augmente alors.

1.4.4. Variation de la dureté

La dureté, est définie comme la résistance d'un matériau à la pénétration d'un objet. La dureté des pièces en fabrication additive est généralement plus élevée que dans les procédés de soustraction [20], du fait de contraintes résiduelles plus importantes et d'une microstructure différente. La dureté est liée à de nombreux phénomènes. Griffith *et al.* [22] par exemple, mettent en évidence la corrélation entre l'intensité des gradients de température et la dureté. Ils montrent qu'une diminution de la vitesse de la buse induit un temps d'interaction plus lent entre le substrat et le faisceau laser. Ceci augmente localement l'énergie déposée et donc diminue l'intensité des gradients thermiques et, de fait, la dureté.

1.4.5. Instabilités géométriques des cordons

La hauteur du cordon est principalement affectée par le débit massique de poudre et la vitesse de déplacement de la buse, c'est-à-dire les paramètres qui pilotent la quantité de matière et d'énergie apportée au bain liquide [2]. Une augmentation du débit massique de poudre engendre une augmentation de la hauteur du cordon déposé jusqu'à atteindre un niveau de saturation pour lequel la puissance laser délivrée n'est plus suffisante pour fondre la quantité de poudre présente dans la fenêtre de fonctionnement nominale.

La largeur du cordon dépend essentiellement de la puissance laser et de la vitesse de déplacement de la buse. Le rapport puissance laser sur vitesse de déplacement définit l'énergie linéique et caractérise l'énergie déposée par unité de longueur. La Figure 1-8 montre que la largeur du faisceau laser suit une loi en puissance en fonction de la puissance laser et de la vitesse de déplacement de la buse. Cette loi est empirique et dépend fortement des paramètres opératoires.

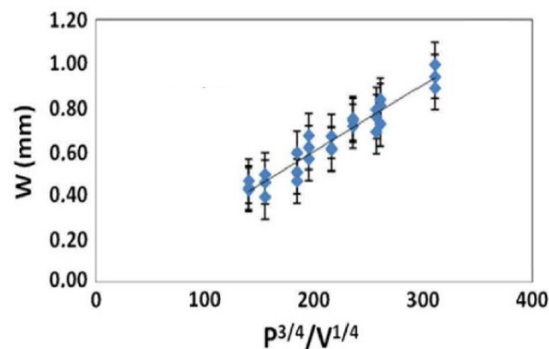


Figure 1-8 Influence des paramètres de puissance laser P et de vitesse de déplacement V de la buse sur la largeur du cordon W , tirée de [2].

Si la largeur des cordons se réduit par rapport au « hatch », un espace se forme entre eux, induisant des manques de cohésion et la formation de porosités. Ces porosités s'étendent sur toute la longueur du cordon et ont généralement un aspect non sphérique du fait de la forme en ménisque des dépôts. Le diamètre de ces porosités est fonction des perturbations de la fabrication, et il peut varier de 100 μm à 1 mm. Le pourcentage de porosités par coupe peut dépasser 10 %. La Figure 1-9 présente deux coupes métallurgiques d'un échantillon en acier 316L présentant un « hatch » trop important.

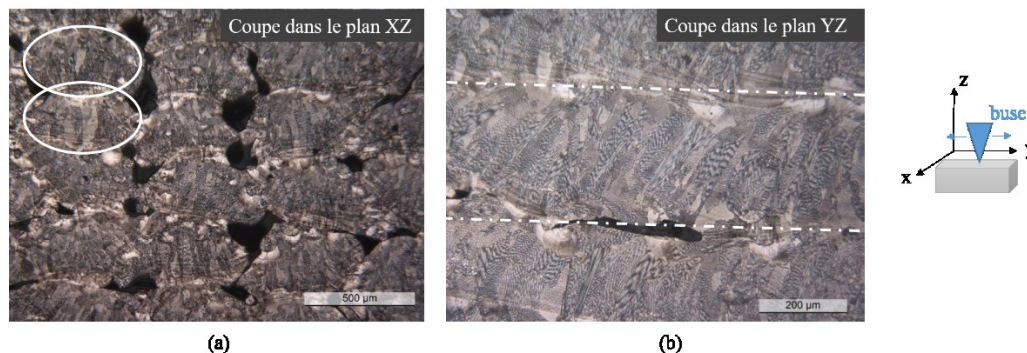


Figure 1-9 Coupes métallurgiques d'une pièce d'acier 316L obtenue par DML (a) Porosités dans le plan XZ. (b) Porosités dans le plan YZ. Les cordons sont délimités par des lignes blanches.

Dans les cas les plus extrêmes, si les espaces entre les cordons s'étendent sur une même zone de la pièce, cela peut conduire à un effondrement (cf. Figure 1-10), voire à une incohésion de deux cordons consécutifs amorçant un processus de délamination [1].



Figure 1-10 Pièce DML présentant un effondrement : le manque de fusion se propage sur plusieurs cordons et laisse une pièce présentant une fissuration.

Notons que les effondrements sont le plus souvent dus à un mauvais choix de la stratégie de fabrication [23], mais ils peuvent également être causés par l'accumulation de fissurations, porosités ou contraintes résiduelles [24].

1.4.6. Principaux défauts rencontrés en DML

Les mécanismes de formation des défauts sont dus aux perturbations des paramètres opératoires, au choix de la stratégie de fabrication, à la qualité des poudres, et également aux gaz de transport des poudres. Ces défauts apparaissent à différentes échelles : au sein même des grains de poudre (porosités dues à l'atomisation gazeuse), dans le bain de fusion puis dans la microstructure et enfin au niveau de la géométrie des cordons et de la pièce. On distinguera cinq catégories de défauts.

Les variations de microstructure, c'est-à-dire la dimension, la nature, l'agencement et l'orientation granulaire et intra granulaire, sont essentiellement causées par des perturbations des gradients thermiques et des perturbations de la vitesse de refroidissement. Elles sont à l'origine des modifications de dureté, contraintes et de la tenue en fatigue de la pièce. Ces variations sont difficilement observables sans détruire la pièce pour effectuer des coupes micrographiques.

Les porosités peuvent prendre différentes formes et dimensions en fonction de leur origine. Les porosités proviennent essentiellement des courants de convections dans le bain de fusion qui peuvent conduire à des pièges de gaz. Dans ces cas, la porosité est de forme sphérique et son diamètre peut varier de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Les porosités contenant de la poudre sont dues à des manques de fusion soit au sein même du bain soit résultant d'un manque de cohésion entre les cordons. De même, leur diamètre peut varier de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres mais leur forme sera plus irrégulière que celle des porosités gazeuses.

Les fissurations peuvent se produire à froid ou à chaud et sont toujours dues à la libération de contraintes. Elles peuvent se propager sur quelques dizaines de micromètres jusqu'à plusieurs centimètres.

Les écarts géométriques sont la plupart du temps causés par des erreurs de trajectoire de la buse qui engendrent des surépaisseurs ou des manques de matière. La stratégie de fabrication, comme le choix de la valeur du « hatch », est déterminée pour des dimensions de cordons nominales, c'est à dire programmées dans la CAO. Si les dimensions du cordon diminuent du fait d'une augmentation de la vitesse de déplacement de la buse par exemple, le « hatch » devient trop important et un espace se forme entre les cordons : les porosités inter cordons apparaissent dans ces configurations.

L'oxydation de la surface ou du bain est essentiellement provoquée par des variations du taux d'oxygène dans l'enceinte. Pour prévenir cette oxydation, l'enceinte de la machine est en inertage.

Les mécanismes très différents à l'origine de la formation des défauts, répertoriés dans le Tableau 1-1-1, ont conduit au développement de plusieurs méthodes de contrôle afin de suivre *in situ* l'ensemble des non-conformités.

Variations de la microstructure		Stratégie de fabrication [3] Variations des paramètres de fabrication [13], [14], [19]
Porosités	Porosités inter cordons [3]	Stratégie de fabrication : défaut de recouvrement
	Porosités contenant du gaz [23]	Manque de fusion [25] Qualité de l'échantillon de poudre Piège de gaz dus à des variations des mouvements de convection du bain
	Porosités contenant de la poudre infondue	Manque de fusion Qualité de l'échantillon de poudre
Fissurations		Inclusion /contamination [20] Libérations de contraintes résiduelles [20]
Ecarts géométriques	Effondrement	Propagation d'une fissuration Erreur de trajectoire [23] Libération de contraintes résiduelles [24]
	Déposition irrégulière/modification du profil de la pièce	Mauvais alignement des jets de poudre et du faisceau laser [26] Stratégie de fabrication [11]
Oxydation	Contamination/impuretés	Composition de l'échantillon de poudres [8] Oxydation de la surface [27]

Tableau 1-1-1 Principaux défauts et perturbations engendrés par des variations du procédé DML.

1.5. Contrôles *in situ* du procédé de fabrication additive par DML

Les non-conformités engendrées par les variations du procédé apparaissent à plusieurs échelles, c'est-à-dire de la microstructure de la pièce jusqu'à la géométrie de celle-ci. Elles peuvent se présenter sous différentes formes : porosités, contraintes résiduelles... L'objectif initial des contrôles *in situ* est de détecter les non-conformités, puis, dans un second temps, de concevoir des boucles de rétroaction sur les paramètres influents qui permettront de corriger ces défauts [28]. Les boucles de rétroaction reposent sur le choix :

- Des observables que nous avons discriminé comme suit : environnement, bain de fusion, thermique de la pièce, microstructure et défauts de type porosités et fissures.
- Des paramètres opératoires sur lesquels il est possible d'agir via des actionneurs pour corriger les perturbations : débit massique de poudre, diamètre et puissance du faisceau laser et vitesse de déplacement de la buse.
- Des capteurs ou associations de capteurs que nous détaillerons au travers de ce paragraphe.

Le procédé DML met en œuvre un système d'alimentation en poudre métallique, un laser pour permettre la fusion de cette poudre, et des systèmes de déplacement trois ou cinq axes de la buse et de la pièce. L'ensemble de la fabrication de la pièce se déroule, pour la plupart des machines commercialisées, dans une enceinte fermée dont l'atmosphère est contrôlée. Chaque système utilisé pour la fabrication (laser, système de déplacement, ...) nécessite un contrôle afin que les paramètres opératoires soient stables et répondent à la stratégie de fabrication programmée.

1.5.1. Environnement

- **Gaz de l'enceinte**

Le procédé DML fonctionne la plupart du temps sous atmosphère contrôlée, contenant des gaz inertes comme l'Argon ou l'Hélium [1], afin d'éviter la contamination du bain de fusion et les réactions d'oxydation. Ainsi, la plupart des machines commercialisées sont équipées d'un système de contrôle de la concentration d'oxygène. Les capteurs au Zirconium sont les plus répandus [27].

- **Alimentation et contrôle des jets de poudre**

Le principe du système d'alimentation en poudre, dans les machines BeAM, est le suivant : la poudre est initialement stockée dans des conteneurs qui délivrent progressivement la poudre sur un plateau tournant, lui-même régulant la quantité de poudre acheminée au niveau du faisceau laser, au moyen des gaz de transport (cf. Figure 1-11).

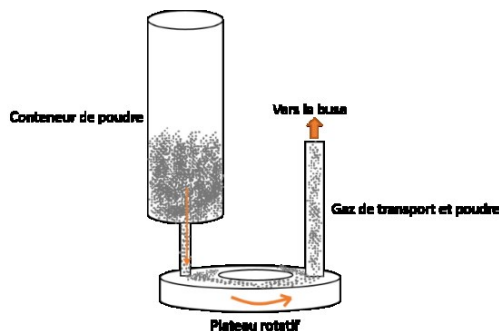


Figure 1-11 Schéma de principe d'un distributeur de poudre : la poudre s'écoule du conteneur puis tourne sur le plateau rotatif, un tuyau contenant du gaz de transport aspire la poudre du plateau pour l'acheminer vers la buse

Selon les technologies, les jets de poudre en sortie de la buse peuvent être mis en forme par des gaz qui ont également pour fonction de protéger le bain de l'oxydation.

Avant toute fabrication, il est nécessaire de quantifier le débit massique de poudre pour s'assurer qu'il corresponde à la valeur nominale souhaitée, au regard de la puissance laser programmée. Le débit massique de poudre peut être ajusté au cours de la fabrication en fonction, par exemple, des variations de la puissance laser dans le cas de stratégie de fabrication impliquant des rebroussements de la buse. L'état de l'art mentionne le suivi d'un débit massique de poudre constant ou dynamique, c'est-à-dire qui varie ou non en fonction des paramètres de fabrication. Ce contrôle est assuré au moyen de plusieurs technologies : photodiode [29], caméra [30], ou détection de la vitesse du plateau rotatif [31] qui permettent, dans certains cas, l'élaboration d'une boucle de rétroaction.

Hu *et al.* [29] développent une boucle de rétroaction qui contrôle le débit de poudre délivrée lors du procédé en corrigeant la vitesse de rotation du plateau. L'instrumentation consiste en une diode laser placée au niveau des distributeurs de poudre, dont la paroi est en verre, et une photodiode diamétralement opposée à la diode laser comme sur la Figure 1-12.

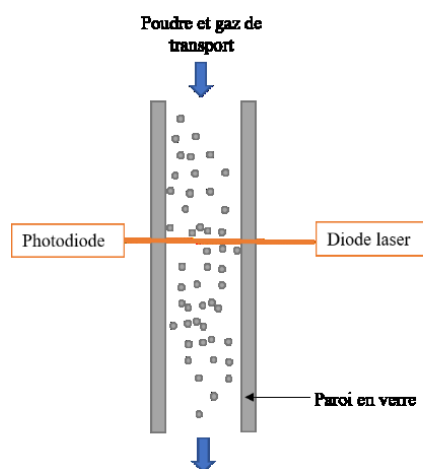


Figure 1-12 Dispositif de mesure en transmission du débit de poudre au niveau des distributeurs [29] : la diode illumine le flux de poudre et la photodiode collecte la lumière transmise par la poudre.

Le dispositif mesure la quantité de photons, émise par la diode laser, et transmise à travers la poudre métallique pour quantifier le débit de poudre métallique distribué. Plus la quantité de poudre est importante, plus le signal reçu par le photodétecteur est faible car les photons émis par le laser subissent des réflexions, absorptions et diffusions à travers celle-ci. Si la quantité de poudre ne correspond plus à la valeur nominale, la vitesse de rotation du plateau délivrant la poudre est modifiée.

La principale limite de cette technique est qu'elle ne considère pas le débit de poudre au niveau de la buse de fabrication. Or, l'écoulement de la poudre peut varier au cours de son acheminement des distributeurs à la buse, en raison des flux convectifs des gaz de transport par exemple [30]. Le même type de dispositif optique a été mis en place au niveau des jets de poudre en sortie de la buse [31] comme sur la Figure 1-13. Cependant, ces dispositifs ne permettent pas de créer une boucle de rétroaction puisque le temps d'enregistrement nécessaire à l'évaluation du débit de poudre est trop important pour réguler, en temps réel, le débit massique de poudre [29]. Pour ce faire, il faut prévoir les fluctuations voulues du débit de poudre afin d'anticiper les variations de vitesse du plateau rotatif. Tang *et al.* [31] ont développé un modèle permettant de déterminer les fluctuations souhaitées du débit de poudre en fonction de la stratégie de lasage (unidirectionnel ou aller-retour). Ce modèle agit sur la vitesse de rotation du plateau pour modifier le débit de poudre ; ces deux grandeurs sont liées par une loi linéaire. La Figure 1-14 présente les images, obtenues par profilométrie, d'une pièce fabriquée avec et sans boucle de rétroaction sur la quantité de poudre délivrée. La pièce construite avec la boucle de rétroaction

présente une hauteur de cordon plus uniforme ; la géométrie de la pièce est plus proche du modèle CAO que de la géométrie obtenue à taux de déposition non-régulé.

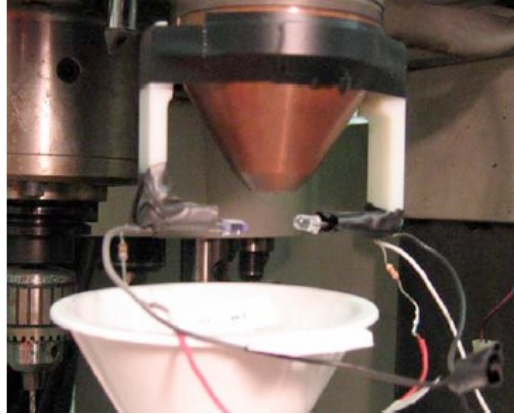


Figure 1-13 Mesure optique en transmission du débit de poudre en sortie de la buse de fabrication, extrait de [31].

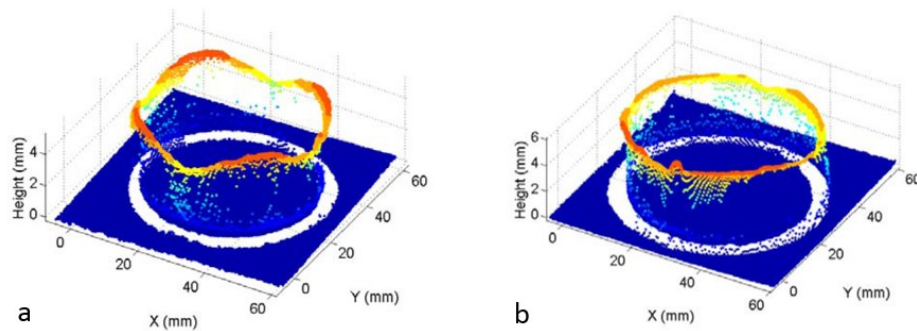


Figure 1-14 Images obtenues par profilométrie (a) d'une pièce fabriquée à débit de poudre constant et (b) d'une pièce fabriquée à débit de poudre variable.

Au-delà du débit massique de poudre, l'observation des jets de poudre en sortie de la buse permet d'estimer la position et le diamètre du jet de poudre [30]. Ainsi, le rendement de fusion [12], c'est-à-dire le rapport de la quantité de matière reçue par la zone fondue sur la quantité de matière totale projetée, peut être évalué. Aucune boucle de rétroaction n'est développée via ces observations. Néanmoins, ces techniques sont intéressantes, puisqu'elles donnent directement accès aux caractéristiques des jets de poudre en sortie de la buse de fabrication. Pour cela, un système de vision active est utilisé ; il consiste en l'utilisation conjointe d'une caméra (CCD ou CMOS) et d'une source d'énergie lumineuse (laser visible ou infrarouge). La lumière cohérente induit la surbrillance de l'objet, ici, la poudre. La triangulation, entre l'objet, la caméra et la source, permet de déterminer la distance entre la caméra et l'objet au niveau du point projeté. Afin d'accélérer l'acquisition, le faisceau laser peut être focalisé en ligne [12] de sorte que la surface illuminée soit plus importante. Via ce principe, Balu *et al.* [30] puis Mezari *et al.* [12] et Gharbi *et al.* [32] obtiennent des images des jets de poudre, à partir desquelles ils déterminent la concentration en poudre et le diamètre des jets de poudre.

- **Autres contrôles de l'environnement**

Un certain nombre de capteurs, que nous ne détaillerons pas dans cette thèse, vérifient par exemple la pression dans l'enceinte ou les déplacements des systèmes de positionnement de la buse et

de la pièce [33] de sorte que dans la mesure du possible, l'ensemble des paramètres nominaux soient respectés.

Contrôle du débit massique de poudre

L'alimentation en poudre occupe une place particulière dans l'environnement puisqu'elle conditionne un des paramètres opératoires déterminant la quantité de matière délivrée au bain de fusion : le débit massique de poudre. La vitesse, la quantité et la répartition des grains de poudre au sein des jets sont des observables qui renseignent sur les perturbations des jets de poudre qui peuvent être causées par :

- une vitesse de rotation du plateau trop faible qui engendre un débit de poudre faible à l'entrée des tuyaux de transport vers la buse,
- des mouvements de convections des gaz de transport importants qui induisent des variations du débit de poudre au niveau du bain de fusion.

Les observables sont contrôlées au moyen de différents capteurs :

- Un couple laser/photodiode,
- Un couple laser/caméra CCD.

À paramètres opératoires constants, une augmentation du débit de poudre induit une hauteur de cordon plus importante, ce qui engendre une géométrie de la pièce non conforme vis-à-vis de celle initialement programmée. Ainsi, un contrôle du rendement de fusion, au moyen d'une rétroaction sur la vitesse de rotation du plateau ou de la puissance laser est nécessaire pour conserver une géométrie de cordon stable. La rétroaction en temps réel est difficile au regard du temps utile à l'évaluation du débit de poudre et au temps de réponse des actionneurs. La stratégie consiste donc à définir les variations de débit de poudre utiles pour conserver une hauteur de cordon constant en amont de la fabrication, en fonction de la stratégie de lasage.

Les contrôles relatifs à l'environnement bien qu'indispensables, peuvent être considérés comme des prérequis, mais ne donnent pas d'information sur l'état propre de la pièce en termes de géométrie ou de microstructure par exemple. Les études menées sur le contrôle du DML ont été initiées, au début des années 2000, par le contrôle du bain de fusion, puisque c'est le siège visible de toutes les perturbations du procédé.

1.5.2. Bain de fusion

Ce paragraphe s'articule autour du suivi de trois observables du bain : sa géométrie, sa température et sa composition. Puisque les dimensions du bain de fusion sont liées à celles du cordon, le suivi du bain a comme principal intérêt de pouvoir contrôler les dimensions des cordons.

- **Contrôle géométrique du bain de fusion**

Comme mentionné au paragraphe 1.4.5, l'augmentation des dimensions du bain induit l'augmentation des dimensions du cordon et la dégradation de l'état de surface. Ainsi, le contrôle géométrique du bain de fusion permet un contrôle des dimensions des cordons. Le contrôle géométrique du bain de fusion s'effectue par des moyens de visualisation passive ou active [12].

La visualisation passive consiste à employer uniquement des photodétecteurs ou des caméras CCD, et à mettre en œuvre des traitements d'image afin de déterminer les contours du bain pour en déduire sa largeur, sa longueur [29] et, moins communément, sa hauteur [34]. Plusieurs configurations ont été utilisées pour obtenir une image du bain liquide : la caméra peut être montée coaxialement à la

buse [29] ou sur le côté de celle-ci [35]. L'utilisation de plusieurs photodétecteurs positionnés autour du bain de fusion permet de s'affranchir de l'angle de vue dans l'estimation des dimensions du bain.

La vision active quant à elle, nécessite l'utilisation d'une source de lumière, pour mettre le bain en surbrillance, couplée à la caméra [29]. La largeur et la hauteur du bain (généralement quelques centaines de micromètres) calculées via le traitement d'image sont ensuite comparées à des valeurs nominales [34]. Si l'écart entre ces valeurs dépasse un seuil de tolérance déterminé expérimentalement, on considère que cette variation aura un impact sur la dimension des cordons.

Des boucles de rétroaction ont été développées pour corriger les dimensions du bain de fusion, et donc celles des cordons, au cours de la fabrication en agissant sur la vitesse de déplacement de la buse [35] et/ou la puissance laser [29]. Hu *et al.* [29] conservent ainsi la largeur des cordons constantes et corrigent les variations géométriques lors de la construction d'un mur, notamment à sa base (Figure 1-15), où les phénomènes de dissipations thermiques par le support modifient les géométries prévues par la CAO de la pièce.

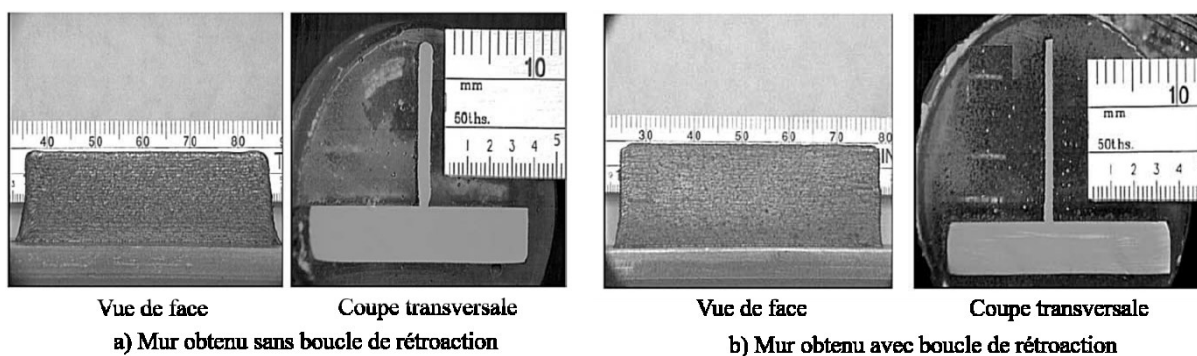


Figure 1-15 (a) Rétrécissement du mur à sa base sans corrections des dimensions et (b) mur obtenu avec corrections des dimensions du bain de fusion, extrait de [29].

Ces rétroactions permettent également de réduire la rugosité d'environ 14 à 20 % par rapport à une pièce élaborée sans rétroaction de la hauteur des cordons [34].

Des études visent à contrôler les dimensions du bain afin d'effectuer une déposition non linéaire des cordons de dépôt, c'est-à-dire créer des dépôts présentant des zones d'épaisseur variable, tout en respectant les cotes imposées par la CAO de la pièce [35]. Pour effectuer ce type de dépôt, il est nécessaire d'ajuster en continu la distance entre la buse et la pièce et la vitesse de déplacement de la buse. Une rétroaction sur ces deux paramètres permet de construire les dépôts en moins de temps et avec une précision accrue par rapport au dispositif sans contrôle.

• Contrôle thermique du bain de fusion

Le contrôle thermique du bain de fusion, comme le suivi géométrique, a pour objectif de maintenir les dimensions des cordons constantes. En effet, comme mentionné au paragraphe 1.4.5, l'augmentation de la puissance laser provoque une augmentation de la largeur du cordon. Le contrôle thermique du bain de fusion repose sur l'évaluation de la luminance de l'objet, correspondant aux rayonnements thermiques émis par celui-ci. L'application de cette mesure est le fondement du fonctionnement des caméras (IR ou CCD) [36] et des pyromètres [37] utilisés pour le contrôle thermique du bain. Un pyromètre focalise le flux radiatif de l'objet, dans une gamme de longueurs d'onde, pour le convertir en signal électrique. Une caméra fonctionne selon le même principe via une matrice de capteurs se comportant comme une multitude de pyromètres.

Comme pour le suivi géométrique du bain, la variation de la température (de l'ordre de 100 K) du bain autour d'une valeur nominale (environ 2000 K [37]) est le critère pour déclencher une correction du procédé. La puissance laser [37] et/ou le débit massique de poudre [36] sont modulés pour

conserver un bain de fusion à une température constante. Ces boucles de rétroaction permettent de maintenir des dimensions de cordons constantes sur quelques dépositions. Cependant, pour une fabrication multicouche, Tang *et al.* [37] observent une augmentation de la largeur du bain le long de la déposition d'un cordon. Ceci est dû au fait que différentes géométries de bain peuvent avoir la même température ; donc le contrôle seul de la température du bain n'est pas suffisant pour assurer une morphologie conforme de cordons.

Song *et al.* [38] proposent donc un système de suivi mixte de la géométrie et de la température. Ils mettent en œuvre une boucle qui contrôle à la fois la géométrie et la température du bain, au moyen de 3 caméras CCD et d'un pyromètre. Les deux systèmes de mesure permettent de réguler la puissance laser en fonction des déviations thermiques et géométriques du bain liquide enregistrées. Par comparaison d'une fabrication avec et sans rétroaction, ils mettent en évidence des cotes plus proches du modèle CAO grâce à sa méthode.

- **Contrôle de la composition du bain de fusion**

Le contrôle de la composition du bain n'est que peu traité dans l'état de l'art, aussi, nous ne citerons que Bartkowiak *et al.* [39] qui ont mis en œuvre un système de surveillance en temps réel de la composition du bain de fusion au moyen d'un spectromètre à fibre optique. Le spectromètre permet d'identifier la présence de certains éléments chimiques grâce à l'intensité et à la longueur d'onde des radiations émises par le bain. Ils montrent que les raies sont plus intenses lorsque la température du bain augmente. Bartkowiak *et al.* mentionnent la possibilité d'utiliser cette technique pour créer une valeur de seuil d'intensité des raies qui permettrait de déclencher une boucle de rétroaction sur les paramètres opératoires. Ils soulignent également le manque de sensibilité de cette méthode pour identifier la totalité des composants chimiques du bain.

Contrôles thermiques et géométriques du bain de fusion

Le contrôle géométrique du bain de fusion s'effectue essentiellement au moyen d'une caméra CCD, coaxiale ou non au faisceau laser. Elle peut être couplée à une source de lumière pour acquérir une image du bain et en déterminer ses contours. Le contrôle en température s'effectue, quant à lui, au moyen d'un pyromètre parfois associé à une caméra. Aussi bien les contrôles géométriques que thermiques du bain ont pour objectif d'anticiper les écarts de géométrie des cordons. Par ailleurs, une augmentation des dimensions des cordons dégrade l'état de surface de la pièce. Pour corriger ces modifications, des boucles de rétroaction agissent sur les paramètres opératoires tels que la vitesse de déplacement de la buse et la puissance laser. Une température du bain constante n'est pas optimale pour assurer une géométrie réelle de la pièce proche de la géométrie CAO puisqu'à une température de bain peut correspondre plusieurs géométries.

Cependant, ces contrôles se limitent à un contrôle local et ne sont éprouvés pour la plupart uniquement sur quelques cordons de déposition. Or, l'histoire thermique de la pièce se construit au fur et à mesure des excursions en température induite par le déplacement du bain de fusion sur le substrat.

1.5.3. Effets thermiques et contrôle de la microstructure

Comme mentionné au paragraphe 1.4, la microstructure est intimement liée à l'histoire thermique de la pièce. La plupart des contrôles thermiques ont donc pour but de contrôler les gradients thermiques au sein de la pièce pour s'assurer que les variations de température, en différents points de

celle-ci, ne conduiront pas à des perturbations dans la microstructure ou la solidification. Les techniques de thermographie sont identiques à celles utilisées pour le suivi du bain mais s'appliquent au suivi de l'ensemble de la pièce : par pyrométrie en un point de la pièce [40], pour suivre les cycles thermiques, et par caméra, pour avoir accès aux gradients au sein de la pièce [22].

La plupart de ces suivis visent à étudier la microstructure, la solidification, et les contraintes associées [16-25] et seuls quelques auteurs évoquent des boucles de rétroaction comme Nassar *et al.* [40]. L'objectif de ses travaux est de modifier la stratégie de fabrication de la pièce de sorte à corriger l'orientation des gradients thermiques dans la pièce pour avoir une croissance verticale des grains et non plus inclinés comme sur la Figure 1-16.

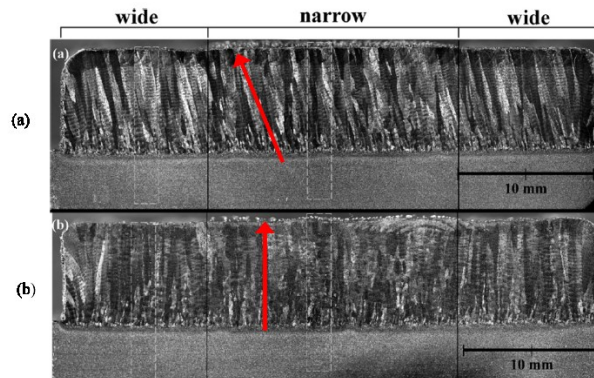


Figure 1-16 Macrostructure d'une pièce obtenue (a) sans boucle de rétroaction : les grains sont inclinés par rapport à la normale et (b) avec boucle de rétroaction qui corrige la stratégie de fabrication où les grains sont redressés, extrait de [40].

Pour ce faire, les cordons ne sont plus construits de manière juxtaposée (Figure 1-17 Stratégie de fabrication (a) sans boucle de rétroaction : les cordons sont fabriqués dans un ordre chronologique et (b) avec boucle de rétroaction : les cordons sont fabriqués dans un ordre optimisé, tiré de [40]) mais de sorte à modifier les gradients thermiques (Figure 1-17 b).

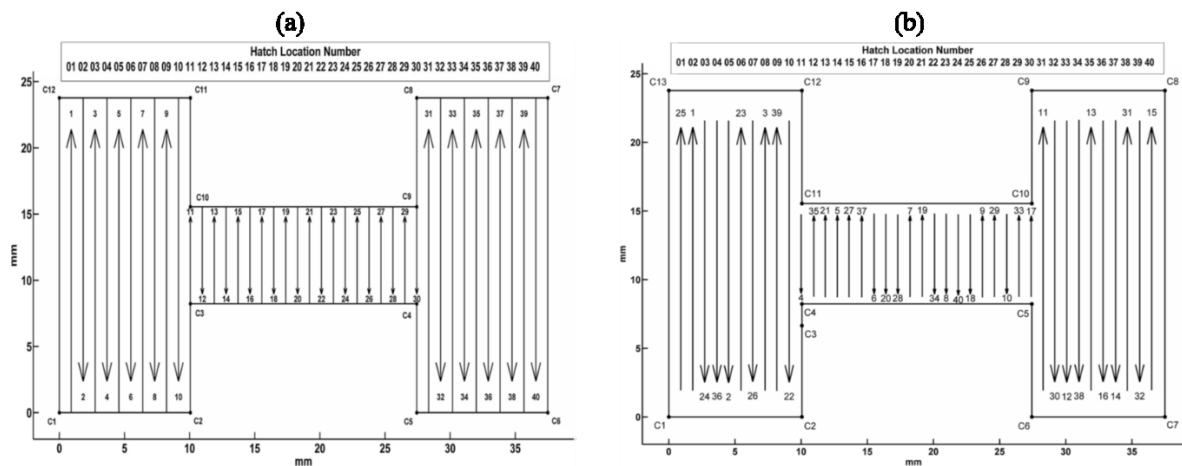


Figure 1-17 Stratégie de fabrication (a) sans boucle de rétroaction : les cordons sont fabriqués dans un ordre chronologique et (b) avec boucle de rétroaction : les cordons sont fabriqués dans un ordre optimisé, tiré de [40].

La buse modifie sa trajectoire si la température d'un cordon enregistrée par le pyromètre, dépasse un certain seuil. Au lieu de construire le cordon juxtaposé au dernier déposé, la buse construit un cordon à quelques millimètres de ce dernier. La stratégie de fabrication n'est donc plus celle de la Figure 1-17-a mais celle de la Figure 1-17-b.

Le contrôle direct de la microstructure s'effectue essentiellement par des examens destructifs (coupes métallurgiques), la technique de spectroscopie acoustique résolue spatialement (SRAS) est, à

notre connaissance, une des seules techniques effectives de contrôle de la microstructure sans destruction de la pièce. La technique SRAS consiste à émettre des ondes ultrasonores de surface au moyen d'un laser et d'un modulateur spatial de lumière (Spatial Light Modulator – SLM) [41]. Le motif d'illumination est constitué de franges espacées de la longueur d'onde des ondes que l'on souhaite engendrer par laser, ce qui correspond à des fréquences comprises entre 80 MHz et 200 MHz. Les ondes de surface sont détectées par interférométrie à quelques millimètres des franges. La méthode SRAS permet d'imager la microstructure des matériaux par la mesure de la vitesse des ondes de surface qui dépend de l'orientation des grains. Lorsque la source acoustique se déplace, les ondes traversent différents grains et leur vitesse est modifiée. Ainsi, une cartographie de la vitesse donne une cartographie de la microstructure.

Contrôle thermique et microstructural de la pièce

Le contrôle thermique de la pièce est essentiellement mis en œuvre pour accéder au suivi des contraintes résiduelles au moyen de techniques de thermographie. Il existe à ce jour peu de boucles de rétroaction se basant sur l'analyse des gradients thermiques de la pièce.

Le contrôle *in situ* de la microstructure, quant à lui, n'est que peu développé puisque complexe à transposer pour des surfaces rugueuses.

1.5.4. Porosités et fissurations

Les porosités et fissures sont des défauts historiquement détectés par des contrôles non destructifs (CND). Les contrôles de ces non-conformités en fabrication additive sont donc des adaptations de méthodes et techniques initialement utilisées en post-fabrication sur des pièces réalisées par le procédé de forge. Parmi les méthodes CND existantes, seules les techniques s'adaptant à un contrôle *in situ* sont mentionnées dans ce paragraphe. Sharatt *et al.* [27] font un état de l'art plus global (contrôle post-fabrication) des applications des CND à la fabrication additive. Parmi les quelques techniques les plus utilisées pour les pièces forgées, les ultrasons induits par éléments piézoélectriques, la radiographie ou la tomographie ne s'adaptent pas aisément à un contrôle *in situ*, les ultrasons nécessitant une immersion de la pièce ou un contact avec celle-ci et les rayons X impliquant une installation au sein de l'enceinte de fabrication. De plus, le post-traitement en tomographie est particulièrement long, ce qui ne permet pas d'envisager un contrôle en temps réel.

Les méthodes abordées dans ce chapitre sont les seules, à l'heure actuelle, répertoriées dans l'état de l'art pour le contrôle *in situ* dans les chambres de fabrication additive. Elles ont été étudiées à travers trois projets : MERLIN, INTRAPID, et I AM SURE. Il s'agit de méthodes thermographiques, par émission acoustique, par courant de Foucault et par ultrasons-laser.

- **Thermographie**

Le principe de la thermographie a été détaillé dans le paragraphe 1.5.2. La thermographie appliquée à la détection de défauts est essentiellement la thermographie infrarouge [42]. Elle permet de détecter des défauts surfaciques et sub-surfaciques (quelques millimètres de profondeur, selon le matériau et la source utilisée dans le cas de la thermographie active [27]). Du fait de son utilisation sans contact, elle est intéressante pour un contrôle *in situ*. Néanmoins, elle montre des limites de sensibilités dans certains cas comme la détection de trous génératrice⁴ sub-surfaciques [42].

⁴ Défaut souvent obtenus par électroérosion, créé un cylindre creux selon un axe dit de génération.

- **Émission acoustique**

L'émission acoustique consiste à utiliser les signaux acoustiques émis par la pièce durant sa construction et notamment les ondes émises par des défauts. Dans le cadre d'un contrôle *in situ*, le ou les capteurs d'émission acoustique sont placés sous le substrat [43,44]. Le capteur délivre une tension dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude de l'onde acoustique reçue. Il enregistre un signal, comme une coda sismique, pour chaque couche déposée lequel présente des pics. Ceux qui dépassent un certain seuil, fixé empiriquement sur le signal d'une couche, sont appelés « événements ». Chaque événement peut être caractérisé par l'amplitude de son pic, son énergie, son kurtosis⁵, son nombre d'oscillations, sa durée, son temps de montée, et sa fréquence centrale [43]. L'étude de ces paramètres donne des informations sur la nature et les dimensions du défaut [44]. Une analyse en composantes principales peut permettre de différencier une porosité, d'une fissure [43] en exhibant une signature acoustique différente. La localisation d'un défaut est possible en corroborant les indications renseignées par plusieurs capteurs disposés en différentes positions du substrat.

- **Courants de Foucault**

La technique de contrôle par courants de Foucault consiste à engendrer un champ magnétique à l'aide d'un bobinage alimenté par une tension sinusoïdale. Ce bobinage est placé à proximité de la pièce à contrôler et provoque des courants dans la pièce, dit champ de réaction, qui s'opposent à la variation du champ magnétique. Le champ de réaction modifie la force électromotrice de la bobine et permet de fournir une information sur l'état du matériau contrôlé. Dans le cas d'une inhomogénéité locale du matériau, par exemple un défaut de type fissure, les lignes de courants induites sont modifiées, entraînant ainsi une modification du champ de réaction. Cette méthode a l'inconvénient d'être ponctuelle et d'être sensible à l'orientation du défaut par rapport au capteur. Rudlin *et al.* [42] ont également montré une faible sensibilité aux trous génératrices usinés dans les pièces de DML.

- **Ultrasons-laser**

A contrario des ultrasons induits par des éléments piézoélectriques, les ultrasons-laser (UL) engendrent des ondes ultrasonores, sans contact avec la pièce, au moyen d'un laser. Leur principe sera décrit ultérieurement. Cette technique sans contact permet de contrôler *ex situ* des pièces de fabrication additive [45-49]. Cerniglia *et al.* [45] sont les rares auteurs à présenter un système de contrôle *in situ* du procédé DML par UL. Ils aboutissent à l'élaboration d'un système de contrôle adaptable en ligne : une plaque comportant l'ensemble du système de détection suit le déplacement de la buse de fabrication (cf. Figure 1-18). En théorie, un tel dispositif doit pouvoir fonctionner dans un milieu sous haute température. De plus, les UL allient la sensibilité d'un contrôle ultrasonore avec la flexibilité d'un système optique (les faisceaux lasers peuvent être acheminés par fibre optique dans l'enceinte de la chambre de fabrication). Les publications rendent compte d'une sensibilité de détection suffisante des UL pour détecter des trous génératrice de l'ordre de quelques centaines de micromètres de diamètre et de profondeur sur des surfaces polies. Les ultrasons-laser semblent donc être de bons candidats au contrôle *in situ* du procédé DML. Cependant, certains points sont encore à explorer comme la robustesse du dispositif pour des défauts de type fissurations, des défauts réels et la possibilité d'inspecter des surfaces rugueuses. Notons qu'aucun auteur n'a publié d'expérimentations portant sur une pièce de surface rugueuse ou portée à haute température sur les pièces fabriquées en DML avec un état de surface brut.

⁵ Kurtosis : est le coefficient d'aplatissement d'une distribution statistique. Une distribution Gaussienne possède un kurtosis égale à 3.

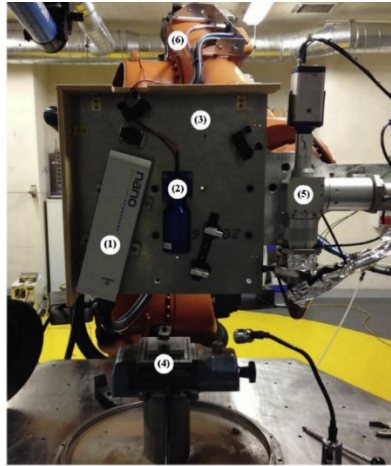


Figure 1-18 Dispositif *in situ* de contrôle par UL développé dans le projet INTRAPID 1-laser de génération, 2- laser de détection, 3- support, 4- pièce inspectée, 5-buse de fabrication DML 6- robot, extrait de [45].

Les techniques mises en œuvre pour détecter des porosités et fissures sont historiquement liés au contrôle non destructif sur pièces forgées. Ainsi, la transposition de ces méthodes à des applications sur des pièces de fabrication additive n'est pas évidente et ne garantit pas une conservation de l'efficacité de détection. Les ultrasons induits par élément piézoélectrique et la radiographie par rayons X sont difficilement envisageables pour un contrôle *in situ* du fait de leur condition d'utilisation et de leur encombrement. La thermographie et les courants de Foucault montrent une sensibilité limitée pour les trous génératrice. En revanche, les ultrasons-laser sont une technique prometteuse qu'il reste à explorer.

1.6. Conclusion

Le procédé de déposition métallique par laser (DML) permet de construire une pièce par superposition de cordons : de la poudre métallique entre en fusion au sein d'un bain liquide, créé par l'apport d'énergie d'un faisceau laser. En se solidifiant, ce bain forme le cordon ; il est donc une observable centrale dans le processus de refroidissement de la pièce et donc de sa microstructure.

Le procédé de déposition métallique par laser repose sur quatre principaux paramètres opératoires : le débit massique de poudre, la puissance et le diamètre du faisceau laser ainsi que la vitesse de déplacement de la buse. Un réglage fin de ces quatre paramètres est nécessaire pour élaborer une pièce ayant les caractéristiques mécaniques et géométriques voulues, conforme au modèle numérique. Des jeux de paramètres différents doivent être appliqués selon la géométrie choisie du cordon à déposer ; ils ne sont pas toujours connus et/ou difficilement anticipés. Cela rend complexe l'impression d'une pièce aux caractéristiques mécaniques/géométriques souhaitées. La variation d'un paramètre peut provoquer l'apparition de défauts tels que des variations de microstructure, des variations de la géométrie de la pièce (effondrements pouvant atteindre plusieurs centimètres de long), l'apparition de fissurations ou de porosités.

En réponse à cela, la stabilisation d'observables tels que les caractéristiques du bain de fusion est proposée, en faisant l'hypothèse qu'une constance de ces caractéristiques assure une homogénéisation de la structure de la pièce imprimée. Pour cela, l'instrumentation de capteurs dédiés à la surveillance de ces observables a été évaluée avec pour principe qu'une dérive des mesures qui en sont issues traduit une dérive du procédé.

Pendant, les liens de cause à effet ne sont pas encore clairement établis ou restent biaisés faute de capteurs adaptés. En l'état, les contrôles effectués ne permettent pas d'identifier toutes les irrégularités souhaitées dépendante du comportement multiphysique de la FA.

De fait, pris indépendamment les uns des autres, il n'existe pas de contrôles *in situ* qui garantissent la répétabilité du procédé DML puisqu'il n'y a pas d'observable unique : à un capteur correspond une observable. Ainsi, il se développe des technologies de contrôle complémentaires : le contrôle de l'atmosphère de la chambre de fabrication ou encore le contrôle du bain de fusion, le contrôle de la microstructure ou de la matière après refroidissement avec la recherche de porosités et fissures.

À travers l'étude bibliographique, on constate que la plupart des recherches se concentrent sur le suivi du bain de fusion. La principale limite de ce contrôle est qu'il ne détecte pas les défauts apparaissant pendant, et après, le processus de solidification comme les porosités ou les fissurations, qui elles, souffrent d'un manque de contrôle. En effet, les porosités et fissurations sont détectées essentiellement par contrôles non destructifs (CND) qui n'ont été transposés que très récemment à la fabrication additive.

Certains CND ont montré des performances de détection et de caractérisation satisfaisantes pour l'inspection de porosités et de fissures, comme l'émission acoustique ou les ultrasons-laser. Ces techniques, et notamment les ultrasons-laser, n'ont été testées que dans quelques cas particuliers, pour la détection de trous génératrice par exemple, et sans tenir compte des contraintes du contrôle *in situ* en DML comme l'état de surface des pièces. Aussi, au vu des possibilités des UL que nous détaillerons au chapitre suivant, il est apparu pertinent de poursuivre les recherches sur cette technologie.

Chapitre 2

Inspection de défauts par ondes de Rayleigh induits par ultrasons-laser (UL) : état de l'art

<u>2.</u>	<u>Inspection de défauts par onde de Rayleigh engendrée par ultrasons-laser (UL) : état de l'art</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.1.</u>	<u>Introduction</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.2.</u>	<u>Rappels sur la propagation des ondes élastiques</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.2.1.</u>	<u>Propagation de l'onde de Rayleigh</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.2.2.</u>	<u>Interactions ondes-matières</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.2.3.</u>	<u>Mises en œuvre d'un contrôle ultrasonore</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.</u>	<u>Principe d'un contrôle ultrasonore</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.1.</u>	<u>Génération d'onde élastique par effet photo-thermique</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.2.</u>	<u>Directivités de l'onde Rayleigh</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.3.</u>	<u>Contenu spectral de l'onde de Rayleigh</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.4.</u>	<u>Détection des ondes engendrées par laser impulsionnel</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.3.5.</u>	<u>Configuration de contrôle</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.4.</u>	<u>Contrôles non destructifs par onde de Rayleigh induite par laser</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.4.1.</u>	<u>Détection et caractérisation des défauts surfaciques</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.4.2.</u>	<u>Détection et caractérisation des défauts sub-surfaciques</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.5.</u>	<u>Conclusion</u>	Erreur ! Signet non défini.

2. Inspection de défauts par onde de Rayleigh engendrée par ultrasons-laser (UL) : état de l'art

2.1. Introduction

L'objectif de cette thèse est de contribuer au développement d'une méthode de contrôle *in situ* du procédé DML par ultrasons-laser (UL). La ligne directrice de ces travaux de thèse est dictée par cet objectif. S'inspirant largement des travaux de Klein *et al.* [46] et Cerniglia *et al.* [45], le système UL que nous avons imaginé pour une application industrielle, suit la buse de fabrication et contrôle les derniers cordons de matière déposée (cf. Figure 2-1). S'agissant d'un contrôle de défauts surfaciques et sub-surfaciques envisagé pour l'utilisation finale : nous nous intéressons aux ondes acoustiques de surface, et plus particulièrement à l'onde de Rayleigh, pour le contrôle du procédé DML.

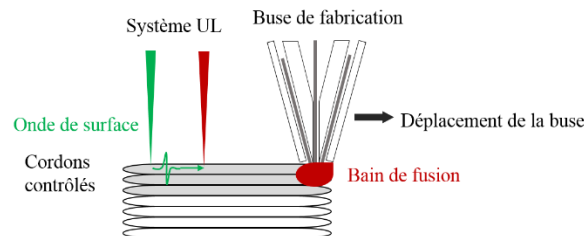


Figure 2-1 Principe du dispositif industriel envisagé pour un contrôle *in situ* du procédé DML : le système UL suit la trajectoire de la buse de fabrication et contrôle les derniers cordons déposés.

La première partie de ce chapitre étudie l'onde de Rayleigh dans un solide isotrope à faces parallèles, libre aux interfaces. La seconde partie détaillera l'engendrement et la détection de ces ondes par un système d'ultrasons-laser ainsi que les caractéristiques du faisceau laser (longueur d'onde, durée de l'impulsion laser, etc...) influençant la direction de propagation, la fréquence et l'amplitude des ondes engendrées. Ces deux premières parties permettent de poser les bases de la génération de l'onde de Rayleigh par UL et de sa propagation. Enfin, dans une dernière partie, nous verrons, comment l'exploitation de ces ondes peut être utile à l'inspection de défauts surfaciques et sub-surfaciques. Ce chapitre permet d'identifier, à travers l'état de l'art, les différentes configurations expérimentales et les différentes méthodes d'exploitations de données d'une inspection UL de porosités ou fissures.

2.2. Rappels sur la propagation des ondes élastiques

Dans ce paragraphe sont rappelés les éléments essentiels à la propagation des ondes de Rayleigh [47], [48].

2.2.1. Propagation de l'onde de Rayleigh

Les ondes ultrasonores sont des ondes élastiques qui se propagent dans une gamme de fréquences supérieures à 20 kHz. La résolution de l'équation de propagation de ces ondes, obtenue en appliquant le principe de la dynamique à la loi de Hooke, conduit à deux types d'ondes qui se propagent aux vitesses V_L et V_T dans le cas d'un solide isotrope [47].

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} \quad (2.2)$$

où λ et μ sont les premières constantes de Lamé, ρ la masse volumique du solide et c_{ij} les termes du tenseur des constantes élastiques. La première onde, se propageant à la vitesse V_L , est une onde de compression, appelée onde longitudinale (notées L), et engendre un déplacement particulaire parallèle à l'axe de propagation. La seconde onde, se propageant à la vitesse V_T , est une onde de cisaillement, appelée onde transversale (notée T). Elle induit un déplacement particulaire perpendiculaire à l'axe de propagation. Ces ondes sont des ondes de volume.

Lorsque le solide est limité, par exemple par une surface plane libre, notée S sur la Figure 2-2, cette frontière impose des conditions sur les grandeurs mécaniques ; les ondes s'y réfléchissent, et peuvent modifier le déplacement particulaire. Les ondes sont alors guidées par ces surfaces ; la surface libre d'un solide constitue un guide pour l'onde de Rayleigh.

L'onde de Rayleigh résulte de la composition d'une onde longitudinale, noté u_1 sur la Figure 2-2, et d'une onde transversale, notée u_2 . Ces composantes sont orthogonales, et leur amplitude varie différemment avec la profondeur, comme l'illustre la Figure 2-2. L'onde de Rayleigh possède une polarisation elliptique : les particules décrivent une ellipse qui se déforme en fonction de la profondeur dans l'échantillon, selon l'axe Z sur la Figure 2-1. L'amplitude de l'onde de Rayleigh décroît exponentiellement avec l'épaisseur, de sorte que son énergie reste confinée sur environ une longueur d'onde, notée λ : cette onde est donc évanescence [49].

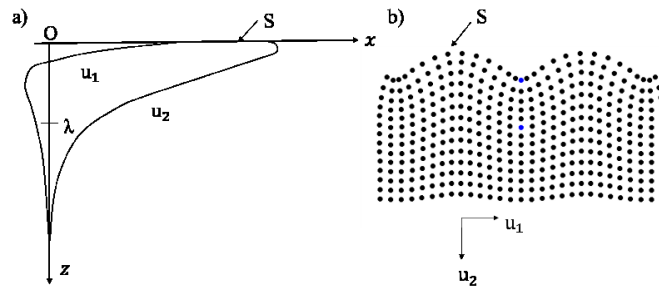


Figure 2-2 Onde de Rayleigh dans un solide isotrope semi-infini de surface libre, S . (a) Décroissance de la composante longitudinale u_1 et de la composante transversale u_2 en fonction de la profondeur z . (b) Déplacement elliptique des particules, extrait de [47].

L'onde de Rayleigh se propage à la vitesse V_R dont l'expression est donnée par l'équation de dispersion suivante [47] :

$$\eta^6 - 8\eta^4 - 8\eta^2(3 - 2\xi^2) + 16(\xi^2 - 1) = 0 \text{ avec } \eta = \frac{V_R}{V_T} \text{ et } \xi = \frac{V_T}{V_L} \quad (2.3)$$

Cette équation ne dépend que des vitesses des ondes L et T, et la vitesse V_R est inférieure à celles des ondes longitudinales et transversales. Une expression simplifiée de la vitesse des ondes de Rayleigh est donnée par Rayleigh [50] en fonction de la vitesse des ondes transversale et du coefficient de Poisson, noté ν environ égal 0,3 dans les métaux :

$$V_R = V_T \frac{0,87 + 1,12\nu}{(1 + \nu)} \quad (2.4)$$

Lors de leur propagation dans la pièce, ces ondes, L, T et R, se réfléchissent aux interfaces acoustiques, c'est-à-dire aux changements d'impédance acoustique rencontrés, qui peuvent être les contours de la

pièce, un défaut, ou par les grains des matériaux. Les ondes subissent également d'autres interactions avec la matière au cours de leur propagation (diffraction, atténuation...) qui peuvent être exploitées dans le cadre d'un contrôle pour mettre en évidence la présence d'un défaut. À ce titre, elles sont rappelées dans le paragraphe suivant.

2.2.2. Interactions ondes-matières

- **Atténuation**

L'atténuation d'une onde dans le milieu dans lequel elle se propage est due à la perte d'énergie durant sa propagation, du fait de sa diffusion, de son absorption, de sa réflexion et de sa diffraction. Elle varie donc en fonction du matériau mais également de l'état de surface, nous y reviendrons dans les chapitres 4 et 5 de cette thèse. L'atténuation totale α_T peut donc s'écrire :

$$\alpha_T = \alpha_V + \alpha_S \quad (2.5)$$

où α_V est l'atténuation viscoélastique et α_S est l'atténuation par diffusion. L'intensité, I , d'une onde ultrasonore se propageant dans un milieu d'épaisseur x suit une loi de Beer-Lambert donnée par l'équation 2.6 :

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

où I_0 est l'intensité initiale de l'onde et α le coefficient d'absorption. Il quantifie les pertes viscoélastiques et est proportionnel à la fréquence de l'onde. Ainsi, une onde haute fréquence est plus absorbée qu'une onde basse fréquence. À partir de l'équation 2.6, l'atténuation, notée α , peut s'exprimer en dB selon l'équation (2.7):

$$\alpha = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.7)$$

Il est intéressant de mettre le phénomène d'atténuation en regard du phénomène de diffraction.

- **Diffraction et diffusion**

L'onde ultrasonore est diffractée par la présence d'un objet de dimension e avec un angle γ tel que :

$$\gamma = \frac{2\lambda}{e} \quad (2.8)$$

où λ est la longueur d'onde ultrasonore. Ainsi, la fréquence de l'onde détermine la dimension des objets qu'il est possible de détecter au moyen de l'onde ultrasonore réfléchi. En pratique, on considère qu'un défaut est détectable lorsque $e \sim \lambda/2$. En conséquence, le choix de la fréquence ultrasonore pour une inspection résulte d'un compromis : plus la fréquence de l'onde est élevée, plus l'onde ultrasonore sera sensible aux petits défauts, mais plus elle sera atténuée.

La diffraction est un cas particulier de la diffusion : la diffusion est le phénomène par lequel l'onde ultrasonore est déviée dans différentes directions du milieu, par son interaction avec un ou plusieurs réflecteurs. La somme des intensités des ondes diffusées est fonction des différents chemins de propagation de ces ondes pour lesquelles les différences de phases ont un caractère aléatoire. Dans le cas d'une diffraction, la somme des intensités des faisceaux diffusés ne présente pas ce caractère aléatoire, et l'onde est cohérente. Le phénomène de diffusion est particulièrement important dans les

milieux où les centres diffuseurs sont multiples comme les milieux poreux, nous y reviendrons au chapitre 5.

• Réflexion

Lorsqu'une onde acoustique rencontre l'interface de deux milieux différents, elle peut être partiellement ou entièrement réfléchi. Un milieu est caractérisé, par son impédance acoustique, défini comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse de propagation des ondes dans ce milieu. Elle traduit la résistance d'un milieu au passage d'une onde. Lorsque deux milieux ont des impédances différentes, les ondes ultrasonores subissent des réflexions. La loi de Snell-Descartes (cf. équation 2.5), illustrée sur la Figure 2-3, donne les vitesses des ondes incidentes V^{inc} , réfléchies V^{ref} et transmises V^{trans} en fonction des angles d'incidence θ^{inc} , de réflexion θ^{ref} et transmission θ^{trans} à l'interface de deux milieux isotropes. Les surfaces des lenteurs présentées sur la Figure 2-3 sont les extrémités des vecteurs lenteurs $\vec{m}$ tracé à partir d'un point fixe O , lorsque la direction de propagation $\vec{n}$ varie. La Figure 2-3-a présente la réflexion et la transmission d'une onde incidente longitudinale sur une interface. L'onde incidente est convertie en une onde longitudinale et une onde transversale.

$$\frac{\sin(\theta^{inc})}{V^{inc}} = \frac{\sin(\theta^{ref})}{V^{ref}} = \frac{\sin(\theta^{trans})}{V^{trans}} \quad (2.9)$$

Pour un angle d'incidence dit critique, noté $\theta_{critique}^{inc}$ sur la Figure 2-3-b, l'onde est transmise avec un angle de 90° , ainsi l'onde longitudinale transmise est surfacique.

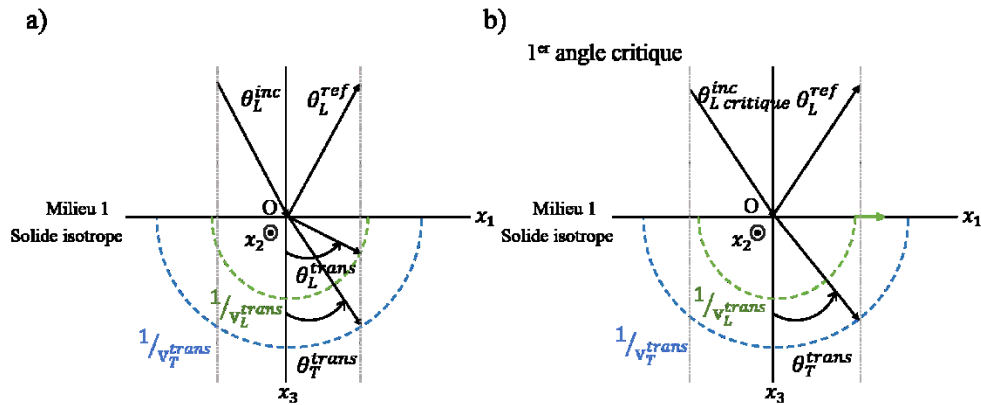


Figure 2-3 Surface des lenteurs illustrant les conversions de mode (a) à un angle d'incidence quelconque, b) à l'angle critique où l'onde transversale transmise est rampante.

L'ensemble de ces interactions ondes-matière sert à l'interprétation des signaux ultrasonores acquis lors d'un contrôle non destructif. Le paragraphe suivant explique comment ces ondes sont engendrées pour ensuite être utilisées pour une inspection.

2.2.3. Mises en œuvre d'un contrôle ultrasonore

La mise en œuvre d'un contrôle ultrasonore (US) consiste à engendrer une onde ultrasonore dans la pièce à tester et à acquérir ensuite son amplitude en fonction du temps. Cette représentation de l'amplitude en fonction du temps est appelée A-scan en imagerie ultrasonore. Les échos visibles du A-scan sont le résultat de la réflexion des ondes aux frontières de la pièce ou sur un défaut comme le montre la Figure 2-4.

Une acquisition temporelle, en plusieurs positions de la surface, permet de construire une représentation B-scan, c'est-à-dire une image représentant le temps en fonction de la position du

capteur. L'amplitude des signaux en chaque point est codée selon une échelle de couleur. Classiquement, les ultrasons sont générés par des capteurs piézoélectriques (PZT), appelés transducteurs, dont le principe repose sur l'effet du même nom : un signal électrique est converti en signal mécanique ou inversement. Une des contraintes de ces capteurs est qu'ils nécessitent l'utilisation de couplant entre la pièce et ces derniers. En effet, la rupture d'impédance entre l'air et le capteur est telle qu'elle atténue fortement la transmission de l'onde. Les capteurs piézoélectriques requièrent donc l'immersion de la pièce dans l'eau ou l'utilisation d'un gel, permettant le couplage avec la pièce.

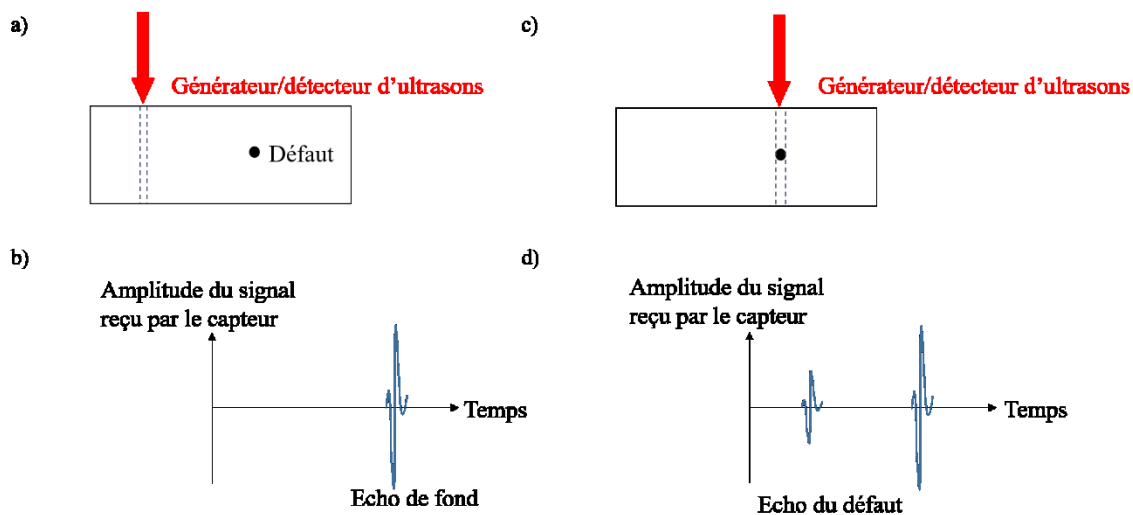


Figure 2-4 (a) Propagation des ondes dans une pièce sans défaut. (b) A-scan présentant uniquement un écho de fond. (c) Propagation et interaction des ondes d'un défaut. (d) A-scan présentant un écho du défaut.

Il existe cependant des méthodes de génération ultrasonore sans contact : les ultrasons couplés à l'air, les ultrasons générés par un champ électromagnétique (EMAT) ou les ultrasons-laser (UL). Dans le cadre d'un contrôle d'une pièce métallique par ultrasons couplés à l'air, la différence d'impédance entre l'air et le métal est très importante et environ 1% des ultrasons induits par le capteur sont transmis à la pièce. Par ailleurs, un inconvénient majeur de cette technique est de n'engendrer des ultrasons qu'en deçà de 5 MHz. Or, les dimensions des défauts recherchés lors du procédé DML sont proches de 100 μm (cf. chapitre 2). D'après l'équation 2.8, la longueur d'onde des ultrasons pour détecter ces défauts doit donc être supérieure à $\lambda/2$ soit environ égale à 100 μm , ce qui dans les métaux correspond à des fréquences de l'ordre de 10 MHz. Ainsi, les transducteurs couplés à l'air ne sont pas adaptés dans le cadre de cette étude. Enfin, nous avons vu au chapitre précédent que les ultrasons-lasers sont également utilisés pour engendrer des ondes acoustiques dont nous détaillerons par la suite le principe et les avantages pour nos applications.

2.3. Principe d'un contrôle ultrasonore

Un contrôle par ultrasons-laser (UL) consiste à engendrer des ondes ultrasonores, au moyen d'un laser, dit de génération, qui, en irradiant la surface de la pièce, crée une élévation de température et donc une déformation thermoélastique au sein du matériau. Cette déformation est à l'origine d'ondes ultrasonores qui se propagent dans la pièce et induisent aussi des déplacements de la surface. Ils peuvent être détectés au moyen d'un autre laser, dit de détection, couplé à un système d'interférométrie. Les ondes acoustiques sont donc engendrées et détectées, sans contact, à distance de la pièce. Cette technologie s'affranchit ainsi du problème de l'utilisation d'un couplant ou de l'immersion et permet

d'envisager un contrôle sur une géométrie complexe. De fait, les UL sont une méthode pertinente pour le contrôle *in situ*.

L'étude et le développement des méthodes par UL ont débuté dans les années 60. Les applications des ultrasons-laser sont centrées sur la mesure d'épaisseur, les propriétés thermiques, optiques, élastiques des matériaux et la détection de défauts dans différents types de matériaux : des composites aux métaux, et mettent en œuvre l'ensemble des ondes engendrées. Dans les années 2000, les UL sont introduits dans l'industrie notamment chez Airbus [51] avec le dispositif LUCIE. Par ailleurs, des projets de recherche sur les UL ont été supportés par le monde académique et industriel, comme dans projet INTRAPID [45], qui a la particularité de s'appliquer au contrôle de pièce de fabrication additive.

2.3.1. Génération d'onde élastique par effet photo-thermique

La génération d'onde ultrasonore par laser dépend des paramètres du faisceau laser (longueur d'onde, puissance incidente, durée de l'impulsion, taille et forme de la tâche focale) et des propriétés optiques, thermiques et élastiques du matériau. Elle repose sur l'interaction d'impulsions lumineuses, le plus souvent de courte durée avec le matériau. La durée de ces impulsions conditionne la gamme de fréquence des ondes générées. Ainsi, un laser nanoseconde génère des ondes allant jusqu'à quelques dizaines de MHz tandis qu'une durée d'impulsion de l'ordre de la femtoseconde génère des ultrasons de l'ordre du THz. Puisque l'objectif est de détecter des défauts de quelques centaines de micromètres, nous travaillons avec un laser nanoseconde [52].

En régime nanoseconde, les sources les plus utilisées sont le laser impulsif déclenché (Q-switched) Nd :YAG et le laser CO₂ [53], pour le contrôle des métaux et des composites respectivement. Un rapide calcul, détaillé dans [52], permet d'estimer le déplacement de la surface, noté u_r , à une distance r de la zone contrainte par l'impact laser, de volume dV , pendant un temps dt , pour quantifier l'énergie nécessaire pour déposer suffisamment d'énergie sans créer une déformation irréversible de la matière :

$$u_r = \frac{1}{6\pi r v_L} \cdot \frac{\delta V}{\delta t} \quad (2.10)$$

$$u_r = \frac{1}{6\pi r v_L \rho C} \cdot \frac{\delta E}{\delta t} \quad (2.11)$$

Pour l'aluminium :

$$u_r = \frac{2,5 \cdot 10^{-16}}{r} \cdot \frac{\delta E}{\delta t} \quad (2.12)$$

Ainsi, pour une amplitude de déplacement $u_r = 1 \text{ \AA}$, qui est l'ordre de grandeur d'un déplacement de la surface créé par UL, à une distance r de 10 mm, la puissance instantanée du laser $\frac{\delta E}{\delta t}$ est de 10^4 W , d'après l'équation 2.12. À cette puissance, un laser continu provoquerait une vaporisation importante du matériau et donc le détériorerait, les lasers impulsifs sont donc préférés dans la mise en œuvre d'un système par ultrasons-laser.

Lorsque le laser de génération est focalisé sur une pièce, une partie de son rayonnement électromagnétique (EM) est absorbée par la surface de la pièce. L'énergie EM est convertie en énergie thermique, ce qui induit une augmentation rapide et locale de la température de l'échantillon. Les ondes ultrasonores sont générées suivants différents mécanismes qui relèvent de trois régimes de fonctionnement : le régime thermoélastique, le régime intermédiaire et le régime ablatif. Le régime

intermédiaire n'est pas couramment utilisé, aussi, nous ne détaillerons pas ici et on pourra se référer à [54-55]

- **Régime thermoélastique**

En régime thermoélastique, l'irradiation induit une élévation de la température en deçà de la température de fusion du matériau. Cette augmentation de température engendre des contraintes essentiellement tangentiels à la surface irradiée (cf. Figure 1-5). Ce mode de génération n'altère pas la pièce contrôlée et il est donc préféré pour le contrôle non destructif.

- **Régime ablatif**

En régime ablatif, l'impact laser vaporise une fine couche de matériau et éjecte des particules de la surface. Ce régime engendre des contraintes principalement normales à la surface qui génèrent des ondes longitudinales et transversales d'amplitudes plus importantes que celles du régime thermoélastique [55] (cf. Figure 2-5).

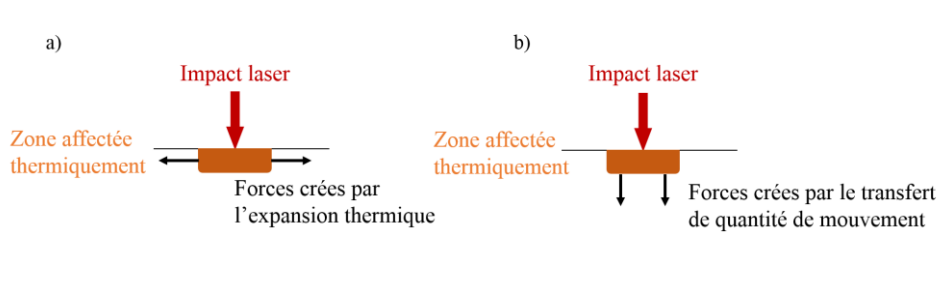


Figure 2-5 (a) Forces tangentiels à la surface libre en régime thermoélastique. (b) Forces normales à la surface libre en régime ablatif.

La puissance surfacique délivrée par le laser, P , est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{E}{\Delta t \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.13)$$

où E est l'énergie du laser par impulsion, Δt la durée de l'impulsion laser et d le diamètre de la surface éclairée par le faisceau laser [52]. Le seuil entre ces deux régimes est conditionné par la densité de puissance surfacique P_{seuil} délivrée à la pièce dont Ready *et al.* [57,58] établissent une approximation :

$$P_{\text{seuil}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot K \cdot \rho \cdot C}{4 \cdot \Delta t}} (\theta_v - \theta_i) \quad (2.14)$$

où K ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) est la conductivité thermique, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) la masse volumique, C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) la capacité thermique massique, Δt (s) durée de l'impulsion laser, θ_v (K) la température de vaporisation du matériau et θ_i (K) la température initiale du matériau. Ainsi, pour les métaux, P_{seuil} est d'environ 10 MW/cm^2 d'après l'équation 2.14.

Suite à l'impact laser, et indépendamment du régime de génération, tous les modes d'ondes élastiques sont engendrés : des ondes de volumes (L et T) et les ondes guidées (onde de Rayleigh et onde longitudinale de surface) comme le montre le champ ultrasonore simulé sur la Figure 2-6. Elle est obtenue au moyen du code SimSonic, développé par Emmanuel Bossy [56]. Il repose sur la résolution par différence finie dans le domaine temporelle (Finite Difference Time Domain, FDTD) des équations élastodynamiques en 2D ou 3D. Elle ne prend pas en compte l'absorption, les propriétés optiques et thermiques. Pour les métaux, l'épaisseur de pénétration optique est restreinte à la surface du matériau,

aussi, en première approximation, ce modèle permet d'illustrer la propagation des ondes au sein des métaux. Par ailleurs, il prend en compte les propriétés élastiques du matériau. La Figure 2-6 est obtenue à partir d'un maillage spatial de pas $\Delta x = 0,04$ mm dans l'acier 316L. Ce pas est choisi pour des raisons de stabilité numérique imposant la condition suivante $\Delta x \leq \lambda/10$. Le maillage temporel est tel que $\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{d}} \cdot \frac{\Delta x}{v_{max}}$, avec d la dimension du maillage et v_{max} , la vitesse maximale des ondes dans le milieu considéré.

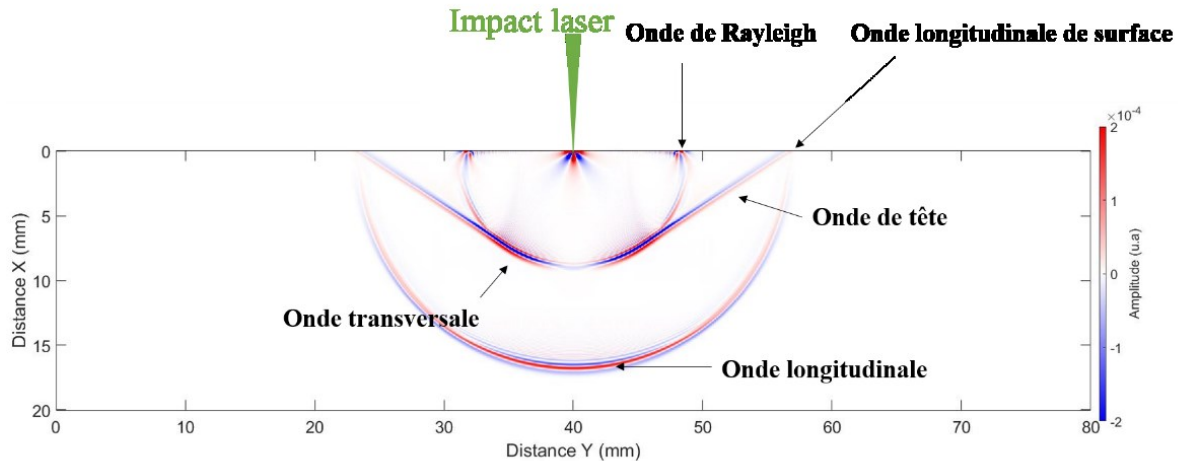


Figure 2-6 Ondes induites par laser dans une pièce d'acier 316L après un temps de propagation de 3 μ s.

L'onde de tête est observée lorsque le point d'observation se situe à un angle supérieur à l'angle critique mentionné au paragraphe 2.2.2.

Les caractéristiques de ces ondes, amplitude et fréquence, sont déterminées par le choix du laser et par les caractéristiques de la tâche focale formée par le laser de génération qui influe notamment sur la direction de propagation privilégiée des ondes. Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, l'onde d'intérêt pour la détection de défauts surfaciques et sub-surfaciques est l'onde de Rayleigh. Aussi, nous ne discuterons que des ondes de surfaces dans la suite de ce chapitre.

2.3.2. Directivités de l'onde Rayleigh

La forme et les dimensions de la tâche focale laser peuvent, d'une part, modifier la densité de puissance surfacique pour une énergie par impulsion fixe (cf. équation 2.14) et d'autre part, induire une direction de propagation privilégiée. La directivité d'une source d'excitation est sa capacité à émettre des ondes suivant une ou plusieurs directions. Une source omnidirectionnelle émet dans toutes les directions avec la même puissance, comme c'est le cas pour une tâche focale laser ponctuelle par exemple. La directivité de l'ensemble des ondes produites par laser est décrite théoriquement par Scruby [52]. Aindow *et al.* et Hutchins *et al.*, quant à eux, ont mené des travaux expérimentaux sur la directivité des ondes de volume [57] et des ondes de Rayleigh [58] dans les métaux. La directivité des ondes dans le matériau est fonction du régime [59], du type de matériau, de la fréquence des ondes [60] et des caractéristiques géométriques de la source. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons au choix de la forme et des dimensions de la tâche focale pour la génération d'onde de Rayleigh. Nous détaillerons plus particulièrement l'influence de la forme de la source sur le diagramme de directivité. Deux formes de source favorisent la génération des ondes de Rayleigh au moyen d'un seul laser : un anneau et une ligne source.

La génération d'une onde de Rayleigh par un anneau [61] est telle que le maximum d'amplitude de l'onde est atteint au centre de celui-ci. La ligne laser favorise, quant à elle, la génération d'onde de

Rayleigh dans une direction perpendiculaire à cette ligne [64-67]. Le choix de la géométrie de la source se pose donc au regard de notre application. Dans la perspective d'intégrer un système UL dans une machine du procédé DML, la distance entre le laser de génération et de détection doit être flexible pour s'adapter au contrôle des géométries des pièces en construction. Cette distance peut être modulée avec une génération en ligne uniquement en déplaçant le point de détection. Avec une configuration en anneau, la distance génération-détection ne peut être changée qu'en modifiant la focale de la lentille générant l'anneau (lentille axicon). Ce changement de focale n'est pas optimal lors d'un contrôle *in situ*, aussi nous avons opté pour une ligne source.

Aindow *et al.* mettent en évidence le caractère omnidirectionnel des ondes de Rayleigh dans le cadre d'une émission ponctuelle [58] et présentent le diagramme de directivité de ces ondes engendrées par une ligne source de 4 mm de long sur 0,1 mm de large (cf. Figure 2-7).

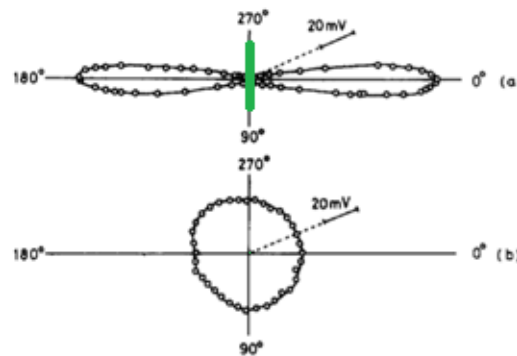


Figure 2-7 Diagrammes de directivité (a) d'une ligne laser et (b) un spot laser en régime thermoélastique dans l'aluminium générant des ondes de Rayleigh, extrait de [58].

L'énergie acoustique est concentrée dans une direction perpendiculaire à la ligne laser, passant par son milieu. Les travaux de Arias *et al.* [62] montrent l'impact de la longueur de cette ligne sur le diagramme de directivité, présentés Figure 2-8.

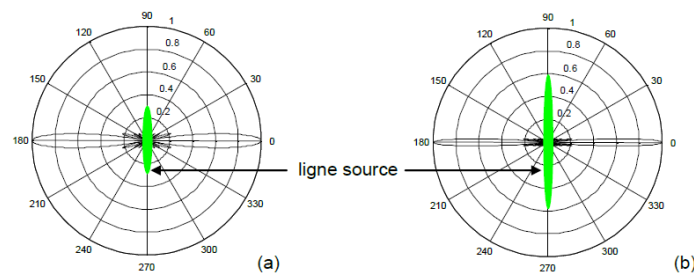


Figure 2-8 Modification des diagrammes de directivité d'une ligne source infiniment fine de (a) 5 mm de long et (b) 10 mm de long en régime thermoélastique, dans l'aluminium, extrait de [14].

Plus la longueur de la ligne source est importante, plus la source est directive selon la direction perpendiculaire à celle-ci. Les auteurs qui mentionnent les dimensions de la ligne source font état de longueurs allant de 5 mm [63] à 30 mm [64] et de largeurs de quelques centaines de micromètres. L'amplitude du déplacement de la surface en fonction de la largeur de la ligne (de 0 à 300 μm) est présentée sur la Figure 2-9, pour une puissance surfacique constante. Plus la largeur de la ligne est faible et plus l'amplitude du déplacement est importante, cette dimension de la source de génération devra être choisie en conséquence, nous y reviendrons au chapitre 3. Si l'amplitude de l'onde joue un rôle essentiel dans le rapport signal sur bruit, la fréquence de l'onde, comme nous l'avons vu au paragraphe

2.2.2 détermine la dimension des défauts qu'il est possible de détecter. Ainsi, le paragraphe suivant traite de la fréquence des ondes engendrées par une ligne source.

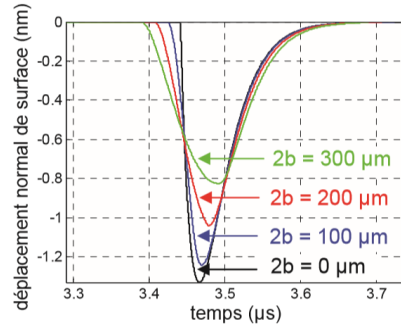


Figure 2-9 Augmentation du déplacement de la surface avec la diminution de la largeur de la ligne source, extrait de [65].

2.3.3. Contenu spectral de l'onde de Rayleigh

Nous avons mentionné au paragraphe 2.3.1 que la durée des impulsions laser conditionne la gamme de fréquences des ultrasons générés dans le matériau. En fait, le profil de l'onde ultrasonore est considéré comme identique à celui de l'impulsion laser émise, soit une gaussienne de la forme :

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\Delta t^2}\right) \quad (2.15)$$

où Δt est la durée moyenne de l'impulsions laser. La transformée de Fourier de l'équation 2.15 est égale à

$$\mathcal{F}(f) = \int \exp(-t^2/2\Delta t^2) \exp(-2i\pi ft) \propto \exp(-2\pi^2 \Delta t^2 f^2) \quad (2.16)$$

La transformée de Fourier est proportionnelle à

$$\mathcal{F}(f) \propto \exp(-2\pi^2 \Delta t^2 f^2) \quad (2.17)$$

Pour la largeur à mi-hauteur de la Gaussienne, la transformée de Fourier tombe à la moitié de sa valeur maximale $\frac{1}{2} = \exp(-2\pi^2 \Delta t^2 f^2)$. On obtient alors :

$$f(-6 \text{ dB}) = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{\Delta t} \cdot \pi\sqrt{2} = 0,1874/\Delta t \quad (2.18)$$

Donc si $f(-6 \text{ dB}) = 10 \text{ MHz}$, la durée de l'impulsion laser donnée par l'équation 2.18, Δt , est alors de 20 ns [66].

Pour une durée d'impulsion laser fixée, les dimensions de la tâche focale peuvent influencer la fréquence centrale et la bande passante du spectre des ondes élastiques engendrées dans la gamme de fréquence déterminée par la durée d'impulsion laser. Par ailleurs, pour une durée d'impulsion laser fixée (25 ns), Doyle [67] étudie l'influence des dimensions de la ligne source laser sur les fréquences des ondes de Rayleigh générée. La

Figure 2-10, tirée de ses travaux, présente le spectre de l'onde de Rayleigh en fonction de la largeur de la ligne source. Doyle observe que plus la largeur de la ligne est faible, plus la fréquence

centrale du spectre est élevée et plus la bande passante est importante ; une largeur de ligne de 0,2 mm rend compte d'un spectre centré en 4 MHz et d'une bande passante d'environ 4 MHz. D'une large bande passante résulte une gamme de longueur d'onde plus étendue, ce qui permet d'inspecter une large gamme de dimensions de défauts, c'est donc, *a priori*, un critère que nous privilégierons pour un contrôle non destructif.

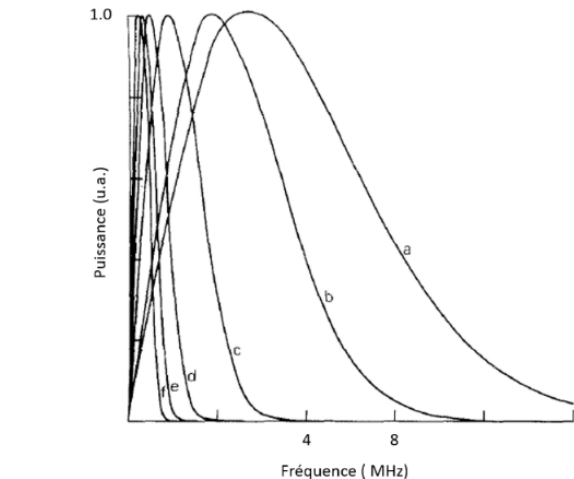


Figure 2-10 Diminution de la bande passante du spectre de l'onde de Rayleigh générée par une ligne source avec l'augmentation de la demi-largeur : (a) 0,1 mm, (b) 0,2 mm, (c) 0,5 mm, (d) 1,0 mm, (e) 1,5 mm et (f) 2,0 mm sur de l'aluminium en régime thermoélastique (durée de l'impulsion laser : 25 ns), extrait de [67].

2.3.4. Détection des ondes engendrées par laser impulsif

La détection des ondes induites par laser consiste à détecter les déplacements de la surface provoqués par la propagation des ondes. Un des intérêts des UL est qu'ils peuvent être utilisés sans contact avec la pièce. Pour exploiter pleinement ce potentiel, la plupart des systèmes UL utilisent une détection optique, donc sans contact également. Les déplacements de la surface générés par les ultrasons sont de l'ordre du nanomètre. Parmi les méthodes optiques sensibles à ces faibles déplacements, on s'intéresse aux méthodes interférométriques autorisant la mesure sur des surfaces rugueuses.

Pour contrôler les pièces en cours de fabrication, comme envisagé dans la perspective d'un contrôle *in situ*, le système de détection doit avoir une bonne sensibilité même vis-à-vis de surfaces rugueuses. Le faisceau laser réfléchi par une telle surface est caractérisé par son speckle qui est une figure d'interférence où la distribution de phase et d'intensité est aléatoire. Pour collecter ce speckle, l'interféromètre doit avoir une étendue suffisante. L'étendue est définie comme le produit de la surface illuminée et de l'angle solide. L'étendue doit correspondre à la surface de l'objet dont on veut mesurer le déplacement pour ne pas perdre en sensibilité. Elle représente la capacité du système à s'adapter aux fluctuations spatiales et temporelles de la lumière diffusée. Parmi les différents systèmes d'interférométrie (Mach-Zender, Michelson, Fabry-Perot, basées sur un cristal photoréfractif...), l'interféromètre confocal de Fabry Perot possède la plus grande étendue [68]. Il est d'ailleurs aujourd'hui répandu dans les applications CND. Cependant, l'interférométrie basée sur l'utilisation d'un cristal photoréfractif [69], détaillé par la suite, présente une meilleure sensibilité de détection sur la gamme de fréquence de 1 à 15 MHz par rapport au Fabry-Perot pour des surfaces diffusantes [70].

L'ensemble des techniques d'interférométrie sont détaillées dans les références [74 -75]. Le paragraphe suivant s'attache à ne décrire qu'un système interférométrique basé sur l'holographie temps réel [71], c'est-à-dire utilisant un cristal photoréfractif, qui est le système utilisé dans la suite de cette thèse.

Ce système d'interférométrie consiste à démoduler la phase présente dans la lumière réfléchie par l'échantillon. Cette modulation de phase contient l'information sur le déplacement de la surface. Pour ce faire, deux faisceaux sont utiles :

- Le faisceau pompe, qui est directement issu du laser,
- Le faisceau signal qui est le faisceau réfléchi par l'échantillon et donc modulé en phase. Il présente une distorsion de son front d'onde du fait des rugosités présentes sur la surface.

Les faisceaux interagissent au sein d'un cristal photoréfractif dans lequel ils forment un hologramme, sans cesse réécrit, dit dynamique, à une fréquence de quelques kilohertz. Dans le même temps, le faisceau pompe se trouve diffracté dans la direction du faisceau signal, avec la particularité d'avoir un front d'onde identique à celui du faisceau signal. Un photodétecteur convertit la variation d'intensité lumineuse, due au déphasage, en signal électrique. Le principe de cet interféromètre est présenté sur la Figure 2-11.

Le laser utilisé dans cette configuration peut être continu ou impulsionnel. L'avantage d'un laser impulsionnel est qu'il peut délivrer plus d'énergie et ainsi améliorer le rapport signal sur bruit. *A contrario*, le temps d'enregistrement d'un signal est limité à la durée d'impulsion du laser, ce qui peut être un facteur limitant si les données doivent être acquises sur une période supérieure à cette durée d'impulsion.

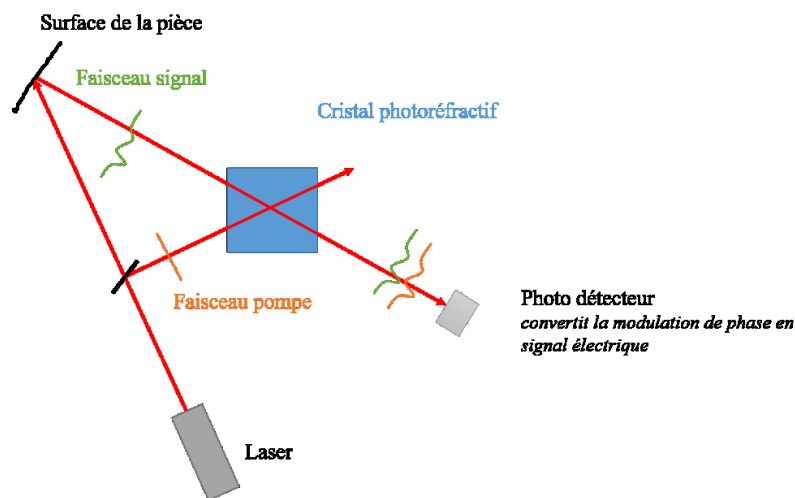


Figure 2-11 Principe de fonctionnement d'un interféromètre par mélange de deux ondes dans un cristal photoréfractif.

2.3.5. Configuration de contrôle

La génération et la détection peuvent être agencées différemment selon le mode d'onde exploité et l'information souhaitée. Ainsi, trois configurations sont possibles :

- Transmission (Figure 2-12-a) : l'émission et la réception sont de part et d'autre de la pièce, ce dispositif peut servir à la mesure d'atténuation ;
- Pulse-écho (Figure 2-12-b) : l'émission et la réception sont confondues, c'est la configuration la plus favorable pour une mesure d'épaisseur, elle peut être utile à la mesure d'atténuation ;
- Pitch-and-catch (Figure 2-12-c) : l'émission et la réception sont espacées d'une distance D , de quelques millimètres à plusieurs centimètres ; cette distance peut être fixe ou les deux lasers peuvent s'écarter progressivement.

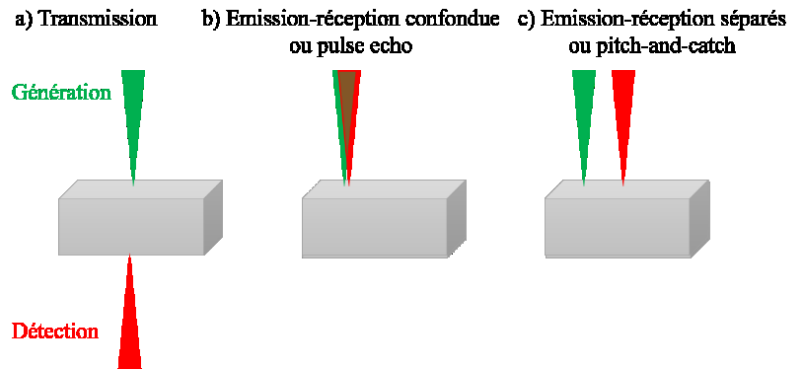


Figure 2-12 Configurations de contrôle possibles par UL (a) transmission, (b) pulse-echo, (c) pitch-and-catch.

La configuration pitch-and-catch est favorable à la détection des ondes de surface ; elle est d'ailleurs largement utilisée pour les contrôles de défauts surfaciques et sub-surfaciques comme détaillé au paragraphe suivant.

Les ultrasons-laser sont une méthode de génération et de détection d'ondes ultrasonores tout optique. Les ultrasons générés au sein de la pièce ont des caractéristiques (fréquence, directivité, et amplitude) conditionnées par le choix des spécificités du laser de génération (durée d'impulsion, nature du laser, fréquence de tir, dimensions de la tâche focale) et du type de matériau inspecté. Les déplacements de la surface, de l'ordre de quelques nanomètres, sont détectés par un système d'interférométrie. Dans le cas d'inspection sur surface rugueuse, la sensibilité aux rugosités est primordiale, à ce titre l'interféromètre par holographie en temps réel s'avère être un candidat pertinent⁶.

Avantages des UL

- Sans contact, ce qui permet par exemple de contrôler des pièces sous hautes températures
- Génération efficace de l'ensemble des modes
- Une bande passante importante (pouvant aller jusqu'au gigahertz)

Inconvénients des UL

- Conditions de sécurités liées aux lasers
- Coût du dispositif

2.4. Contrôles non destructifs par onde de Rayleigh induite par laser

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer les configurations expérimentales et exploitations de données possibles pour l'inspection d'une pièce métallique par l'onde de Rayleigh. Plus particulièrement, le système identifié doit permettre de détecter des défauts dont les dimensions sont de l'ordre de 100 μm .

Puisqu'un contrôle par ondes de Rayleigh est envisagé, seules les publications qui traitent d'une configuration pitch-and-catch sont retenues dans cet état de l'art. Deux variantes de cette configuration sont envisageables :

- les deux lasers balayent la surface de l'échantillon (cf. Figure 2-13-a)

⁶ Les systèmes Polytec (IR) et Bossa Nova fonctionne aussi très bien sur surface rugueuse

- un laser reste fixe tandis que l'autre est progressivement écarté comme schématisé sur la Figure 2-13-b.

Deux aspects sont traités, d'une part la détection des défauts et d'autre part, la caractérisation de ces derniers. En effet, leurs dimensions et leur nature sont des éléments importants dans la perspective d'un contrôle *in situ* puisqu'ils permettront éventuellement d'évaluer l'effet de ces défauts sur les propriétés mécaniques de la pièce. Pour plus de clarté, le paragraphe traite séparément le contrôle des fissures, étudié majoritairement dans les années 2000 sur des pièces forgées en aluminium ou acier, du contrôle des porosités, pour lesquelles il existe déjà un certain nombre d'études sur des pièces DML.

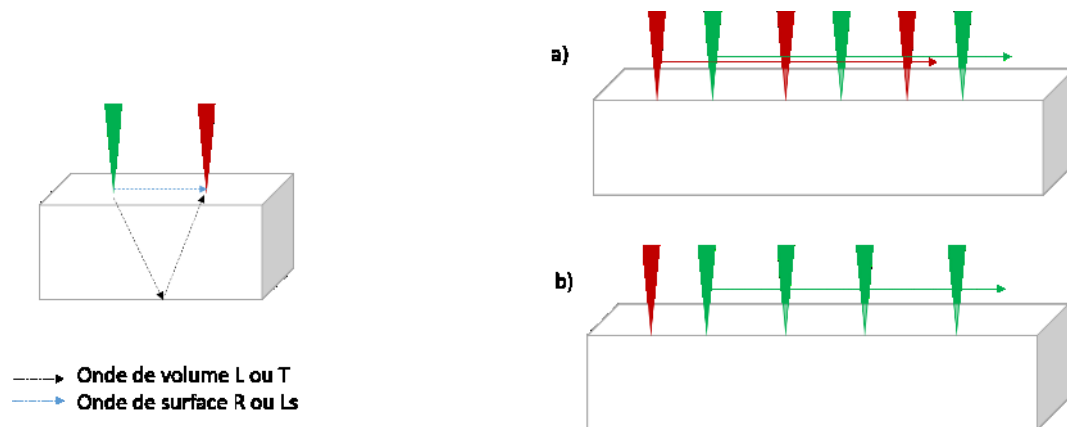


Figure 2-13 Déplacements des lasers en configuration pitch-and-catch, (a) distance génération détection fixe et (b) déplacement du laser de génération.

2.4.1. Détection et caractérisation des défauts surfaciques

• Détection des entailles par ondes de Rayleigh

La configuration majoritairement utilisée pour la détection d'entaille est celle présentée Figure 2-14 où le laser de génération reste fixe et la détection s'écarte progressivement. Sans la présence de défaut, seule l'onde de Rayleigh se propage de la génération à la détection, c'est l'onde dite incidente. Le défaut est un réflecteur, une partie de l'énergie de l'onde incidente est réfléchiée, l'autre transmise.

Dans leur travaux, Zhou *et al.* [72] inspectent une entaille usinée par électroérosion dans l'acier ; son ouverture, w , est de 0,2 mm, et sa hauteur, h , de 0,5 mm. Les diamètres de tâches focales de détection et de génération sont de 100 μm , et 1 mm, respectivement. L'onde de Rayleigh présente un contenu spectral centré en 1 MHz [23], soit une longueur d'onde d'environ 3 mm. Le contrôle est en deux temps ; tout d'abord, la génération et la détection sont à gauche de la fissure, puis la fissure se situe entre les deux lasers. La Figure 2-14 présente un A-scan obtenu pour une position où la détection se situe en amont de l'entaille. Le défaut est détecté et l'onde réfléchiée est observée sur le A-scan (cf. Figure 2-14). L'onde de Rayleigh est donc sensible au réflecteur puisque $\lambda/6 \sim h$. L'amplitude de l'onde réfléchiée est inférieure à l'onde incidente car une partie de l'énergie est transmise mais également diffusée au sein de la pièce.

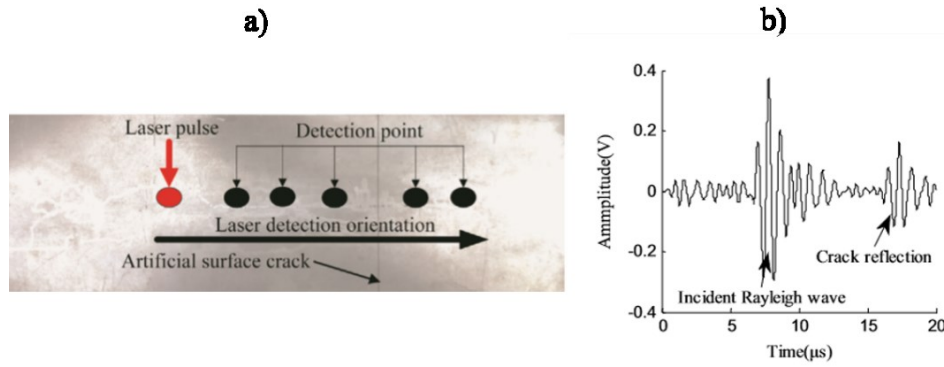


Figure 2-14 (a) Déplacement du laser de détection par rapport au défaut et au laser source, (b) A-scan issu de cette configuration de déplacement, montrant l'onde incidente et sa réflexion sur le défaut, extrait de [72].

En conservant cette configuration pitch-and-catch, et en exploitant l'ensemble des A-scans acquis aux différents points de mesures, il est possible de reconstruire une image B-scan et de visualiser rapidement la présence d'une entaille comme le montrent Ni *et al.* [73]. La génération et la détection sont initialement distantes de 14 mm, et focalisées en spots quasi ponctuels. Le spectre de l'onde de Rayleigh induite est centré en 5 MHz soit $\lambda \sim 0,7$ mm. La génération s'écarte progressivement de la détection sur 9 mm et se situe initialement à 4,5 mm du défaut.

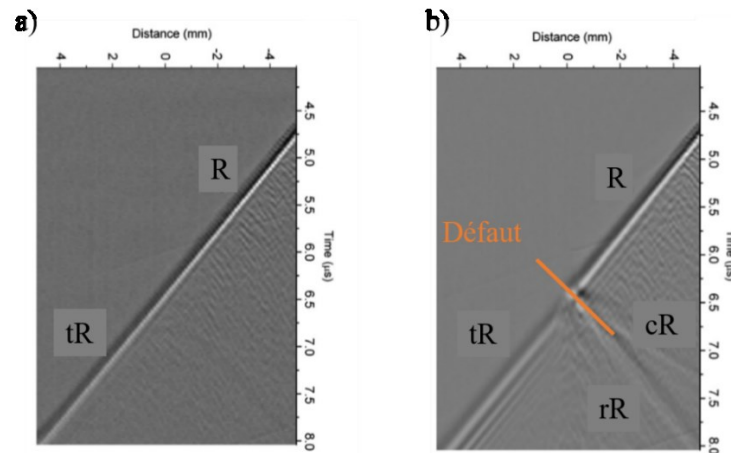


Figure 2-15 Représentation B-scan (a) sans entaille, (b) avec entaille avec R : onde de Rayleigh incidente, tR : onde de Rayleigh transmise, C_R : onde longitudinale de surface et rR : onde de Rayleigh réfléchie, extrait de [73].

Sans défaut, seule l'onde de Rayleigh incidente, noté R, est visible sur le B-scan (cf. Figure 2-15-a). En présence d'une entaille (d'ouverture 0,3 mm, w , et de hauteur, h , 13 mm), on note la présence d'une onde réfléchie rR, transmise tR, et d'une onde réfléchie convertie en onde longitudinale de surface C_R (cf. Figure 2-15-b). Dans ce cas, $\lambda \ll h$ et $\lambda \sim w$.

En pratique, λ n'est pas nécessairement inférieure ou égale aux dimensions des défauts comme mentionné au paragraphe 2.2.2. Il est donc crucial de tester le dispositif UL au regard des défauts recherchés comme il le sera détaillé au chapitre suivant. Des phénomènes de réflexions et de conversions interviennent lors de la présence d'une entaille.

• Caractérisation d'entailles

Les ondes réfléchies et converties par l'entaille contiennent des informations sur les dimensions de cette dernière [74]. La mise en évidence des conversions de modes des ondes de surface et de volume sur le fond de l'entaille, via une génération par ultrasons-laser, a été faite par Cooper *et al.* [75] et

Dewhurst *et al.* [76], puis par Jian *et al.* [64]. Le dispositif est tel que la génération est focalisée selon un spot quasi ponctuel (0,3 mm de diamètre). Seule la détection se déplace sur l'échantillon dans lequel est implantée une entaille de 0,5 mm d'ouverture et de 2,5 mm de hauteur. La Figure 2-17 présente les trajets parcourus par les différentes ondes attendues :

a : onde de Rayleigh incidente

b : onde de Rayleigh réfléchi par le bord de l'entaille

c : onde de Rayleigh convertie en onde de volume sur le fond de l'entaille

d : onde de volume réfléchi par le fond de l'entaille

e : onde de Rayleigh convertie en onde de volume sur le fond de l'entaille et transmise par le défaut

f : onde de Rayleigh transmise par le défaut

Les A-scans acquis à différentes distances de l'entaille sont donnés sur la Figure 2-16. Les ondes A à F sont identifiées sur les A-scans de la Figure 2-16. Les temps de vol des ondes A, t_A , et F, t_F permettent de donner la valeur d de la profondeur de l'entaille [61] :

$$d = \frac{v_R}{2} \cdot (t_F - t_A) \quad (2.19)$$

Cette méthode demande de pouvoir détecter l'onde de Rayleigh transmise par l'entaille c'est-à-dire de pouvoir la différencier des ondes E et D qui correspondent à la conversion d'une onde sur le fond de l'entaille. Pour une distance détection-entaille de 3 mm, la différence de temps de vol entre l'onde E et F est de 2,6 μ s pour une hauteur d'entaille de 2,5 mm ; pour une hauteur de 0,5 mm, ce temps de vol devient 0,5 μ s. La résolution des fronts d'onde est faible au regard de cette différence de temps de vol. Il devient difficile de discriminer les ondes F sur les A-scans et ce point constitue une limite de cette méthode.

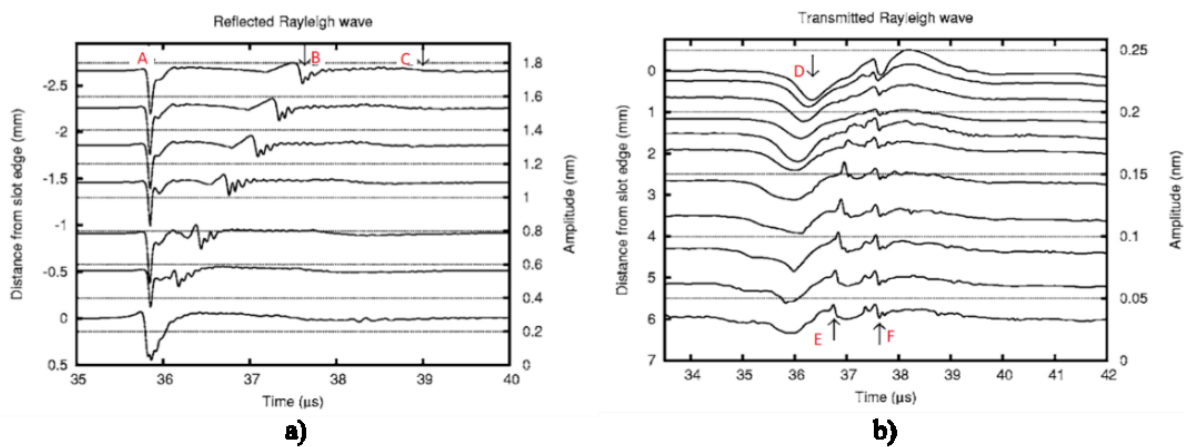


Figure 2-16 A-scans acquis à différentes distances de l'entaille (largeur : 0,5mm – profondeur : 2,5 mm). (a) A : onde de Rayleigh se propageant entre la génération et la détection, B et C ondes réfléchies et converties de l'onde de Rayleigh sur l'entaille lorsque la détection se situe avant le défaut. (b) D, E et F les ondes réfléchies sur le fond de l'entaille lorsque le défaut se situe entre les deux lasers, extrait de [64].

Toujours en travaillant avec les temps de vol de l'onde réfléchi par l'entaille, il est possible de remonter à l'ouverture de celle-ci en effectuant une mesure de part et d'autre de celle-ci, comme proposent Wang *et al.* [77]. Une onde de Rayleigh est engendrée par une ligne laser et détectée à 12 mm du point d'émission. Une première excitation est faite d'un côté de l'entaille, induisant une onde réfléchi notée RR_1 . Une seconde est effectuée de l'autre côté de l'entaille, engendrant une onde réfléchi notée RR_2 (Figure 2-18). L'ouverture de l'entaille, w , est donnée par l'expression suivante :

$$w = d - \frac{V_R}{2(t_{R1} + T_{RR2} + T_{RR1} - T_{R2})} \quad (2.20)$$

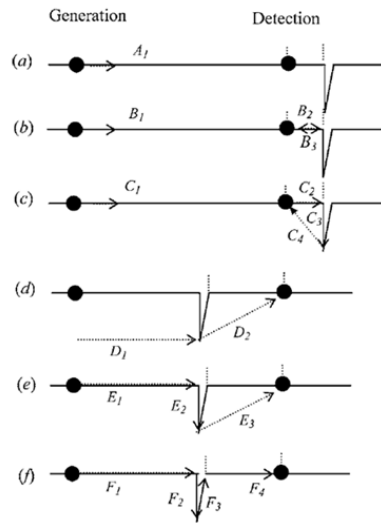


Figure 2-17 Parcours des différentes ondes converties sur le fond d'une entaille, extrait de [64].

Pour une profondeur d'entaille fixée à 2 mm, Wang *et al.* mesurent des ouvertures comprises entre 0,5 et 1,5 mm. L'erreur relative de ces mesures augmente lorsque l'ouverture de l'entaille diminue. Nous pouvons nous interroger jusqu'à quelle valeur d'ouverture cette méthode est valide.

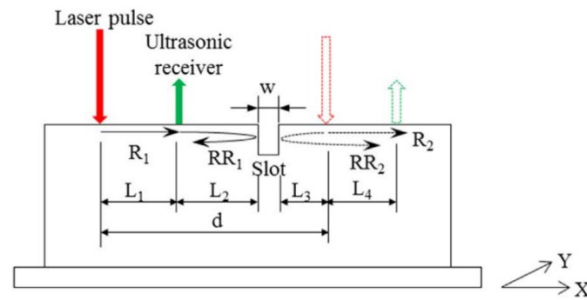


Figure 2-18 Dispositif expérimental pour la mesure de l'ouverture d'une entaille avec R_1 et R_2 les distances génération détection et RR_1 et RR_2 les chemins parcourus par l'onde de Rayleigh réfléchi par le défaut, extrait de [77].

Le spectre et l'amplitude des ondes de Rayleigh réfléchi et transmis peuvent également renseigner sur la hauteur et l'ouverture d'une entaille. Park *et al.* [78], s'inspirant des travaux de Kromine *et al.* [63], étudient les variations d'amplitude et de fréquence des ondes transmises par des entailles dont la profondeur varie de 100 à 500 μm . L'entaille est située entre la génération et la détection, elles-mêmes distantes de 30 mm. La source d'excitation est une ligne laser de 300 μm de large et induit une onde de Rayleigh dont le spectre est centré à 5 MHz. Ainsi, la longueur d'onde de Rayleigh, λ , est environ égale à 0,7 mm.

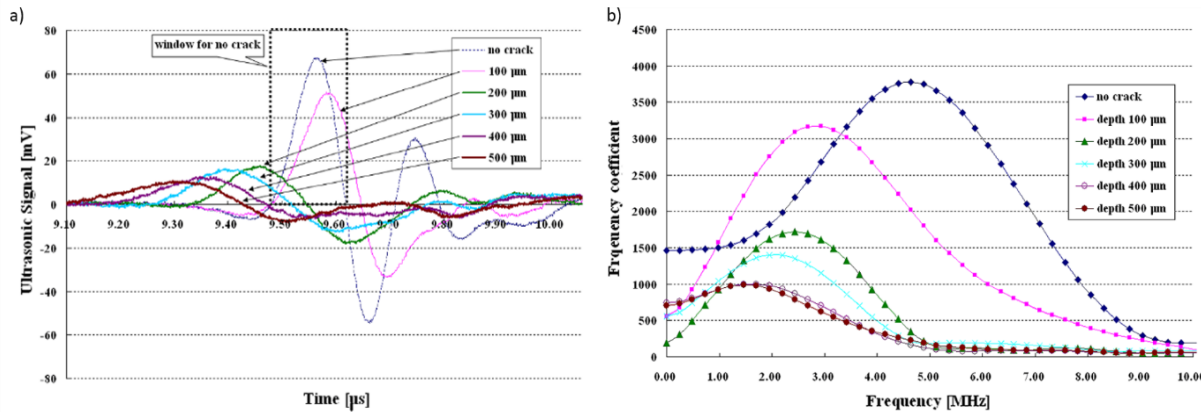


Figure 2-19 (a) Diminution de l'amplitude de l'onde réfléchie avec la hauteur de l'entaille. (b) Diminution de la fréquence de l'onde réfléchie avec la hauteur du défaut, extrait de [78].

Comme le montre Figure 2-19, plus la hauteur de l'entaille est importante, plus l'amplitude de l'onde transmise est faible et plus son spectre est centré sur les basses fréquences. L'entaille agit comme un filtre passe bas sur l'onde de Rayleigh incidente. En interagissant avec l'entaille, l'énergie de l'onde est d'autant plus transmise par l'entaille que la hauteur de celle-ci est inférieure à λ .

Zhou *et al.* [72] proposent d'exploiter la relation entre l'énergie transmise par l'entaille et la hauteur de l'entaille en calculant un coefficient de transmission. Ce dernier se définit comme le rapport de l'amplitude de l'onde transmise sur l'amplitude de l'onde de Rayleigh incidente. Zhou *et al.* mettent en œuvre une configuration laser où l'émission est fixe et le laser de détection en déplacement. Ils calculent un coefficient de transmission et de réflexion pour différentes hauteurs d'entaille allant de 0,5 mm à 1,6 mm. La Figure 2-20 montre que le coefficient de transmission diminue lorsque la hauteur de l'entaille augmente.

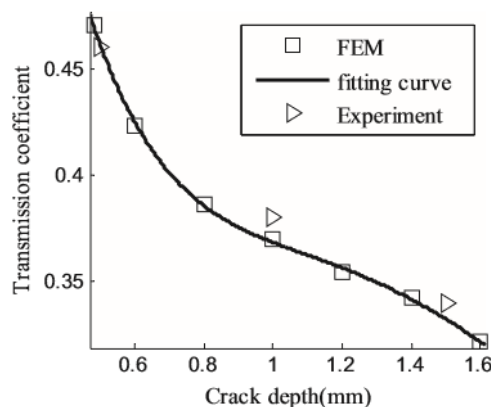


Figure 2-20 Diminution du coefficient de transmission, calculé numériquement et expérimentalement, avec la hauteur de l'entaille, extrait de [72].

L'amplitude de l'onde transmise est corrélée à la hauteur de l'entaille pour des profondeurs allant de 0,5 mm à 1,5 mm. Le spectre de l'onde incidente contenant des fréquences allant jusqu'à 10 MHz (cf. Figure 2-19) et l'onde de Rayleigh se propageant à environ 2900 m/s dans l'aluminium, $\lambda \sim 0,3$ mm. Nous pouvons nous interroger si la corrélation entre la hauteur des entailles et l'amplitude de l'onde transmise reste valide pour des hauteurs d'entaille plus faibles, inférieure à λ_R , nous y reviendrons au chapitre 4.

Le lien entre fréquence centrale de l'onde réfléchiée et les dimensions des défauts est développé par Krishnawamy *et al.* [79]. La configuration utilisée est différente de celle de Kromine *et al.* : le laser de détection est fixe, situé à environ 10 mm du défaut et l'émission, en régime thermoélastique, balaye la surface de l'échantillon. Le spectre de l'onde incidente est centré sur 2,5 MHz. Pour trois entailles, dont les dimensions sont données dans le Tableau 2-1, la fréquence centrale des ondes réfléchiées est relevée.

	Ouverture (mm)	Hauteur (mm)	Fréquence centrale de l'onde réfléchiée (MHz)
Entaille 1	1,6	0,1	1,70
Entaille 2	3,2	0,1	0,86
Entaille 3	1,6	0,2	1,66

Tableau 2-1 Dimensions des entailles et fréquences centrales des ondes réfléchiées inspectées dans les travaux de Krishnaswamy [79].

Krishnawamy *et al.* observent une diminution de la fréquence de l'onde de 1,7 MHz à 0,86 MHz lorsque l'ouverture de l'entaille augmente de 1,6 mm à 3,2 mm. Nous pouvons supposer qu'il existe une corrélation entre l'onde réfléchiée et l'ouverture de l'entaille pour cette gamme de fréquence. Il peut s'avérer pertinent de vérifier cette tendance pour des ouvertures de défauts plus petites.

2.4.2. Détection et caractérisation des défauts sub-surfaciques

- **Détection par ondes de Rayleigh, de porosités usinées dans des pièces issues du procédé DML**

Dans l'état de l'art, les travaux concernant les trous génératrice sont plus récents et deux auteurs principaux, Cerniglia *et al.* [45] et Klein *et al.* [46], traitent d'une détection dans les pièces issues du procédé DML. Les trous génératrice sont considérés comme représentatif d'une porosité. Ces auteurs mettent en œuvre une configuration pitch-and-catch où l'émission et la détection sont à une distance fixée de quelques millimètres, et balayent ensemble la surface de l'échantillon. Les faisceaux lasers sont focalisés en spots quasi ponctuels. Klein *et al.* présentent la détection de porosités dont les diamètres, $\varnothing$, sont compris entre 0,5 mm et 1,5 mm pour des profondeurs allant de 0,4 mm à 0,8 mm. Il ne précise pas la fréquence ni la longueur d'onde de Rayleigh. La représentation B-scan, Figure 2-21, est issue d'un contrôle sur une pièce DML en acier 316L polie.

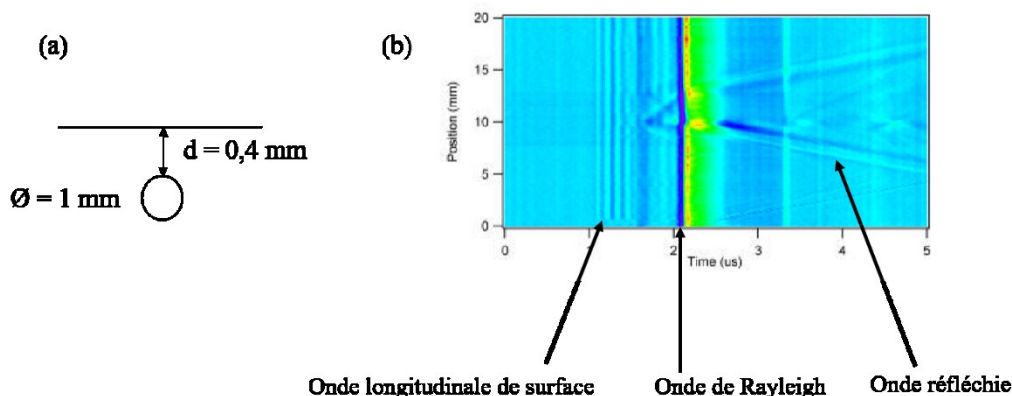


Figure 2-21 (a) Trou génératrice à une profondeur $d = 0,4$ mm et de diamètre $\varnothing = 1$ mm, (b) Image B-scan du défaut où figure l'onde longitudinale de surface, l'onde de Rayleigh et l'onde réfléchiée par le défaut, extrait de [46].

Sur le B-scan, Klein *et al.* identifient l'onde de Rayleigh incidente et l'onde réfléchi par le défaut. L'onde réfléchi peut être une réflexion directe de l'onde de Rayleigh ou une conversion de l'onde de Rayleigh incidente en onde transversale sur le défaut.

Cerniglia *et al.* inspectent des trous génératrice dont les diamètres sont compris entre 50 μm et 500 μm et des profondeurs allant de 50 μm à 800 μm . Les lasers sont focalisés en spot quasi ponctuels et l'onde de Rayleigh induite présente une longueur d'onde à 30 MHz telle que $\lambda=96 \mu\text{m}$. Le régime est thermoélastique.

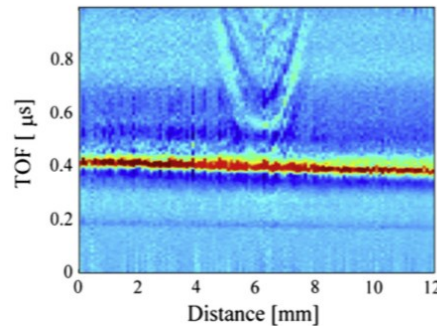


Figure 2-22 Représentation B-scan pour un trou génératrice de diamètre 470 μm à une profondeur de 345 μm où figure l'onde longitudinale de surface et l'onde de Rayleigh ainsi que le front d'onde réfléchi par le défaut, d'allure hyperbolique, extrait de [45].

Sur la Figure 2-22, l'onde de Rayleigh incidente (en rouge) ne semble pas perturbée par les ondes réfléchies et le temps de vol expérimental de l'onde réfléchi semble être une hyperbole. Cerniglia fait l'hypothèse que les caractéristiques de l'hyperbole pourraient être liées à la profondeur et au diamètre du défaut.

L'onde de Rayleigh, sur le B-scan obtenu par Klein *et al.*, montre une onde de Rayleigh dont la durée est comprise entre 2 μs et 2,5 μs . La durée du train d'onde de Rayleigh, sur le B-scan obtenu par Cerniglia *et al.*, est inférieure à 0,2 μs , ce qui suggère une différence du contenu spectral de l'onde induite et expliquerait les différences entre les deux B-scans (cf. Figure 2-21 et Figure 2-22). Dans l'étude menée par Cerniglia *et al.* l'inspection s'effectue dans les conditions suivantes : $\lambda \sim \emptyset$. L'étude menée par Klein s'effectue, quant à elle, dans les conditions où $\lambda > \emptyset$. À ce stade de la thèse, nous ne pouvons pas expliquer les phénomènes physiques à l'origine de la différence des deux B-scans au regard de ces deux conditions d'inspection : $\lambda \leq \emptyset$ et $\lambda > \emptyset$; mais nous y reviendrons au chapitre 4.

Ces résultats sur l'inspection de pièces réalisées en fabrication additive (FA) montrent qu'il est possible, malgré la microstructure des pièces, de détecter des défauts par UL. L'aspect rugueux de la surface n'est cependant pas pris en compte puisque les pièces sont polies. L'évaluation de la méthode UL sur les surfaces rugueuses reste donc à être traitée et nous aborderons ce point au chapitre 4.

• Caractérisation des trous génératrice

Concernant la caractérisation de trous sub-surfaciques, Kromine *et al.* [80] mentionnent la possibilité de corréler la fréquence des ondes réfléchies aux caractéristiques du trou. Comme ils l'avaient fait pour les entailles, ils tracent les variations de l'amplitude maximale et de fréquence maximale de l'onde de Rayleigh, avant, au niveau et après le défaut comme présenté sur les Figure 2-23. Les trous détectés ont un diamètre de 0,3 mm et des profondeurs allant de 0 mm à 0,75 mm.

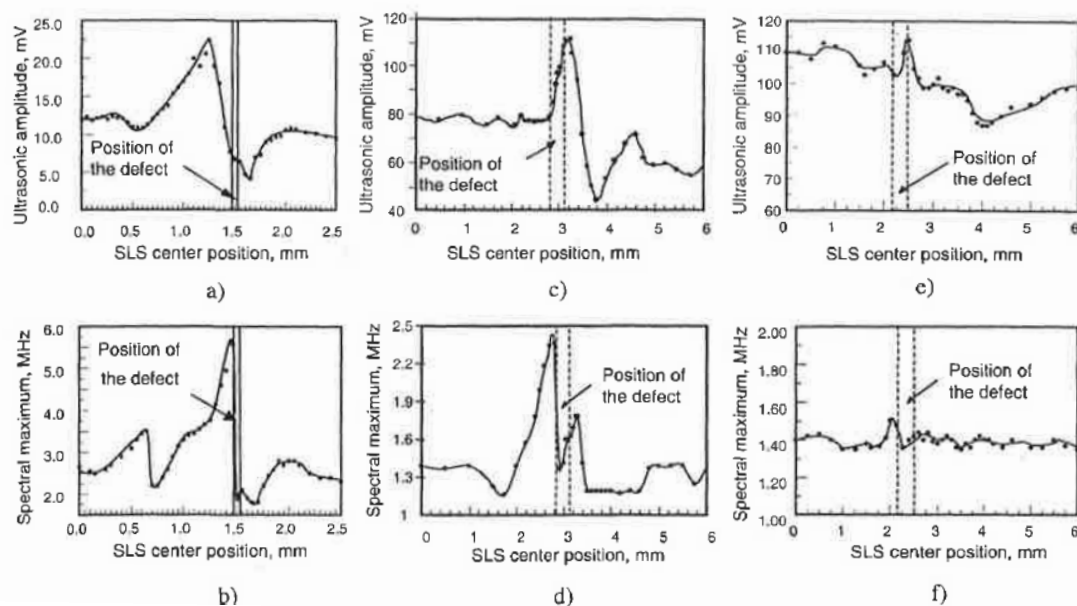


Figure 2-23 (a,b,c) Augmentation de l'amplitude de l'onde de Rayleigh au voisinage d'un trou génératrice de diamètre 0,3 mm avec la profondeur du trou : 0 mm, 0,2 mm, 0,75 mm. (b,d,f) Augmentation de la fréquence de l'onde de Rayleigh au voisinage du défaut pour des trous génératrice de 0,3 mm de diamètre avec la profondeur du trou de 0 mm, 0,2 mm de profondeur et 0,75 mm de profondeur, extrait de [63].

Ils expliquent, entre autres, les variations plus importantes avant et après le défaut du fait de l'interférence des ondes incidentes avec les ondes réfléchies par le défaut issu ou non d'une conversion de mode. Les variations d'amplitude et de fréquence diminuent avec la profondeur des défauts. Ceci peut être expliqué par la fréquence centrale de l'onde incidente, proche de 2,5 MHz, qui correspond à $\lambda \sim 1$ mm pour une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh de 2900 m/s. Si le défaut est à une profondeur proche de cette longueur d'onde, c'est le cas pour le trou à une profondeur de 0,75 mm, l'onde n'est alors plus perturbée par la présence du défaut. Il y a donc une corrélation entre la profondeur des trous et le spectre de l'onde de Rayleigh. Kromine *et al.* ne tirent aucune information sur le diamètre.

Cerniglia *et al.* [81] (la configuration du système UL a été détaillée au paragraphe précédent) choisissent d'exploiter la représentation B-scan et propose d'apparenter les fronts d'ondes réfléchies à une parabole (cf. Figure 2-22). La distance entre le sommet de la parabole et l'onde de Rayleigh à 0,4 μ s donnerait une estimation de la profondeur du défaut tandis que la distance entre les deux branches de la parabole renseignerait sur le diamètre du trou. Ces hypothèses n'ont cependant pas encore été explorées expérimentalement.

Défauts surfaciques

Dans l'état de l'art, les entailles sont essentiellement détectées par une configuration UL pitch-and-catch pour laquelle un des lasers reste fixe. La présence d'un front d'onde réfléchi signe la détection d'un défaut. L'onde de Rayleigh est engendrée et détectée soit par des spots lasers dont le diamètre peut varier entre 100 μ m et 1 mm soit par une ligne source d'une centaine de μ m de large sur quelques millimètres de long. La fréquence de l'onde générée dépend du diamètre de la source : plus cette taille est faible plus le spectre contient des hautes fréquences.

Concernant la caractérisation de la hauteur et de l'ouverture d'entailles, plusieurs méthodologies sont évoquées dans l'état de l'art :

- Le calcul des temps de vols des ondes réfléchies et converties par l'entaille. Ce principe nécessite de pouvoir identifier aisément les différents fronts d'onde issues des réflexions et conversion sur l'entaille.
- Le calcul de l'amplitude et la fréquence des ondes réfléchies ou transmises par l'entaille : l'entaille agissant comme un filtre passe bas. L'ouverture d'une entaille pourrait être déterminée par l'amplitude de l'onde réfléchie et la hauteur par celle de l'onde transmise.

Ces résultats ou tendances doivent être évaluées expérimentalement sur des défauts dont l'ouverture et/ou la profondeur est plus faible et au moyen de notre dispositif expérimental qui n'est pas strictement le même que celui utilisé par les différents auteurs, notamment du fait des dimensions des tâches focales.

Défauts sub-surfaciques

La configuration de détection des porosités est légèrement différente : les deux lasers sont fixes et balayent l'échantillon. La génération laser est un spot quasi ponctuel de 100 μm de diamètre. La mise en évidence de la présence d'un défaut est identique à celle des entailles et se fait via les ondes réfléchies par le défaut. La caractérisation de ces défauts sub-surfaciques trous génératrice semble plus délicates que les entailles ; il serait possible d'en déterminer la profondeur en fonction de la fréquence et de l'amplitude des ondes réfléchies par celui-ci. Ce résultat doit cependant être évalué pour d'autres défauts.

Cerniglia *et al.* sont les seuls à proposer des expérimentations où $\lambda \leq \emptyset$ et les B-scans qu'ils observent sont différents des acquisitions dans les conditions où $\lambda > \emptyset$. Nous y reviendrons au chapitre 4.

2.5. Conclusion

Un système ultrasons-laser permet d'engendrer des ondes ultrasonores de quelques mégahertz au moyen d'un laser impulsif dont la durée d'impulsion est comprise entre une et quelques dizaines de nanosecondes. L'impact laser crée une déformation par effet thermoélastique à la surface du matériau, qui engendre les ondes élastiques dans le solide. L'efficacité de génération des ondes ultrasonores dépend des caractéristiques du faisceau laser et des propriétés du matériau contrôlé. La durée d'impulsion du laser de génération conditionnent la gamme de fréquence ultrasonore induite, tandis que la forme de la tâche focale conditionne la directivité. L'état de l'art montre qu'une génération selon une ligne laser est favorable à la génération d'ondes de Rayleigh, qui se propagent dans une direction privilégiée perpendiculairement à cette ligne. Puisqu'un contrôle surfacique est envisagé lors de la mise en œuvre d'un contrôle *in situ*, cette forme de tâche focale semble intéressante et sera retenue pour nos applications.

L'amplitude des déplacements de la surface, engendrés par la propagation des ondes ultrasonore dans le milieu, sont de quelques nanomètres. Pour un système « sans contact », la détection de ces déplacements s'effectue par des méthodes optiques et plus particulièrement par interférométrie. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les pièces de fabrication additive présentent une rugosité de surface importante. Parmi les différents systèmes d'interférométrie existants, l'interférométrie adaptative holographique, basée sur l'utilisation d'un cristal photoréfractif, est moins sensible aux rugosités. Cet aspect en fait un système particulièrement approprié pour un contrôle sur les états de surface dégradés des pièces obtenues en DML.

Dans la perspective d'intégrer un système d'ultrasons-laser dans une machine de DML qui suivrait la buse de fabrication, nous envisageons un dispositif dans lequel la distance entre la génération et la détection serait fixe et le système balayerait la surface de l'échantillon. Le contrôle serait axé sur la détection de défauts sub-surfaciques au moyen de l'onde de Rayleigh. Suite à l'étude bibliographique présentée dans ce chapitre, nous pouvons conclure que la génération selon une ligne source favorise la génération d'onde de Rayleigh. Le spectre des ondes générées doit aller jusqu'à environ 10 MHz pour espérer détecter des défauts de l'ordre de 100 μm .

Le chapitre suivant a pour objectif d'évaluer les performances de détection du dispositif TECNAR, disponible au laboratoire qui, comme nous le verrons, permet de générer des ondes de Rayleigh dont le spectre va jusqu'à 5 MHz seulement. Nous serons donc amenés à développer une tête optique capable de générer des ondes de Rayleigh allant jusqu'à 10 MHz, grâce à une ligne source.

Chapitre 3

Optimisation de la génération des ondes de Rayleigh pour la détection de défauts dans les pièces issues du procédé DML

3. Optimisation de la génération de l'onde de Rayleigh	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Limites de détection du dispositif ultrasons-laser	Erreur ! Signet non défini.
3.2.1. Caractéristiques du dispositif TECNAR	Erreur ! Signet non défini.
3.2.2. Contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh	Erreur ! Signet non défini.
3.2.3. Inspection de défauts usinés et évaluation des limites de détection du dispositif	
TECNAR	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Optimisation de la bande spectrale et effet des dimensions de la tâche focale	Erreur ! Signet non défini.
3.3.1. Modèle heuristique	Erreur ! Signet non défini.
3.3.2. Validation numérique	Erreur ! Signet non défini.
3.3.3. Validation expérimentale	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Amélioration du dispositif optique pour la génération d'onde de Rayleigh haute fréquence	Erreur !
Signet non défini.	
3.4.1. Génération	Erreur ! Signet non défini.
3.4.2. Détection	Erreur ! Signet non défini.
3.4.3. Validation expérimentale du dispositif	Erreur ! Signet non défini.
3.5. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
5.3.1. Échantillons en acier 316L	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2. Échantillons en inconel 718	Erreur ! Signet non défini.
5.4. Caractérisation du taux de porosités par Analyse en Composantes Principales (ACP)	Erreur ! Signet non défini.
non défini.	
5.4.1. Principe de l'ACP	Erreur ! Signet non défini.
5.4.2. ACP dans l'acier 316L	Erreur ! Signet non défini.
5.4.3. ACP dans l'inconel 718	Erreur ! Signet non défini.
5.5. Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	Erreur ! Signet non défini.

3. Optimisation de la génération de l'onde de Rayleigh

3.1. Introduction

Ce chapitre introduit l'importance de la mise en forme des tâches focales de laser de génération et de détection lors d'une inspection de défauts par l'onde de Rayleigh. Sur la base des montages expérimentaux dédiés à la détection de défauts présentés aux chapitres 1 et 2, il met tout d'abord en évidence les relations qui lient les dimensions et formes des tâches focales au contenu spectral des ondes élastiques engendrées. Ensuite, ce chapitre traite de l'implémentation d'un modèle heuristique du phénomène observé, de sa validation expérimentale, puis de son utilisation afin d'optimiser au mieux les tailles des tâches focales pour les applications visées. Enfin, le dernier paragraphe présente le dispositif optimisé et conçu.

3.2. Limites de détection du dispositif ultrasons-laser

Le dispositif TECNAR, utilisé au laboratoire pour les contrôles UL et décrit dans le paragraphe suivant, était initialement prévu pour effectuer des mesures d'épaisseur de matériau. Les dimensions et formes des tâches focales n'avaient donc pas été choisies, *a priori*, pour détecter des défauts de l'ordre de 100 μm . Cette partie décrit le travail préliminaire effectué afin d'évaluer si le dispositif convenait à l'application visée, notamment en termes de fréquences engendrées, et de déterminer ses limites de détection.

3.2.1. Caractéristiques du dispositif TECNAR

Le dispositif expérimental que possède le laboratoire est un système de contrôle par ultrasons-laser de marque TECNAR.

Un **laser impulsif de génération** Nd :YAG Q-switché de marque Quantel émet, à la longueur d'onde de 532 nm et à une fréquence de 20 Hz, des impulsions d'une durée d'environ 7 ns ; chaque impulsion transporte 30 mJ. Le faisceau laser est injecté dans une fibre optique à gros cœur (1 mm de diamètre), d'ouverture numérique 0,22, pour être acheminé vers un ensemble d'optiques (dit tête optique de génération, cf. Figure 3-1) permettant de focaliser le faisceau en un spot circulaire de 2,5 mm de diamètre.

Un **laser impulsif de détection** Nd :YAG de marque Quantel émet, à la longueur d'onde de 1064 nm et à une fréquence de 20 Hz, des impulsions de 80 μs . Le laser est couplé à une amplification par lampe flash. Il est également fibré : une fibre de 0,4 mm de diamètre et d'ouverture numérique 0,12 achemine le faisceau jusqu'à la tête optique de détection (cf. Figure 3-1). La particularité du système TECNAR, par rapport aux systèmes couramment utilisés en ultrasons-laser, est l'utilisation d'un laser de détection pulsé. Ce type de laser a l'avantage d'éclairer plus intensément la surface que les lasers continus et donc d'améliorer le rapport signal sur bruit du signal collecté.

L'**interféromètre** utilise un cristal photoréfractif Ga:As dont le temps de réécriture de l'hologramme est de l'ordre d'une dizaine de millisecondes. Le principe de cet interféromètre a été détaillé au chapitre précédent.

Ce dispositif offre deux configurations possibles :

- Configuration **émission/réception confondues** : les faisceaux du laser de génération et du laser de détection sont collimatés au même point focal.
- Configuration **émission/réception séparées** : les faisceaux lasers de génération et de détection sont mis en forme séparément et sont mobiles l'un par rapport à l'autre.

Les déplacements des têtes optiques sont limités : la tête optique de génération est fixe, celle de la détection est montée sur un banc motorisé en 2D. Ainsi, pour acquérir un B-scan deux types de balayage sont possibles :

- Un balayage en **pulse écho**.
- Un balayage en **pitch catch** dans la configuration : émission fixe, détection mobile comme présentée sur la Figure 3-1.

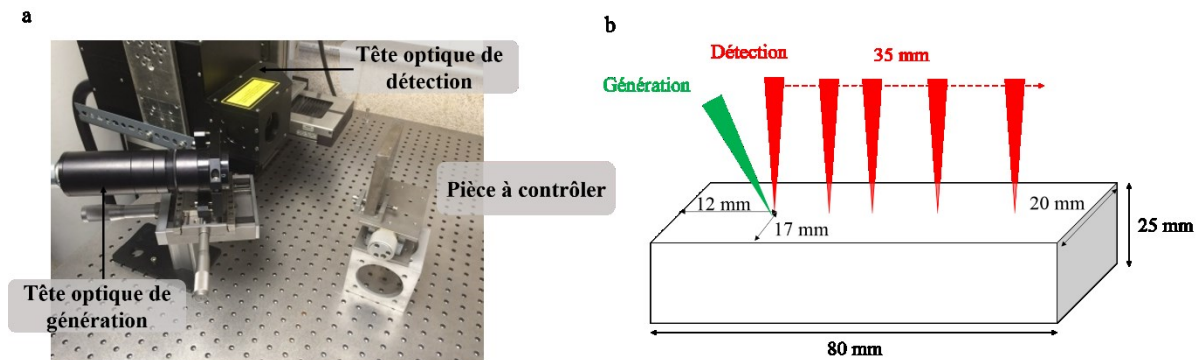


Figure 3-1 a) Têtes optiques de génération et de détection du dispositif TECNAR et b) configuration expérimentale pitch catch où seule la détection se déplace.

3.2.2. Contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh

Afin d'évaluer le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh engendré par le dispositif, l'inspection d'un échantillon sans défaut est réalisée afin de reconstruire une image B-scan. L'objectif est de visualiser sur ce B-scan les différentes ondes se propageant dans l'échantillon, notamment l'onde de Rayleigh, puis d'isoler le front d'onde de Rayleigh pour en déterminer le contenu fréquentiel. Les différentes ondes sont identifiées par comparaison aux temps de vol théoriques. Par ailleurs, l'objectif de ce test étant d'évaluer le dispositif expérimental à travers la caractérisation des ondes ultrasonores générées en termes de fréquences, il semble naturel d'utiliser des pièces de forges dont la signature acoustique est recensée dans l'état de l'art. Le test pratiqué constitue donc une étude de cas maîtrisés qui permet d'évaluer les performances d'inspection du système, comparables à l'état de l'art. Ainsi, seules les caractéristiques des faisceaux lasers sont mises en cause au regard de la bande de fréquences détectée ; l'aspect fabrication additive sera abordé par la suite.

La pièce testée est un parallélépipède d'acier 316L [82], de volume $80 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$, obtenue par procédé de forge. Cet alliage est souvent utilisé en fabrication additive pour régler les paramètres machines. C'est la raison pour laquelle il a été choisi, afin de permettre une comparaison forge/FA dans le chapitre suivant. Puisque l'onde d'intérêt est une onde surfacique (onde de Rayleigh), la génération et la détection, d'abord confondues, doivent progressivement se séparer pour évaluer sa propagation ; c'est donc une configuration pitch catch qui a été mise en œuvre. Du fait de l'encombrement spatial des têtes optiques, pour que la génération soit confondue avec la détection en position initiale, le faisceau émetteur a été incliné de 50° par rapport à la surface de la pièce. La tâche focale sur la pièce n'est alors plus un spot circulaire mais une ellipse de grand axe 3,8 mm et de petit axe 2,5 mm. Le faisceau de détection, en revanche, reste normal à la surface de la pièce, pour détecter la composante perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (out-of-plane) du champ ultrasonore [83]. Le

diamètre du spot de détection est donc égal à son diamètre nominal : 0,8 mm. La configuration expérimentale utilisée est présentée sur la Figure 3-1-b : la détection s'écarte progressivement de la génération, parcourant 35 mm par pas de 0,2 mm. La densité de puissance surfacique maximale délivrée à la surface est de 21,8 MW/cm² d'après l'équation (2.14). Sachant que la puissance seuil pour atteindre le régime thermoélastique est d'environ 10 MW/cm², l'énergie par impulsion est diminuée de moitié pour travailler en régime thermoélastique (par modification du délai Q-switch). Pour chaque position de détection, 400 signaux sont acquis pour bénéficier d'un meilleur rapport signal sur bruit. La représentation B-scan, issue de l'acquisition et présentée sur la Figure 3-2, est le résultat de la moyenne de ces signaux à chaque position.

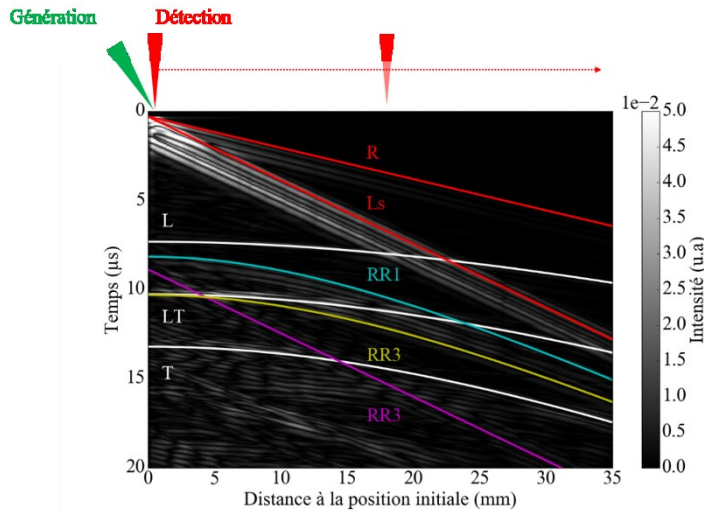


Figure 3-2 Image B-scan expérimentale acquis sur une pièce réalisée en forge, sans défaut, en acier 316L avec le système TECNAR en régime thermoélastique.

Les ondes de surface, se propageant directement de la génération à la détection (cf. Figure 3-3-a), sont l'onde de Rayleigh (R) et l'onde longitudinale de surface (L_s). Elles sont aisément identifiables puisqu'elles correspondent à une augmentation linéaire du temps de vol avec le déplacement de la détection. Les deux ondes sont discriminées par comparaison avec leur temps de vol théoriquement attendus en fonction de leur vitesse. L'onde de Rayleigh (R) annotée en ligne rouge sur la Figure 3-2, correspond à une vitesse $V_R = 2900$ m/s et l'onde longitudinale de surface (L_s), annotée en pointillé rouge, à une vitesse $V_L = 5700$ m/s. Leurs temps de vol sont égaux au rapport de la distance émetteur/récepteur, notée D , et de leur vitesse dans le matériau, noté V_{Ls} (égale à V_L) et V_R :

$$t_{Ls} = \frac{D}{V_{Ls}} \quad (3.21)$$

$$t_R = \frac{D}{V_R} \quad (3.22)$$

Les ondes sur le B-scan sont ensuite identifiées par comparaison avec les temps de vols théoriquement attendus pour chacune des ondes. Les vitesses des ondes dans l'acier 316L ont été préalablement déterminées par une mesure avec un transducteur piézoélectrique (PZT) : les vitesses des ondes longitudinales (V_L) et transversales (V_T) de volume sont respectivement de $V_L = 5700$ m/s et $V_T = 3100$ m/s. Le paragraphe suivant donne les temps de vol théoriques pour chaque onde présentée sur la Figure 3-2, tout d'abord, pour les ondes surfaciques, puis pour les ondes volumiques.

L'onde de Rayleigh (R) et l'onde longitudinale de surface (L_s) sont réfléchies par l'ensemble des bords de la pièce. La Figure 3-3 schématise la propagation des ondes réfléchies et/ou converties

aux frontières de la pièce. L'angle de réflexion suite à la conversion de mode est déterminé par la loi de Snell-Descartes donnée au chapitre 2 (d'après l'équation 2.5).

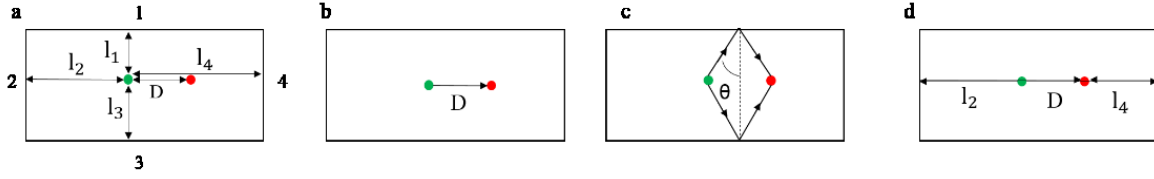


Figure 3-3 Configurations de propagation des ondes de surface identifiées sur la Figure 3-2 avec a) annotations des différentes distances entre la source de génération et les côtés de la pièce.

L'équation du temps de vol est identique pour le côté 1 et 3. Il suffit de remplacer l_1 par l_3 . Elle est donnée par :

$$t = \frac{l_1}{V_1 \cos(\theta)} + \frac{l_1}{V_2 \cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{V_1}\right)\right)} \quad (3.23)$$

où V_1 , V_2 sont respectivement les vitesses de l'onde incidente et de l'onde réfléchi et θ l'angle d'incidence de l'onde sur le bord de réflexion et l la distance spot-bord de la pièce (cf. Figure 3-3). Les différentes ondes correspondantes à ces réflexions/ conversions des ondes de surface seront notées RR1. La première lettre correspond à l'onde émise, la deuxième à l'onde réfléchi et le chiffre au côté sur lequel l'onde a été réfléchi.

La Figure 3-3 c schématise l'équation du temps de vol d'une réflexion sur les côtés 2 et 4. L'équation ci-dessous donne le temps de vol pour une réflexion sur le côté 2 :

$$t = \frac{l_2}{V_1} + \frac{l_2 + D}{V_2} \quad (3.24)$$

Les ondes longitudinales (L) et transversales (T) sont réfléchies et/ou converties par le fond de la pièce comme schématisé sur Figure 3-4. Leur temps de vol inclut donc l'épaisseur de matériau traversé, notée e .

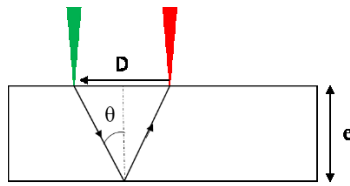


Figure 3-4 Chemin de propagation des ondes de volume.

L'équation des temps de vol pour la réflexion/conversion d'une onde de volume sur le fond de la pièce est la suivante :

$$t = \frac{D}{2V_1} \sin(\theta) + \frac{D}{2V_2} \sin\left(\arcsin\left(\frac{\sin(\theta)}{V_1}\right)\right) \quad (3.25)$$

L'onde de Rayleigh étant identifiée par son temps de vol, la transformée de Fourier de l'onde est faite pour le A-scan correspondant à une distance génération/détection de 13 mm. À cette distance, les différentes ondes de surface sont distantes de plusieurs microsecondes et peuvent facilement être isolées pour en calculer le spectre. La Figure 3-5 représente un A-scan pris à la position 13 mm de la représentation B-scan ci-dessus. Les ondes, annotées L_s , R , L , LT , T , sont l'onde longitudinale de

surface, l'onde de Rayleigh et les échos de fond de l'onde longitudinale, l'écho de la conversion de l'onde longitudinale en onde transversale, et l'écho de fond de l'onde transversale, respectivement.

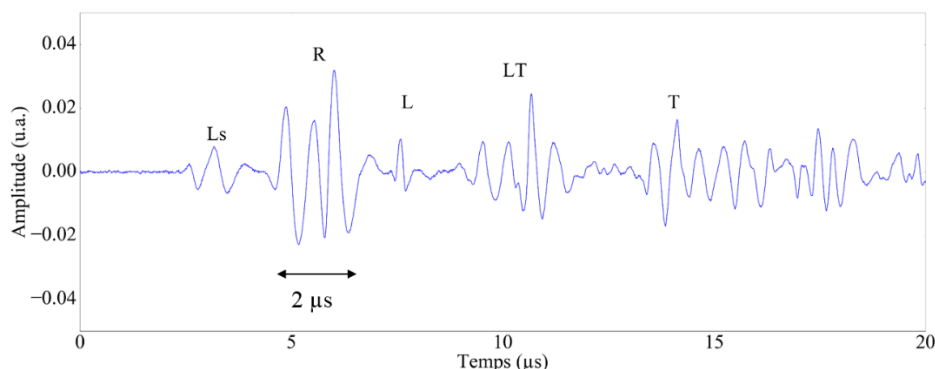


Figure 3-5 A-scan expérimental à la position 13 mm issu d'une acquisition sur une pièce en acier 316L en régime thermoélastique avec L_s, l'onde longitudinale, R, l'onde de Rayleigh, L, l'onde de longitudinale et T, l'onde transversale.

Le spectre, associé à la représentation temporelle de l'onde de Rayleigh de la Figure 3-6-a, est représenté sur la Figure 3-6, son contenu spectral s'étend de 0,5 MHz à 4 MHz.

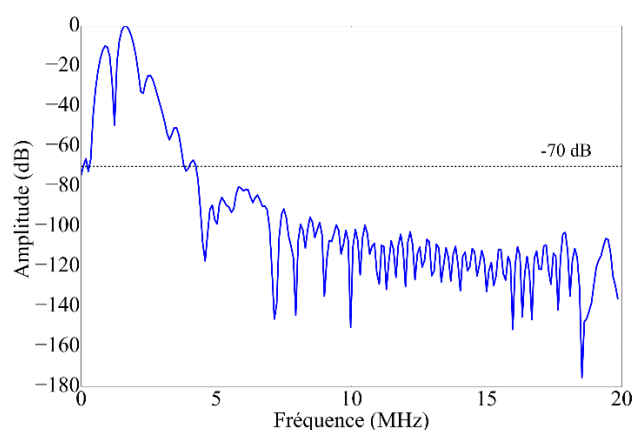


Figure 3-6 Spectre de l'onde de Rayleigh s'étendant jusqu'à 4 MHz.

Au regard de la durée de l'impulsion laser (7 ns), le spectre des ondes générées devrait, selon Scruby [52], s'étendre jusqu'à plusieurs dizaines de MHz. Or, le contenu spectral de l'onde de Rayleigh générée expérimentalement est beaucoup plus basse fréquence que celui attendu. Par ailleurs, le spectre présente trois maxima aux fréquences de 0,9 MHz, 1,6 MHz et 2,5 MHz qui correspondent à des longueurs d'onde, notées λ_R , respectivement de 3,2 mm, 1,8 mm et 1,16 mm. En conséquence, l'onde de Rayleigh étant sensible uniquement à des défauts d'environ la moitié de sa longueur d'onde, seuls des défauts dont les dimensions sont proches de 500 μm pourront, a priori, être détectés. Or, les défauts recherchés dans les pièces réalisées en DML sont de l'ordre de 100 μm . En conclusion, l'onde engendrée par le système est trop basse fréquence pour espérer détecter des défauts de l'ordre de la centaine de micromètres dans l'acier puisqu'il n'y a pas de composantes supérieures à 4 MHz dans le spectre.

Dans ce paragraphe, nous avons mis en évidence que l'onde de Rayleigh engendrée par la source elliptique de 3,2 mm de grand axe et détectée par le spot de 0,8 mm de diamètre avait un contenu fréquentiel différent de celui attendu. En effet, un laser nanoseconde génère des ondes allant jusqu'à plusieurs dizaines de MHz et les publications relatives au contrôle par UL présentaient des

ondes de Rayleigh d'environ 1 μs avec un contenu fréquentiel centrée en 5 MHz pouvant aller jusqu'à 15 MHz. Dans notre cas, l'onde de Rayleigh présente trois fréquences principales et ne s'étend pas au-delà de 3 MHz.

La suite de ce paragraphe se déroulera en deux temps : dans un premier temps la limite de détection effective du système est déterminée quantitativement par l'inspection de défauts calibrés réalisés par électroérosion dans des pièces issues du procédé de forge. Dans un second temps, on s'attachera à comprendre pourquoi le spectre de l'onde de Rayleigh générée par notre système est limité en fréquence.

3.2.3. Inspection de défauts usinés et évaluation des limites de détection du dispositif TECNAR

Deux natures de défauts sont usinés : des entailles débouchantes représentant les potentielles fissures et des trous génératrice sub-surfaciques représentant des porosités. Un panel de dimensions et de profondeurs d'implantation, répertoriés dans le Tableau 3-1, est choisi, de sorte à couvrir l'ensemble de la gamme de défauts réels d'intérêt. On ne présentera dans cette partie uniquement quelques cas limites utiles.

a) Entailles		b) Trous génératrice	
Hauteur (h)	Ouverture (w)	Diamètre($\varnothing$)	Profondeur (p)
μm	μm	μm	μm
500	300	500	800
500	100	300	300
100	100	300	100
100	50	100	300

Tableau 3-1 Dimensions a) des entailles et b) trous génératrice usinées dans des pièces issues du procédé de forge.

La configuration de contrôle de ces pièces est telle qu'en position initiale (émetteur et récepteur confondus) les faisceaux laser sont à environ 17 mm du défaut. La Figure 3-7 présente les B-scans pour les entailles (a et c) et les trous génératrice (c et d), la position du défaut est matérialisée par les pointillés blancs.

Sur les Figure 3-7-a et b, l'onde de Rayleigh est réfléchiée par l'entaille et le trou génératrice, respectivement ; elle est matérialisée par les pointillés orange. Cette onde réfléchiée marque la présence de l'entaille de 0,5 mm de hauteur et du trou génératrice de 0,3 mm de profondeur. Les reconstructions B-scans des Figure 3-7-c et Figure 3-7d, dont les défauts ont une hauteur ou une profondeur de 0,1 mm, ne présentent pas cette onde réfléchiée. Ainsi, lorsque $h \sim 0,1$ mm ou $w \sim 0,1$ mm, l'onde de Rayleigh n'est plus réfléchiée par les défauts.

Comme mentionné au chapitre 2, une onde n'est perturbée par un réflecteur que si $\lambda_R/2$ est inférieure ou égale aux dimensions du réflecteur. De plus, l'onde de Rayleigh ne se propage en épaisseur que sur environ une longueur d'onde. Ainsi, lorsque la hauteur de l'entaille ou la profondeur du trou génératrice deviennent significativement inférieurs à $\lambda_R/2$, comme c'est le cas pour une profondeur d'entaille de 0,1 mm par exemple, l'onde de Rayleigh n'est plus réfléchiée par le défaut. En effet, dans ces cas-là, la fréquence de l'onde de Rayleigh engendrée par le système actuel n'est plus suffisamment élevée pour être sensible aux défauts. Cependant, un contenu fréquentiel allant jusqu'à 10 MHz permettrait de détecter ces défauts puisqu'alors, $\lambda_R \sim 0,1$ mm.

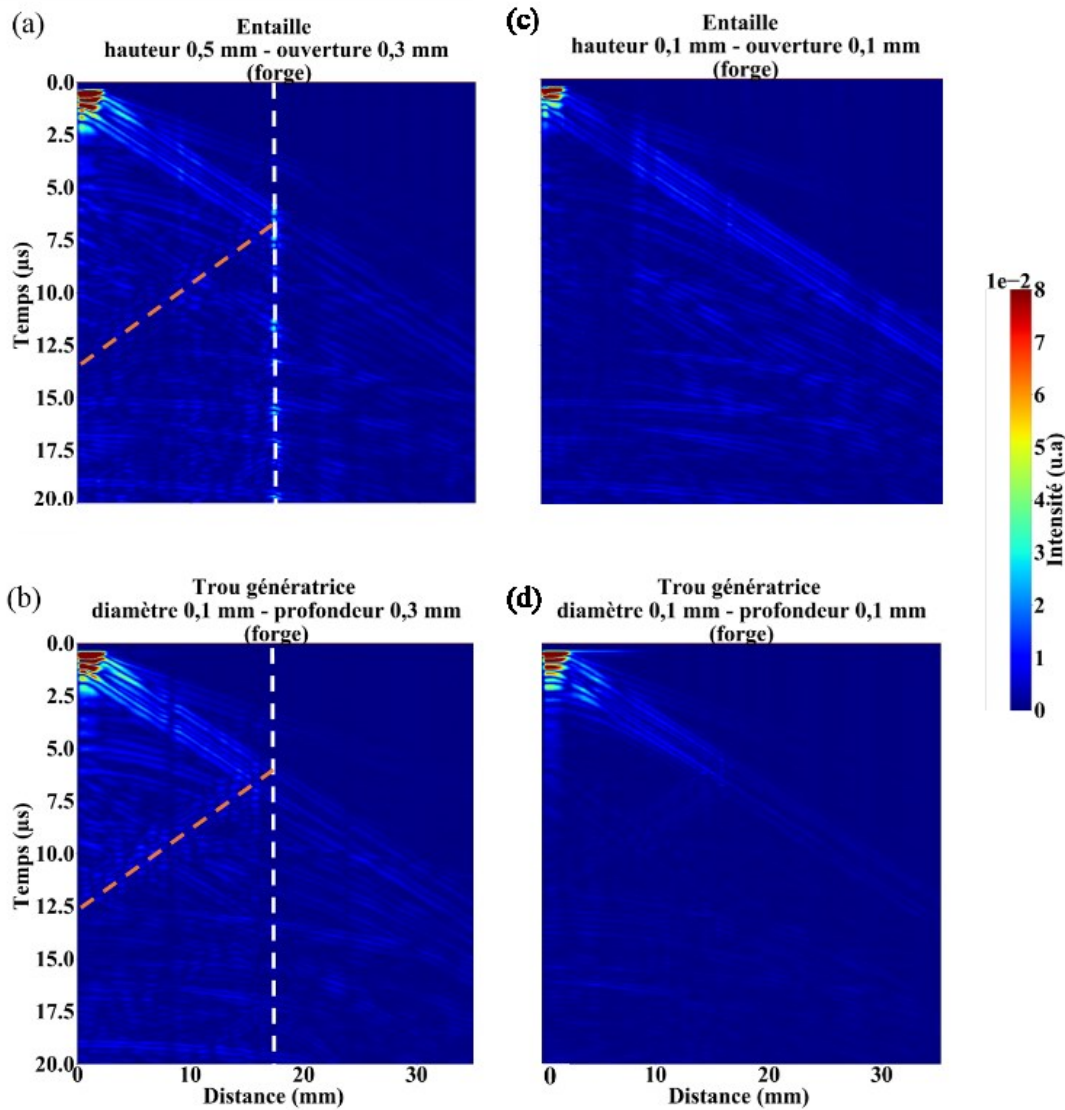


Figure 3-7 B- (a) Onde de Rayleigh réfléchi par une entaille de $h : 0,5$ mm et $w : 0,3$ mm. (b) B-scan pour par une entaille de $h : 0,1$ mm et $w : 0,1$ mm. (c) Onde de Rayleigh réfléchi par un trou génératrice de $p : 0,3$ mm et $\varnothing 0,1$ mm. (d) B-scan pour un trou génératrice de $p : 0,1$ mm et $\varnothing 0,1$ mm.

L'inspection de défauts usinés montre que les fréquences générées et détectées par les tâches focales du système TECNAR, allant jusqu'à 3 MHz, ne sont pas suffisamment élevées pour détecter des défauts dont les dimensions (h , p , d , $\varnothing$) sont inférieures à environ $\lambda_{US}/2$, soit inférieures à 500 μm . Cette observation corrobore l'analyse fréquentielle de l'onde de Rayleigh qui met en évidence un spectre s'étendant jusqu'à 3 MHz et donc une limite de détection spatiale proche de 500 μm dans l'acier 316L.

De plus, l'onde de Rayleigh dans l'espace temporel et le spectre associé sont différents de ceux présentés dans les publications. Or, les dimensions des tâches focales sont plus importantes que celles mentionnées au chapitre 2 dans l'état de l'art. On attribue donc cet écart aux dimensions des tâches focales. Le paragraphe suivant s'attache à vérifier cette hypothèse.

3.3. Optimisation de la bande spectrale et effet des dimensions de la tâche focale

L'hypothèse pour expliquer le contenu spectral associé, de l'onde de Rayleigh, s'appuie sur les différences de configurations expérimentales entre celles présentées ci-dessus, et celles des publications mentionnées au chapitre 2. Avec le système TECNAR, le diamètre nominal du faisceau laser de génération sur la surface de l'échantillon est cinq à dix fois plus important que celui présenté par Cerniglia *et al.* [45] et Klein *et al.* [46]. De plus, le faisceau de génération est incliné, dans notre application, ce qui engendre une tâche focale elliptique à la surface de l'échantillon sous test.

Si la gamme de fréquences des ondes générées dépend essentiellement de la durée de l'impulsion laser comme mentionné au chapitre 2 ; Arias [62] puis Faëse [65] ont montré que les dimensions de la ligne source sur les fréquences ultrasonores générées et détectées avaient également un effet important. Ainsi ces fréquences seraient corrélées aux dimensions des tâches focales. On propose un modèle heuristique pour comprendre ce lien. Un modèle analytique prendrait par exemple en compte l'asymétrie des diagrammes de directivité provoquée par l'inclinaison du faisceau de génération.

3.3.1. Modèle heuristique

Une explication naît de l'application du principe de Huygens : il permet de considérer la surface éclairée par le laser comme un ensemble de sources ponctuelles. Ces sources, isotropes émettent une onde élémentaire $s(t)$. Ces ondes induisent, en interférant, l'onde unique observée expérimentalement, $S(t)$. Pour un point de détection donné, l'onde $S(t)$ observée correspond alors à la somme des ondes $s(t)$ auxquelles s'appliquent un retard égal à leur temps de propagation propre. Les interférences résultantes sont à l'origine des ondes et contenus spectraux observés.

Pour vérifier ce postulat, nous développons un modèle numérique sous Python qui a pour objectif de déterminer si les dimensions des tâches focales ont effectivement une influence sur le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh. Les résultats obtenus via le modèle seront comparés à l'expérimentation afin de valider le postulat.

3.3.2. Validation numérique

La surface éclairée par le laser de génération est modélisée par une ellipse dont le centre est l'origine du repère cartésien. Cette ellipse est discrétisée en maille de coordonnées (x_i, y_i) . La tâche focale de détection est représentée par un point de coordonnées (x_d, y_d) comme schématisé sur la Figure 3-8. La répartition d'énergie au sein des tâches focales est homogène.

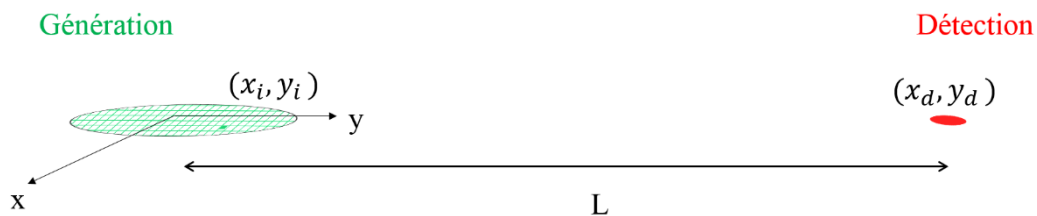


Figure 3-8 Configuration exploitée pour le modèle numérique visant à étudier les liens entre les dimensions des tâches focales et les fréquences de l'onde de Rayleigh.

En chaque maille est émise une onde élémentaire $s(t)$. Sur la base de mesures expérimentales, elle est choisie de manière à présenter un spectre Gaussien de fréquence centrale 2 MHz et de bande passante, 5,7 MHz. Au point de détection, l'onde $S(t)$ reçue est égale à la somme des signaux $s(t)$ en

tenant compte des retards $t_{i,j}$ de chaque onde élémentaire par rapport à l'onde élémentaire émise à l'origine du repère :

$$S(t) = \sum_{i,j} s(t - t_{i,j}) \quad (3.26)$$

Le retard $t_{i,j}$ est donné par l'expression suivante

$$t_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_d - x_{i,j})^2 + (y_d - y_{i,j})^2}}{V_R} \quad (3.27)$$

La distance L est imposée par le dispositif expérimental. Pour avoir des faisceaux lasers normaux à la surface, les deux têtes optiques doivent être côte à côte, et, du fait de l'encombrement, L est égale à 107 mm. Le seul paramètre variant est donc l'inclinaison du faisceau de génération, noté θ , par rapport à la normale à la surface de l'échantillon. En faisant varier cet angle, la longueur, x , du grand axe de l'ellipse est modifiée tel que $x = d/\cos(\theta)$, où d est le diamètre nominal du faisceau. La discrétisation de la génération s'en trouve alors modifiée et le signal somme $S(t)$ également. Ainsi, il est possible d'observer le signal somme $S(t)$ pour différentes inclinaisons du faisceau de génération.

Dans le cas d'une inclinaison du faisceau de génération de 50° , par exemple, on retrouve la configuration utilisée pour générer les B-scans expérimentaux des Figure 3-7. La Figure 3-9-a présente le signal élémentaire $s(t)$ et son spectre en bleu, Figure 3-9-c, ainsi que le signal somme $S(t)$, Figure 3-9-c, émis par un faisceau de diamètre nominal 2,5 mm et incliné de 50° et sa transformée de Fourier, Figure 3-9- d.

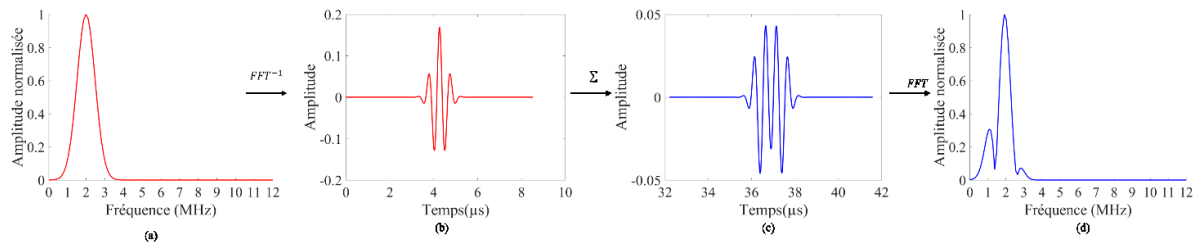


Figure 3-9 (a) Spectre modélisé centré en 2 MHz et de bande passante 5,7 MHz. (b) Signal élémentaire obtenu par transformée de Fourier inverse du spectre. (c) Somme modélisée des signaux élémentaires. (d) Spectre du signal $S(t)$. Ces résultats sont obtenus pour $\theta = 50^\circ$ et $L = 107$ mm.

Le signal temporel reçu, $S(t)$, présente quatre alternances, corroborant les résultats expérimentaux de la Figure 3-6 présentant le front d'onde de Rayleigh. Il en va de même pour le spectre simulé qui présente les trois maxima, en 0,8 MHz, 1,5 MHz et 2,3 MHz, mises en évidence par l'expérimentation (cf. Figure 3-6).

Puisque l'on retrouve les spectres de l'onde de Rayleigh expérimentaux, le modèle semble valider l'hypothèse qui a conduit à son implémentation. On se propose dans le paragraphe suivant de confronter ces premiers résultats numériques à des résultats expérimentaux afin de conforter notre hypothèse. Un montage permettant d'incliner le faisceau est élaboré en conséquence et les spectres des signaux sommes pour différentes inclinaisons du faisceau de génération sont testés.

3.3.3. Validation expérimentale

Pour valider le modèle numérique décrit dans le paragraphe précédent, un montage expérimental consistant à incliner le faisceau de génération d'un angle θ compris entre 10° à 90° est mis en œuvre. Il permet de comparer le contenu fréquentiel du front d'onde de Rayleigh pour différentes dimensions de la tâche focale de génération. La distance L , fixée à 107 mm, est la distance minimale entre les deux faisceaux lasers lorsqu'ils sont normaux à la surface. Les diamètres nominaux des

faisceaux, c'est-à-dire lorsqu'ils ne sont pas inclinés par rapport à la surface de la pièce, sont respectivement de 0,8 mm pour la détection et de 2,5 mm pour la génération. Les expérimentations sont effectuées sur un bloc d'acier ferritique et la configuration est schématisée sur la Figure 3-10.

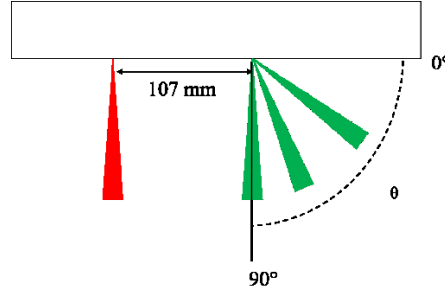


Figure 3-10 Configuration expérimentale pour l'étude des dimensions des tâches focales sur le contenu spectral de l'onde de Rayleigh. La taille de la tâche focale de génération est modifiée par l'inclinaison θ du faisceau de génération.

Afin de déterminer le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh, on choisit de s'appuyer sur le spectrogramme du A-scan et non sur la transformée de Fourier. Un spectrogramme est généré à partir d'un signal $s(t)$ découpé en séquences de largeur Δt , commençant en t_j . Chaque séquence de s noté $s_{t_j, \Delta t}$ peut s'écrire comme suit :

$$s_{t_j, \Delta t} = s(t) \Pi \left(\frac{t - t_j - \frac{\Delta t}{2}}{\Delta t} \right) = \frac{\sin(\theta^{trans})}{v^{trans}} \quad (3.28)$$

où Π , est la fonction porte définie comme :

$$\forall t \in \mathbb{R} \quad \Pi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } -\frac{1}{2} < t < \frac{1}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le spectrogramme étant une représentation temps/fréquence, il est plus aisé de distinguer les composantes du spectre associé au domaine temporel. De plus, il n'est plus nécessaire de sélectionner une fenêtre temporelle correspondant à l'onde de Rayleigh sur le A-scan dont le choix peut faire varier significativement le spectre associé. L'ensemble des résultats constitue le spectrogramme.

Afin de s'affranchir de l'incertitude de mesure sur le déplacement, engendrée par la distance génération-détection ou encore la distance focale, pour chaque angle d'inclinaison θ , l'expérimentation est répétée dix fois. C'est la somme des spectrogrammes obtenue à partir des dix mesures qui est comparée à la transformée de Fourier obtenue par le modèle. La Figure 3-11 montre les spectrogrammes expérimentaux et les transformées de Fourier du front d'onde de Rayleigh modélisées pour deux inclinaisons du faisceau de génération : à $\theta = 90^\circ$, correspondant aux faisceaux normaux, et à $\theta = 30^\circ$, correspondant à une inclinaison extrême du faisceau. Pour une inclinaison de 30° , le spectre modélisé présente quatre fréquences principales : 1 MHz, 1,7 MHz, 2,1 MHz et 2,7 MHz. Le spectrogramme, issu de l'expérimentation, montre quatre fréquences principales : 1 MHz, 1,6 MHz et 2,4 MHz et 3,5 MHz. Les trois premières fréquences obtenues expérimentalement corroborent le modèle. La dernière fréquence, 3,5 MHz, est plus importante que celle du modèle et cet écart peut provenir des hypothèses de départ sur la fréquence centrale et la bande passante de l'onde élémentaire et des dimensions de la tâche focale. Pour $\theta = 90^\circ$, le spectre présente trois fréquences principales prédites par le modèle et strictement retrouvées expérimentalement : 1 MHz, 2 MHz et 2,8 MHz.

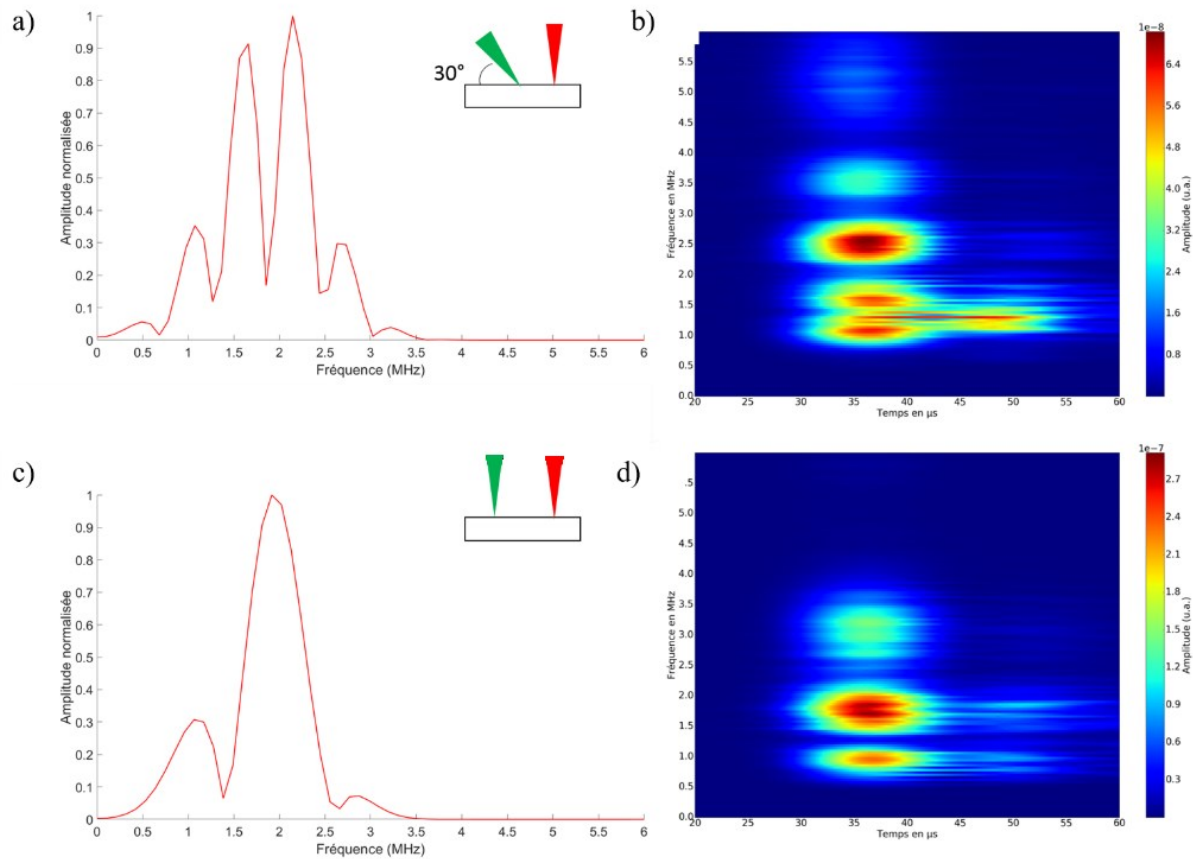


Figure 3-11 (a) Spectre de l'onde de Rayleigh modélisé pour $\theta = 30^\circ$. (b) Spectrogramme expérimental de l'onde de Rayleigh $\theta = 30^\circ$. (c) Spectre de l'onde de Rayleigh modélisé pour $\theta = 90^\circ$. (d) Spectrogramme expérimental de l'onde de Rayleigh pour $\theta = 90^\circ$.

Pour l'ensemble des angles, le modèle suit la même tendance que les résultats expérimentaux. Bien que l'on constate quelques écarts, comme pour le cas d'inclinaison à 30° . On considère donc que le modèle et l'expérimentation sont en adéquation et que le postulat selon lequel le contenu fréquentiel est modifié par les dimensions de la tâche focale est vérifié.

L'inclinaison du faisceau modifie les dimensions des tâches focales de génération, et de fait, la directivité de la source. L'amplitude du signal n'est plus la même dans toutes les directions, et la position de la détection doit être choisie en conséquence, dans la direction privilégiée, pour détecter le signal de plus forte amplitude. Le paragraphe suivant traite du caractère directionnel des sources elliptiques et constitue un élément de la démarche qui vise à déterminer la forme de la source la plus adéquate pour nos applications.

• Directivité de la source

On se propose de tracer numériquement le diagramme de directivité de l'onde de Rayleigh pour différentes dimensions de la tâche focale elliptique de génération afin de comprendre l'influence de la déformation de la tâche focale de génération sur le diagramme de directivité. Pour ce faire, on calcule l'amplitude du signal reçu en chacun point d'un cercle, en rouge sur la Figure 3-12, qui a pour centre la tâche focale de la génération et pour rayon la distance génération-détection, noté L , comme sur la Figure 3-12.

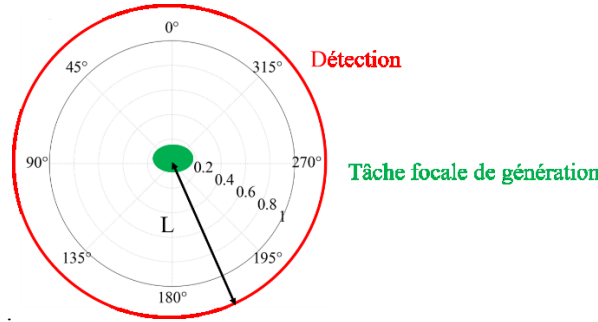


Figure 3-12 Principe du calcul du diagramme de directivité dans le cas de l'utilisation du modèle numérique de sommation des ondes élémentaires.

On considère que la tâche focale de génération émet en chaque point une onde élémentaire $s(t)$ modélisée par un cosinus. Son déphasage φ , en chaque point $x(i,j)$ de la tâche focale de génération, est tel que :

$$\varphi_{i,j}(f) = 2\pi f t_{i,j} \quad (3.29)$$

où $t_{i,j}$ est le retard donné à l'équation 3.27 et f la fréquence de l'onde ultrasonore considérée.

La somme des $\cos(\varphi_{i,j})$ pour chaque point de la génération donne le signal en sortie, noté S et ce pour chaque point du cercle de détection (allant de $\omega = 0^\circ$ à 360°) :

$$S_\omega = \sum_{i,j} \cos(\varphi_{i,j}) \quad (3.30)$$

L'amplitude moyenne de ce signal S_ω , tracé en coordonnées polaires permet d'obtenir les diagrammes de directivité présentés sur la Figure 3-13 pour un faisceau de génération incliné à $\theta = 90^\circ$, $\theta = 50^\circ$ et $\theta = 30^\circ$. La fréquence de l'onde de Rayleigh considérée est choisie et égale à 2 MHz au regard des spectres expérimentaux (cf. Figure 3-6).

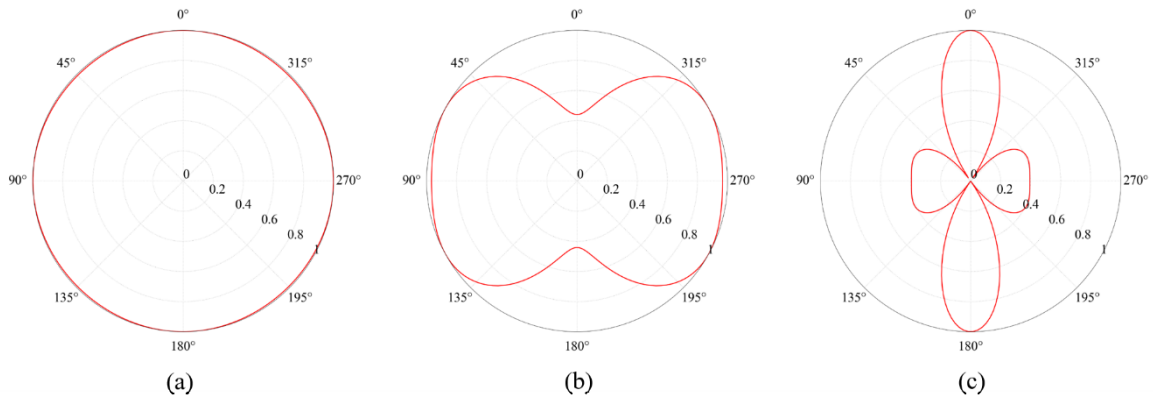


Figure 3-13 Modification du diagramme de directivité des ondes de Rayleigh modélisé en fonction de l'angle d'incidence du faisceau de génération. (a) $\theta=90^\circ$: la source est isotrope. (b) $\theta=50^\circ$: la source est directive. (d) $\theta=30^\circ$: la source est directive. Les résultats sont obtenus pour $f=2$ MHz, $L=107$ mm, et pour un diamètre nominal du faisceau de $d=2,5$ mm.

Le diagramme de la Figure 3-13 a, correspondant à un faisceau de génération normal à la surface, montre que la source est omnidirectionnelle pour un spot circulaire de 2,5 mm. Puis, plus le faisceau est incliné ($\theta=50^\circ$, Figure 3-13-b, puis $\theta=30^\circ$, Figure 3-13-c), plus le grand axe de l'ellipse formée par la source est grand et plus la source est directionnelle. Ces résultats sont en accord avec la

littérature [84]. Un cas extrême de l'inclinaison du faisceau de génération pourrait être, non plus une ellipse, mais une ligne source.

Comme énoncé au chapitre 2, la ligne source favorise une direction de propagation privilégiée des ondes de Rayleigh. La Figure 3-14-a présente les diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh générées par des lignes sources de 3 mm de long et de largeurs comprises entre 0,2 et 2 mm. La Figure 3-14-b montre le diagramme de directivité des ondes de Rayleigh générées par des lignes sources de largeurs 0,2 mm et de longueurs comprises entre 0,2 mm et 2 mm.

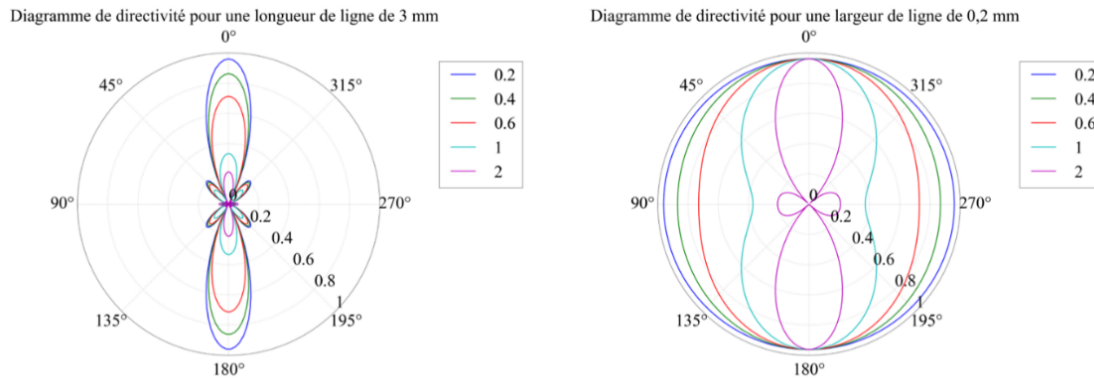


Figure 3-14 (a) Modification du diagramme de directivité d'une ligne source en fonction de sa longueur. (b) Modification du diagramme de directivité d'une ligne source en fonction de sa largeur, pour $f = 2$ MHz.

On observe que plus la largeur augmente, pour une longueur donnée, et plus les ondes de Rayleigh ont une amplitude faible. Sur la Figure 3-14b, qui présente les diagrammes de directivité pour différentes longueurs de ligne, pour une largeur de ligne fixée à 0,2 mm, la source est d'autant plus directive que sa longueur est élevée.

En conclusion, plus le rapport longueur sur largeur de la ligne source de génération est élevée, plus elle est directive. Pour favoriser la génération de l'onde de Rayleigh, la Figure 3-14 montre qu'un rapport longueur sur largeur important, tel que $2/0,2 = 10$, est préféré.

Les diagrammes de directivité sont tracés pour une fréquence ultrasonore donnée, ici, $f = 2$ MHz. On cherche à présent à préciser les dimensions de la ligne source permettant de générer un spectre dont le contenu fréquentiel va jusqu'à 10 MHz. On se propose d'étudier la transmission d'une gamme de fréquence de l'onde somme générée par une source pour une gamme de fréquence comprise entre 0 et 20 MHz.

• Transmission fréquentielle du système

Le spectre de l'onde de Rayleigh engendrée par le système présente des fréquences maximales en alternance avec des fréquences dont l'amplitude est quasi nulle, (cf. Figure 3-11). Ces fréquences correspondent aux interférences destructives suivant le postulat évoqué au paragraphe 3.3.1. Afin de prédire la fréquence correspondant à la première interférence destructive dans le spectre, un modèle numérique est développé pour déterminer le taux de transmission d'une fréquence émise et reçue par les tâches focales laser. On se propose de regarder la réponse impulsionnelle du système pour la gamme de fréquence d'intérêt, à savoir de 0 à 20 MHz et en s'appuyant sur le modèle développé précédemment.

En reprenant le raisonnement précédent selon lequel le signal au point de détection est la somme des signaux élémentaires émis par la source, on calcule ce signal somme, non plus pour une fréquence donnée, mais pour une gamme de fréquences. D'après l'équation (3.26), on peut réécrire l'expression de S en introduisant la fréquence dans la somme des $\cos(\varphi)$ pour chaque point $x(i,j)$ de la génération :

$$S(f) = \sum_{i,j} \cos(\varphi_{i,j}(f)) \quad (3.31)$$

La moyenne de S correspond au taux de transmission pour une fréquence f . La Figure 3-15 donnent les taux de transmissions, $S(f)$, des fréquences jusqu'à 20 MHz pour différentes largeurs d'une ligne source de 3 mm de long.

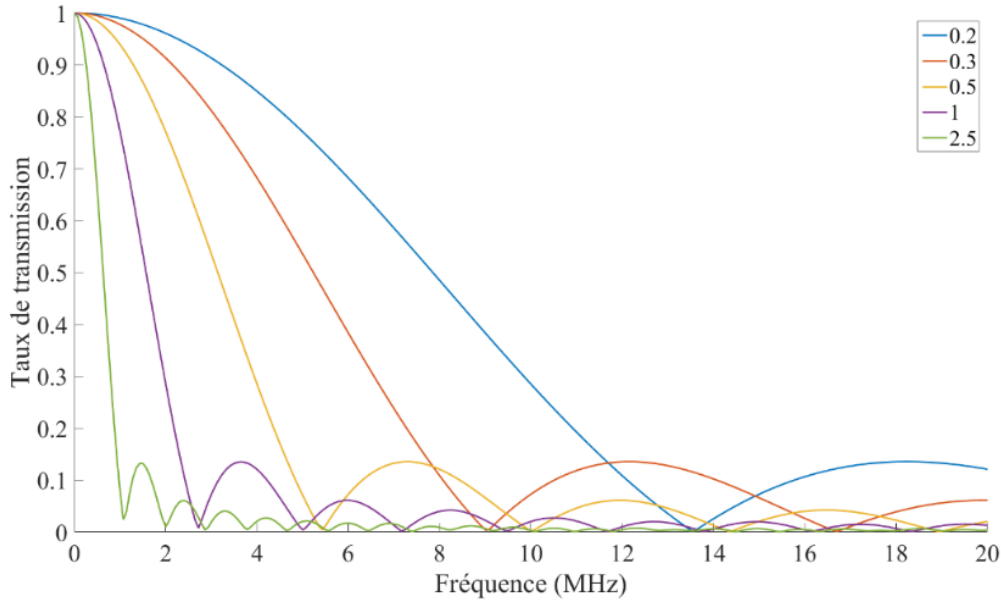


Figure 3-15 Modification du taux de transmission fréquentiel modélisé en fonction de la largeur de la ligne source (comprises entre 0,2 mm et 2,5 mm) et pour une longueur de 3 mm.

Le taux de transmission est caractérisé par des extinctions dont la période augmente avec la diminution de la largeur de la ligne source. La première apparaît pour une fréquence inférieure à 5 MHz pour une largeur de 1 mm, tandis qu'il n'apparaît qu'à 15 MHz pour une largeur de ligne de 0,2 mm. En conséquence, pour avoir une transmission suffisante et exploitable à 10 MHz, on choisira une largeur de ligne de 0,2 mm. Notons que l'on retrouve la tendance mise en évidence par Doyle [67] et présentée sur la Figure 2-10 : la bande passante augmente lorsque la largeur de la source décroît. Cependant, nous n'évaluons pas la fréquence centrale contrairement à Doyle qui étudiait directement le spectre de l'onde de Rayleigh. En effet, dans notre étude, nous ne considérons pas l'expression analytique que propose Doyle, nous cherchons à retrouver des tendances à partir du postulat initial énoncé au début de ce paragraphe.

• Impact de la taille du spot de détection

Si les dimensions de la tâche focale de génération induisent des interférences et modifient le spectre de l'onde de Rayleigh détectée, les dimensions de la tâche focale de détection impactent également le spectre de l'onde de Rayleigh mesuré. Chaque point constituant le spot de détection reçoit le signal somme $S(t)$ émis par la génération. Le signal reçu par une tâche focale de détection non ponctuelle est la somme des signaux reçus en chaque point de celle-ci. Le taux de transmission fréquentielle s'en trouve modifié comme le montre la Figure 3-16.

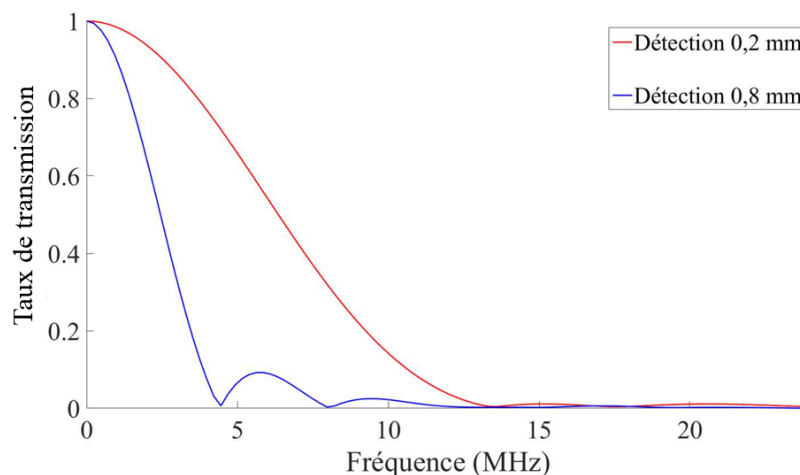


Figure 3-16 Taux de transmission fréquentielle modélisé engendré par une ligne source de 0,2 mm de largeur et pour un spot de détection de 0,2 (en bleu) et 0,8 mm (en rouge).

L'étude paramétrique visant à évaluer la taille optimale du spot de détection a montré qu'un spot de détection de 0,2 mm de diamètre permettait d'engendrer un spectre allant jusqu'à 10 MHz comme le montre la Figure 3-16.

Le lien entre la fréquence de l'onde de Rayleigh générée et les dimensions de la tâche focale s'explique par le postulat émis et vérifié par le modèle heuristique et l'expérimentation.

La limite en fréquence, observée sur les premières expérimentations, s'explique par les dimensions de la tâche focale du laser, alors de 2,5 mm. Le calcul du taux de transmission des fréquences pour une ligne source montre qu'une largeur de 0,2 mm pour une longueur de 3 mm permet d'exploiter les fréquences allant jusqu'à 10 MHz et donc de pouvoir détecter des défauts de l'ordre de 100 μm au moyen de l'onde de Rayleigh. Le système peut être modifié en conséquence afin de focaliser les faisceaux laser et obtenir un contenu fréquentiel plus élevé.

3.4. Amélioration du dispositif optique pour la génération d'onde de Rayleigh haute fréquence

Compte tenu des conclusions précédentes, une nouvelle tête optique est conçue pour obtenir une ligne source de 0,2 mm de largeur sur quelques millimètres de long et un spot de détection de 0,2 mm de diamètre. En plus de la focalisation des faisceaux, le système de déplacement des optiques et de la pièce a été modifié de sorte que les deux faisceaux puissent être confondus et s'écarter progressivement pour effectuer des mesures d'atténuation par exemple. Comme pour l'ancien dispositif optique, l'encombrement des optiques oblige l'inclinaison du faisceau laser de génération.

Le système de déplacement de la pièce doit permettre de la positionner dans la configuration industrielle imaginée et présentée dans l'introduction du chapitre 2, où la génération et la détection sont à une distance fixe et balayent la surface de l'échantillon.

3.4.1. Génération

L'effet de l'inclinaison du faisceau de génération sur la taille et la forme du faisceau a été évalué grâce au développement, sous Python, d'un modèle numérique. Il est basé sur un tirage aléatoire de

rayons et permet d'évaluer le trajet et l'énergie du faisceau se propageant à travers des lentilles convergentes, cylindriques, ou des diaphragmes. Le paragraphe suivant, détaille le montage optique qui a été retenu compte tenu des dimensions de tâches focales que l'on souhaitait obtenir.

Le diamètre de la fibre est égal à 1 mm et celui de la tâche de focalisation souhaitée est de 0,2 mm. Le rapport des focales de collimation et de focalisation doit être égal au rapport de ces deux diamètres, c'est-à-dire 0,2 mm. Les focales des lentilles de collimation et de focalisation sont respectivement de 125 mm et 25 mm tel que leur rapport soit égal à 0,2. Le choix de ces focales est un compromis entre la distance entre la dernière lentille et la pièce, et les dimensions de la tâche focale.

Pour former la ligne laser, une lentille cylindrique est intercalée entre la lentille de collimation et la lentille de focalisation. Un premier diaphragme positionné devant la fibre permet de limiter le cône lumineux en sortie, dû à l'ouverture numérique importante de la fibre de 0,22. Un second diaphragme, positionné après la lentille cylindrique, permet d'ajuster les dimensions de la ligne. Le chemin des faisceaux lumineux en sortie de la fibre est modélisé sous Python et illustré sur la Figure 3-17.

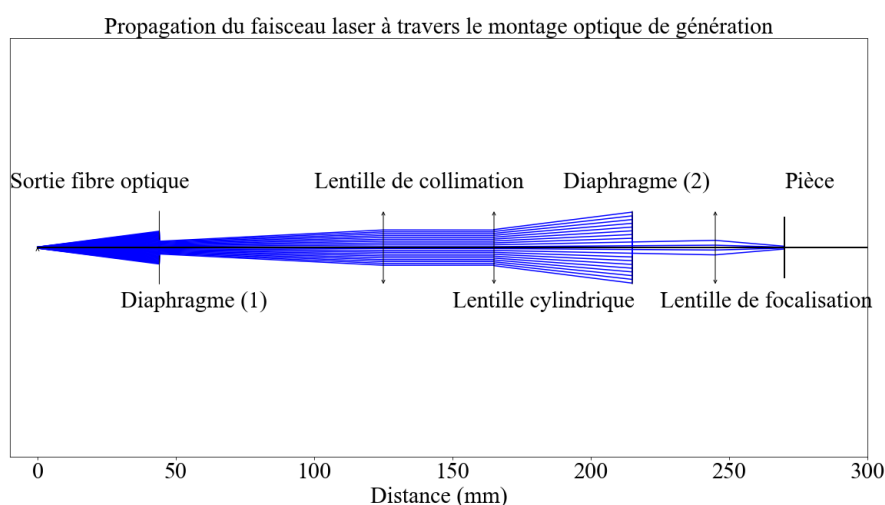


Figure 3-17 Chemin optique du faisceau en sortie de la fibre de génération, traversant les différentes optiques. Cette figure est le résultat du modèle de tirage aléatoire de rayon développé.

Une grande partie des rayons est perdue au cours de la propagation à travers le montage optique.

Le modèle, basé sur le tirage aléatoire de rayons, prédit la densité de puissance surfacique sur la pièce. La Figure 3-18 montre la densité de puissance surfacique en sortie de fibre à gauche et la densité de puissance surfacique en sortie de la lentille de focalisation à droite. 98% de la puissance est perdue à travers le dispositif optique mais la densité de puissance surfacique moyenne au niveau de la ligne source est d'environ 8 MW/cm², ce qui est suffisant pour engendrer des ondes en régime thermoélastique (cf. chapitre 2).

Pour conserver une certaine flexibilité dans les mesures, on souhaite pouvoir confondre les deux faisceaux. Comme pour le montage TECNAR, nous sommes confrontés à l'encombrement des montures optiques et le faisceau de génération doit être incliné pour se superposer à celui de la détection. Le modèle permet de quantifier l'effet de l'inclinaison du faisceau sur la densité de puissance surfacique engendrée par la ligne source. La Figure 3-19 montre la densité de puissance surfacique pour une ligne source avec un faisceau incliné à $\theta=50^\circ$ et $\theta=90^\circ$.

L'angle d'inclinaison de la génération déforme peu la ligne source, on considèrera cette déformation négligeable pour nos applications.

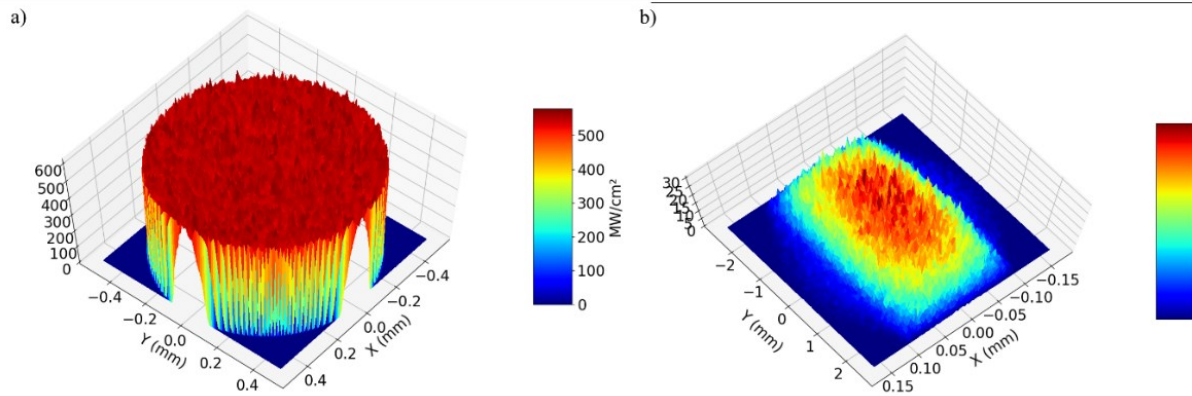


Figure 3-18 (a) Densité de puissance surfacique modélisée en sortie de la fibre. (b) Densité de puissance surfacique sur la pièce.

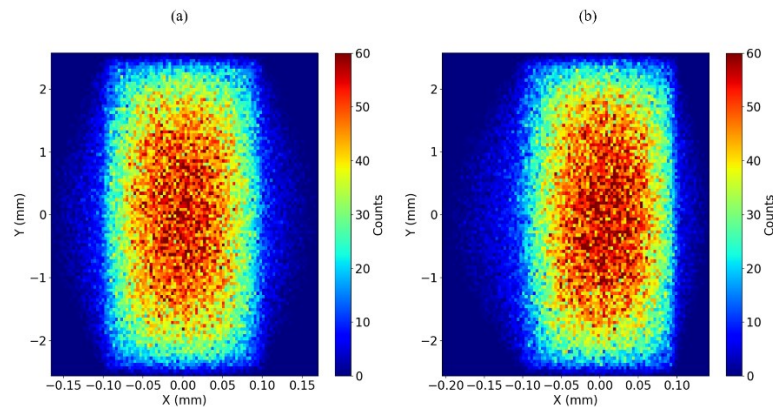


Figure 3-19 Modification de la répartition d'énergie simulé pour une ligne source en fonction de l'angle d'incidence du faisceau de génération (a) pour $\theta = 90^\circ$ et (b) pour $\theta = 50^\circ$.

3.4.2. Détection

La détection requiert trois fibres optiques : la fibre **illuminatrice** qui provient directement du laser, la fibre de **référence** qui achemine une partie du faisceau vers l'interféromètre et la **fibre de collection** qui achemine le faisceau réfléchi par la pièce.

Le montage réalisé pour la détection est similaire à celui de l'ancien dispositif et seules les focales des optiques sont modifiées de sorte à obtenir un spot de 0,2 mm de diamètre. Les chemins optiques des faisceaux lumineux sont illustrés sur la Figure 3-21. Le faisceau issu du laser est divisé en deux faisceaux par un cube polariseur : la partie du faisceau polarisé verticalement est envoyée vers la fibre de référence, l'autre partie est acheminée jusqu'à la pièce. Sur son trajet, le faisceau traverse une lame quart d'onde qui induit une polarisation circulaire. Le faisceau est réfléchi par la pièce et son sens de polarisation est modifié, puis il est collecté par la dernière fibre.

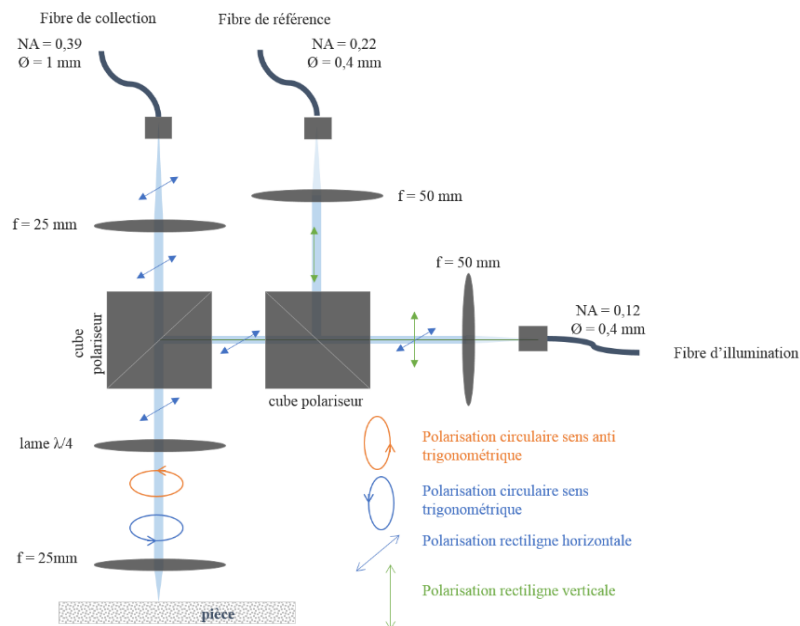


Figure 3-20 Schéma optique développé.

Finalement, le montage réalisé est présenté sur la Figure 3-21. Il présente un système optique en sortie de la fibre de génération, permettant de mettre en forme la ligne source, conformément au modèle numérique (cf. Figure 3-17). Un système optique propre à la détection et correspondant au schéma de la Figure 3-21 est élaboré.

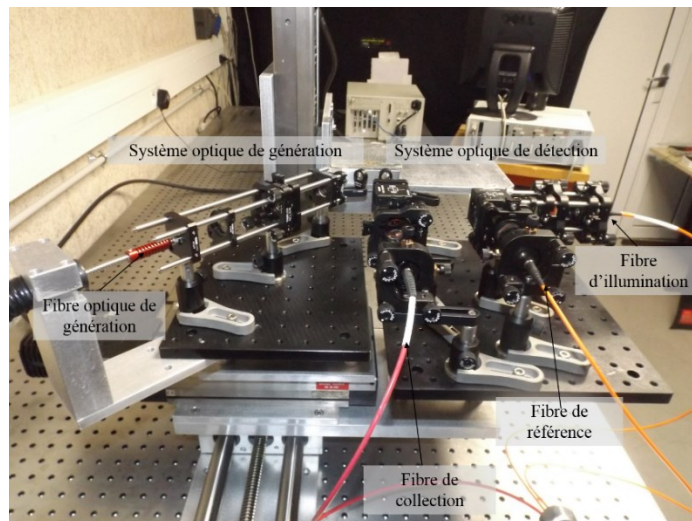


Figure 3-21 Montage optique réalisé avec la tête optique de génération et la tête optique de détection avec les trois fibres optiques (collection, référence et illumination).

3.4.3. Validation expérimentale du dispositif

Suite à l'installation des nouveaux dispositifs optiques de génération et de détection, on souhaite vérifier que le contenu spectral de l'onde de Rayleigh générée par une ligne source de 0,2 mm de large et détectée par le spot de 0,2 mm de diamètre atteint 10 MHz.

Pour ce faire, on se place dans la même configuration qu'avec l'ancien montage : la génération et la détection sont espacées de 13 mm sur une surface polie d'acier 316L obtenue par un procédé de

forge. La génération est une ligne source de 0,2 mm de large sur 3 mm de long et la détection un spot de 0,2 mm de diamètre. Les acquisitions A-scans obtenues dans la même configuration expérimentale mais avec des dimensions de tâches focales différentes sont présentées sur les Figure 3-22. La Figure 3-22-a est obtenue avec l'ancien montage optique et la Figure 3-22-b avec le dispositif optimisé pour la génération de l'onde de Rayleigh.

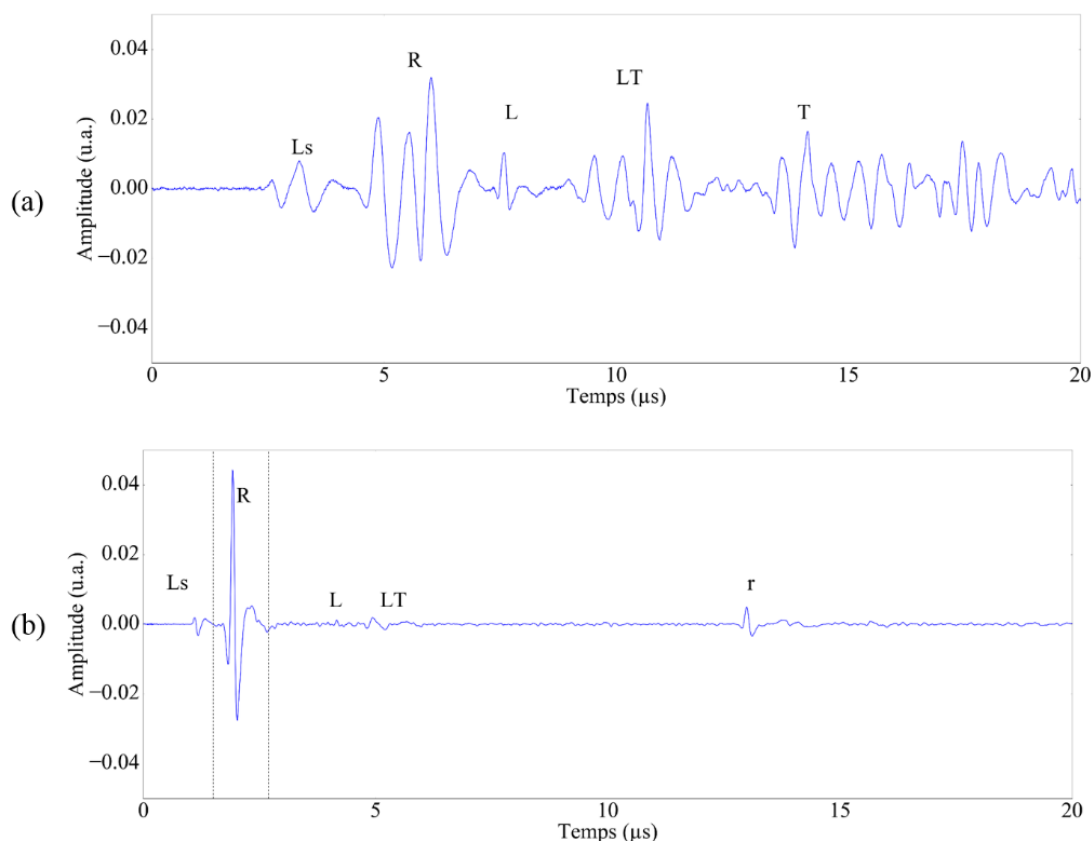


Figure 3-22 (a) A-scan obtenu avec un spot laser de 2,5 mm de diamètre. (b) A-scan obtenu avec une ligne source de 3 mm de long sur 0,2 mm de large. Les expérimentations sont menées en régime thermoélastique sur une pièce en acier 316L, réalisée par le procédé de forge.

Le A-scan, acquis avec le nouveau montage optique, ne présente que l'onde de Rayleigh et l'onde longitudinale de surface ; du fait de la génération en ligne qui favorise les ondes de surface, comme attendu. La durée de l'onde de Rayleigh n'est plus que de 1 μ s et son spectre est donné sur la Figure 3-23. L'amplitude du spectre est donnée en dB pour mieux visualiser le niveau de bruit.

Le spectre ne présente plus de rebonds, c'est-à-dire, de fréquences maximales alternées avec des fréquences quasi nulles. L'unique maximum est donné pour 5 MHz et le spectre s'étend jusqu'à 10 MHz, corroborant les résultats du modèle (cf. Figure 3-15). Au-delà de $f = 11,5$ MHz, l'amplitude du spectre est inférieure à -70 dB et se situe donc dans le niveau de bruit. Le spectre de l'onde de Rayleigh s'étend de 1 MHz à 10 MHz, ce qui correspond à des longueurs d'onde allant de 2,9 mm à 0,29 mm. Le spectre des ondes de Rayleigh engendré par la ligne source correspond aux caractéristiques souhaitées en termes de fréquences attendues pour la détection de défauts dont les dimensions sont proches de 100 μ m. Le dispositif conçu permet d'atteindre, le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh souhaité et prédit par le modèle. Les caractéristiques des ondes générées et détectées par le nouveau montage sont données dans le Tableau 3-2 et constitue la conclusion de ce paragraphe.

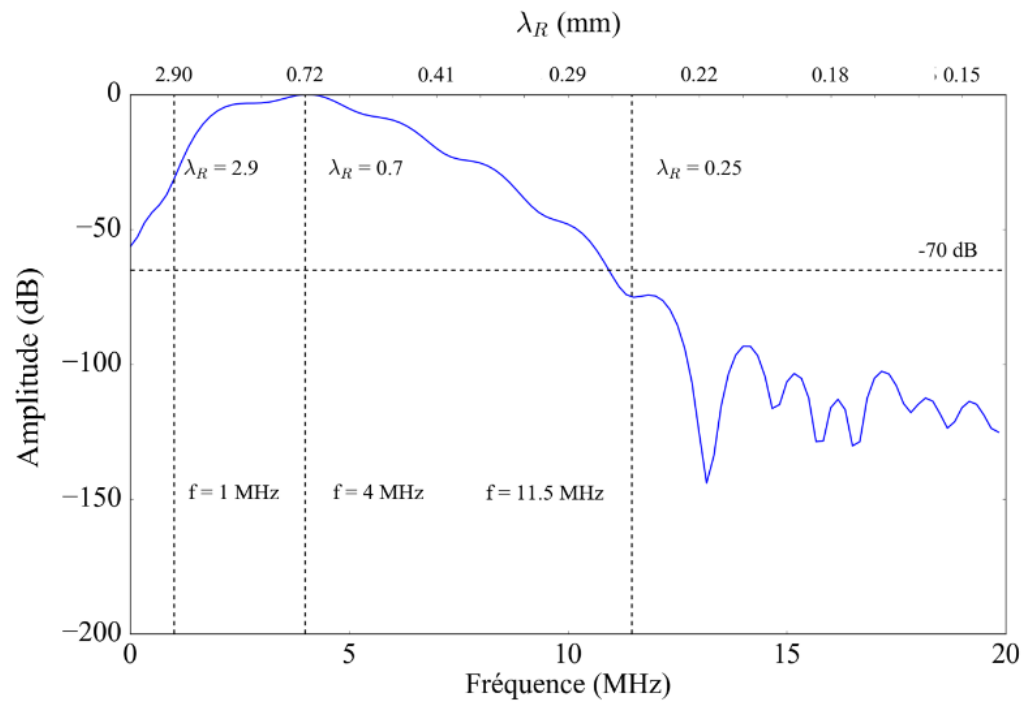


Figure 3-23 Spectre de l'onde de Rayleigh générée par la ligne source de 0,2 mm de large sur 3 mm de long et détectée par un spot laser de 0,2 mm de diamètre (cf. Figure 3-22).

	Génération spot : 2,5 mm	Génération ligne : 0,2 mm
Durée de l'onde de Rayleigh	2 μ s	1 μ s
Bande passante de l'onde de Rayleigh	$\approx$ 2 MHz	$\approx$ 5 MHz
λ_R	3,2 mm, 1,8 mm et 1,16 mm	Comprises entre 3 mm et 0,3 mm

Tableau 3-2 Caractéristiques des ondes générées par le dispositif Tecnar et le nouveau montage.

3.5. Conclusion

Dans un premier temps, à travers l'inspection de défauts usinés dans des pièces issues du procédé de forge, nous avons mis en évidence les limites de détection du dispositif optique UL disponible au laboratoire. Dans cette configuration, les tâches focales des lasers de génération et de détection, de l'ordre du millimètre (0,8 mm pour la détection et 2,5 mm pour la génération), permettaient uniquement de générer des ondes de Rayleigh dont le contenu fréquentiel était inférieur à 5 MHz. Or, cette gamme de fréquence, ne permet pas de détecter des défauts en deçà de 500 μm comme nous l'avons confirmé expérimentalement. Notre objectif étant de détecter des défauts dont les dimensions sont proches de la centaine de micromètres, nous avons dû envisager de concevoir un nouveau système optique.

Nous avons montré à travers le modèle numérique, permettant d'étudier le spectre de l'onde de Rayleigh en fonction des dimensions de la tâche focale de génération, que la source de génération se comporte comme une multitude de points sources émettant des signaux élémentaires. Ainsi, le signal détecté est la somme de ces derniers. Le spectre de l'onde de Rayleigh détectée, présente des fréquences maximales et des fréquences d'amplitude quasi nulle du fait des interférences.

Le modèle a mis en évidence qu'une ligne source de 3 mm de long et de 0,2 mm de large permettait de générer une onde de Rayleigh dont le contenu fréquentiel s'étendait jusqu'à 10 MHz et ne présentait pas de fréquences d'amplitude quasi nulle. Ces résultats nous ont conduit à élaborer un nouveau montage optique permettant de former cette ligne source. Les premiers essais expérimentaux faits via ce montage ont montré que le contenu fréquentiel prédit numériquement était atteint : le spectre de l'onde de Rayleigh est centré en 5 MHz et les fréquences s'étendent jusqu'à 10 MHz. Ainsi, la longueur d'onde de Rayleigh λ_R à la fréquence centrale est de 0,72 mm.

Fort de ces développements, le chapitre suivant détaille les premières expérimentations menées grâce à ce nouveau dispositif, prometteur, puisqu'il génère des ondes dont le contenu fréquentiel devrait permettre la détection des défauts usinés de l'ordre de la centaine de micromètre. Le chapitre 4 s'attarde donc sur l'inspection et les limites de la détection de défauts usinés dans des pièces obtenues par les procédés de forge et de DML.

Chapitre 4

Détection et caractérisation de défauts

4.	<u>Détection et caractérisation de défauts usinés par le dispositif optimisé</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.1.	<u>Introduction</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.2.	<u>Évaluation des performances de détection du nouveau dispositif expérimental</u>	Erreur ! Signet non défini.
		Erreur ! Signet non défini.
4.2.1.	<u>Configuration génération-détection fixes</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.2.2.	<u>Caractérisation d'un échantillon issu du procédé DML</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.3.	<u>Détection des trous génératrice et entailles</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.3.1.	<u>Sur surface polie</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.3.2.	<u>Sur surface rugueuse</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.4.	<u>Caractérisation des défauts</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.4.1.	<u>Domaine temporel</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.4.2.	<u>Domaine spectral</u>	Erreur ! Signet non défini.
4.5.	<u>Conclusion</u>	Erreur ! Signet non défini.

4. Détection et caractérisation de défauts usinés par le dispositif optimisé

4.1. Introduction

La conception du dispositif, présentée au chapitre 3, a été motivée par la détection des défauts surfaciques et sub-surfaciques pouvant apparaître lors des variations des paramètres du procédé DML. Les dimensions de ces défauts (porosités et entailles), identifiées au chapitre 1, sont autour de la centaine de micromètres. La fréquence de l'onde de Rayleigh générée dans les métaux doit théoriquement atteindre 10 MHz pour être sensible à ces derniers. Nous avons montré expérimentalement au chapitre précédent que la ligne source de notre système engendre une onde de Rayleigh avec un tel spectre.

Ce chapitre vise à évaluer les performances de détection du dispositif face à des défauts surfaciques et sub-surfaciques de dimensions calibrés, proches des défauts recherchés sur procédé DML. L'objectif premier est de s'assurer de la possibilité d'une détection dans une pièce de fabrication additive par ondes de Rayleigh. Puis, on cherche à quantifier les limites de détection en fabrication additive afin de donner des ordres de grandeurs des défauts qu'il sera possible de détecter en cours de fabrication. *In fine*, le contrôle *in situ* devra s'effectuer sur des pièces dont l'état de surface est brut, c'est-à-dire rugueuse donc diffusante. Ainsi les limites de détection seront également données pour des entailles et porosités usinées sur une surface rugueuse. Enfin, puisque le but d'un contrôle *in situ* est de corriger le procédé de fabrication si le défaut détecté s'avère critique pour la santé de la pièce, il est pertinent de pouvoir estimer les dimensions des défauts pour apprécier l'impact que ces derniers auront sur la tenue en fatigue de la pièce. De fait, dans une dernière partie, nous évaluerons des méthodes de caractérisations de défauts surfaciques et sub-surfaciques dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde de Rayleigh.

4.2. Évaluation des performances de détection du nouveau dispositif expérimental

Ce paragraphe vise à détailler la nouvelle configuration de contrôle. Dans un premier temps, nous présentons une image B-scan acquise avec le nouveau dispositif puisqu'elle constitue une nouvelle représentation des signaux ultrasonores. Les ondes en présence seront déterminées dans une pièce ne comportant pas de défaut. On pourra par la suite plus facilement apprécier les images B-scans issues des inspections de défauts usinés. La fabrication selon le procédé DML favorise la croissance colonnaire des grains qui pourraient modifier la propagation des ondes. Dans un second temps, afin d'évaluer ce point, nous comparerons les caractéristiques de l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce réalisée en fabrication additive à celles obtenues sur une pièce réalisée en forge qui constitue le milieu référence.

4.2.1. Configuration génération-détection fixes

La configuration choisie fixe la distance entre génération/détection, L , et se place ainsi dans la configuration de contrôle prévue pour un usage industriel, c'est-à-dire un système UL suivant la buse de fabrication. Dorénavant, les B-scans seront acquis selon une distance génération-détection fixe de 5 mm. Cette disposition est possible grâce au nouveau système de déplacement de la pièce conçu au chapitre 3. Cette distance est choisie afin de séparer temporellement le front d'onde de Rayleigh du front d'onde longitudinal. Pour une vitesse $V_R = 2,9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ et $V_L = 5,7 \text{ mm}/\mu\text{s}$, avec un écart de temps de vol d'environ $1 \mu\text{s}$ correspond à $L = 5 \text{ mm}$.

Ce paragraphe est consacré à l'analyse des différentes ondes observées sur les B-scans obtenus avec le nouveau dispositif. La Figure 4-1-b compare un B-scan acquis avec l'ancien dispositif (a, génération et détection progressivement écartés), avec un B-scan acquis avec le nouveau dispositif (b, génération et détection écartés de 5 mm). La pièce sur laquelle est faite l'acquisition est une pièce en acier 316L issue du procédé de forge, de 24 mm d'épaisseur.

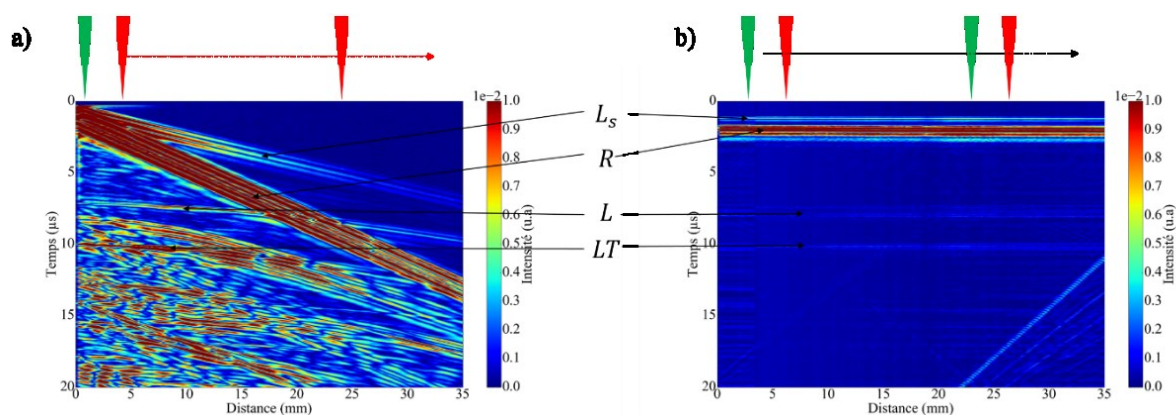


Figure 4-1 (a) B-scans acquis pour une distance génération-détection variable et un spot laser de génération de 2,5 mm de diamètre. (b) B-scans acquis avec une distance génération-détection fixe et une ligne source laser de 0,2 mm de large et 3 mm de long. Les mesures sont faites sur une pièce en acier 316L réalisée en forge et en régime thermoélastique.

Les ondes de la Figure 4-1-a ont été décrites dans le chapitre précédent. On se limitera donc ici, à décrire celles de la Figure 4-1-b. Elles sont identifiées par comparaison avec les temps de vol théoriques attendus. Le temps de vol de l'onde de Rayleigh ($V_R = 2900 \text{ m/s}$) se propageant de la génération à la détection (distance $L = 5 \text{ mm}$) vaut $1,7 \mu\text{s}$. Pour l'onde longitudinale de surface, notée L_s , sur la Figure 4-1, ce temps de vol est de $0,88 \mu\text{s}$. Les ondes à $7,5 \mu\text{s}$ et $10 \mu\text{s}$ correspondent à l'écho de fond selon les modes LL et LT/TL. L'onde se propageant entre 20 et 35 mm, $10 \mu\text{s}$ après l'impact laser, correspond à la réflexion d'une onde de Rayleigh aux frontières de la pièce.

Ces ondes étant identifiées, le paragraphe suivant vise à caractériser le milieu issu du procédé DML.

4.2.2. Caractérisation d'un échantillon issu du procédé DML

- Diffusion

La Figure 4-2 compare l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce obtenue par un procédé de forge à l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce réalisée par le procédé de FA. Les spectres sont normalisés pour comparer plus aisément leur contenu. Nous avons cependant mesuré une

diminution d'un facteur deux de l'amplitude du spectre issue de l'acquisition sur la pièce de fabrication additive.

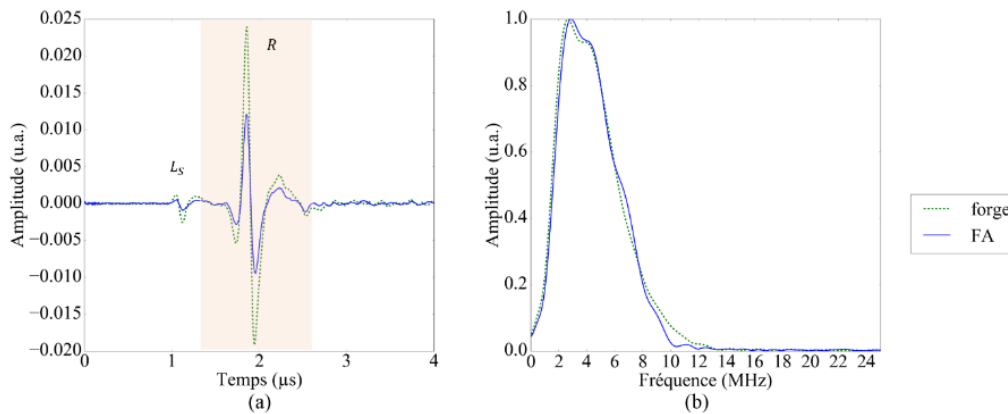


Figure 4-2 (a) Variations de l'amplitude de l'onde de Rayleigh entre une acquisition sur pièce réalisée en forge et une pièce réalisée par le procédé. (b) Spectres normalisés des ondes de Rayleigh se propageant sur une pièce réalisée en FA et sur une pièce réalisée en forge.

L'amplitude de l'onde de Rayleigh est de 0,024 mV pour la pièce de forge et de 0,014 mV pour la pièce réalisée en fabrication additive. L'écart d'atténuation entre la structure issue du procédé de forge et celle issue du procédé DML est de 2,1 dB/mm. Cette tendance est confirmée sur un jeu de six mesures sur des zones distinctes des pièces, donnant une perte d'amplitude de $1,9 \pm 0,1$ dB/mm.

Puisque la seule différence entre les deux pièces réside dans le procédé de fabrication, cette perte d'amplitude pourrait être une conséquence de la microstructure prévue en FA. En effet, la microstructure engendrée par la fabrication additive présente une structure à gros grains (cf. chapitre 1). La Figure 4-3 présente des coupes métallurgiques de la pièce testée (en acier 316L ; les paramètres de fabrication sont donnés en annexe A) et illustre les dimensions des cordons et des grains.

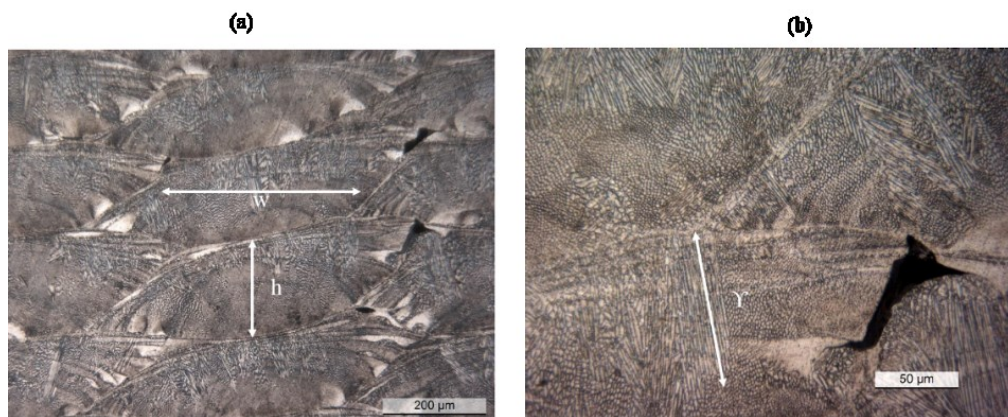


Figure 4-3 Coupes métallurgiques de la pièce issue du procédé DML en acier 316L, (a) la largeur w d'un cordon est environ égale à 350 μm et la hauteur h à 180 μm , (b) la taille d'un grain γ est égale à 100 μm .

Dans cette structure dite à gros grains, l'atténuation due à l'absorption est souvent négligée devant celle liée aux phénomènes de diffusion. Dans ce cas, le coefficient d'atténuation, α , dépend du rapport entre la longueur d'onde, λ_R et la taille des grains γ . En fonction de λ_R / γ , on distingue trois régimes d'atténuation [85] pour lesquels α s'exprime en fonction de la fréquence et de la taille des grains :

- le régime de Rayleigh où $\lambda_R / \gamma \gg 1$, $\alpha \propto \gamma^3 f^4$;

- le régime stochastique où $\lambda_R / Y \approx 1$, $\alpha \propto Yf^2$;
- le régime de diffusion $\lambda_R / Y < 1$, $\alpha \propto 1/Y$.

Pour la fréquence centrale ($f = 4$ MHz), λ_R vaut $720 \mu\text{m}$. Le rapport λ_R / Y est donc égal à 7, on se situe donc dans le régime stochastique. Pour une pièce réalisée par le procédé de forge, la taille des grains est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres [86]. C'est donc l'atténuation par absorption qui prédomine dans ce cas et α est donc proportionnelle à f^2 . Ainsi, on peut comprendre que l'atténuation de l'onde de Rayleigh sur la pièce issue du procédé DML est plus importante que celle d'une onde de Rayleigh se propageant sur les pièces issues du procédé de forge.

- Anisotropie

Intuitivement, on s'attend à ce que le caractère anisotrope soit constaté sur la face latérale des pièces où l'agencement colonnaire des grains est visible (cf. Figure 4-4). Le montage suivant est mis en œuvre pour évaluer la vitesse des ondes de Rayleigh : la génération et la détection sont écartées de 5 mm et la pièce est tournée par pas de 5 degrés comme illustré sur la Figure 4-4.

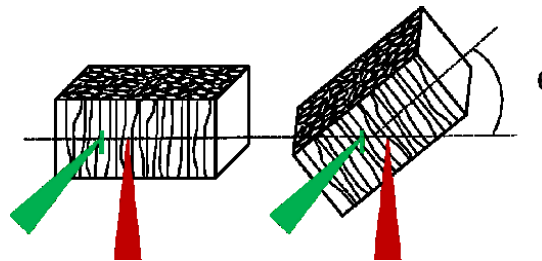


Figure 4-4 Schéma de l'agencement des grains au sein d'une pièce DML et principe de la mesure d'anisotropie sur la face latérale.

Pour chaque angle θ d'inclinaison de la pièce, on enregistre un A-scan moyenné sur 400 tirs laser. À partir de ces A-scans, la vitesse de l'onde de Rayleigh est calculée en rapportant la distance génération-détection de 5 mm à la mesure de son temps de vol à l'amplitude maximale.

La mesure est effectuée sur la face supérieure, perpendiculairement au sens de croissance des grains, puis sur la face latérale, parallèlement au sens de croissance des grains. La Figure 4-6-a présente la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction de l'orientation de la ligne source par rapport à sa position initiale. Sur la face latérale, en position initiale, c'est-à-dire à $\theta = 0^\circ$, la ligne source est parallèle aux colonnes formées par les grains (cf. Figure 4-4-a). Les Figure 4-6-a et b sont les surfaces de lenteurs respectivement associées aux mesures sur les faces supérieures et latérales. Cette représentation est couramment utilisée pour mettre en évidence le caractère anisotrope d'un milieu [47].

La vitesse de l'onde de Rayleigh se propageant sur la face supérieure (cf. Figure 4-4-a et b) est quasi constante et sa moyenne est de $V_R = 2,98 \pm 0,03 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Le matériau présente donc un caractère isotrope dans le plan perpendiculaire à la croissance des grains. En revanche, sur la face latérale, une variation cyclique entre $2,88 \text{ mm}/\mu\text{s}$ et $2,96 \text{ mm}/\mu\text{s}$ est observée : la vitesse est maximale lorsque la ligne source est perpendiculaire aux colonnes formées par les grains et minimale lorsqu'elle y est parallèle (cf. Figure 4-4-a et b). La vitesse des ondes de Rayleigh est ainsi plus élevée dans la direction qui minimise la traversée des interfaces entre grains. Cet effet, dû à la microstructure, a aussi été mis en évidence dans une forêt de tiges et dans des pièces forgées en titane TA6V par Baelde *et al.* [87]. De plus, la surface des lenteurs (cf. Figure 4-4) rend compte d'une anisotropie s'apparentant à une anisotropie de type trigonale [49].

La différence entre la vitesse maximale et la vitesse minimale des ondes de Rayleigh se propageant dans le matériau semble faible. Néanmoins, si l'on calcule l'écart de temps de vol causée par une telle variation pour un défaut se situant par exemple à 15 mm de la génération, l'écho de réflexion aura un temps de vol de $5,07 \mu\text{s}$ en considérant la vitesse minimale et de $5,20 \mu\text{s}$ pour la

vitesse maximale. Ce qui correspond à une différence de position du défaut de 0,43 mm, en prenant comme vitesse moyenne 2,92 mm / μ s. Au regard de la dimension des défauts recherchés (100 μ m), la prise en compte de l'anisotropie pour un contrôle sur une face latérale s'avère cruciale pour localiser le défaut.

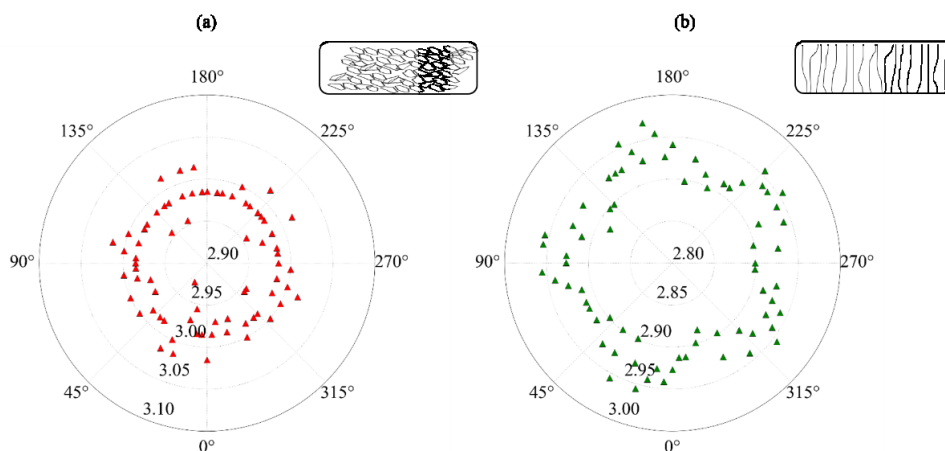


Figure 4-5 Variation de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction de l'orientation de la ligne source par rapport aux grains. (a) Caractère isotrope du matériau dans la direction perpendiculaire à la croissance des grains. (b) Caractère anisotrope du matériau dans la direction de croissance des grains.

Ainsi, on a montré le caractère anisotrope des pièces issues du procédé DML dans le plan de la croissance colonnaire des grains, à travers la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh.

Le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh ne semble pas affecté par la microstructure du procédé, et est suffisamment haute fréquence pour être compatible avec une détection de défaut de 100 μ m. La partie suivante évalue expérimentalement les performances de détection sur trous et entailles.

4.3. Détection des trous génératrice et entailles

La détection de défauts surfaciques et sub-surfaciques dans des pièces issues du procédé DML est un des objectifs de ces travaux de thèse. Le dispositif élaboré, et décrit au chapitre 3, a été conçu dans ce but ; théoriquement, nous avons montré que la gamme de fréquences générées par celui-ci devait permettre de détecter des défauts de l'ordre de 100 μ m. Les expérimentations qui suivent visent à déterminer les limites de détection du système à travers l'inspection de défauts surfaciques (entailles débouchantes) et de défauts sub-surfaciques (trous génératrice) dans des pièces réalisées en forge et en fabrication additive.

Les dimensions des défauts ont été choisies de sorte à couvrir un ensemble de cas possibles relativement large. Ceux-ci sont usinés par électroérosion, dans des pièces de forge et de fabrication additive dont les surfaces ont été polies. Les dimensions sont rappelées dans les Tableau 4-1 a et b.

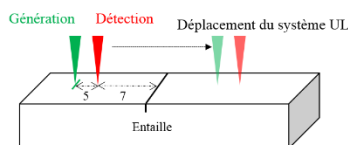


Figure 4-6 Configuration de contrôle des défauts usinés.

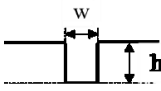
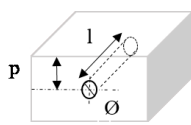
a) Entailles			b) Trous génératrice			
(en μm)	Hauteur (h)	Ouverture (w)	(en μm)	Diamètre ($\varnothing$)	Profondeur (p)	Longueur (l)
	500	300		500	800	$10 \cdot 10^3$
	500	100		300	300	$9 \cdot 10^3$
	100	100		100	300	$3 \cdot 10^3$
	100	5		100	100	$3 \cdot 10^3$

Tableau 4-1 (a) Dimensions des entailles. (b) Dimensions des trous génératrice usinés dans des pièces issues du procédé DML sur surface polie.

Pour chaque défaut, l'acquisition d'un B-scan est faite selon la configuration suivante : la distance L est fixée à 5 mm et la détection est initialement positionnée à 7 mm du défaut (cf. Figure 4-6). En chaque position, 400 A-scans sont enregistrés puis moyennés afin d'améliorer le rapport signal sur bruit.

Le paragraphe suivant présente les acquisitions et donne les limites de détection sur les pièces fabriquées par le procédé de forge et par le procédé DML.

4.3.1. Sur surface polie

• Entailles

La Figure 4-9 présente les B-scans des entailles usinées dans la forge (a-d) et, les B scans des entailles usinées dans les pièces issues du procédé DML(e-h).

Contrairement au B-scan de la Figure 4-1, acquis sur une pièce sans défaut, on constate ici la présence de quatre ondes annotées en orange sur la Figure 4-9-a. Ces ondes correspondent à l'onde de Rayleigh et l'onde longitudinale de surface réfléchies par le défaut. Pour mieux comprendre l'origine de ces ondes réfléchies, le déplacement a été modélisé sous SimSonic pour une entaille d'ouverture 0,05 mm et de hauteur 0,1 mm correspondant au B-scan de la Figure 4-9-d. On impose un pas de 0,04 mm, $\Delta t = 0,01 \mu\text{s}$ et des couches absorbantes pour s'affranchir des réflexions des ondes sur les côtés de la pièce. Les Figure 4-7-a,b et c présentent les déplacements jusqu'à 6 μs après l'excitation. La Figure 4-7-d est un B-scan modélisé sous SimSonic : le défaut se situe à 7 mm de la détection en position initiale et la distance, L , génération/détection vaut 5 mm.

Sur la Figure 4-7-a, l'onde longitudinale de surface interagit avec le défaut et est en partie réfléchiée en une onde notée L_r . Sur la Figure 4-7-b, l'onde de Rayleigh qui est réfléchiée par l'entaille, et est notée R_r . Quelques microsecondes après l'excitation (cf. Figure 4-7-c), l'onde de Rayleigh est diffractée par le fond de l'entaille et on observe la propagation d'une onde transversale, notée S_r , issue d'une conversion sur le fond de l'entaille.

L'évaluation des vitesses des ondes, par une régression linéaire des temps de vol en fonction de la position des lasers, confirme les observations des modélisations et montre que le premier front d'onde réfléchi correspond à L_{sr} sur la Figure 4-7-a et le second à R_r . En fait, d'après la simulation de la Figure 4-7-c, le second front d'onde réfléchi est composé d'une interaction entre le front d'onde R_r et S_r . Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe sur la caractérisation des entailles.

Les entailles sont détectées sur l'ensemble des B-scans (cf. Figure 4-9). Ainsi, les limites de détection de notre système ne sont pas atteintes à travers la gamme de dimensions de défauts choisie et sont identiques pour la forge et la fabrication additive. Les entailles sont détectées, par notre dispositif, jusqu'à des hauteurs h telles qu'égalées à $h/\lambda_R = 0,14$ et des ouvertures w telles que $w/\lambda_R = 0,07$. Ces limites sont établies pour $\lambda_R = 0,7$ mm, c'est-à-dire à la fréquence centrale de l'onde de Rayleigh, $f = 4$ MHz (cf. Figure 3-23).

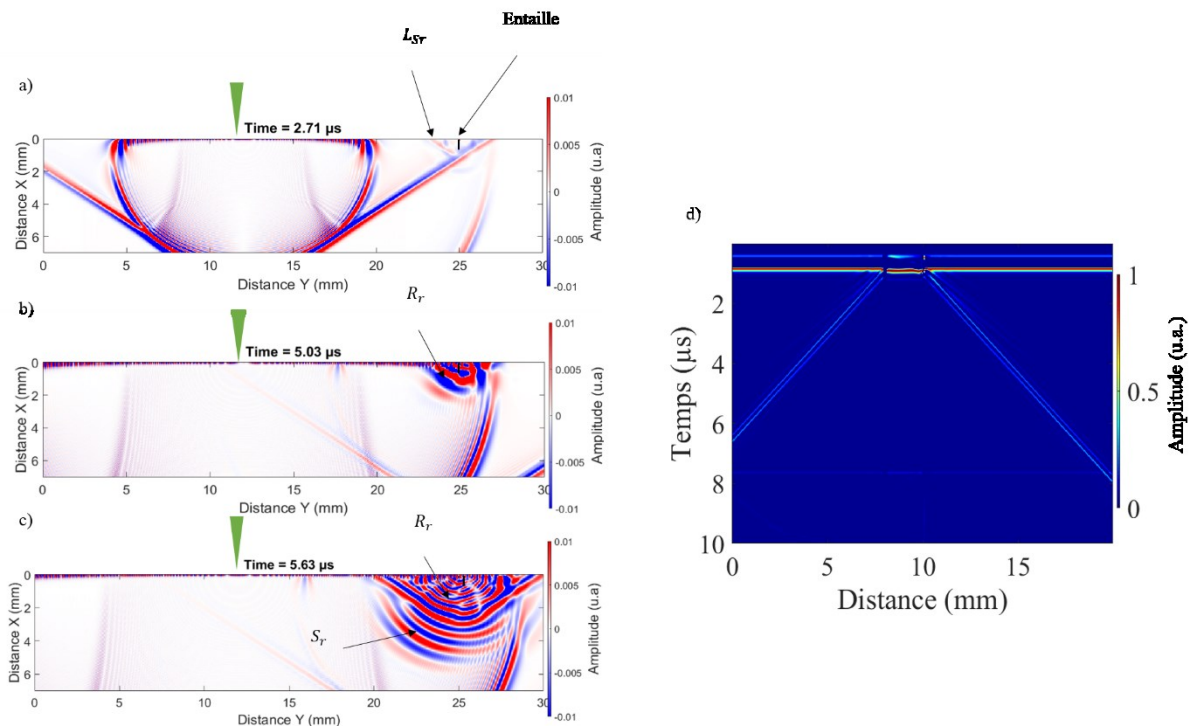


Figure 4-7 Simulations des déplacements dans une pièce comportant une entaille de 0,1 mm de hauteur et 0,05 mm d'ouverture. (a) L'onde longitudinale est diffractée par l'entaille. (b) L'onde de Rayleigh est diffractée par l'entaille. (c) L'onde de Rayleigh est convertie en onde transversale sur le fond de l'entaille. (d) B-scan simulé pour $L = 5$ mm.

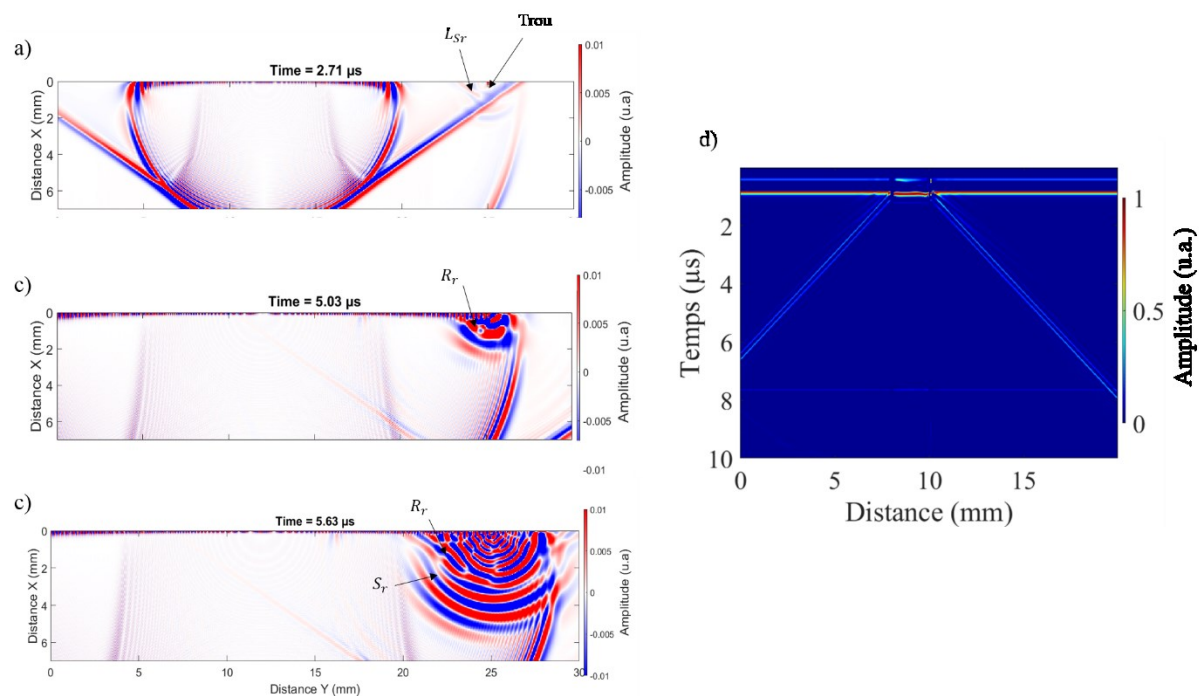


Figure 4-8 Modélisation des déplacements et B-scan dans une pièce comportant un trou génératrice de 0,1 mm de diamètre et à une profondeur de 0,05 mm d'ouverture. (a) L'onde longitudinale est diffractée par le trou. (b) L'onde de Rayleigh est diffractée par le trou. (c) L'onde de Rayleigh est convertie en onde transversale sur le fond du trou. (d) B-scan modélisé pour une distance $L = 5$ mm, dans une pièce en acier 316L comportant un trou génératrice.

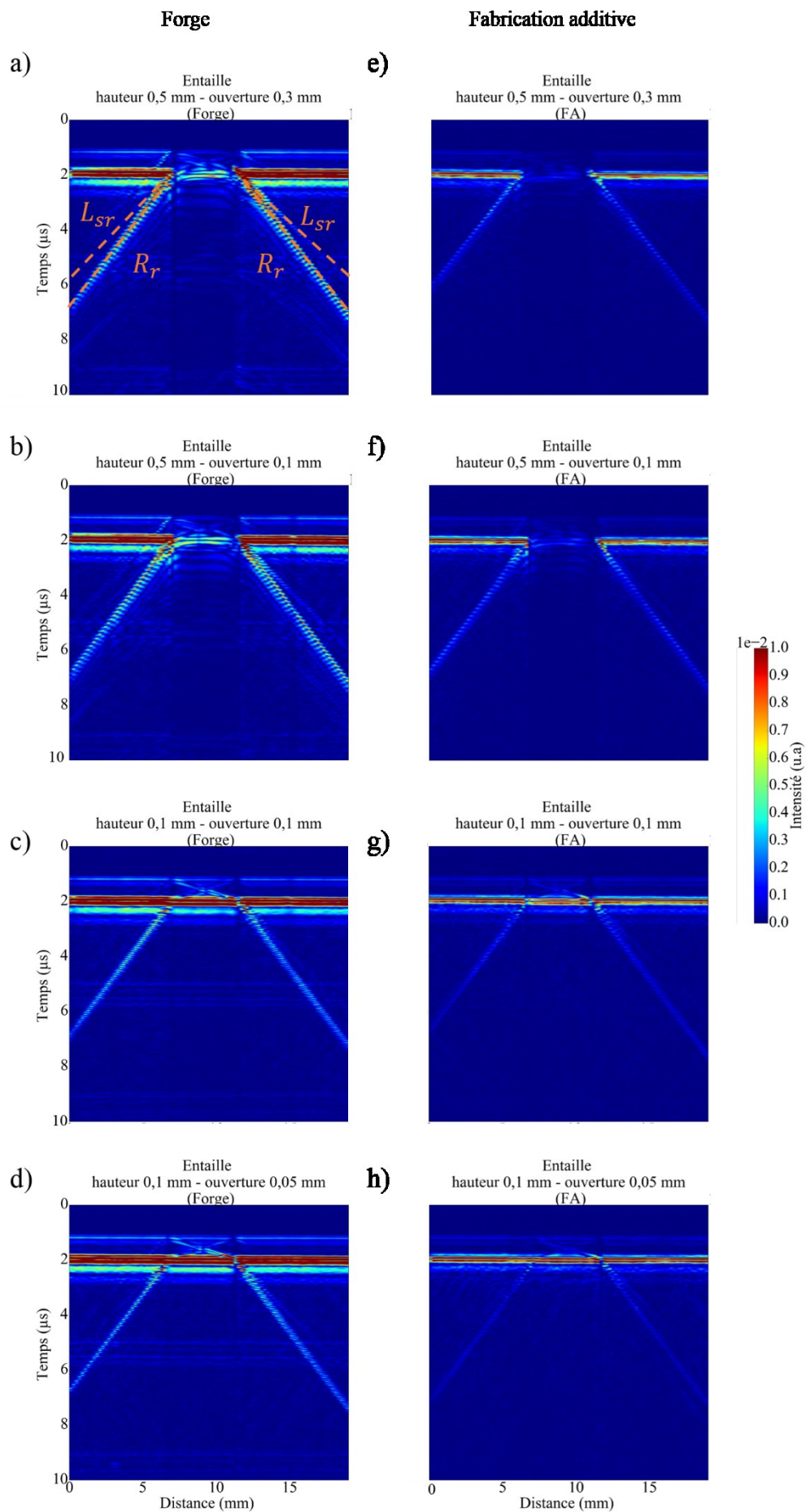


Figure 4-9 (a-d) B-scans des entailles usinées dans des pièces réalisées par le procédé de forge. (e-h) B-scans des entailles usinées dans des pièces réalisées par le procédé DML.

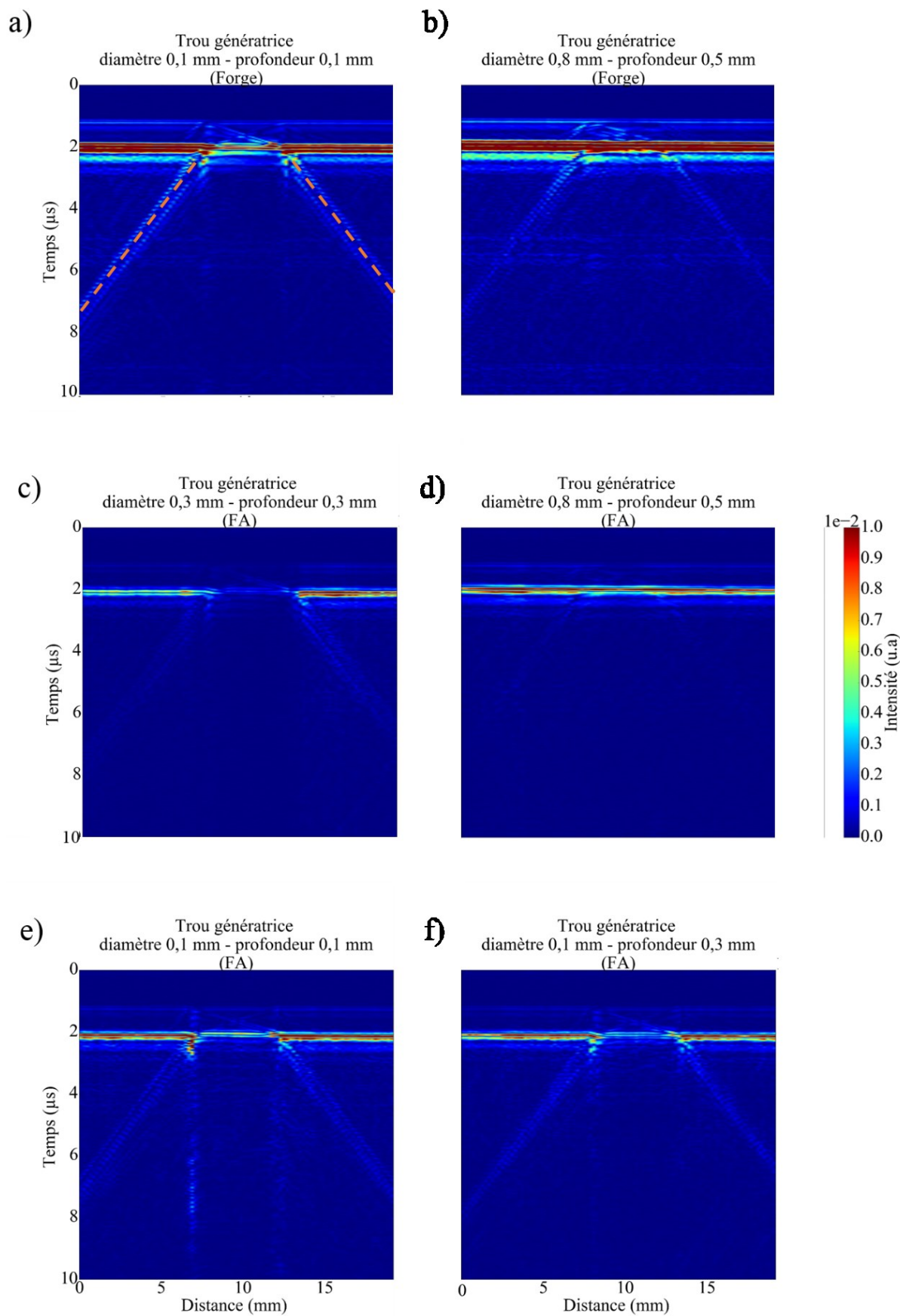


Figure 4-10 B scans des trous génératrice implantés a-b) en forge et c-f) FA.

• Trous génératrice

L'usinage des trous génératrice de diamètre 0,1 mm et 0,3 mm est imparfait et les trous sont débouchants, les rendant inexploitable dans le cadre de nos essais. Par conséquent, seuls les cas extrêmes (0,05 mm et 0,5 mm) ont pu être traités en forge. La Figure 4-16 présente les B-scans acquis pour les trous génératrice usinés par électro érosion, sur des pièces issues du procédé de forge et de DML.

Comme pour les entailles, les B-scans mettent en évidence la présence de l'onde de Rayleigh réfléchi. La modélisation du déplacement, réalisée dans une pièce comportant un trou génératrice de 0,1 mm de diamètre et de 0,1 mm de profondeur, est présentée sur les Figure 4-8-a à c. Elle met en évidence un comportement similaire au cas d'un défaut de type entaille. La Figure 4-8-d présente un B-scan modélisé pour ce trou génératrice pour une distance $L=5$ mm.

Sur la Figure 4-8-a, l'onde longitudinale de surface est réfléchi par le défaut, notée L_r . Sur la Figure 4-8-b, c'est l'onde de Rayleigh qui est réfléchi par le trou, notée R_r . Quelques microsecondes après l'excitation (cf. Figure 4-7-c), l'onde de Rayleigh est diffractée par le trou et on observe la propagation d'une onde transversale, notée S_r , issue d'une conversion par le défaut.

Revenons à la quantification des limites de détection pour les trous génératrice. L'ensemble des trous sont détectés sur les pièces de forge. Sur les pièces de fabrication additive, tous les défauts sont détectés excepté le trou de diamètre 0,5 mm et de profondeur 0,8 mm. Ce défaut se situe à une profondeur environ égale à λ_R . Il est donc à la limite de détection de l'onde de Rayleigh puisque l'énergie de l'onde est confinée sur, environ une longueur d'onde, comme l'illustre la Figure 4-11. De plus, nous avons vu au paragraphe 4.2 que l'atténuation des ondes de Rayleigh était plus importante en fabrication additive du fait de la microstructure à gros grains. Aussi, la limite de détection est atteinte pour ce défaut usiné dans une pièce issue du procédé DML.

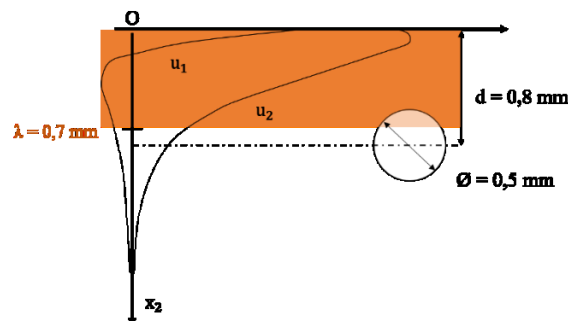


Figure 4-11 Épaisseur dans laquelle la majorité de l'énergie de l'onde est confinée et trou génératrice

Les limites de détection des plus petits défauts sub-surfaciques ne sont pas atteintes sur la gamme de dimensions de défauts choisie excepté pour le trou le plus profond ($d = 0,8$ mm) sur la pièce fabriquée par le procédé DML. Pour les autres défauts, elles sont identiques pour la forge et la fabrication additive : les trous sont détectés jusqu'à une profondeur et un diamètre de 0,1 mm correspondant à $\phi/\lambda_R \sim p/\lambda_R \sim 0,14$.

4.3.2. Sur surface rugueuse

Le chapitre 1 abordait les aspects de rugosité liés à l'état de surface des pièces réalisées par fabrication additive. Au regard d'un contrôle *in situ*, les pièces auront un état de surface brute. En conséquence, il convient d'aborder dans ce chapitre la détection de défauts usinés sur des surfaces dégradées. Dans ces travaux, nous considérerons donc un état de surface relatif aux échantillons issus du procédé DML. Le diamètre du faisceau laser de fabrication, de 0,75 mm de diamètre, engendre la

formation de cordons d'environ 0,8 mm de largeur. La hauteur d'un cordon, h , est approximativement celle de l'incrément en z c'est-à-dire 0,3 mm. Enfin, le paramètre « hatch » pour une pièce saine est d'environ 0,4 mm et la distance, a , entre deux cordons est estimée environ égale à cette valeur. L'ensemble de ces grandeurs sont illustrées sur la Figure 4-12.

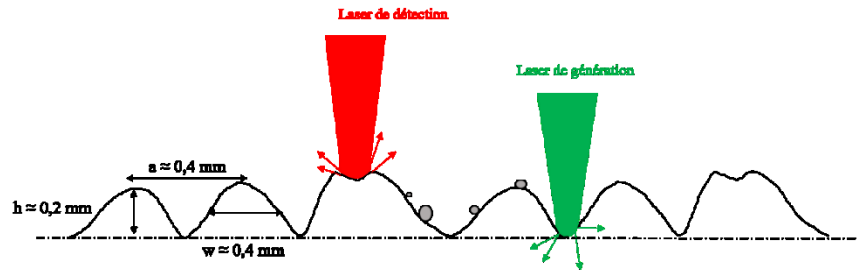


Figure 4-12 Profil de surface et diffusions des faisceaux laser dues aux rugosités.

De plus, comme nous l'avons vu au chapitre 1, des particules de poudre infondues de quelques dizaines de micromètres viennent participer à la rugosité décrite ci-dessus.

La Figure 4-13 présente l'onde de Rayleigh et son spectre associé acquise sur une pièce de fabrication additive, sur une surface polie et sur une surface rugueuse.

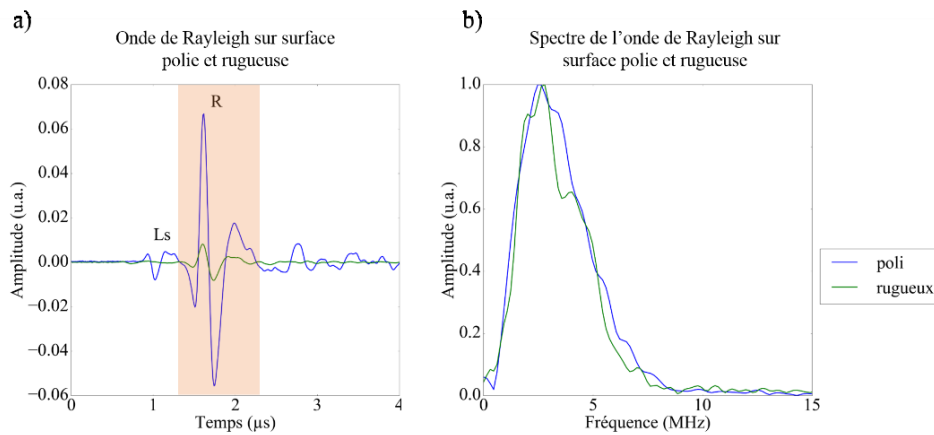


Figure 4-13 (a) Diminution de l'amplitude du déplacement engendrée par l'onde de Rayleigh sur surface rugueuse. (b) Spectres de l'onde de Rayleigh sur une surface polie (bleue) et sur une surface rugueuse (vert).

L'amplitude de l'onde de Rayleigh est fortement atténuée par la présence de la rugosité de surface. Sur une surface polie, elle est de $6,7 \cdot 10^{-2}$ mV et sur une surface rugueuse de $8 \cdot 10^{-3}$ mV. Le spectre associé à l'onde de Rayleigh n'est pas modifié en termes de fréquence centrale et de bande passante. La rugosité induit une atténuation de - 8,5 dB / mm pour cette acquisition. Afin d'estimer plus précisément l'atténuation engendrée par la rugosité, le même raisonnement est fait pour six acquisitions. L'atténuation moyenne est égale à $11,9 \pm 1,9$ dB / mm. Cette atténuation peut être associée à plusieurs phénomènes de diffusions relatifs à la fois aux faisceaux lasers et à la propagation de l'onde elle-même.

Le **faisceau laser de détection** étant diffusé par les aspérités de la surface, la quantité de photons perçue par la fibre de collection est donc moindre, l'étendue de l'interféromètre est diminuée par les diffusions et l'intensité du signal sera moindre.

De plus, la répartition de l'énergie absorbée lors de l'impact du faisceau **laser de génération** va également être modifiée. On suppose que la directivité des ondes sera impactée par la diffusion. En effet, les travaux de Raetz *et al.* [88] montrent que l'angle d'incidence du laser a un effet sur la directivité des ondes. La surface rugueuse peut localement modifier l'angle d'incidence du laser et le diagramme de directivité de la ligne source.

Enfin, la Figure 4-14 illustre la diffraction multiple de **l'onde de Rayleigh** en présence de rugosité à partir de l'abscisse 80 mm. Ces simulations ont été réalisées via SimSonic en introduisant une rugosité aléatoire.

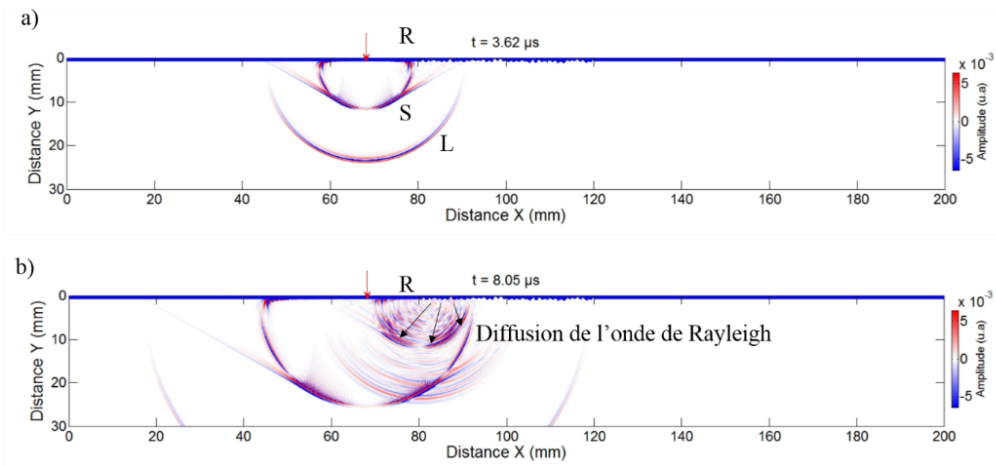


Figure 4-14 (a) Propagation de l'onde de Rayleigh avant d'atteindre les rugosités. (b) Diffraction de l'onde de Rayleigh après s'être propagée sur les premières rugosités.

On comprend donc que l'introduction d'un défaut dans ce problème de diffusion multiple rend sa détection et sa caractérisation délicates. Les défauts usinés sur surface rugueuse sont donnés dans le Tableau 4-2 ci-dessous :

a) Entailles		b) Trous génératrice	
Hauteur (h)	Ouverture (w)	Diamètre(Ø)	Profondeur (p)
μm	μm	μm	μm
500	300	500	800
500	100	300	300
		300	100
		100	300

Tableau 4-2 (a) Dimensions des entailles usinées. (b) Dimensions des trous génératrice usinés dans des pièces issues du procédé DML sur surface rugueuse.

Les Figure 4-15 a et b comparent les B-scans des entailles dont la hauteur est de 0,5 mm et l'ouverture de 0,1 mm et 0,3 mm, respectivement.

La Figure 4-16 présente les B-scans pour les trous génératrice usinés sous la surface brute après fabrication. Les ondes diffusées par les rugosités interfèrent entre elles (cf. Figure 4-14) et de fait, participent au signal incohérent observés sur les B-scans (cf. Figure 4-15). Sur ces derniers, les ondes réfléchies par les entailles sont visibles. Ainsi, l'onde de Rayleigh se propageant sur un état de surface tel que décrit plus haut, est sensible *a minima*, aux entailles dont la hauteur est telle que $h/\lambda_{US} \sim 0,7$ et dont l'ouverture est telle que $w/\lambda_R \sim 0,14$. Seul le trou génératrice de 0,3 mm de diamètre et de profondeur 0,3 mm est visible de par la présence des ondes réfléchies. Pour les trous dont le diamètre est de 0,1 mm, les ondes réfléchies ne sont pas détectées. Ainsi, les ondes diffractées par le trou interfèrent avec celle engendrée par les rugosités.

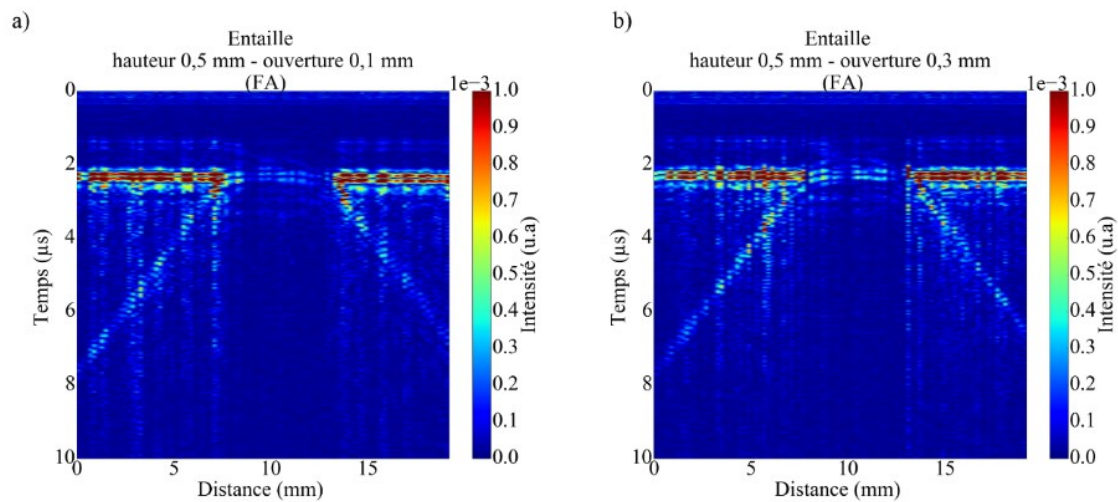


Figure 4-15 B-scans acquis sur une pièce en acier 316L issue du procédé DML présentant des rugosités de surface.
 (a) Ondes réfléchies par une entaille de hauteur 0,5 mm et d'ouverture 0,1 mm. (b) Ondes réfléchies par une entaille de 0,5 mm de hauteur et 0,3 mm d'ouverture.

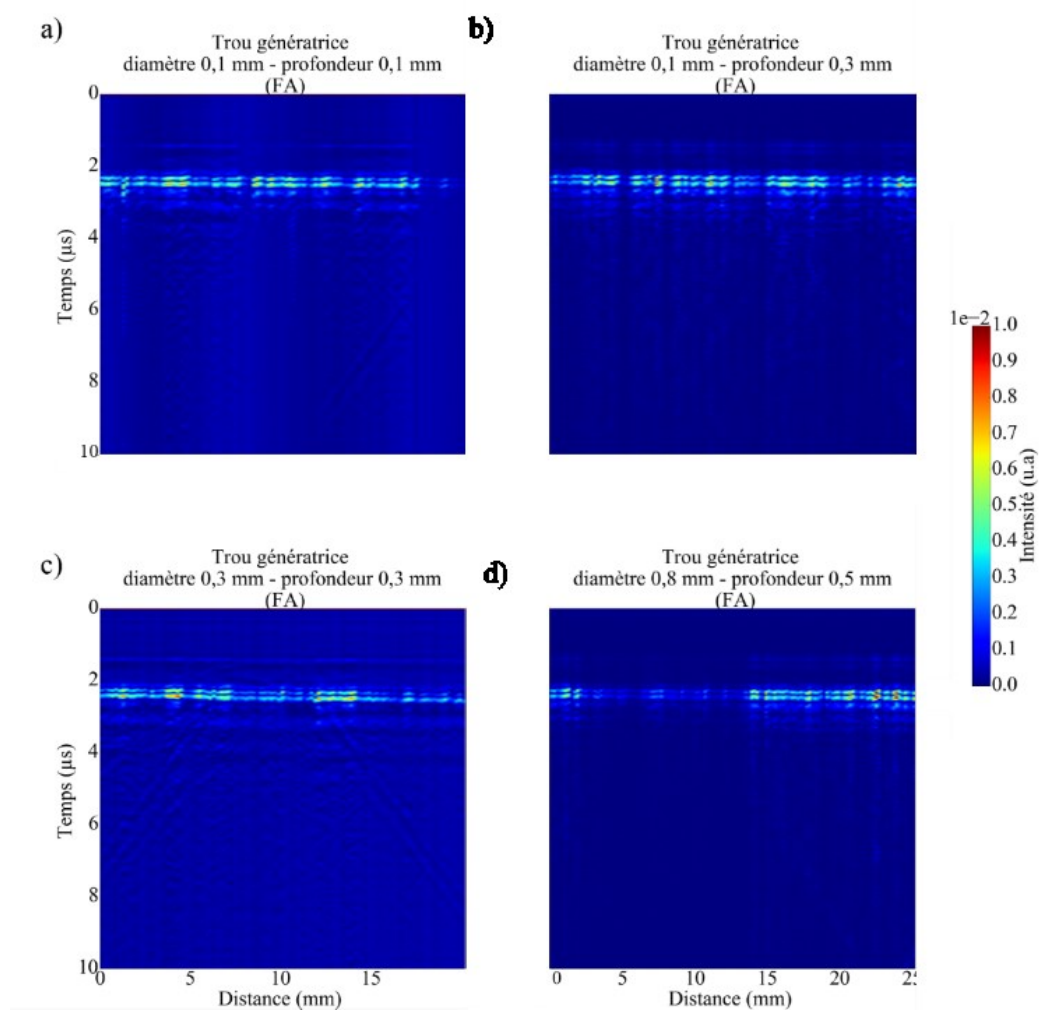


Figure 4-16 B-scans des trous génératrice usinés dans des pièces issues du procédé DML présentant un état de surface brut.

Entailles

La limite de détection des défauts débouchants sur les surfaces polies et rugueuses n'est pas atteinte au regard des entailles usinés dans les pièces issues du procédé DML. Plus précisément, l'onde de Rayleigh se propageant sur un état de surface rugueux, caractéristique d'un procédé DML, est sensible *a minima*, aux entailles dont la hauteur est telle que $h/\lambda_R \sim 0,7$ et dont l'ouverture est, telle que $w/\lambda_R \sim 0,14$. Sous surface polie, elles sont détectées, pour notre dispositif, jusqu'à des hauteurs h telles qu'elle égale $h/\lambda_R \sim 0,14$ et des ouvertures w telles que $w/\lambda_R \sim 0,07$. Ces limites sont établies pour $\lambda_R = 0,7$ mm c'est-à-dire à la fréquence centrale de l'onde de Rayleigh, $f = 4$ MHz (cf. Figure 3-23).

Trous génératrice

Les limites de détection ne sont pas identiques pour la forge et la fabrication additive. Les trous sont détectés jusqu'à une profondeur et un diamètre de 0,1 mm correspondant à $\phi/\lambda_R \sim p/\lambda_R \sim 0,14$. Pour le trou usiné à 0,8 mm de la surface, il est détecté dans la pièce issue du procédé de forge mais pas dans celle fabriquée par le procédé DML. A cette profondeur $p \sim \lambda_R$, le trou se situe aux limites théoriques de la zone d'inspection. La diffusion de l'onde engendrée par la microstructure induite par le procédé DML rend la détection impossible dans cette zone limite. Concernant les surfaces rugueuses, seul le trou de diamètre et profondeur de 0,3 mm est détecté. Les trous de diamètre 0,1 mm ne sont pas détectés

Remarques sur la détection sur surface rugueuse

Les conclusions sur les limites de détection de défauts se confinent à l'étude d'un seul et unique profil de rugosité où $a \sim 0,4$ mm et $h \sim 0,1$ mm.

4.4. Caractérisation des défauts

L'objectif à terme d'un contrôle *in situ* du procédé DML est de pouvoir arrêter ou corriger le procédé lorsqu'un défaut critique est détecté. Un défaut est considéré comme critique si son implantation et ses dimensions sont susceptibles d'altérer les propriétés mécaniques de la pièce. Pour évaluer cette criticité, il est donc nécessaire de pouvoir caractériser les défauts en présence. En effet, une entaille de plusieurs millimètres de hauteur n'aura pas le même effet sur la tenue en fatigue, qu'une porosité dont le diamètre est de quelques dizaines de micromètres. Cette partie a pour objectif d'évaluer les performances de méthodes de caractérisation des défauts surfaciques et sub-surfaciques. Les essais sont menés sur les défauts étudiés au paragraphe 4.3.

Comme abordé au chapitre 2, il existe plusieurs approches pour caractériser les défauts. Les approches suivantes avaient été identifiées :

- Caractérisation dans le domaine temporel par l'évaluation des temps de vol ;
- Caractérisation dans le domaine spectral par les ondes réfléchies et calcul des coefficients de transmission et réflexion.

Dans cette partie, ces différentes approches sont testées afin de déterminer lesquelles s'avèrent les plus pertinentes pour nos applications.

4.4.1. Domaine temporel

Une première méthode pour caractériser les dimensions des défauts, introduite par les travaux de Jian *et al.* [64] (cf. chapitre 2), repose sur l'exploitation de l'image B-scan et l'étude des temps de vol des ondes réfléchies et converties.

Rappelons tout d'abord les phénomènes de réflexions et conversions des ondes de surface relatifs à une entaille. La Figure 4-15 illustre les déplacements induits et leurs perturbations par une entaille d'ouverture 1 mm et de hauteur 5 mm. On choisit volontairement des dimensions plus élevées que celles observées dans les échantillons réels pour mieux visualiser la propagation des ondes. Le maillage spatial utilisé est tel que $\Delta x = 0,04$ mm et des couches absorbantes sont introduites aux frontières de la pièce pour s'affranchir des réflexions.

Le temps de vol de l'onde de Rayleigh se propageant le long de l'entaille (cf. Figure 4-17-d) pourrait permettre de quantifier la hauteur, h , du défaut (cf. Figure 4-17-d), comme l'avaient montré Jian *et al.* [64] pour des entailles dont la hauteur égale à 1,5 mm est supérieure à la longueur d'onde de Rayleigh. *A contrario*, dans nos applications la hauteur des entailles est inférieure à λ_R . Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que la propagation de l'onde est identique au cas où $\lambda_R > h$ et on se propose de calculer le temps de vol correspondant au chemin de l'onde illustré sur la Figure 4-18.

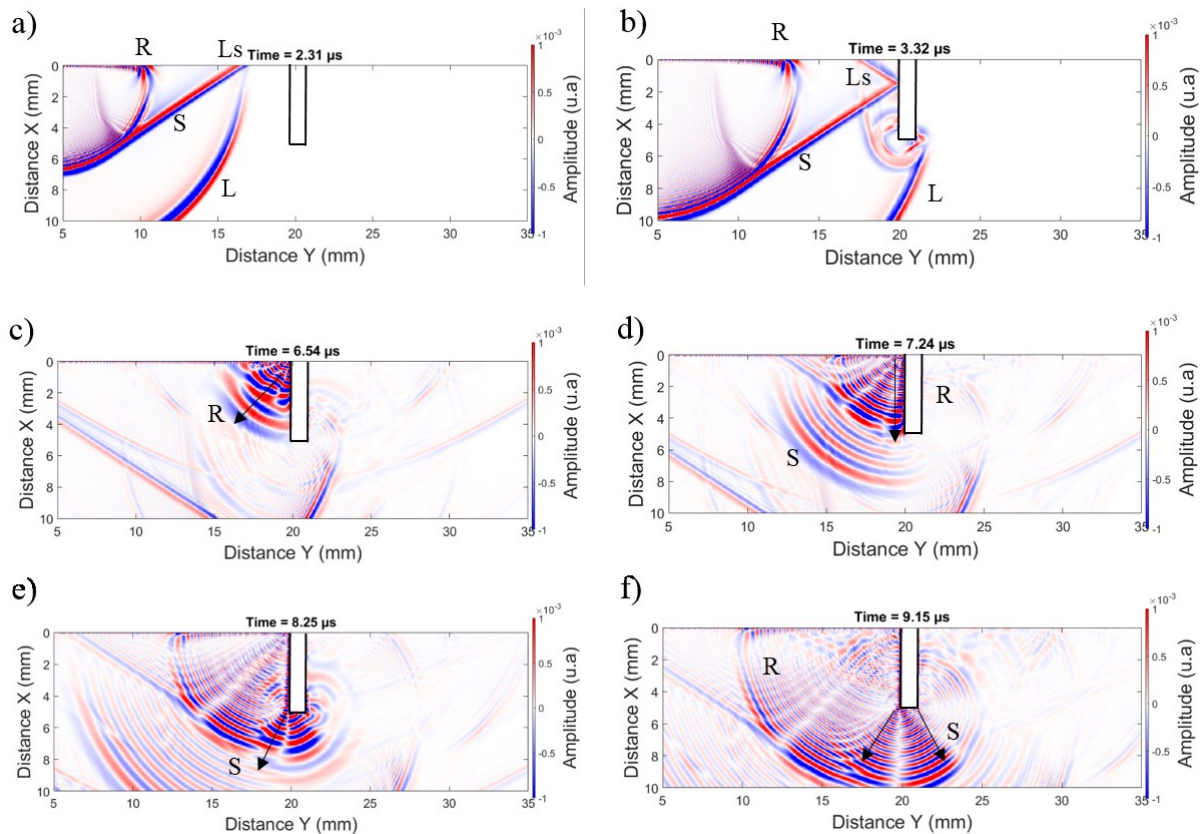


Figure 4-17 Déplacement en présence d'une entaille d'ouverture 1 mm et de hauteur 5 mm dans l'acier 316L. (a) L'onde de Rayleigh R, longitudinale, L et transversale, S, se propagent. (b) L'onde L_s interagit avec le défaut et l'onde L est diffractée par le fond de l'entaille. (c) L'onde R est diffractée une première fois sur le haut de l'entaille. (d) L'onde R se propage le long de l'entaille et l'onde S est diffractée par le fond de l'entaille. (e) l'onde de R est diffractée par le fond de l'entaille.

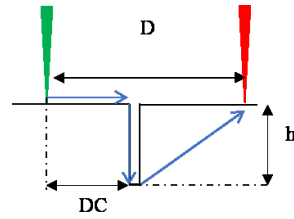


Figure 4-18 Propagation de l'onde de Rayleigh diffractée par le fond de l'entaille.

L'équation du temps de vol, t_{th} , relative à la propagation des ondes de Rayleigh diffractée par l'entaille est la suivante [61] :

$$t_{th} = \frac{L + h + \sqrt{h^2 + (DC - x)^2}}{V_R} \quad (4.32)$$

Avec L la distance génération-détection, h la hauteur de l'entaille, DC la distance génération défaut, x la position de la détection par rapport à la génération, V_R la vitesse de l'onde de Rayleigh

La Figure 4-19-a est un B-scan expérimental d'entaille usinée de 0,1 mm de hauteur et de 0,1 mm d'ouverture. Sur celui-ci, Figure 4-19-b, sont tracés les théoriques calculées à partir de l'équation 4.32 pour une hauteur de 0,1 mm (en noir), de 0,5 mm (en orange) et de 1 mm (en blanc).

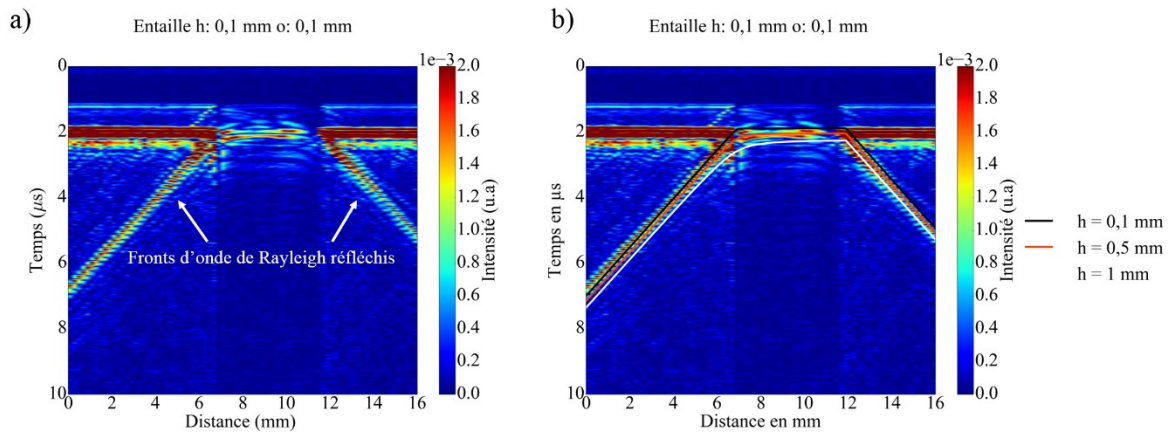


Figure 4-19 a) B scan expérimental d'une entaille de hauteur 0,1 et d'ouverture 0,1 mm et b) Temps de vols théoriques correspondant à la réflexion de l'onde de Rayleigh pour une entaille de hauteur 0,1 mm (noir), 0,5 mm (orange) et 1 mm (blanc).

Les trois fronts d'onde correspondant aux trois hauteurs d'entailles : 0,1 mm, 0,5 mm et 1 mm ont une différence de temps de vol d'environ 0,2 μs . Du fait de la durée du front d'onde réfléchi par l'entaille, les trois temps de vol calculés théoriquement se superposent à l'onde réfléchie expérimentale. Pour une variation de 0,1 mm de la hauteur de l'entaille, le temps de vol théorique varie de 0,04 μs et est très inférieur à la durée, t , de l'onde réfléchie expérimentalement ($t = 0,8 \mu s > t_{th}$). Ainsi, pour distinguer aisément deux ondes, il faut un écart de 0,8 μs en termes de temps de vol, ce qui correspond à une différence de hauteur, h , de 2 mm. De fait, cette méthode d'évaluation de la hauteur de l'entaille par le temps de vol des ondes réfléchies a une résolution de plusieurs millimètres ce qui est trop important au regard des hauteurs des entailles inspectées de l'ordre de 0,1 mm.

On se propose donc d'évaluer la hauteur de l'entaille dans le domaine fréquentiel.

4.4.2. Domaine spectral

- **Caractérisation des entailles**

Kromine [63] avait mis en évidence un décalage fréquentiel entre l'onde incidente et réfléchi, pouvant renseigner sur les dimensions des défauts. On se propose, dans un premier temps, de tracer les spectres des ondes réfléchies et transmises par les différents défauts. Pour prendre en compte les incertitudes de mesures, les ondes de Rayleigh sont extraites du B-scan pour différentes fenêtres spatiales. Les points verts délimitent la fenêtre temporelle considérée.

Le spectre de l'onde réfléchi ou transmise est évalué pour la somme des fronts en chaque position de la fenêtre temporelle matérialisée sur la Figure 4-20. Pour faire cette somme, les signaux extraits en chaque position sont recalés en temps puis sommés, afin de ne pas introduire un déphasage lors de la somme. Puis, une transformée de Fourier est effectuée sur ce signal somme. La Figure 4-21 présente les spectres des ondes incidentes et transmises pour les quatre entailles usinées dans une pièce en acier 316L issue du procédé de forge, du procédé DML sur surface polie et du procédé DML sur surface rugueuse. La nomenclature des défauts est donnée dans le Tableau 4-3.

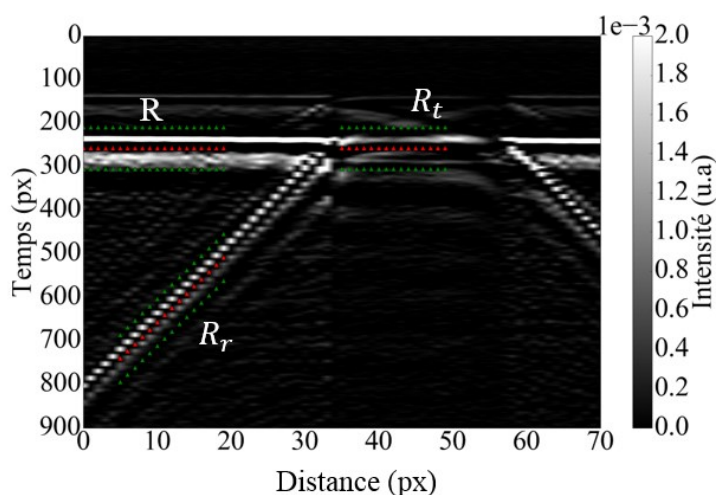


Figure 4-20 Sur le B-scan les temps de vol théoriques de l'onde incidente (R), transmise (R_t), réfléchi (R_r) sont mis en évidence par les triangles rouges. Une fenêtre temporelle (triangles verts) est imposée pour extraire les différentes ondes sur des fenêtres spatiales.

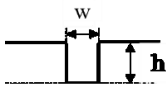
(Dimension en μm)	Nomenclature	Hauteur (h)	Ouverture (w)
	h05-o03	500	300
	h05-o01	500	100
	h01-o10	100	100
	h01-o005	100	50

Tableau 4-3 Nomenclature des entailles.

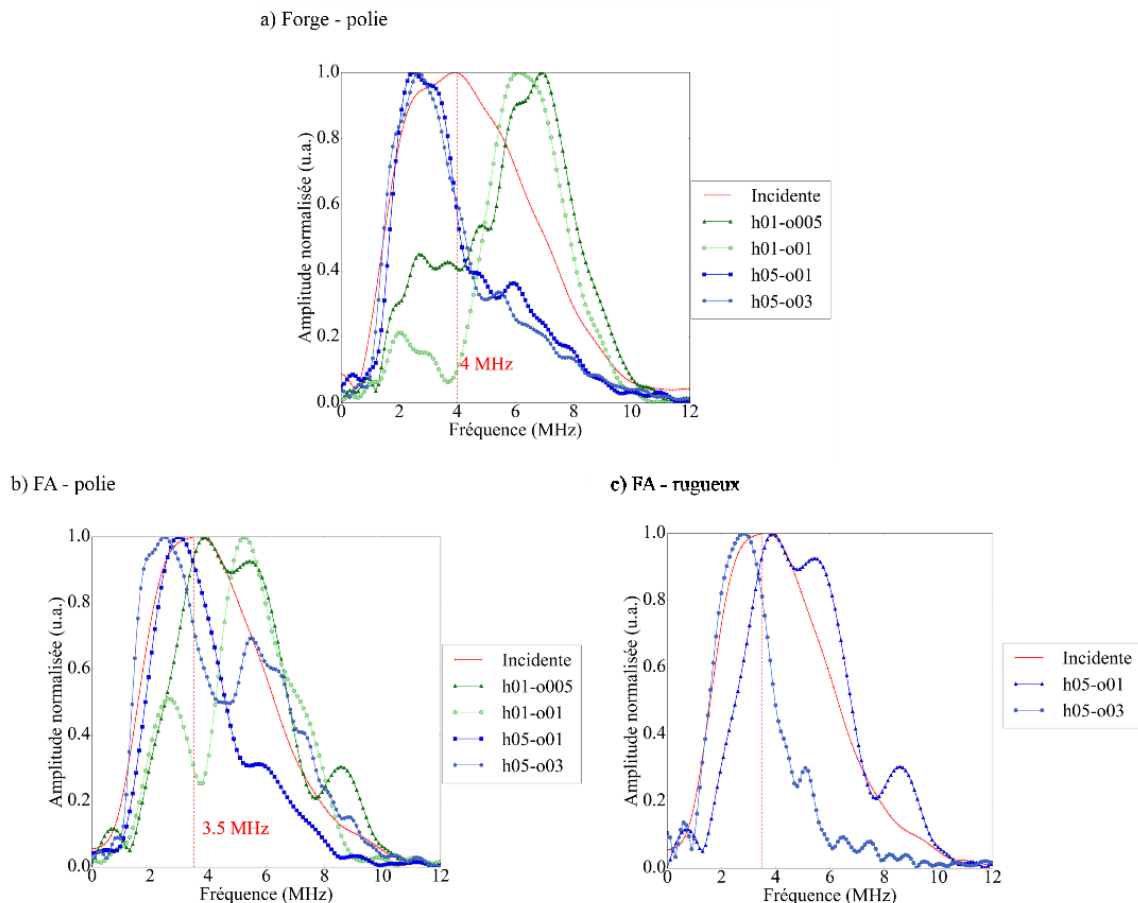


Figure 4-21 Spectre normalisé de l'onde de Rayleigh incidente, réfléchi pour les entailles a) sur des pièces réalisées en forge sur surface polie b) sur des pièces réalisées en FA sur surface polie et c) sur des pièces réalisées en FA sur surface rugueuse.

Sur la Figure 4-21-a présentant les spectres des ondes réfléchies par les différentes entailles usinées dans la forge, on constate que les spectres des ondes réfléchies se répartissent de part et d'autre de la fréquence centrale de l'onde incidente à 4 MHz. Les spectres relatifs aux entailles de 0,5 mm de hauteur ont une fréquence centrale proche de 2 MHz, tandis que les spectres relatifs aux entailles de 0,1 mm ont une fréquence centrale aux alentours de 7 MHz. Ces observations sont confirmées par les expérimentations sur les pièces issues du procédé DML dont la surface est polie ou rugueuse. Le spectre des ondes réfléchies par les hauteurs de 0,5 mm se centrent autour de 2 MHz et celui des hauteurs de 0,1 mm autour de 7 MHz.

Les basses fréquences ($f < 4$ MHz) de l'onde incidente sont donc réfléchies par les entailles de hauteur 0,5 mm et les hautes fréquences ($f > 4$ MHz) sont réfléchies par les entailles de hauteur 0,1 mm. En terme de longueur d'onde de Rayleigh, les fréquences de 2 MHz, 4 MHz et 7 MHz correspondent respectivement à 1,45 mm, 0,7 mm, et 0,4 mm. Ainsi, pour une entaille de 0,5 mm, ce sont les longueurs d'onde inférieures à λ_R qui sont réfléchies. Pour les entailles de hauteur 0,1 mm, ce sont les longueurs d'onde supérieures à λ_R .

On peut également s'intéresser à l'amplitude des ondes réfléchies, A_R , et transmises A_T , par le défaut à la fréquence centrale, f , où l'énergie est maximale. Pour cela, les spectres sont normalisés par rapport à l'onde incidente et les coefficients de transmission et de réflexion sont calculés comme suit :

$$R = \frac{A_R(f)}{A_I(f)} \text{ et } T = \frac{A_T(f)}{A_I(f)} \quad (4.33)$$

Puisque ces coefficients sont calculés à partir d'une fenêtre temporelle et seulement sur quelques positions du B-scan (cf. Figure 4-20), la conservation d'énergie n'est pas respectée et l'addition des valeurs de T et R n'est pas égale à l'unité. La Figure 4-22 présente les coefficients de transmission et de réflexion pour l'ensemble des entailles. Les barres d'erreur sont obtenues à partir des mesures effectuées sur les pièces de forge et sur les pièces de fabrication additive (polie).

Le coefficient de transmission est compris entre 0,68 et 0,85 pour les entailles dont la hauteur est égale à 100 μm puis chute autour de 0,15 pour les entailles dont la hauteur est de 500 μm . Le coefficient de réflexion, augmente avec la hauteur de l'entaille mais de façon moins significative que le coefficient de transmission. Il est proche de 0,1 pour les hauteurs de 100 μm et atteint 0,15 pour les hauteurs de 500 μm . Le coefficient de réflexion tend à augmenter lorsque l'ouverture de l'entaille augmente, mais au regard des barres d'erreurs, seule une tendance est mise en évidence qu'il faudrait confirmer en incluant plus de défauts d'ouverture et de hauteurs différentes.

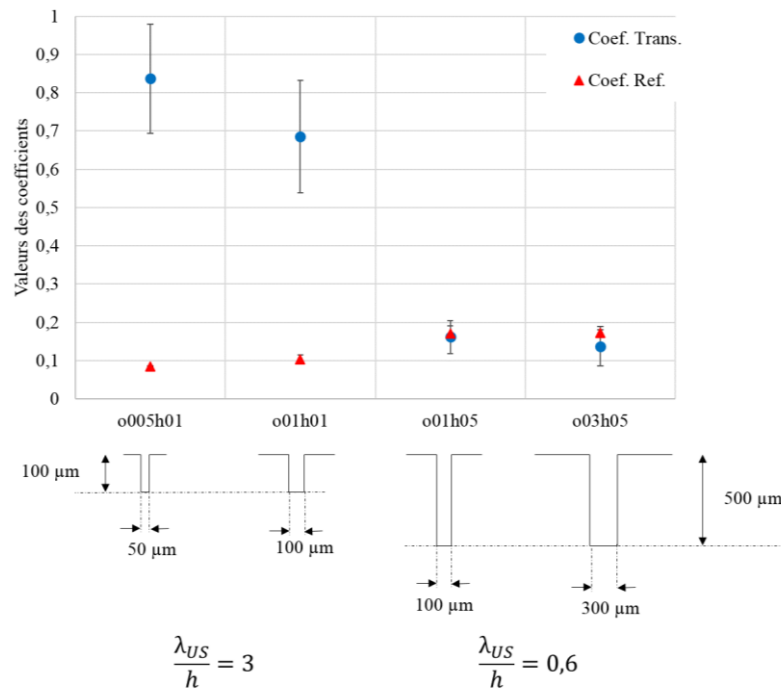


Figure 4-22 Diminution du coefficient de transmission avec l'augmentation de la hauteur de l'entaille et augmentation du coefficient de réflexion avec la hauteur de l'entaille.

Intuitivement, on suppose que les basses fréquences, dont les longueurs d'onde sont proches de la profondeur de l'entaille vont être réfléchies par le défaut tandis que les hautes fréquences seront transmises comme l'illustre la Figure 4-23.

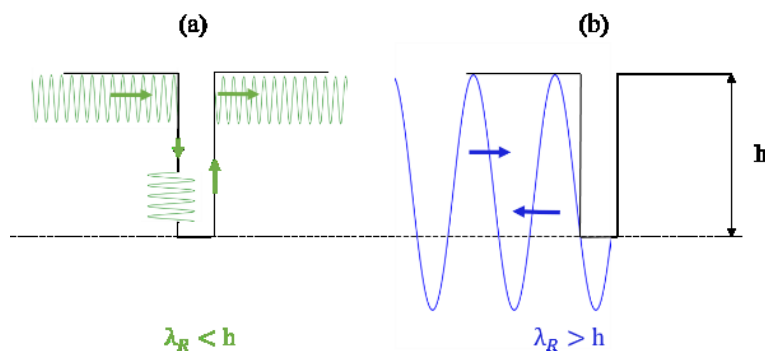


Figure 4-23 (a)Transmission des hautes fréquences et (b) réflexion des basses fréquences

Ainsi, on a mis en évidence des variations du coefficient de transmission en fonction de la hauteur des entailles mais avec seulement deux hauteurs d'entailles. Il n'est pas possible de conclure quant à une loi reliant la hauteur de l'entaille, la longueur d'onde de Rayleigh et le coefficient de transmission.

• Caractérisation des trous génératrice

De la même façon que pour les entailles, on se propose de tracer le spectre des ondes réfléchies par les trous génératrice normalisés par rapport à leur maximum. Ainsi, on ne s'intéresse qu'au décalage fréquentiel. Pour ces données, trois mesures sont effectuées pour chaque dimension de défauts de sorte à évaluer l'incertitude de mesure. La Figure 4-24 montre les spectres des ondes réfléchies pour les trois trous génératrice et la nomenclature est donnée dans le Tableau 4-4.

Dimensions en μm	Nomenclature	Diamètre($\varnothing$)	Profondeur (p)
	tg p03-d03	300	300
	tg p03-d03	300	100
	tg p10-d01	100	100

Tableau 4-4 Nomenclature des trous génératrice

Les spectres des ondes réfléchies sont différents pour chaque trou génératrice. Tout d'abord, on constate un premier maximum dans le spectre à $f = 1,6$ MHz pour le trou de 0,3 mm de diamètre et à $f = 2$ MHz pour les trous de 0,1 mm de diamètre. Puis le spectre présente deux harmoniques à $f = 3$ et $f = 4,2$ MHz pour le trou de profondeur 0,3 mm, une harmonique à $f = 5,7$ MHz pour le trou de 0,3 mm de profondeur et trois harmoniques à $f = 4,2$ MHz, $f = 6,07$ MHz et $f = 7$ MHz pour une profondeur de 0,1 mm. Le nombre d'harmoniques diminue avec l'augmentation de la distance trou-surface. L'origine de ces résonances pourrait permettre de dimensionner les trous génératrice, comme le suggère la littérature.

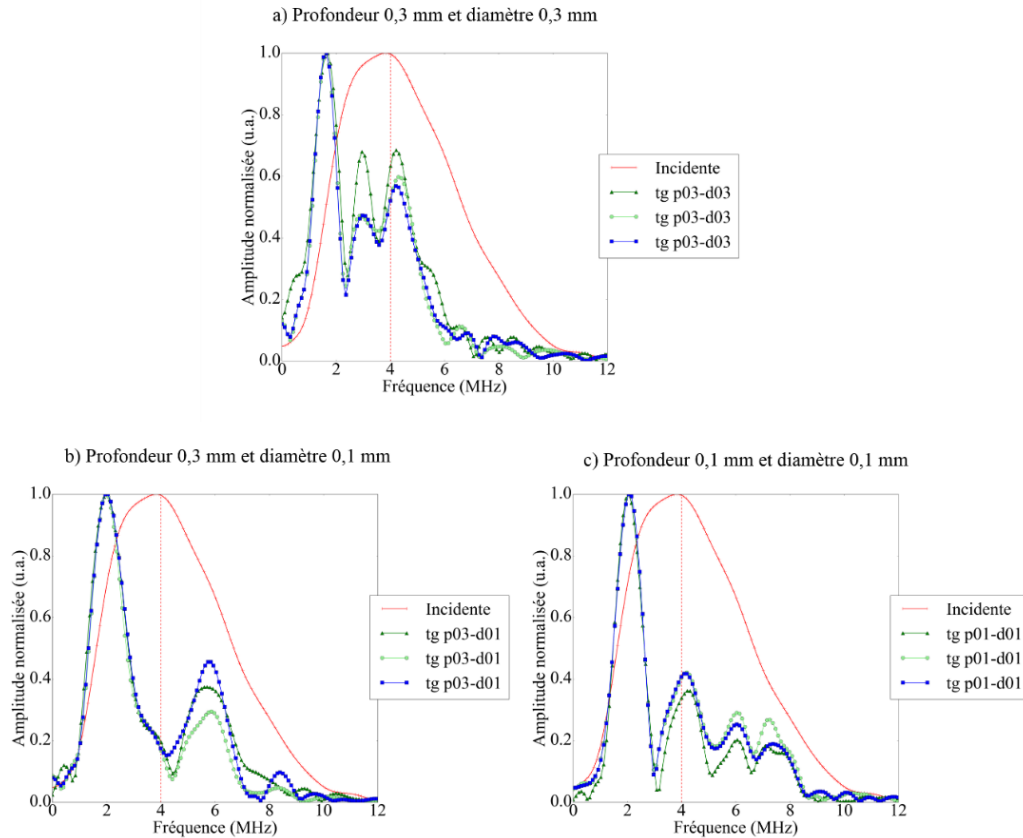


Figure 4-24 (a) Spectre de l'onde réfléchi par le trou génératrice de profondeur 0,3 mm et diamètre 0,3 mm. (b) Spectre de l'onde réfléchi par le trou génératrice de profondeur 0,3 mm et diamètre 0,1 mm. (c) Spectre de l'onde réfléchi par le trou génératrice de profondeur 0,1 mm et diamètre 0,1 mm.

Essayons de comprendre l'origine de ces résonances. L'interaction des ondes acoustiques avec un défaut sub-surfacique, de type trou génératrice par exemple, relève de phénomènes de rayonnement complexes. Lorsqu'une onde incidente interagit avec un réflecteur circulaire (trou génératrice ou cavité d'air par exemple) de rayon r situé à une distance d de la surface, elle n'est pas seulement réfléchi, elle est également convertie en ondes circonférentielles à la surface de celui-ci, appelées « creeping wave » en anglais. Si ce phénomène a été mis en évidence à l'interface entre un milieu solide et une cavité fluide par Martson *et al.* par exemple [89], il est également présent pour un réflecteur au sein d'un milieu solide tel que l'aluminium, comme le montrent Pei *et al.* [90]. L'énergie de l'onde incidente est donc en partie « piégée » par le réflecteur sous forme de cette onde circonférentielle et libère progressivement cette énergie via une onde rayonnée par le réflecteur comme le présente la Figure 4-25, inspirée des travaux de Hassan et Nagy [91].

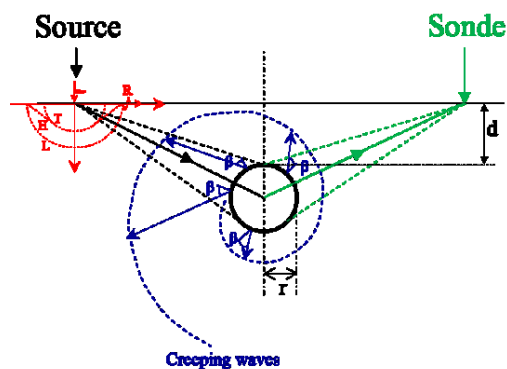


Figure 4-25 Diffraction des ondes de Rayleigh sur un réflecteur circulaire générant des ondes circonférentielles ou « creeping wave ».

L'onde rayonnée est réfléchiée par la surface de la pièce, créant ainsi une résonance. La fréquence de cette résonance dépendrait du périmètre, $2\pi r$, et de la distance à la surface d .

En parcourant la littérature sur ce sujet, nous avons essayé d'établir les origines possibles de ces harmoniques. Les premières hypothèses avancées (1 à 3) sont à considérer dans un cas général au regard de la longueur d'onde λ_R par rapport aux dimensions du défaut.

1 - La résonance pourrait être provoquée par les **réflexions de l'onde rayonnée avec la surface**. Elle dépendrait alors essentiellement de d . La première fréquence de résonance, f , comme l'a montré Zachary [92] serait donnée par :

$$f = \frac{V_R}{2d} \quad (4.34)$$

Dans notre cas, V_R , la vitesse des ondes de Rayleigh vaut 2,9 mm/μs et d est égal à 0,15 mm pour le trou génératrice de profondeur 0,3 mm et de diamètre 0,3 mm. D'après l'équation 4.34, la première fréquence de résonance vaut $f = 9,6$ MHz, ce qui ne correspond pas à la première fréquence observée expérimentalement sur la Figure 4-24 valant $f = 1,6$ MHz.

2 - Une autre cause des résonances pourrait être expliqué tel un **résonateur d'Helmholtz**. L'air contenu dans la cavité vibrerait à une fréquence donnée par l'équation suivante :

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (4.35)$$

Avec c , la vitesse du son dans l'air, S la section du résonateur, L sa longueur et V son volume. Sachant que la longueur du trou de profondeur $d = 0,15$ mm et de diamètre 0,3 mm est de 9 mm ; la fréquence de résonance serait alors, d'après l'équation 4.35, de $f = 50$ kHz. Cette fréquence est bien inférieure à celles des spectres qui sont autour du MHz.

3 - Enfin, les résonances pourraient également provenir de la propagation **de l'onde de Rayleigh à la surface du réflecteur** comme le montre Nagy *et al.* [93], La première fréquence de résonance serait alors donnée par

$$f = \frac{v_R}{2\pi r} \quad (4.36)$$

où r est le rayon du trou. Une caractéristique supplémentaire s'observe pour les cylindres : un saut de phase de $\pi/2$ est mis en évidence par Überall [94] et Viktorov [48]. La position des résonances s'en trouve décalée d'un facteur $\frac{1}{2}$ et l'équation 4.37 devient :

$$f = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{v_R}{2\pi r} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.38)$$

L'application numérique, pour le trou de diamètre 0,3 mm et à une profondeur d de 0,15 mm, de l'équation 4.36, donne une fréquence centrale à $f = 1,53$ MHz, ce qui correspond à la première fréquence de résonance observée expérimentalement sur la Figure 4-24-a à $f = 1,6$ MHz. Néanmoins, pour les trous de 0,1 mm de diamètre, l'équation 4.38 ne permet pas de rendre compte de la première fréquence de résonance.

Hurst *et al.* [95] et Peck *et al.* [96] montrent que la vitesse des ondes circonférentielles dépend de la courbure du réflecteur considéré. La Figure 4-26 montre que la vitesse des ondes circonférentielles, notées P et S , décroît rapidement avec le rayon, a .

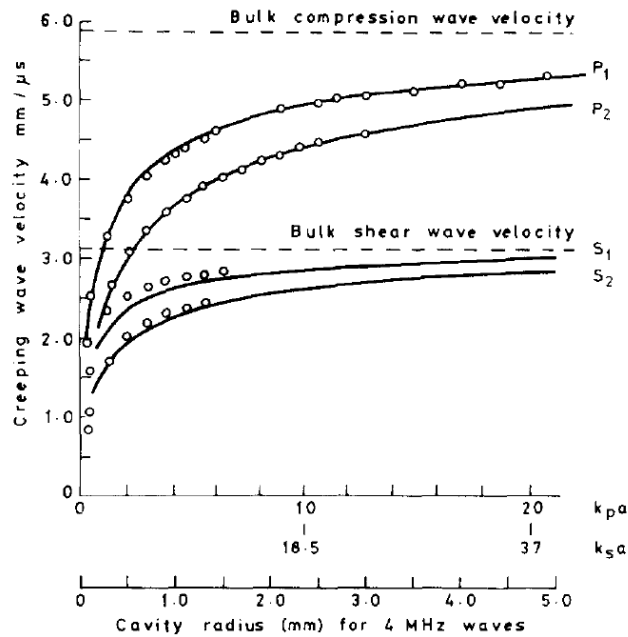


Figure 4-26 Variations de vitesse des ondes circonférentielles en fonction du rayon, a , de la cavité, et k le nombre d'onde, extrait de [95].

On peut supposer, d'après la Figure 4-26, que la vitesse des ondes de Rayleigh circonférentielles pourrait être inférieure à 1 mm/μs lorsque le rayon des trous génératrice est compris entre 0,05 et 0,15 mm, comme c'est le cas des défauts étudiés dans ces travaux.

4 – Enfin, puisque que dans notre cas, les dimensions (diamètre et profondeur) des défauts sont inférieures à la longueur d'onde de Rayleigh, on peut supposer que le trou se comporte comme une source ponctuelle et est donc gouverné par la diffusion de Mie. La diffusion de Mie explique la diffusion d'une onde par une particule isolée.

Ces spéculations permettent de cerner l'origine physiques des résonances présentes sur les spectres des ondes réfléchies par les trous génératrice dans un cas général c'est-à-dire sans considération de la longueur d'onde par rapport aux dimensions du défaut. Les ondes circonférentielles se propagent à la surface du réflecteur à une vitesse dépendante de son rayon de courbure. C'est un système bouclé en phase : l'onde génère une résonance tous les n entiers. À chaque tour parcouru par l'onde, elle engendrerait une résonance. De plus, les trous sont usinés dans une pièce issue du procédé DML dont nous avons mis en évidence l'anisotropie au paragraphe 4.2. Ceci implique aussi que la vitesse de l'onde rayonnée est modifiée au cours de sa propagation, déformant l'onde rayonnée par le défaut présentée sur la Figure 4-25. La caractérisation de ces trous génératrice dont les dimensions sont inférieures à λ_R doit être analysée plus en détails. Par ailleurs, ces hypothèses peuvent nous renvoyer aux travaux de Cerniglia *et al.* [42]. En effet, la parabole observée sur leurs acquisitions pourrait être la manifestation de ces ondes circonférentielles.

Puisqu'il n'est pas possible en l'état de tirer des informations directement des spectres, on se propose comme pour les entailles, d'analyser les coefficients de réflexion et de transmission présentés sur la Figure 4-27. Le coefficient de réflexion est compris entre 0,08 et 0,15 pour les trous génératrice.

L'amplitude du spectre réfléchi ne permet pas de donner des éléments de caractérisation dans notre cas. Le coefficient de transmission, diminue (de 0,54 à 0,25) lorsque la profondeur du trou augmente (de 150 μm à 450 μm). L'onde de Rayleigh est d'autant mieux transmise que le trou est proche de la surface. Les diamètres des trous étant inférieurs ou égaux à la longueur d'onde minimale de l'onde de Rayleigh (0,3 mm), c'est la profondeur du trou qui aura l'impact le plus important sur la transmission. En effet, les trous tg p01-d01 et tg p03-d01 ont le même diamètre et seule leur profondeur diffère. Le coefficient de transmission est significativement plus faible pour le plus profond (tg p03-d01).

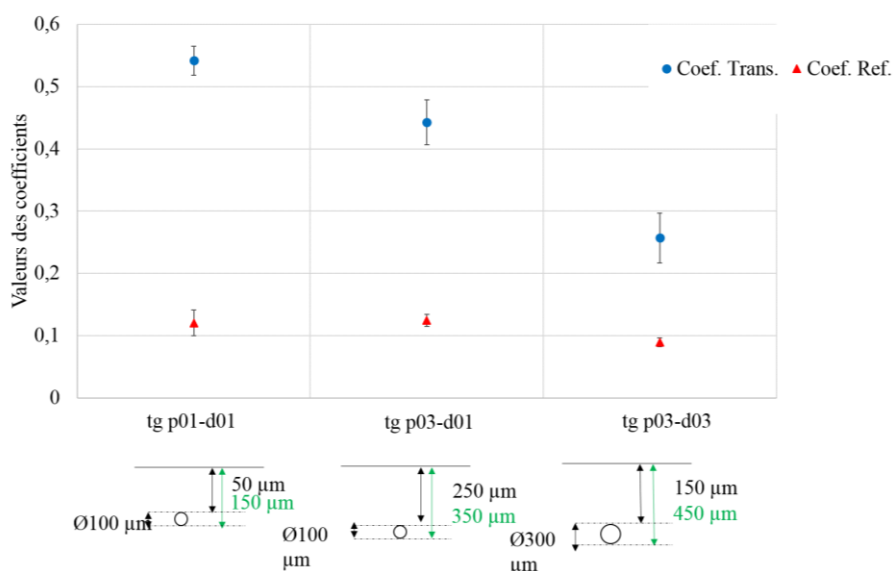


Figure 4-27 Coefficients de réflexion et transmission pour les trous génératrice sur des pièces issues du procédé DML

Dans notre cas, le coefficient de transmission donne donc une indication sur la profondeur du trou génératrice sans pour autant donner de loi quantitative.

4.5. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons apprécié les limites de détection du dispositif conçu au chapitre 3. Tout d'abord, nous avons caractérisé le milieu induit par une fabrication additive. L'amplitude est atténuée d'environ 1 dB/mm par rapport à l'amplitude de l'onde acquise sur les pièces issues du procédé de forge du fait de la microstructure à gros grain. C'est une atténuation d'origine diffusive. Une fabrication par le procédé DML engendre une pièce dont les grains sont grands devant la longueur d'onde de Rayleigh. Ainsi, l'atténuation est essentiellement due à la diffusion par ces grains qui est plus importante que l'atténuation par absorption ayant lieu dans la forge. On a également mis en évidence le caractère anisotrope des pièces issues du procédé DML en mesurant la vitesse de l'onde de Rayleigh sur les différentes faces de la pièce. Ainsi, un caractère anisotrope s'apparentant à une anisotropie trigonale est mis en évidence dans le sens de croissance des grains.

Puis, nous nous sommes concentrés sur la détection de défauts surfaciques et sub-surfaciques dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde de Rayleigh, $\lambda_R = 0,7$ mm à la fréquence centrale. Dans le cas d'une surface polie, l'onde de Rayleigh est sensible au moins jusqu'à des défauts dont les dimensions (ouverture et hauteur, profondeur, diamètre) sont égales à 0,1 mm et donc inférieure à λ_R . La limite sur la profondeur des défauts sub-surfaciques est atteinte lorsque la profondeur du défaut est proche de λ_R . Concernant les surfaces rugueuses, trois phénomènes peuvent altérer la détection d'un défaut :

- La diffusion du faisceau laser de détection qui diminue l'étendue,
- La diffusion du faisceau laser de génération qui altère l'efficacité de génération de l'onde ultrasonore,
- La diffusion de l'onde de Rayleigh lors de sa propagation.

Ces diffusions sont à l'origine du signal incohérent observé sur les images B-scans. Les entailles dont la hauteur est comparable à la longueur d'onde de Rayleigh sont détectées. Pour les trous génératrice, la détection est plus délicate, et seul le défaut de 0,3 mm de profondeur et de diamètre est détecté.

Enfin, la caractérisation dans le domaine fréquentiel, des défauts dont les dimensions sont inférieures à la longueur d'onde de Rayleigh s'avère plus pertinente que dans le domaine temporel. Les études sur la caractérisation de défauts sub-longueur d'onde a mis en évidence les tendances suivantes :

- La fréquence des ondes réfléchies par les entailles est d'autant plus élevée que la hauteur de l'entaille est faible devant λ_R .
- Le coefficient de transmission est d'autant plus élevé que la hauteur de l'entaille est faible.
- Le spectre des ondes réfléchies par un trou génératrice présente des résonances. La fréquence de ces résonances est gouvernée par la propagation d'une onde circonférentielle cheminant autour du défaut.
- Le coefficient de transmission diminue avec la profondeur du trou génératrice.

Le contrôle *in situ* constitue la trame directrice de la démarche scientifique présentée dans cette thèse. Aussi, nous avons choisi de consacrer le dernier chapitre à l'étude de cas réels de défauts sub-surfaciques afin de donner d'ores et déjà des traitements de données et quelques limites d'un contrôle de défauts réels sur surface rugueuse au moyen d'un contrôle par UL. Ces défauts réels sont des porosités multiples apparaissant dans l'ensemble de la pièce lors d'une variation d'un paramètre du procédé.

Chapitre 5

Détection des porosités réelles par méthode de corrélation

5.	<u>Détection de porosités réelles par méthodes de corrélation</u>	Erreur ! Signet non défini.
5.1.	<u>Introduction</u>	Erreur ! Signet non défini.
5.2.	<u>Échantillons comportant des défauts réels</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.2.1. Variations du « hatch » dans des pièces en acier 316L</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.2.2. Dégradation de la qualité de la poudre dans des pièces en inconel 718</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.2.3. Diffraction de l'onde de Rayleigh par les rugosités de surface et les porosités sub-surfaciques</u>	Erreur ! Signet non défini.
5.3.	<u>Degré de ressemblance</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.3.1. Échantillons en acier 316L</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.3.2. Échantillons en inconel 718</u>	Erreur ! Signet non défini.
5.4.	<u>Caractérisation du taux de porosités par Analyse en Composantes Principales (ACP)</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.4.1. Principe de l'ACP</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.4.2. ACP dans l'acier 316L</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>5.4.3. ACP dans l'inconel 718</u>	Erreur ! Signet non défini.
5.5.	<u>Conclusion</u>	Erreur ! Signet non défini.
	<u>Conclusion générale</u>	Erreur ! Signet non défini.

5. Détection de porosités réelles par méthodes de corrélation

5.1. Introduction

Les parties précédentes traitaient de défauts isolés et usinés, servant de preuve de concept de l'inspection de pièces de fabrication additive par UL. En vue d'une future intégration dans une machine DML, il semble opportun de consacrer la dernière partie de ces travaux à l'étude de cas réels.

Pour assurer la continuité des travaux du chapitre 4, et pouvoir exploiter les outils développés précédemment pour l'inspection et la caractérisation de défauts isolés et usinés, des défauts isolés mais réels, c'est-à-dire aux contours et formes irrégulières, s'apparentant à des porosités et à des fissures, auraient pu être considérés dans cette partie. Cependant, ce type de défauts isolés est souvent dû à des variabilités locales du procédé ; il est donc difficile de générer volontairement de tels défauts. Il aurait pu être envisagé d'intégrer dans la CAO de la pièce des pores ou fissures ; cependant, la fabrication de telles pièces aurait contraint l'étude à l'inspection de défauts de l'ordre du millimètre en raison des tolérances géométriques du procédé et des problèmes d'effondrements des cordons lors de la fabrication de pores notamment [96].

Pour induire ces défauts réels, nous avons opté pour deux solutions distinctes : la première a consisté à jouer sur le paramètre machine définissant la distance entre deux cordons successifs (« hatch » en anglais et terme utilisé dans la suite du texte), la seconde à utiliser de la poudre dont la granulométrie et la sphéricité étaient dégradées par rapport aux conditions optimales (mauvaise poudre). Cette dégradation intentionnelle de la fabrication conduit à la génération de porosités multiples (taux de porosités compris entre 0,5 % et 12 %) au sein des pièces. Ces défauts ont été engendrés, pour des raisons pratiques, dans deux types de matériaux différents : la variation du paramètre « hatch » est induite à travers un lot d'échantillon en acier 316L, tandis que la mauvaise poudre est utilisée sur un lot d'échantillon en inconel 718.

Ainsi, ce chapitre a pour objectif de présenter deux méthodes de corrélation des signaux ultrasonores, susceptibles de mettre en évidence des défauts réels générés volontairement (modification du « hatch » et utilisation de poudre de mauvaise qualité), de type porosités, distribués dans une pièce de FA dont l'état de surface est brut. Les acquisitions sont réalisées selon la configuration pitch-and-catch.

Dans une première partie, les échantillons inspectés sont décrits à travers leurs coupes métallurgiques desquelles sont déterminées les taux de porosités. Cette analyse est abordée dans ce chapitre mais détaillée en annexe. Cette annexe décrit également le procédé de réalisation des coupes métallurgiques.

Nous avons observé dans le chapitre précédent que l'onde de Rayleigh est déformée par la présence de porosités sub-surfaciques et d'autant plus lorsque la surface est rugueuse. Ces observations nous ont conduits, dans une deuxième partie, à considérer une méthode de corrélation des signaux, issus d'une même pièce, comme outil de discrimination des échantillons poreux, des échantillons sans porosités générées volontairement dit échantillons de référence ou sains. Puis, dans une troisième partie,

nous avons testé une seconde méthode de corrélation : l'analyse en composantes principales (ACP) [97], afin de discriminer plus finement les différents échantillons dont les taux de porosités sont proches.

5.2. Échantillons comportant des défauts réels

La formation de défauts par la modification du paramètre « hatch » du procédé a été réalisée dans des conditions propices à celle-ci mais sans contrôles, ainsi le taux de porosités et la dimension des pores ne sont pas connus suite à la fabrication. Il en est de même pour les pièces manufacturées à partir de poudre de mauvaise qualité. Cette première partie fournit les caractéristiques des défauts générés volontairement à partir de coupes métallurgiques. L'ensemble de ces coupes sont disponibles en annexe A.

5.2.1. Variations du « hatch » dans des pièces en acier 316L

Le premier lot d'échantillons, fabriqué en acier 316L, comporte cinq pièces (cf. Figure 5-1), deux dites « de référence » ou « saines », fabriquées avec des paramètres machines optimaux et considérées comme ne comportant aucun défaut, et trois dites « poreuses » fabriquées avec des paramètres dégradés.

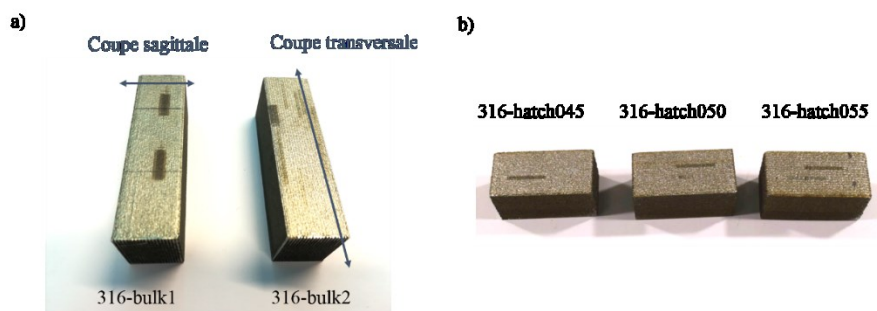


Figure 5-1 Lot d'échantillons en acier 316L. (a) Les deux pièces de références sont notées 316L-bulk1 et 316L-bulk2. (b) Les trois pièces poreuses sont notées 316-hatch045, 316-hatch050 et 316-hatch055.

Les deux échantillons de références sont ceux utilisés dans les chapitres précédents et ont été fabriqués avec les mêmes paramètres machines et la même poudre, ils sont notés 316-bulk1 et 316-bulk2. Les trois échantillons, présentés sur la Figure 5-1-b, et notés 316-hatch045, 316-hatch050 et 316-hatch055, ont été fabriqués en augmentant le « hatch » qui est égal à 0,45 mm, 0,5 mm et à 0,55 mm, respectivement.

Afin de quantifier la porosité dans chacune des pièces, des coupes métallurgiques selon les plans transverse et sagittal sont effectuées et présentées sur la Figure 5-2. Sans post-traitement thermique, les pièces en sortie de fabrication peuvent comporter quelques porosités, même lorsque celles-ci sont fabriquées avec les paramètres optimaux. Des porosités, mesurant plus de 100 μm , dans la pièce de référence 316-bulk1, sont, par exemple, observées à environ 1 mm de la surface (Figure 5-2-a). En revanche, la variation du paramètre opératoire « hatch » induit systématiquement des manques de fusion entre chaque cordon juxtaposé engendrant des porosités. Pour les trois échantillons, les porosités ont un aspect polyédrique anguleux et peuvent atteindre des hauteurs de 0,75 mm et des longueurs de 1 mm.

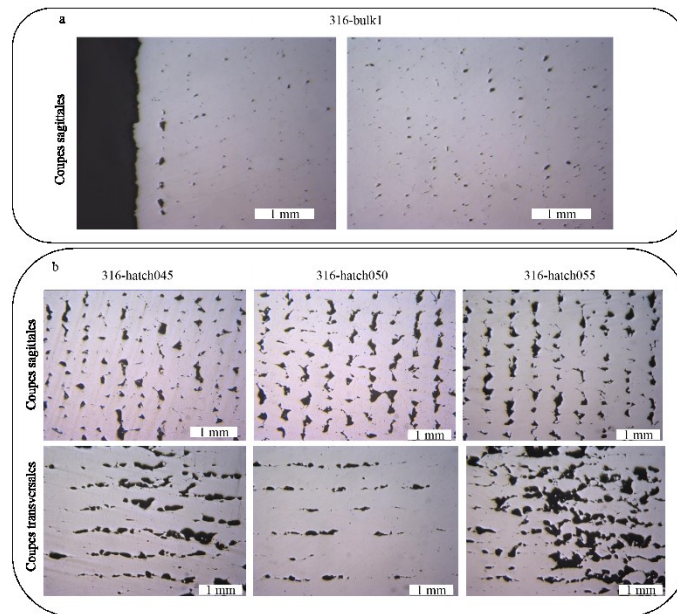


Figure 5-2 (a) Coupes sagittales des échantillons en acier 316L pour les deux pièces de références (316L-bulk1 et 316L-bulk2). (b) Coupes sagittales et transversales des trois pièces poreuses en acier 316L (316-hatch045, 316-hatch050 et 316-hatch055).

Les taux de porosités, notés Φ , sont calculés par « seuillage » de l'image sous le logiciel ImageJ. Ils sont estimés à partir des images de la Figure 5-2. Le seuillage consiste à fixer les seuils haut et bas de niveaux de gris, permettant de séparer l'arrière-plan du reste de l'image (en rouge sur la Figure 5-3). Ainsi, une valeur de niveau de gris correspond au matériau dense et une autre aux pores comme le montre la Figure 5-3. Le rapport de ces deux valeurs rend compte du taux de porosités.

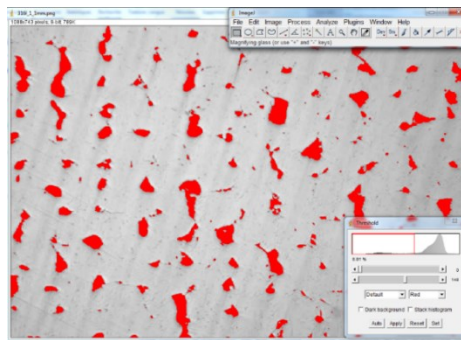


Figure 5-3 Seuillage d'une coupe micrographique de l'échantillon 316L-hatch045 sous ImageJ.

Les taux de porosités moyen ainsi déterminés sont de 1,9 % pour les deux échantillons, 316-bulk1 et 316-bulk2 et respectivement de 8 %, 11,8 % et 10,4 % pour les échantillons 316-hatch045, 316-hatch050 et 316-hatch055.

La variation du « hatch » induit également une modification de l'état de surface : s'il augmente, la distance entre deux cordons augmente et la distance, a , entre deux oscillations du profil de surface est également augmentée (cf. Figure 5-4). Le paramètre a est souvent appelé longueur de cohérence par les auteurs (cf. annexe B relative à l'étude exploratoire de l'atténuation de l'onde de Rayleigh par des rugosités). L'état de surface est donc une signature de la présence de porosité pour cette variation du procédé.

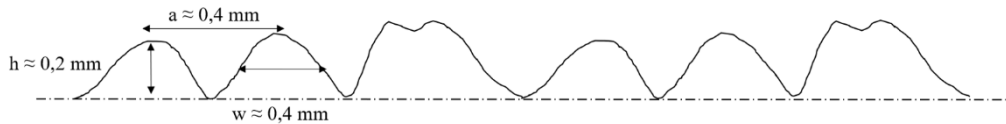


Figure 5-4 Paramètres de rugosité pour des paramètres optimaux. h est la hauteur d'un cordon, a la longueur de cohérence et w la largeur d'un cordon.

Les longueurs de cohérence peuvent être approximées dans notre cas par le « hatch », ainsi, elles sont respectivement égales à 0,45 mm, 0,50 mm et 0,55 mm pour des échantillons 316-hatch045, 316-hatch050 et 316-hatch055. La différence d'état de surface entre les trois échantillons poreux de 316L n'est pas visible à l'œil nu, mais cette altération est clairement visible pour les échantillons d'inconel 718 pour lesquels la valeur du « hatch » est quasiment le double de celui des échantillons d'acier 316L (cf. Figure 5-6).

5.2.2. Dégradation de la qualité de la poudre dans des pièces en inconel 718

Le lot d'échantillon fabriqué en inconel 718 comporte trois pièces : une construite à partir des paramètres machines optimaux, notée 718-bulk, l'une élaborée via une dégradation du « hatch » (égale à environ 0,75 mm), notée 718-hatch, et la dernière fabriquée avec une granulométrie de poudre dégradée, notée 718-powder.

L'estimation des taux de porosités est faite à partir de 56 images représentant 206 mm² de surface et a été évalué par le CETIM comme détaillé précédemment. La Figure 5-5 présente les coupes métallurgiques du lot d'échantillon en inconel 718.

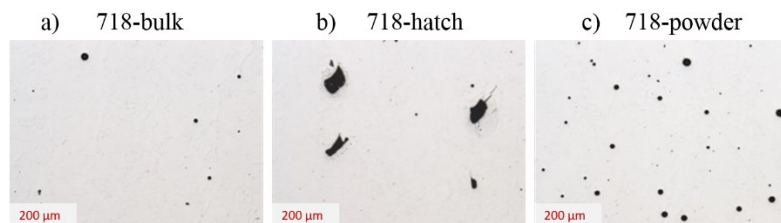


Figure 5-5 Coupes métallurgiques des échantillons du lot de pièce en inconel 718. (a) 718-bulk, b) 718-hatch et c) 718-powder

Les taux de porosités des pièces 718-bulk, 718-hatch et 718-powder sont respectivement de 0,1 %, 0,7 % et 0,4 %. L'aspect des porosités dépend du facteur les ayant générées ; ainsi, la pièce élaborée avec le « hatch » dégradé (Figure 5-5-b), présente des porosités dont la forme est polyédrique anguleuse et dont le diamètre est supérieur à 100 µm. La pièce issue de la fabrication avec la mauvaise poudre (cf. Figure 5-5) comporte des porosités d'allure sphérique et dont le diamètre est inférieur à 100 µm. Ces taux de porosités ne sont pas directement comparables à ceux du lot d'échantillons en acier 316L puisque le matériau n'est pas le même.

Dans le cas des échantillons en inconel 718 contrairement à ceux en acier 316L, la dégradation de l'état de surface, dû à la variation du « hatch », entre la pièce 718-bulk et 718-hatch, est nettement visible à l'œil nu (cf. Figure 5-6). En revanche, les paramètres a et h , des pièces 718-bulk et 718-powder, sont, *a priori*, identiques puisque le « hatch » n'est pas modifié.

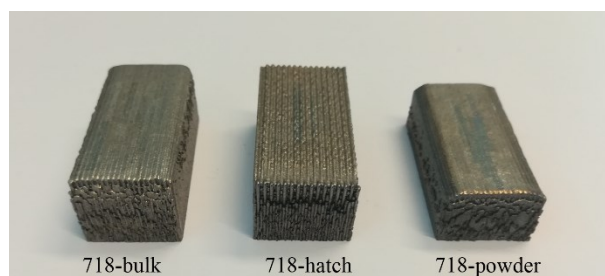


Figure 5-6 Échantillons en inconel 718 : 718-bulk, 718-hatch et 718-powder.

Dans la suite de ce chapitre, des mesures seront effectuées sur les surfaces rugueuses mais également sur des surfaces polies afin de décorréler les aspects poreux et rugueux. Les échantillons ont été détachés de leur substrat. De fait, la face initialement solidaire de celui-ci est polie ; c'est sur cette face que sont faites les acquisitions sur surface polie.

Le Tableau 5-1 reprend les dimensions et les aspects des porosités ainsi que le taux de porosités pour l'ensemble des pièces étudiées dans ce chapitre.

	Nomenclature	N°	Taux de porosités Φ (%)	Tailles des porosités (μm)	Aspect des porosités	Qualité de l'état de surface	Paramètre dégradé pour la fabrication
Lot échantillons 316L	316-bulk1	1	1,9	<100	Sphérique	Sain	Aucun
	316-bulk2	2	1,9	<100	Sphérique	Sain	Aucun
	316-hatch045	3	8	>>100	Polyédrique anguleux	Dégradé	Hatch
	316-hatch050	4	11,8	>>100	Polyédrique anguleux	Dégradé	Hatch
	316-hatch055	5	10,4	>>100	Polyédrique anguleux	Dégradé	Hatch
Lot échantillons 718	718-bulk	6	0,1	<100	Sphérique	Sain	Aucun
	718-hatch	7	0,7	>100	Polyédrique anguleux	Dégradé	Hatch
	718-powder	8	0,4	<100	Sphérique	Sain	Qualité de la poudre

Tableau 5-1 Caractéristiques des échantillons en acier 316L et en inconel 718.

Pour plus de clarté dans la suite du texte, nous utiliserons la numérotation des échantillons plutôt que leur nomenclature.

5.2.3. Diffraction de l'onde de Rayleigh par les rugosités de surface et les porosités sub-surfaciques

Dans la perspective d'inspecter la qualité des pièces *in situ* par ondes de Rayleigh, on cherche un moyen de mettre en évidence le caractère poreux d'une pièce sur une surface rugueuse. Pour ce faire, nous nous imposons la configuration retenue pour une application industrielle à savoir la configuration pitch-and-catch avec une distance génération/réception de 5 mm. La ligne laser est perpendiculaire au sens de dépose de la buse du procédé DML et le système UL parcourt 10 mm par pas de 0,2 mm.

Les Figure 5-7-a présentent les images B-scans issues de milieux poreux, sur des surfaces rugueuses et polies.

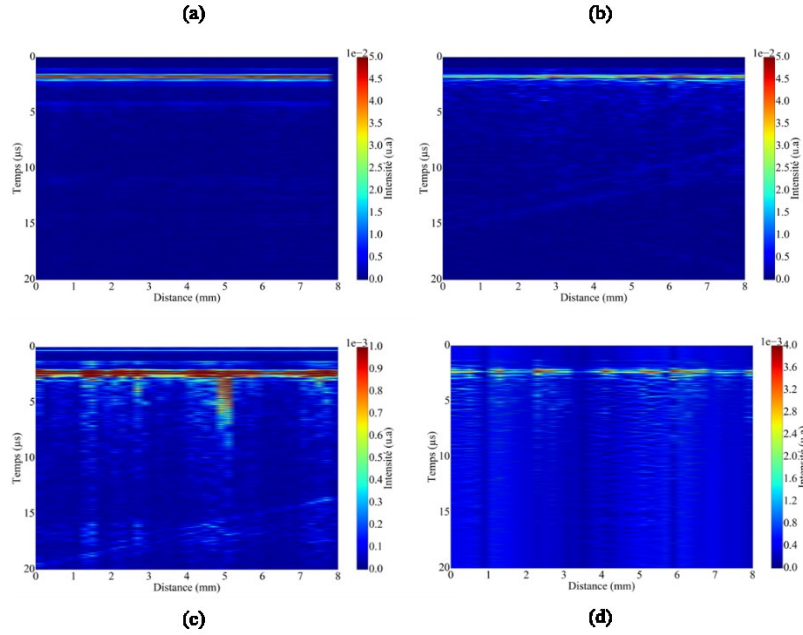


Figure 5-7 B-scans acquis sur des pièces en acier 316L fabriquées par le procédé DML. (a) Onde de Rayleigh se propageant sur un milieu sain et sur une surface polie. (b) Onde de Rayleigh se propageant sur un milieu poreux et sur une surface polie. (c) Onde de Rayleigh se propageant sur un milieu sain et sur une surface polie. (d) Onde de Rayleigh se propageant sur un milieu poreux et sur une surface rugueuse.

Sur le B-scan de la Figure 5-7-a, acquis dans un milieu sain et sur une surface polie, l'onde de Rayleigh est aisément visible à 1,8 μs . En présence de porosités sub-surfaciques, Figure 5-7-b, des fluctuations apparaissent sur le front d'onde de Rayleigh. La rugosité atténue significativement l'intensité de l'onde de Rayleigh (cf. annexe B sur l'atténuation de l'onde de Rayleigh sur surface rugueuse). Par ailleurs, contrairement aux B-scans issus des inspections des défauts isolés, vus au chapitre 4, les B-scans acquis sur des milieux poreux ne présentent pas d'ondes réfléchies par les pores puisque les porosités multiples induisent un phénomène de diffusion des ondes élastiques. La Figure 5-8 permet de préciser les fluctuations de l'onde de Rayleigh au regard de la dégradation de l'état de surface et des porosités au sein du milieu. Elle présente trois ondes de Rayleigh acquises à différentes positions de la pièce, notées d ; $d=0$ correspond à la position initiale du système UL sur la pièce.

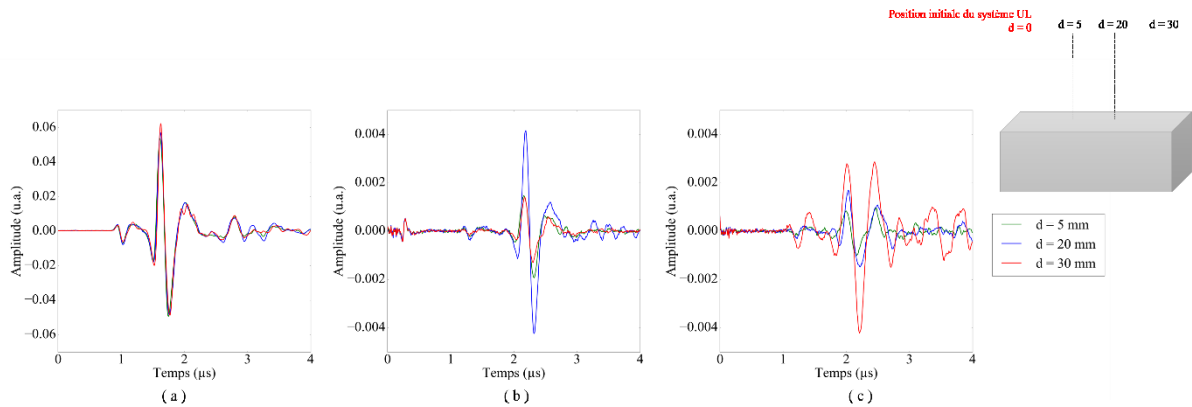


Figure 5-8 Ondes de Rayleigh pour plusieurs positions du système UL sur des pièces en acier 316L. (a) Onde de Rayleigh se propageant sur une pièce saine et de surface polie. (b) Fluctuations de l'amplitude de l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce saine et de surface rugueuse. (c) Fluctuations de l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce poreuse et de surface rugueuse.

L'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce de référence et de surface polie (cf. Figure 5-8-a) présente une amplitude constante, quelque soit la position d'acquisition. L'amplitude maximale moyenne est de $5,7 \pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ mV. Lorsque l'aspect rugueux est introduit des fluctuations d'amplitude apparaissent (cf. Figure 5-8-b). L'amplitude maximale moyenne est alors de $2,3 \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$ mV. Enfin, les porosités au sein du matériau engendrent un déphasage de l'onde et l'amplitude maximale moyenne est de $1,8 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$ mV. Au regard de ces observations, il semble pertinent de quantifier ces fluctuations en calculant la corrélation des signaux au sein d'une même pièce pour mettre en évidence des perturbations plus ou moins importantes liées à la porosité sub-surfacique.

5.3. Degré de ressemblance

L'idée est d'évaluer la ressemblance des signaux pour chacun des quatre cas présentés sur la Figure 5-7 et ce pour les deux matériaux : l'acier 316L et l'inconel 718, grâce à la corrélation des signaux issus d'une même pièce. La fonction de corrélation normalisée de deux signaux $s(t)$ et $y(t)$ d'énergie finie est définie par l'équation suivante :

$$\Gamma_{sr}(\tau) = \frac{R_{sy}(\tau)}{\sqrt{R_{ss}(0) \cdot R_{yy}(0)}} \quad (5.39)$$

où τ est le temps nécessaire à la fonction de corrélation pour recaler les signaux entre eux et R_{sy} , R_{yy} sont les fonctions d'intercorrélation et d'autocorrélation telles que

$$R_{sy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot y^*(t - \tau) dt \quad (5.40)$$

La Figure 5-9 représente la fonction de corrélation normalisée pour deux signaux issus d'un milieu poreux en acier 316L sur une surface polie. Elle traduit le degré de ressemblance de deux signaux et on la désignera par « fonction de ressemblance » dans la suite de cette thèse.

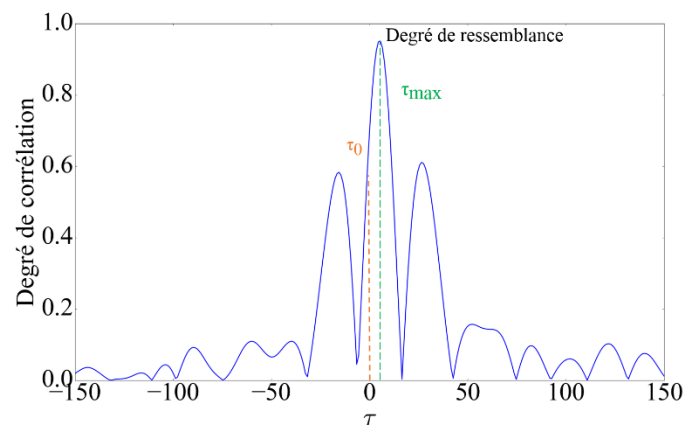


Figure 5-9 Fonction de ressemblance pour deux signaux temporel, $s(t)$ et $y(t)$, correspondant à l'onde de Rayleigh se propageant sur une pièce de référence en acier 316L polie. La fonction est calculée à partir de l'équation 5.42.

La fonction de ressemblance renseigne sur deux informations remarquables :

- Le degré de ressemblance, Γ , correspondant au maximum de la fonction (cf. Figure 5-9). En valeur absolue, un degré de ressemblance égale à 1 correspond à deux signaux identiques.
- L'écart de ce maximum pour $\tau = 0$ (cf. Figure 5-9). Il traduit le décalage temporel entre les deux signaux. Ce décalage peut être dû à une modification de la distance focale des lasers, modifiant ainsi la distance entre génération et détection et donc en apparence la variation du temps de vol de l'onde de Rayleigh. En conséquence, nous n'exploiterons pas cet écart pour quantifier des variations de vitesse de l'onde.

Enfin, le degré de ressemblance peut être obtenu par rapport au signal de référence (équation 5.41), ou de façon itérative d'un signal i à $j = i+1$ par exemple (équation 5.42).

$$\Gamma_{sr}(\tau) = \frac{\max(R_{ij})}{\sqrt{R_{ii}R_{jj}}} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 0 \\ j = 0,1,2,3, \dots \end{array} \right. \quad (5.41)$$

$$\Gamma_{sr}(\tau) = \frac{\max(R_{ij})}{\sqrt{R_{ii}R_{jj}}} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 0,1,2,3, \dots \\ j = 1,2,3,4 \dots \end{array} \right. \quad (5.42)$$

Ces deux manières de calculer le degré de ressemblance entre les signaux issus d'une même pièce permettent de quantifier les fluctuations de l'onde de Rayleigh. Les valeurs des degrés de ressemblance ne sont pas les mêmes mais ils traduisent la même information : la ressemblance globale des signaux acquis à différentes positions de la pièce.

5.3.1. Échantillons en acier 316L

- **Sur surface polie**

Pour décorréler les effets de porosité et de rugosité, les degrés de corrélation sont d'abord calculés pour des ondes de Rayleigh se propageant sur la face polie des échantillons. Les Figure 5-10 présentent les degrés de corrélation calculés pour l'ensemble des pièces en acier 316L ; la Figure 5-10-a, à partir de l'équation 5.42, et la Figure 5-10-b, à partir de l'équation 5.41.

Les fluctuations des signaux, mises en évidence sur la Figure 5-8, sont donc quantifiés à travers l'évaluation du degré de ressemblance pour des signaux issus d'une pièce. Sur la Figure 5-10-a, la quantification de ces fluctuations est traduite par un degré de ressemblance proche de $0,99 \pm 0,01$ pour une pièce saine (1 et 2) et de $0,95 \pm 0,02$ pour une pièce poreuse (3, 4 et 5). La Figure 5-10 b ne vient que conforter les observations faites sur la Figure 5-10 a. Le calcul du degré de ressemblance par rapport au premier A-scan rend compte d'un degré moyen de $0,98 \pm 0,01$ pour les échantillons 1 et 2. Pour les échantillons poreux, le degré moyen est de $0,92 \pm 0,03$. La différence entre les degrés de corrélation des pièces saines et poreuses est donc plus facilement observée pour la Figure 5-10 b.

Sur une surface polie, il est donc possible de distinguer une pièce poreuse d'une pièce saine, pour ce lot d'échantillon en acier 316L, grâce au calcul du degré de ressemblance moyen entre chaque signal.

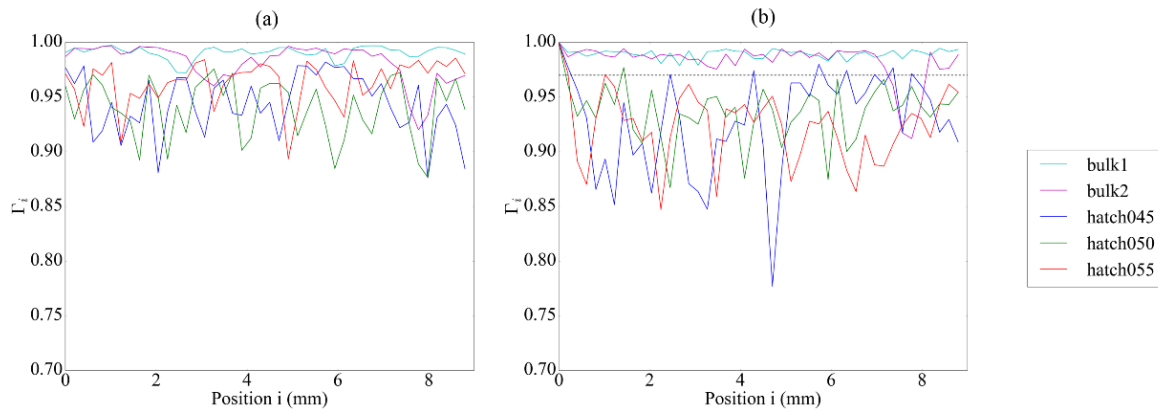


Figure 5-10 Degrés de ressemblance des signaux acquis sur surface polie pour le lot d'échantillons en acier 316L, (a) à partir de l'équation 5.42, et (b) à partir de l'équation 5.41.

• Sur surface rugueuse

Les fluctuations du signal croissent lorsque la surface est rugueuse (cf. Figure 5-8) ; l'introduction de la rugosité pourrait donc rendre les différences de degré de ressemblance, mis en évidence sur les polies, non significatives. On se propose d'évaluer la méthode de corrélation, présentée ci-dessus, pour des surfaces rugueuses. Elle permettra d'appréhender si l'introduction d'une surface dégradée permet de discerner un milieu sain d'un milieu poreux.

Les Figure 5-11 présentent les degrés de ressemblance, calculés à partir des équations 5.41 et 5.42, pour les mêmes échantillons que précédemment (1, 2, 3, 4 et 5) mais sur une surface rugueuse.

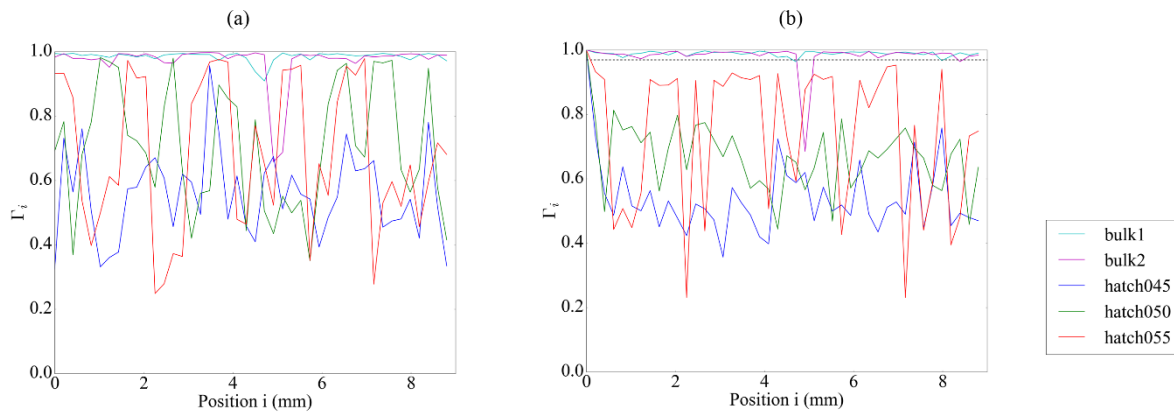


Figure 5-11 Degrés de ressemblance des signaux acquis sur surface rugueuse pour le lot d'échantillons en acier 316L, (a) à partir de l'équation 5.42, et (b) à partir de l'équation 5.41.

Sur la Figure 5-11-a, les fonctions de ressemblance pour les échantillons 1 et 2 rendent compte d'un degré de ressemblance moyen de $0,98 \pm 0,02$. Les degrés de ressemblance des échantillons poreux, 3, 4 et 5, varient de 0,24 à 0,98, et l'écart type moyen est alors de 0,19 pour ces pièces. La Figure 5-11-b corrobore les observations de la Figure 5-11 a. Le degré moyen de corrélation pour les échantillons 1 et 2 est de $0,98 \pm 0,03$ et ceux des échantillons poreux sont toujours inférieurs à 0,93.

On constate, sur les Figure 5-11-a et b, un degré de ressemblance de 0,68 à la position $i = 4,8$ mm pour l'échantillon sain, 2. Nous n'avons pas identifié avec certitude l'origine de cette brutale fluctuation, mais il semble que ce degré de ressemblance est dû à un défaut local au sein du bloc, comme une porosité isolée.

Les fluctuations du signal induites par les rugosités de surface sont plus élevées que dans le cas d'une surface polie à cause de la diffraction des ondes acoustiques par les rugosités qui s'ajoute aux perturbations induites par les porosités sub-surfaciques engendrant une diffusion multiple de l'onde d'autant plus élevée. Les degrés de corrélation sur une surface rugueuse sont donc globalement plus fluctuants que sous les surfaces polies. L'évaluation du degré de ressemblance par la fonction de ressemblance (à partir des équations 5.41 ou 5.42) permet de mettre en évidence la présence de porosités. Le degré moyen de corrélation fluctue jusqu'à 75 % de sa valeur maximale pour les pièces poreuses, tandis que les pièces saines ont un degré toujours environ égal à 0,98.

Ces résultats se limitent cependant à un matériau, l'acier 316L, et pour des taux de porosités important par rapport à l'échantillon sain (1,9 %), puisque proche de 10 %. Notons que la différence moyenne des taux de porosités sur une pièce poreuse et une pièce saine est de 8,1%. Le paragraphe suivant traite du second lot d'échantillons, en inconel 718 pour lesquels la différence moyenne des taux de porosités est égale à 0,45 %.

5.3.2. Échantillons en inconel 718

En suivant la même démarche que pour les pièces en acier 316L, les degrés de ressemblance sont déterminés pour les trois échantillons en inconel 718 et sont présentés sur les Figure 5-12.

- **Sur une surface polie**

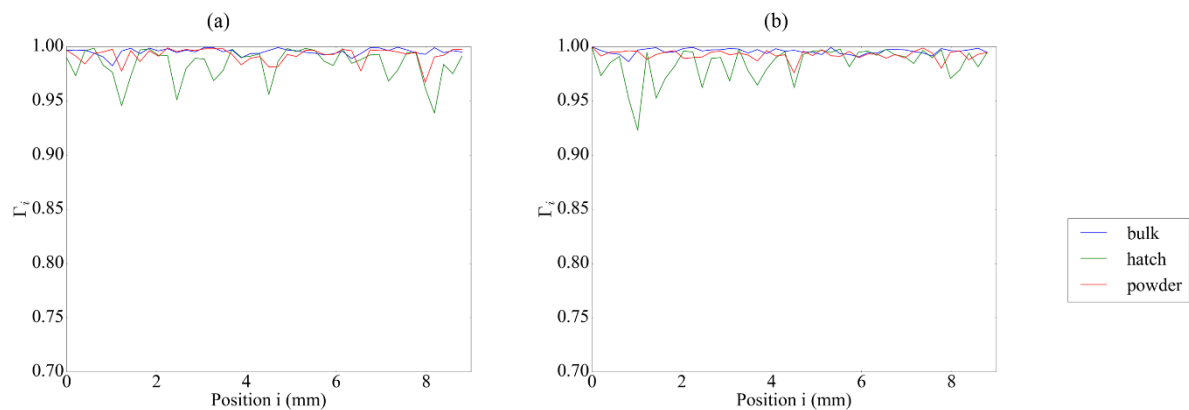


Figure 5-12 Degrés de ressemblance des signaux acquis sur surface polie pour le lot d'échantillons en inconel 718, (a) à partir de l'équation 5.42, et (b) à partir de l'équation 5.41.

La fonction de ressemblance de l'échantillon de référence en inconel 718 présente un degré de ressemblance moyen de $0,992 \pm 0,003$, comme pour l'échantillon 316L de référence. Il en va de même pour le degré de ressemblance calculé pour l'échantillon 8. La fonction de ressemblance de la pièce 7 montre un degré moyen de ressemblance de $0,98 \pm 0,02$, ce qui est proche des valeurs de la pièce de référence. Il est, de fait, difficile de conclure sur l'aspect poreux pour ce matériau.

Les échantillons poreux du lot d'échantillon en inconel 718 ont un taux de porosités proche de celui de l'échantillon sain (différence des taux de porosités égale à 0,45 %), et la fonction de ressemblance ne rend pas clairement compte de cette différence dans ce cas.

- **Sur une surface rugueuse**

La Figure 5-13 présente la fonction de ressemblance pour les échantillons 718 sur une surface rugueuse.

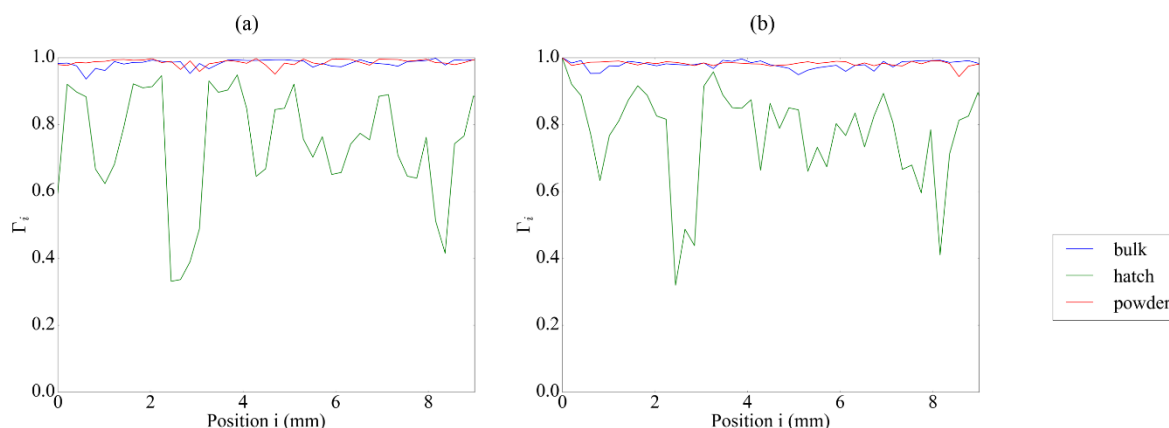


Figure 5-13 Degrés de ressemblance des signaux acquis sur surface rugueuse pour le lot d'échantillons en inconel 718, (a) à partir de l'équation 5.42, et (b) à partir de l'équation 5.41.

Les pièces 6 et 8 présentent le même degré de ressemblance moyen : $0,96 \pm 0,13$. La fonction de corrélation de la pièce 7, quant à elle, a un degré moyen de corrélation de $0,76 \pm 0,22$. Puisque les degrés de corrélations calculés à partir d'acquisitions sur la surface polie n'ont pas mis en évidence le caractère poreux de l'échantillon 7, on peut conclure que les fluctuations du degré de ressemblance maximum pour l'échantillon 7 sont essentiellement dues à l'état de surface.

Cette méthode trouve donc ses limites lorsque le taux de porosités d'un échantillon poreux n'est pas significativement différent du taux de porosités d'un échantillon sain, comme c'est le cas pour le lot d'échantillons d'inconel 718.

Le calcul de la fonction de ressemblance, pour les échantillons d'acier 316L, ayant des surfaces polies, montre que le degré moyen de corrélation des pièces poreuses (égale à 0,95) est inférieur à celui des pièces saines (égale à 0,99). Ainsi, le caractère poreux des échantillons en acier 316L est mis en évidence par la fonction de ressemblance évaluée sur une surface polie.

La même analyse, appliquée à des échantillons d'acier 316L, ayant une surface rugueuse, rend également compte du caractère poreux notamment à travers l'écart type de la fonction de ressemblance qui est de 0,24 pour les échantillons présentant des variations de « hatch » et seulement de 0,015 pour l'échantillon de référence. Ainsi, la différence du taux de porosité, d'environ 8%, d'un échantillon de référence ($\Phi \sim 1,9\%$) et d'un échantillon poreux ($\Phi \sim 10\%$) est mise en évidence par la détermination du degré de ressemblance, même sur une surface rugueuse. Notons que cette méthode ne nécessite que quelques signaux par position de mesure et pourrait donc être utilisée dans le cadre d'un contrôle *in situ*.

Cependant, une des limites de cette méthode est mise en évidence à travers l'étude de cas d'échantillons en inconel 718. En effet, pour ce lot d'échantillons, la différence de taux de porosités entre un échantillon de référence et un échantillon poreux est de 0,45%, donc bien inférieure au lot d'acier 316L. Dans ce cas, où la variation du taux de porosités est faible d'un échantillon à l'autre, la fonction de ressemblance ne rend plus compte des différences de taux de porosités des échantillons. Une perspective à notre étude, repoussant les limites de cette méthode, serait de considérer le signal diffusé. Ici, seule l'onde de Rayleigh a été considérée, mais il pourrait être pertinent de travailler avec le signal diffusé. Les ondes multiples diffusées sont celles qui ont sondé le milieu le plus longtemps, aussi, elles portent une partie de l'information non négligeable.

Ainsi, on se propose d'évaluer une autre méthode qui permettrait de discriminer plus précisément un échantillon de référence d'un échantillon poreux, notamment pour des taux de porosités proche comme pour le lot de pièces en inconel 718.

5.4. Caractérisation du taux de porosités par Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse de données qui consiste à transformer des variables liées entre elles en nouvelles variables décorrélées les unes des autres [99-101]. Géométriquement, cet outil mathématique permet de représenter les variables dans un nouvel espace. D'un point de vu statistique, il permet de réduire la population à un échantillon de variables portant l'information de l'ensemble de la population.

5.4.1. Principe de l'ACP

Dans notre cas d'étude, les variables sont les A-scans concaténés, selon les colonnes, dans une matrice signal notée A . L'ACP repose sur la décomposition en valeurs singulières (Singular Value Decomposition, SVD) de la matrice A , sa décomposition est donnée par l'équation suivante :

$$A = U\Sigma V^* \quad (5.1)$$

où U est une matrice unitaire $m \times n$ dont les colonnes sont les vecteurs propres orthogonaux notés U_m et appelés composantes, Σ est une matrice $n \times n$ diagonale composée des valeurs singulières $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_n$, et V est une matrice $n \times n$ unitaire. Les valeurs singulières sont rangées, par ordre décroissant. Le principe de la SVD est illustré par la Figure 5-14.

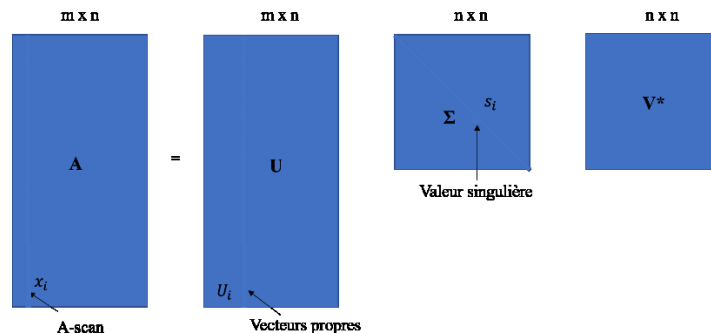


Figure 5-14 Illustration du principe de la décomposition SVD pour une matrice signal A . La matrice signal est la concaténation, selon les colonnes, de l'ensemble des signaux A-scans acquis sur les échantillons.

Dans notre application de l'ACP, la dimension m représente le temps d'acquisition et vaut $3,15 \mu s$ puisqu'on ne considère pas la totalité d'une acquisition A-scan mais uniquement une portion de celle-ci, comportant l'onde de Rayleigh. La dimension n correspond aux nombres de A-scans pris en compte pour la SVD. La dimension n , est déterminée à partir :

- du nombre de pièces considérées pour la SVD, noté l , (5 pour le lot d'échantillon en acier 316L, et 3 pour le lot d'échantillon en inconel 718) ;
- du nombre de A-scans acquis sur chaque échantillon, noté k , et égal à 20 pour l'ensemble de nos travaux.

Ainsi, pour une décomposition la dimension n de la matrice A est donné par : $n = l \times k$.

De par la définition de l'ACP, le premier vecteur propre U_0 est associé avec la première, et la plus importante valeur singulière, s_0 . En d'autres termes, U_0 est le vecteur propre qui possède le plus grand degré de ressemblance avec les signaux de la matrice A . Les autres vecteurs propres, par définition, sont orthogonaux les uns aux autres. Ainsi, l'ensemble des vecteurs propres décrivent la totalité des signaux de A . Par ailleurs, les valeurs singulières, s_n , associées aux vecteurs propres correspondent au « poids » de la contribution de chaque vecteur dans la description des signaux A .

Ainsi, l'objectif de l'ACP est ici d'étudier la corrélation des signaux avec les vecteurs propres afin d'évaluer cette méthode pour discriminer des signaux acquis sur des pièces saines, des signaux acquis sur des pièces poreuses. Pour ce faire, il faut déterminer le nombre de vecteurs propres utiles pour effectuer l'ACP. Une des méthodes consiste à rechercher un changement de pente dans l'ébouilissement des valeurs singulières (critère de Cattell *et al.* [98]). Les q vecteurs propres conservés pour l'analyse se situent avant ce point. La Figure 5-15 présente l'ébouilissement des valeurs singulières issues de la SVD pour la matrice A comprenant les signaux A-scans acquis sur des échantillons en acier 316L polis : 1, 2, 3, 4 et 5.

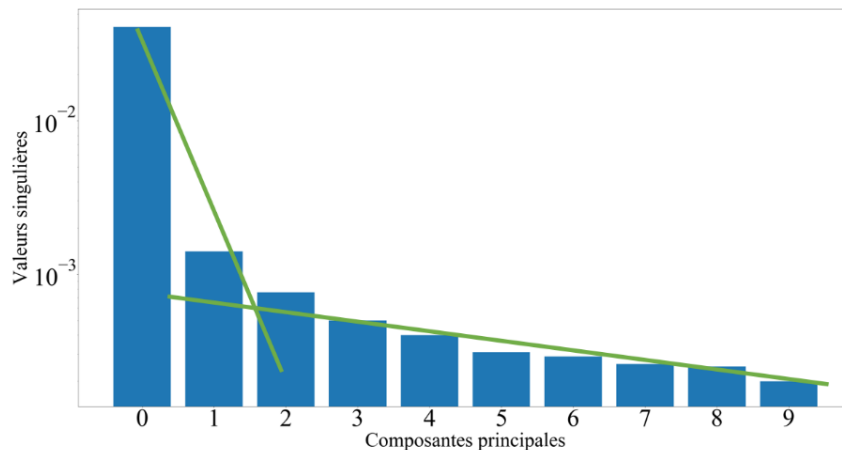


Figure 5-15 Ébouilissement des valeurs singulières pour les échantillons en acier 316L sur une surface polie. Les deux premières composantes portent la majorité de l'information selon le critère de Cattell.

Les signaux de la matrice A sont donc essentiellement décrits par les composantes retenues par le critère de Cattell. À ce titre, on peut évaluer le pourcentage d'inertie, noté I_i , des composantes i , donné par l'expression suivante :

$$I_i = \frac{s_i}{\sum_{k=0}^{k=n} s_k} \quad (5.2)$$

où les s_i sont les valeurs singulières.

Dans cette étude, nous utiliserons deux représentations graphiques pour analyser les signaux par l'ACP : le plan factoriel et le cercle des corrélations, illustrées sur la Figure 5-16 .

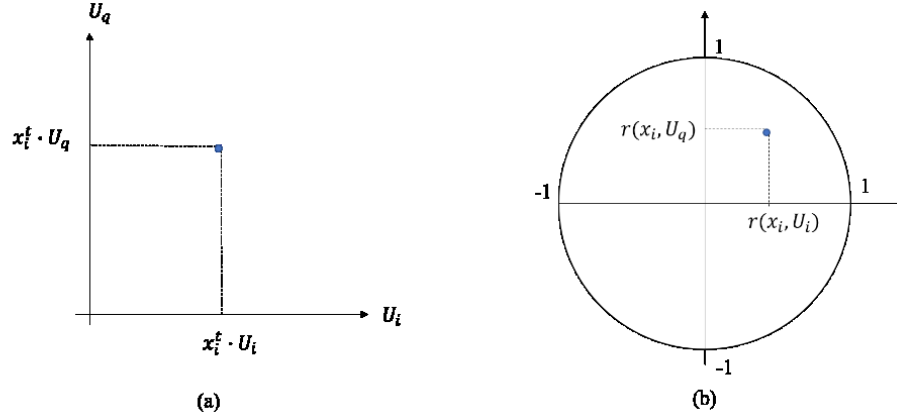


Figure 5-16 Représentations graphiques des données issues de l'ACP. (a) Le plan factoriel est la projection des A-scans x_i dans un plan formé de deux composantes U . (b) Le cercle des corrélations est la projection des corrélations des A-scans avec une composante U .

Un plan factoriel est formé par deux vecteurs propres et les A-scans de la matrice A sont projetés dans ce plan. Pour faciliter l'interprétation des données, on peut également synthétiser les corrélations des signaux avec les composantes i tel que chaque A-scan x^n est repéré par son coefficient de corrélation avec un vecteur propre (U_i, x^n) . Pour chaque pièce, on représentera la moyenne des coefficients de corrélation de l'ensemble des A-scans dont l'expression est rappelée ci-dessous :

$$r(U_i, x^j) = \frac{1}{k} \sum_{j=0} \frac{cov(U_i, x^j)}{\sqrt{var(U_i) \cdot var(x^j)}} \quad (5.43)$$

où k est le nombre de signaux considéré pour chaque pièce. La qualité de la représentation d'une variable sur une composante est donnée par le cosinus carré de l'angle formé par le point représentant le A-scan et l'axe factoriel. Ainsi, un point est parfaitement corrélé avec une composante lorsque la corrélation est égale à l'unité.

Afin de décorréler la porosité de la rugosité, l'ACP est effectuée pour des surfaces polies dans un premier temps puis pour des surfaces rugueuses dans un second temps.

5.4.2. ACP dans l'acier 316L

Une partie des signaux acquis sur les cinq échantillons en acier 316L est utilisée pour la SVD comme décrits ci-dessus et les signaux de la matrice A sont ensuite analysés au moyen de leur projection dans un plan factoriel et dans un cercle de corrélation. Des A-scans également acquis sur les cinq échantillons, et ne participant pas à l'obtention des vecteurs propres, sont projetés dans les deux représentations afin de vérifier que les projections obtenues rendent compte ou non d'un critère pour

discriminer les données. Pour faciliter la lecture des données, les deux échantillons sains ont été traités ensemble et sont représentés par un seul jeu d'A-scans, noté « bulk ».

- Surface polie

Il s'agit dans un premier temps de déterminer les vecteurs propres les plus pertinents pour former le plan factoriel. On a vu sur la Figure 5-15 que les deux premiers vecteurs U_0 et U_1 étaient retenus. L'inertie des composantes 0 et 1 est respectivement de 90,4 % et 3,1 % d'après l'équation 5.2. L'inertie cumulée pour ces deux vecteurs est donc de 93,5 %. Ces deux premiers vecteurs propres, notés U_0 , U_1 , sont tracés sur les Figure 5-17.

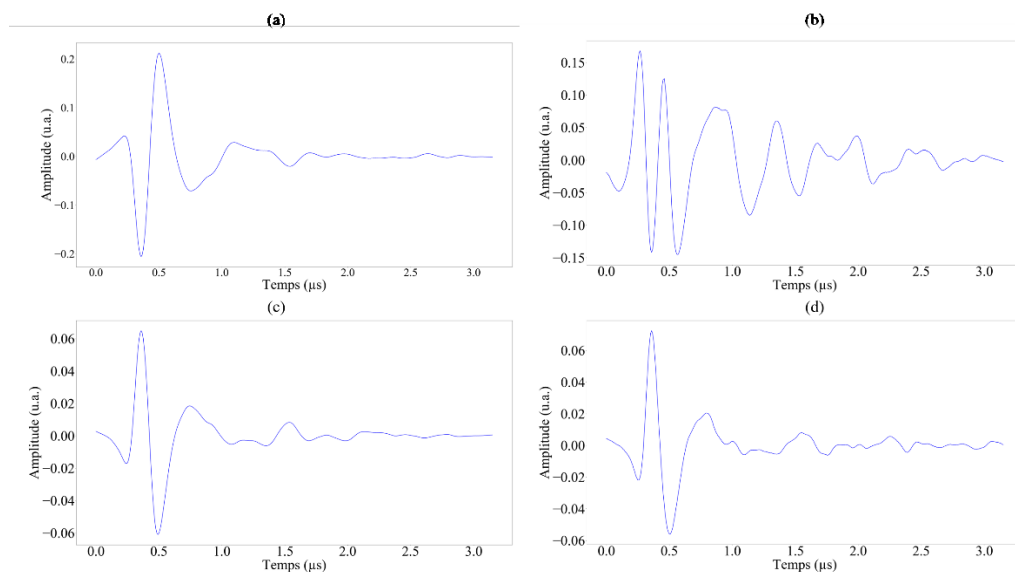


Figure 5-17 Mise en évidence de l'information contenue dans les deux premières composantes de l'ACP pour un signal acquis sur un échantillon de référence en acier 316L. (a) Première composante, U_0 . (b) Deuxième composante, U_1 . (c) Reconstruction du signal à partir des deux premières composantes U_0 et U_1 . (d) Signal brut avant la décomposition.

Le premier vecteur propre s'apparente à une onde de Rayleigh se propageant sur une surface polie, dans un milieu non poreux. Le second vecteur peut être interprété comme une perturbation induite par la présence de porosités, comme nous l'avons observé sur la Figure 5-8. La Figure 5-17-c montre que le signal initial (Figure 5-17-d) est presque entièrement décrit par les composantes U_0 et U_1 .

Les Figure 5-18 présentent la projection des A-scans du lot d'échantillons en acier 316L, dont la surface est polie, dans le plan factoriel (U_0 , U_1). Les points rouge, bleu, vert et magenta correspondent à un premier jeu d'acquisition, les points de couleurs plus clairs correspondent au deuxième jeu de A-scans évoqués dans l'introduction de ce paragraphe.

Dans le plan factoriel (U_0 , U_1), le nuage de points des données de référence (en rouge sur la Figure 5-18) et les nuages de points des données issues des pièces poreuses (en vert, bleu et magenta) se distinguent aisément. Les Figure 5-19 présentent le cercle des corrélations et les valeurs des corrélations moyennes des données avec les composantes U_0 et U_1 . La corrélation des variables de l'échantillon 316-bulk avec la composante U_0 (en rouge sur la figure) est égale à 97%. L'onde de Rayleigh de l'échantillon 316-bulk est donc essentiellement constituée du vecteur propre U_0 . En revanche, les corrélations des A-scans issus des échantillons poreux avec la composante U_0 , sont inférieures à celle de l'échantillon 316-bulk, et environ égale à 90 %. Ceci met en évidence que l'onde de Rayleigh est perturbée par la présence de porosités sub-surfaciques. Ainsi, la contribution de U_0 tend

à diminuer avec la porosité. Néanmoins, la valeur absolue des corrélations des variables avec U_1 est quasiment identique pour l'échantillon de référence (1) et l'échantillon avec un « hatch » dégradé (5). Seul le signe de la corrélation est différent. La composante U_1 participe négativement aux A-scans de l'échantillon de référence et positivement aux A-scans des échantillons avec un « hatch » dégradé.

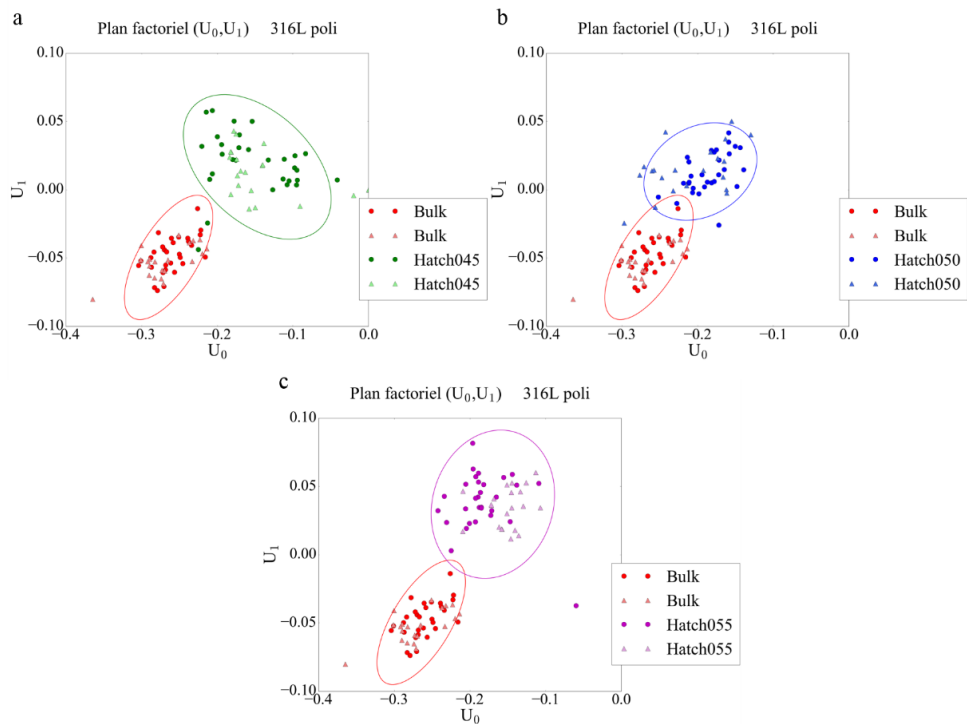


Figure 5-18 Plan factoriel (U_0, U_1) et projections des données issues des échantillons en acier 316L polis. (a) Discrimination des A-scans issus de la pièce 3 de la pièce 316-bulk. (b) Discrimination des A-scans issus de la pièce 4 de la pièce 316-bulk. (c) Discrimination des A-scans issus de la pièce 5 de la pièce 316-bulk.

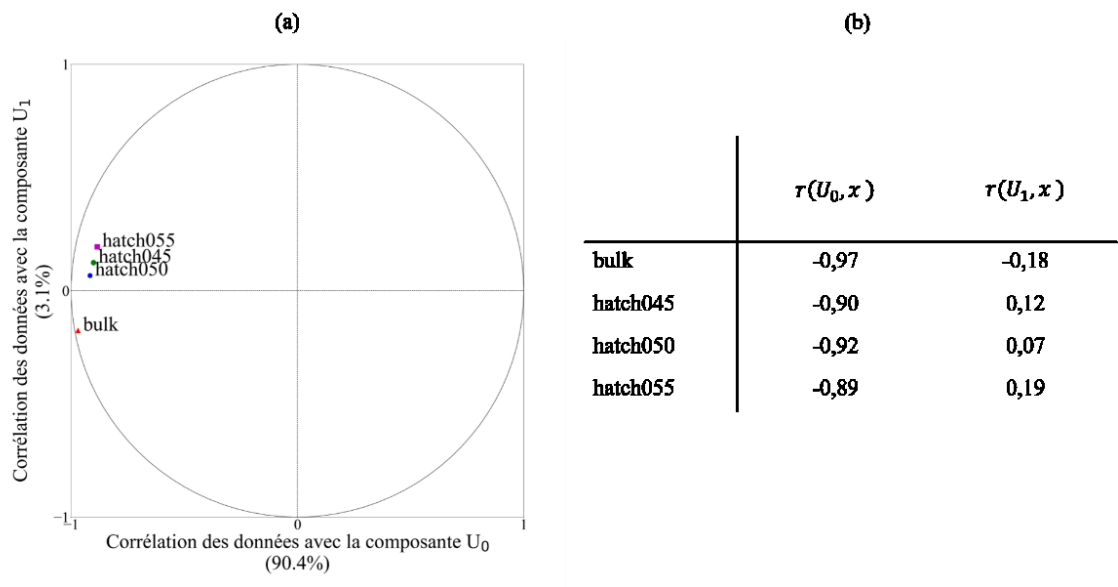


Figure 5-19 Cercle des corrélations pour les échantillons en acier 316L sur surface polie. (a) Discrimination des A-scans du lot d'échantillons en acier 316L poli sur le cercle des corrélations tracé pour les composantes U_0 et U_1 . (b) Corrélations moyennes des A-scans issus des différents échantillons avec les composantes U_0 et U_1 .

Les A-scans, qu'ils soient issus d'une pièce de référence ou d'une pièce poreuse, sont en opposition de phase avec le premier vecteur propre U_0 . La corrélation négative des A-scans avec une composante traduit une opposition de phase entre le vecteur propre et le signal. De même, le A-scan issu d'une pièce saine est en opposition de phase avec le second vecteur propre et celui issu d'une pièce poreuse est en phase. Ceci est dû au fait que la matrice U est composée de vecteurs orthogonaux.

Si l'ACP permet de différencier l'échantillon de référence (316-bulk) des autres, elle ne permet pas de caractériser les taux de porosités, des échantillons poreux. Les taux de porosités étant très proches ($\approx 10\%$), on ne peut pas conclure quant à la sensibilité de discrimination de l'ACP, nous préciserons ce point à travers l'étude du second lot d'échantillons en inconel 718.

- **Surface rugueuse**

La matrice A des échantillons de surfaces rugueuses est décomposée par SVD, afin d'évaluer la sensibilité de la méthode à l'état de surface. La Figure 5-20 montre que l'on peut retenir les deux premières composantes pour l'ACP.

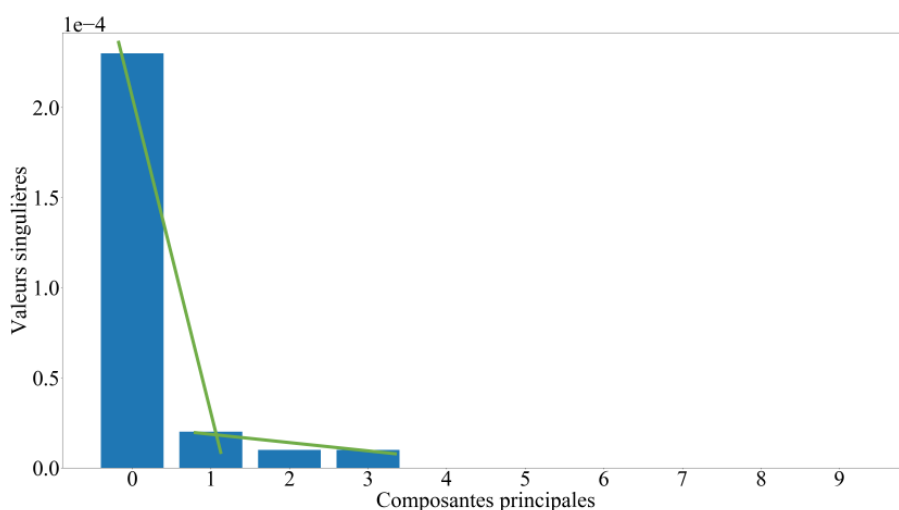


Figure 5-20 Éboulis des valeurs singulières pour les échantillons en acier 316L sur surface rugueuse.

Les deux premières composantes portent respectivement 85,2 % et 7,2 % de l'information. Pour faciliter la lecture du plan factoriel, les données des échantillons poreux sont représentées avec les données de l'échantillons de référence sur les Figure 5-21, représentant le plan factoriel (U_0 , U_1).

En revanche, la tendance de la contribution de U_1 pour les pièces poreuses est la même sur la surface polie et sur la surface rugueuse : elle augmente avec le « hatch ». L'aspect poreux semble prendre le pas sur l'aspect rugueux. Pour confirmer cette observation, nous nous proposons d'effectuer l'ACP pour une matrice A formée par la concaténation des A-scans extraits sur l'ensemble des échantillons de surfaces polie et rugueuse. L'éboulis des valeurs singulières et le critère de Cattell indiquent que les deux premières composantes doivent être retenues. La Figure 5-23 présente la corrélation des A-scans, issus de l'ensemble des données du lot d'échantillons en acier 316L, avec les composantes U_0 et U_1 sur le cercle des corrélations.

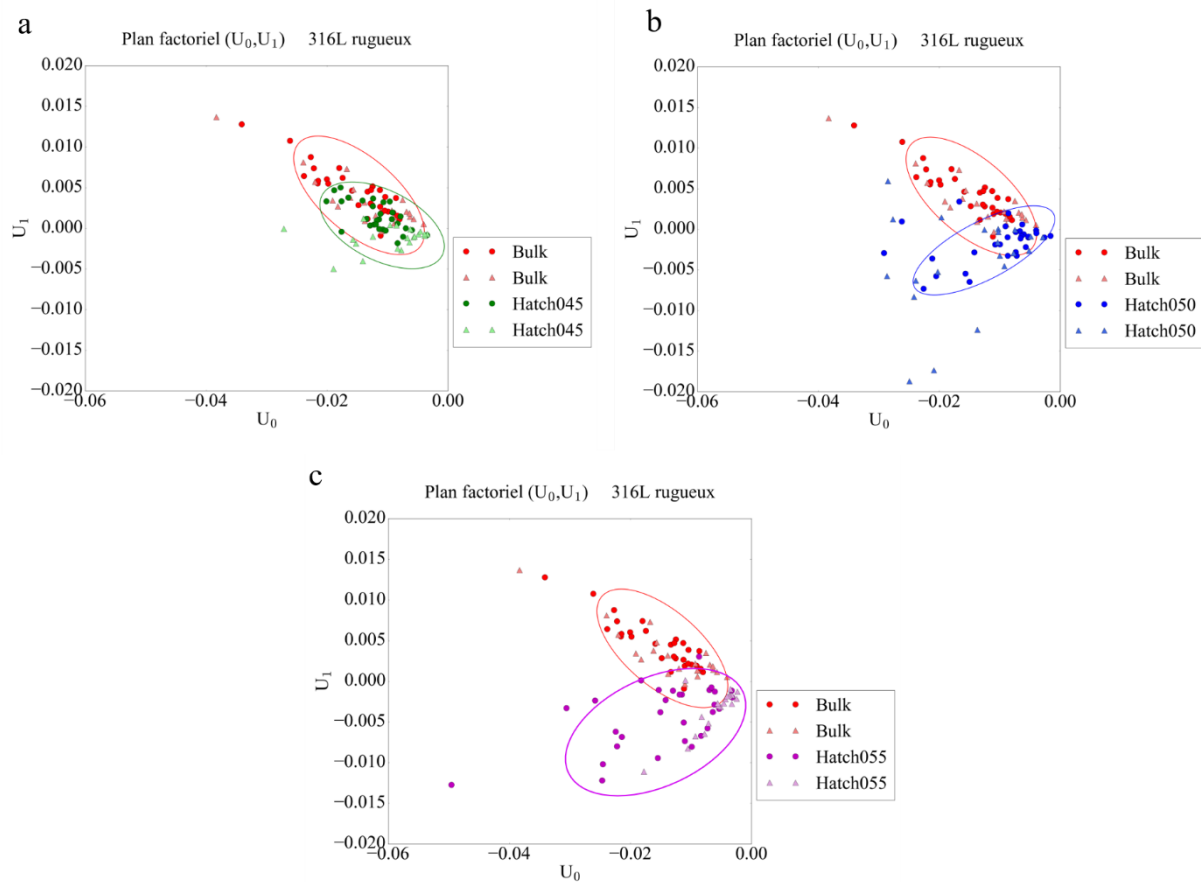


Figure 5-21 Plan factoriel (U_0, U_1) et projections des données issues des échantillons en acier 316L rugueux. (a) Discrimination des A-scans issus de la pièce 3 de la pièce 316-bulk. (b) Discrimination des A-scans issus de la pièce 4 de la pièce 316-bulk. (c) Discrimination des A-scans issus de la pièce 5 de la pièce 316-bulk.

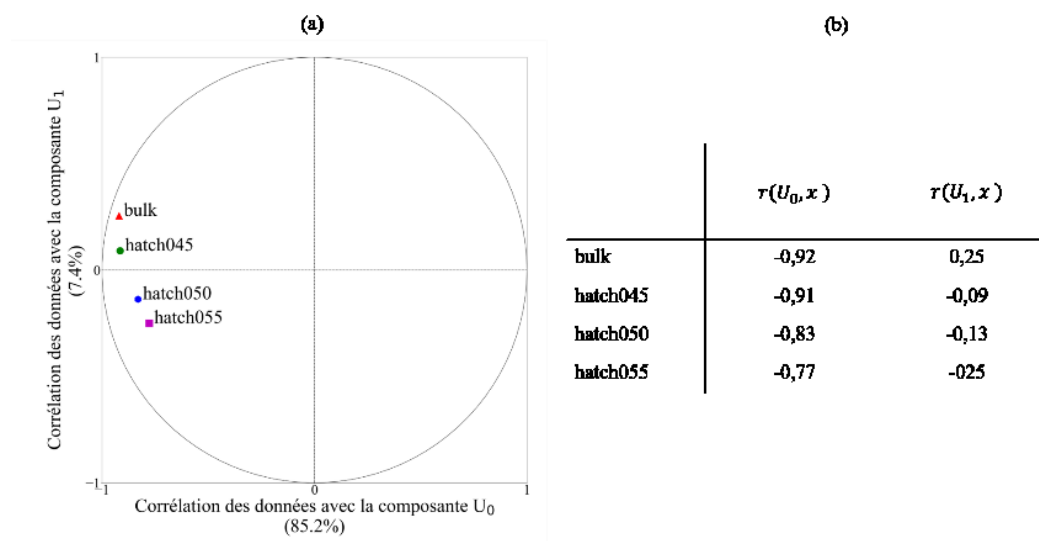


Figure 5-22 Cercle des corrélations pour les échantillons en acier 316L rugueux. (a) Discrimination des A-scans du lot d'échantillons en acier 316L sur le cercle des corrélations tracé pour les composantes U_0 et U_1 . (b) Corrélations moyennes des A-scans issus des échantillons en acier 316L rugueux avec les composantes U_0 et U_1 .

Tout d’abord, on constate qu’indépendamment de l’état de surface, les A-scans issus des pièces de référence ont une valeur de corrélation avec U_0 plus importante que les blocs poreux. Donc on peut conclure que l’aspect poreux prend le pas sur l’aspect rugueux. Puis, on peut également mettre en évidence que les A-scans issus des surfaces rugueuses sont moins corrélés avec U_0 que les A-scans issus des surfaces polies. Sur le cercle des corrélations, les deux points représentant les A-scans des milieux poreux ont une corrélation négative avec la composante U_1 . Ainsi, indépendamment de l’état de surface, les A-scans issus des échantillons de référence ont une corrélation avec U_1 opposée à celle des A-scans issus des pièces poreuses.

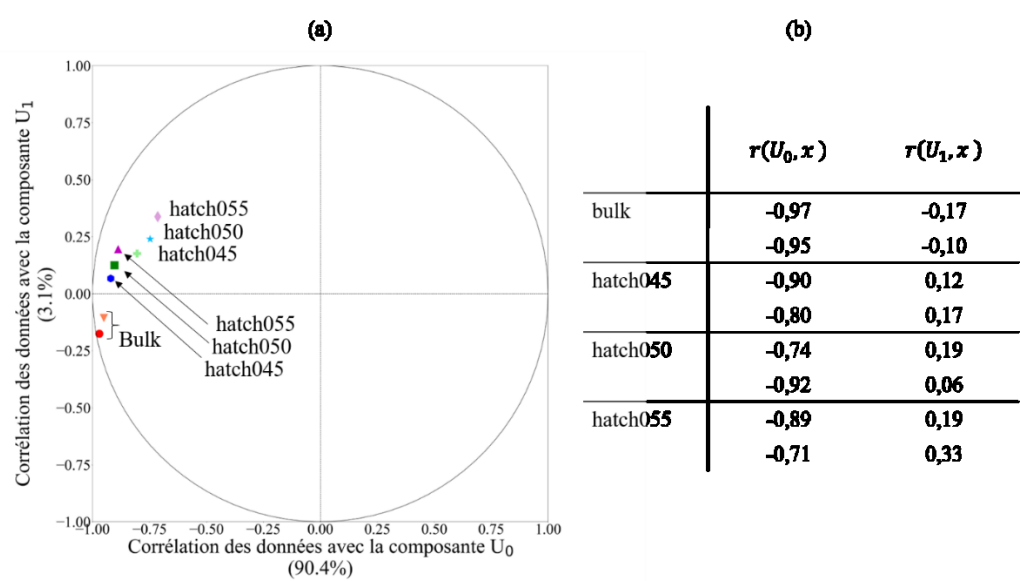


Figure 5-23 Cercle des corrélations pour les échantillons en acier 316L pour des surfaces polie et rugueuse. (a) Discrimination des A-scans du lot d’échantillons en acier 316L sur le cercle des corrélations tracé pour les composantes U_0 et U_1 . (b) Corrélations moyennes des A-scans issus des échantillons en acier 316L avec les composantes U_0 et U_1 .

L’ACP permet ainsi de mettre en évidence le caractère poreux d’un échantillon ayant un taux de porosités significativement différent de celui d’un échantillon sain indépendamment de l’état de surface.

5.4.3. ACP dans l’inconel 718

- **Sur surface polie**

Les pièces poreuses du lot d’échantillons d’inconel 718 comportent des taux de porosités très proches (bulk : 0,1 %, « hatch » : 0,7 % et powder : 0,4 %). L’ACP donnant des relations de corrélations plus détaillées, on cherche à évaluer cette méthode pour discriminer ces deux échantillons. La Figure 5-24 présente l’éboullis des valeurs singulières. D’après le critère de Cattell [98], les deux premières composantes contiennent l’information pertinente. L’inertie pour ces deux axes est respectivement 94,9 % et 3,1 %.

Les Figure 5-27 présentent la projection des données dans le plan factoriel formé des vecteurs U_0 et U_1 et le cercle des corrélations associé. Les trois nuages de points, correspondant aux données issues des pièces 6, 8 et 7, sont nettement distincts. Le nuage de point rouge possède une corrélation très forte

avec la composante U_0 égale à 99 %, et, *a contrario*, très faible avec la composante U_1 : 3%. L'onde de Rayleigh de la pièce de référence est donc presque uniquement décrite par la composante U_0 . Les variables issues des échantillons 8 et 7 ont une corrélation moindre avec la composante U_0 (respectivement 96 % et 95 % d'après la Figure 5-25-b). À l'inverse, la contribution de U_1 augmente avec la porosité aussi bien pour la pièce 8 que pour la pièce 7. Cependant, les variables de l'échantillon 8 contribuent positivement à la composante U_1 tandis que les variables de l'échantillon 7 y contribuent négativement. Il y a donc un déphasage différent entre les A-scans des échantillons 8 et 7 avec la composante U_1 , ce qui permet de les différencier aisément sur le cercle des corrélations.

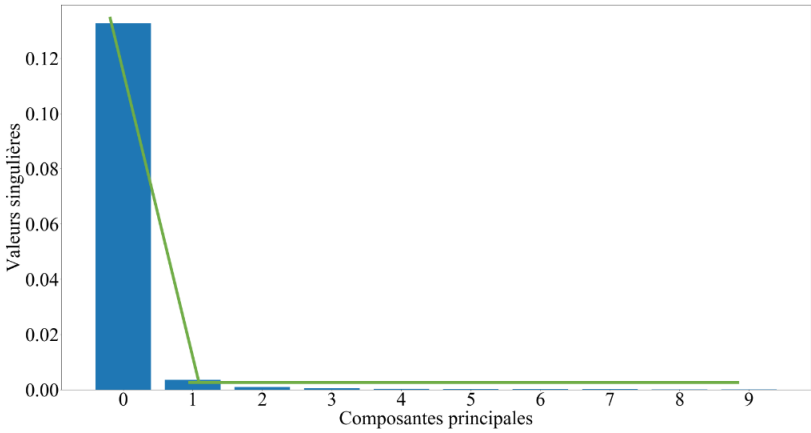


Figure 5-24 Échelle des valeurs singulières pour les échantillons en Inconel 718 sur surface polie.

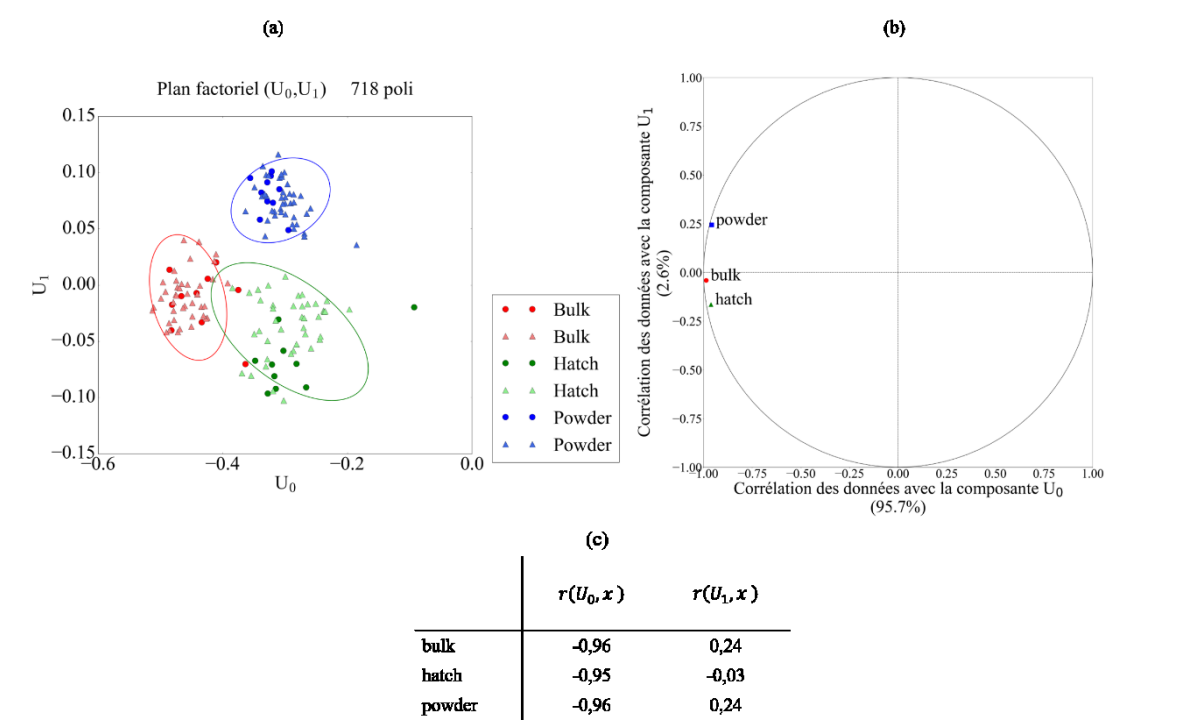


Figure 5-25 (a) Plan factoriel (U_0, U_1) et projections des données issues du lot d'échantillons en Inconel 718 sur surface polie. (b) Cercle des corrélations pour les échantillons en Inconel 718 sur surface polie. (c) Corrélations moyennes des A-scans issus des échantillons de surface polie.

L'ACP appliquée aux données des échantillons inconel 718 sur surface polie permet de distinguer les trois taux de porosités (0,1% 0,4 % et 0,7 %) associés aux différents échantillons du lot d'inconel 718. L'ACP s'avère donc pertinente pour discriminer des échantillons poreux dont les taux de porosités sont proches, contrairement au calcul de la fonction de ressemblance détaillé au paragraphe 5.3.

- **Sur surface rugueuse**

Dans la suite de ce paragraphe, l'ACP est évaluée au regard des échantillons en inconel 718 sur surface rugueuse. Pour les échantillons en inconel 718 dont la surface est rugueuse, l'éboulis des valeurs singulières est représenté sur la Figure 5-26. Le critère de Cattell permet de retenir les deux premières composantes 0 et 1.

Sur la Figure 5-28, les A-scans sont projetés dans le plan factoriel (U_0, U_1). Cette représentation ne permet pas de différencier les nuages de points, excepté pour l'échantillon 7. Le cercle des corrélations montre que la distance au centre du point, représentant la corrélation moyenne des variables de la pièce 718- hatch, est faible. L'état de surface de l'échantillon 7 est tel que l'amplitude de l'onde de Rayleigh est bien inférieure à celle des échantillons 6 et 8. Ainsi, les vecteurs propres donnés par l'ACP décrivent essentiellement ces deux échantillons. Le cercle des corrélations montre que les contributions de U_0 et U_1 sont identiques pour les variables issues des échantillons 6 et 8, il est donc impossible de différencier les deux échantillons sur ce plan. On se propose de projeter les données dans un plan faisant intervenir la troisième composante : U_2 . Les Figure 5-28 présentent la projection des données dans le plan (U_0, U_2) et sur le cercle des corrélations.

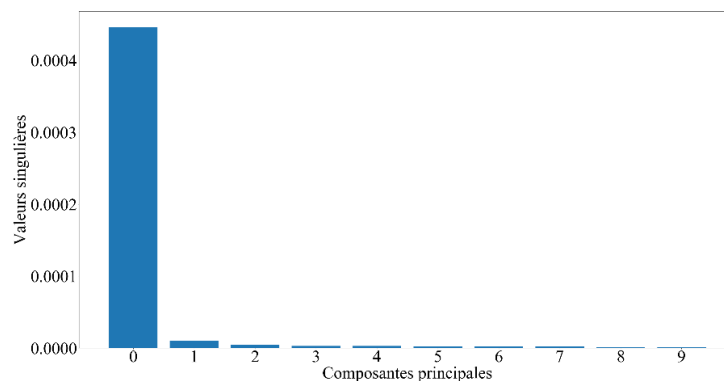


Figure 5-26 Éboulis des valeurs singulières pour les échantillons en inconel 718 sur surface rugueuse.

Le cercle des corrélations, Figure 5-28-b, montre que les données des échantillons 6 et 8 sont bien représentés par ce plan. Les A-scans issus de la pièce 7, comme pour le plan (U_0, U_1) sont peu corrélés aux composantes 0 et 2. Dans le plan factoriel (U_0, U_2), les données issues des échantillons 6 et 8 sont clairement différenciées grâce à la contribution de la composante U_2 . Le cercle des corrélations montre que les données issues de la pièce de référence participent positivement suivant l'axe U_2 , tandis que les données issues de la pièce 8 participent négativement suivant l'axe U_2 . Le déphasage des A-scans avec ce vecteur propre est donc différent selon la qualité de l'échantillon et permet de faire la distinction entre les deux jeux de A-scans, pour les échantillons considérés dans cette étude.

L'ACP permet donc de distinguer les deux échantillons en inconel 6 et 8 sur une surface rugueuse ce que ne permettait pas la méthode exploitant le degré de ressemblance.

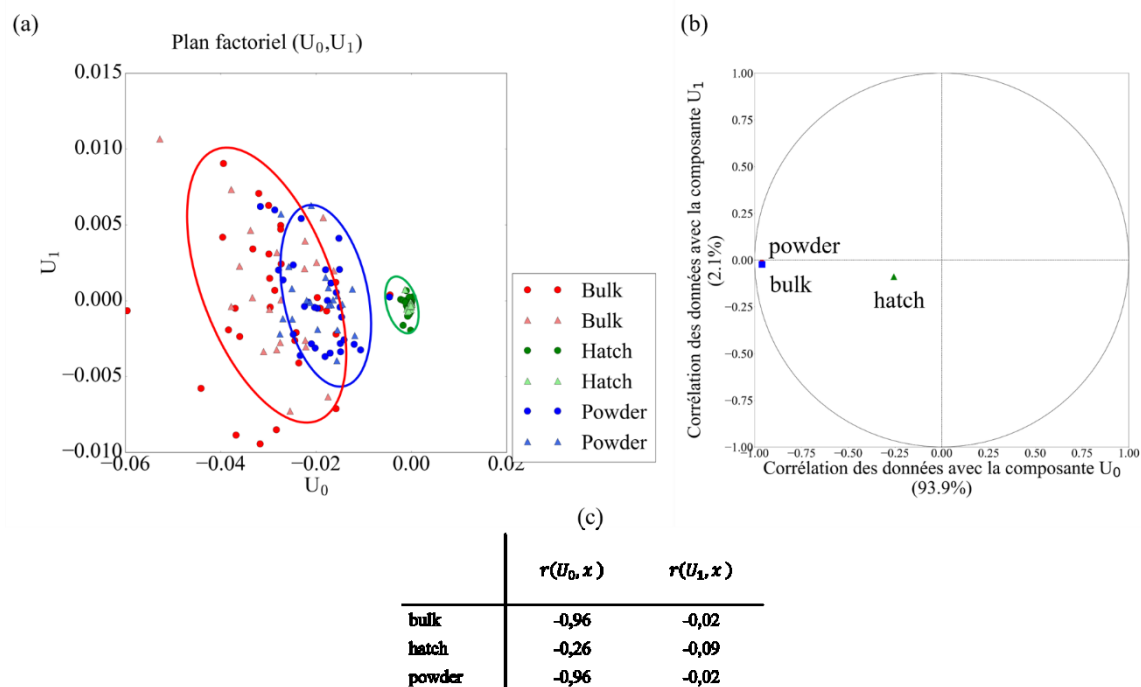


Figure 5-27 (a) Projections des A-scans, issus du lot d'échantillons en inconel 718 sur surface rugueuse, dans le plan factoriel (U_0, U_1). (b) Cercle des corrélations pour les échantillons en acier 718 sur surface rugueuse. (c) Corrélations moyennes des A-scans issus

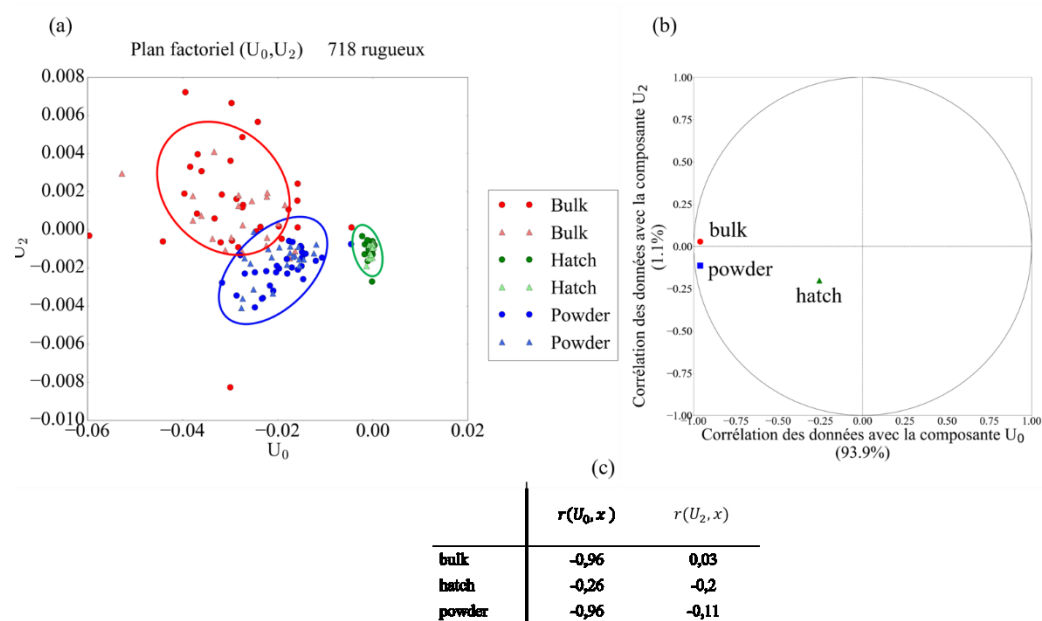


Figure 5-28 (a) Projections des A-scans, issus du lot d'échantillons en inconel 718 sur surface rugueuse, dans le plan factoriel (U_0, U_2). (b) Cercle des corrélations pour les échantillons en acier 718 sur surface rugueuse. (c) Corrélations moyennes des A-scans issus des échantillons en inconel 718 avec les composantes U_0 et U_2 .

L'ACP permet de distinguer, sur les surfaces polies, comme sur les surfaces rugueuses, les pièces de référence des pièces poreuses, et ce pour les deux matériaux considérés à savoir l'inconel 718 et l'acier 316L.

Cette méthode d'analyse, contrairement au calcul du degré de ressemblance permet de distinguer des taux de porosités proches (0,1% et 0,4% pour les échantillons 718- powder et 718- bulk du lot en inconel 718 par exemple) pour nos échantillons.

Si l'ACP a permis de mettre en évidence différents taux de porosités grâce aux corrélations des A-scans avec les vecteurs propres, ces valeurs de corrélation ne trouvent pas d'explication physique. Néanmoins, il n'est pas exclu que l'ACP pourrait permettre de différencier les taux de porosités, et ce pour des matériaux différents avec des tailles et nombres de porosités variés. L'ACP reste donc un outil mathématique. Un A-scan simulé dont on peut faire varier l'amplitude et la phase, permettrait de comprendre l'influence des modifications du signal sur ses corrélations avec les vecteurs propres.

5.5. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'étudier des méthodes de traitement du signal ultrasonore permettant de mettre en évidence un taux de porosités sub-surfaciques, à partir d'une acquisition sur surface rugueuse. Deux méthodes de traitement du signal ont été évaluées, elles exploitent l'amplitude et le déphasage de l'onde de Rayleigh dues à la diffusion par les porosités.

La méthode par corrélation, exploitant le degré de ressemblance des signaux acoustiques, est une méthode simple à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite seulement de calculer la fonction de ressemblance des signaux. Elle est pertinente lorsque le taux de porosités est significativement grand au regard de celui d'une pièce saine, c'est-à-dire pour environ 10 %. Cependant, elle montre ses limites, lorsque le taux de porosité est proche de celui de la pièce sans porosités (1 %). Une perspective, pour repousser ses limites, serait de considérer l'onde de Rayleigh diffusée et non plus l'onde de Rayleigh cohérente. Cette méthode est rapide à mettre en œuvre et ne nécessite que peu de moyennage du signal. Elle est donc une bonne candidate pour un contrôle *in situ*.

La méthode d'ACP requiert plus de traitement et est soumise à l'évaluation du nombre de composantes pertinentes pour l'analyse des données. Cependant, en décomposant le signal selon les différents vecteurs propres, elle permet d'être sensible à de faibles perturbations de l'onde de Rayleigh grâce à l'évaluation des contributions de chaque composante. Ainsi, les pièces dont les taux de porosités sont proches, sont discriminées. Une perspective consisterait à qualifier la contribution des composantes en fonction des variations d'amplitude et de phase de l'onde de Rayleigh simulée. Ainsi, on pourrait quantifier la corrélation de ce dernier avec les composantes en fonction des modifications de l'onde. Si en parallèle, une étude de la quantification de l'amplitude et de la phase de l'onde de Rayleigh en fonction du taux de porosités est menée, alors il serait possible de donner les limites de discrimination des taux de porosités par l'ACP.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était d'évaluer les performances des ultrasons-laser (UL) au regard de la génération d'ondes surfaciques afin de réaliser un contrôle de défauts dans des pièces issues du procédé de fabrication additive de Déposition Métallique par Laser (DML). Ces pièces ont la particularité de présenter une surface rugueuse, diffusante et peu réfléchissante. L'ensemble de nos travaux s'est inscrit dans la perspective d'intégrer un système UL dans une machine du procédé DML pour contrôler les derniers cordons déposés. La génération d'une onde de Rayleigh par une ligne source a été privilégiée et les dimensions de cette ligne ont été optimisées afin d'engendrer un contenu spectral atteignant 10 MHz. En conséquence, un dispositif optique a été conçu pour optimiser cet engendrement. Nous avons mis en évidence les limites de détection de cette configuration sur des défauts calibrés : des entailles et des trous génératrice usinés dans des pièces fabriquées par le procédé DML. Par ailleurs, nous avons montré que la détection de défauts usinés, dont les dimensions sont inférieures ou égale à la longueur d'onde de Rayleigh, sur surface rugueuse, était possible. Enfin, nous avons proposé deux méthodes de corrélation pour détecter des porosités proches d'une surface diffusante de diamètre submillimétrique ($\sim 100 \mu\text{m}$).

Tout d'abord, nous avons rappelé, **au chapitre 1**, le comportement multi-physique du procédé DML et plus particulièrement, l'influence de ses quatre principaux paramètres opératoires : le débit massique de poudre, la puissance et le diamètre du faisceau laser, et la vitesse de déplacement de la buse. Une variation, même faible, de ces paramètres, peut provoquer l'apparition de défauts tels que des variations de microstructure, des variations de la géométrie de la pièce ou encore l'apparition de fissurations ou de porosités de quelques centaines de micromètres. Nous avons constaté que, pris indépendamment les uns des autres, il n'existe pas de contrôle *in situ* qui garantit la répétabilité du procédé DML. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur la détection de porosités et fissuration. Ces défauts sont détectés par des contrôles non destructifs (CND) qui n'ont été transposés que très récemment à la fabrication additive. Après une revue des différentes méthodes existantes, les ultrasons-lasers, sans contact et engendrant une large bande fréquentielle, sont apparus comme pertinents pour un contrôle *in situ* du procédé DML.

Le **chapitre 2** s'est focalisé sur la génération et la détection d'onde de Rayleigh par UL et de son exploitation pour le contrôle. L'onde de Rayleigh est une onde surfacique ; son énergie décroît exponentiellement en fonction de la profondeur. Elle interagit avec le milieu dans lequel elle se propage, et subit une atténuation d'origine viscoélastique et/ou diffusive. Les principaux modes d'interaction laser-matière conduisant à la génération d'ondes ultrasonores dans un solide ont été présentés. Pour détecter des défauts de l'ordre de $100 \mu\text{m}$, le contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh doit s'étendre jusqu'à 10 MHz.

De plus, l'état de l'art relatif à la détection de défauts surfaciques et sub-surfaciques montre que la génération en ligne source favorise la génération de l'onde de Rayleigh, c'est pourquoi cette configuration a été retenue. Par ailleurs, la littérature souligne que la détection et la caractérisation de défauts dont les dimensions, d , sont inférieures à la longueur d'onde de Rayleigh, λ_R , n'est pas aisée.

Enfin, les contrôles de pièces issues du procédé DML, présentant une surface diffusante et des défauts réels, n'ont pas été traités dans la littérature. Ainsi, les méthodes de caractérisation des entailles et trous génératrice, vues dans l'état de l'art, doivent être testées au regard du contenu fréquentiel de l'onde de Rayleigh et des dimensions des défauts.

Le **chapitre 3** s'est d'abord concentré sur l'évaluation des limites de détection du système disponible au laboratoire : les défauts surfaciques dont la hauteur et l'ouverture étaient de 100 μm n'étaient pas détectés. Cela s'expliquait par le contenu spectral de l'onde de Rayleigh dont les fréquences étaient inférieures à 3 MHz. Nous avons donc cherché à augmenter ce contenu spectral jusqu'à 10 MHz. Ainsi, une étude numérique a été menée ; elle était basée sur un modèle heuristique pour quantifier les dimensions de ces tâches. Le modèle, reposant sur le principe de Huygens, consistait à considérer les tâches focales comme des multitudes d'émetteurs et de récepteurs d'ondes de Rayleigh dites « élémentaires ». L'interférence de ces ondes élémentaires est à l'origine du contenu spectral. Une étude paramétrique, numérique et expérimentale, sur les dimensions des tâches focales a été menée pour déterminer lesquelles permettaient d'engendrer un contenu fréquentiel allant jusqu'à 10 MHz. Une ligne source, dont la largeur est d'environ 200 μm et la longueur d'environ 3 mm, a été retenue.

Cela nous a conduit à concevoir un nouveau montage optique permettant de former cette ligne source et une tâche focale de détection de 0,2 mm de diamètre. Le spectre de l'onde de Rayleigh est alors centré en 5 MHz et s'étend jusqu'à 10 MHz. La longueur d'onde, λ_R , à la fréquence centrale est égale à 0,7 mm. Forts de ce nouveau dispositif, nous avons pu initier les premiers tests expérimentaux sur des pièces réalisées en fabrication additive.

Ainsi, le **chapitre 4** visait à apprécier les limites de détection du dispositif conçu au chapitre 3, sur des pièces de fabrication additive (acier 316L et inconel 718), et comportant des défauts usinés (entailles et trous génératrices). Tout d'abord, le milieu issu du procédé DML a été caractérisé par UL. Une atténuation d'origine diffusive a été observée, ayant pour origine la microstructure des pièces réalisées par le procédé DML. De plus, une anisotropie élastique de type trigonal a été mise en évidence dans la direction perpendiculaire à la plus grande dimension des cordons : la vitesse de l'onde de Rayleigh, se propageant sur la face latérale de la pièce, est inférieure à celle de l'onde de Rayleigh se propageant sur la face supérieure.

Puis, nous avons montré que l'onde de Rayleigh induite par le dispositif optique optimisé est sensible à des défauts surfaciques dont les dimensions (ouvertures et hauteurs) sont inférieures à λ_R . Il en va de même pour les défauts sub-surfaciques (diamètre et profondeur des trous génératrice). Une limite au regard de la profondeur d'inspection a été observée lorsque le trou génératrice se situe à une profondeur proche de λ_R . Cette limite est atteinte plus rapidement dans une pièce de fabrication additive, du fait de l'atténuation d'origine diffusive. Sur surface rugueuse, l'atténuation de l'onde de Rayleigh, due à la diffraction par les rugosités, restreint les limites de détection notamment pour les défauts sub-surfaciques. Ainsi, les entailles dont la profondeur est environ égale à λ_R sont détectées. Néanmoins, seul le trou génératrice de profondeur et de diamètre 0,3 mm réfléchit l'onde de Rayleigh.

La dernière partie de ce chapitre discute de la caractérisation des défauts dans le domaine spectral. Nous avons montré que le spectre de l'onde réfléchi par les entailles est influencé par la hauteur de l'entaille, ce que nous avons confirmé par la mesure des coefficients de transmission : plus la hauteur de l'entaille est grande devant λ_R et plus le coefficient de transmission est faible. Les ondes réfléchies par les trous génératrice ont des spectres comportant des résonances induites par le rayonnement des ondes circonférentielles : à chaque tour ($2\pi a = n\lambda$), les ondes de surfaces, qui se propagent le long des extrémités de la cavité d'air, interfèrent constructivement engendrant ainsi un spectre. On a donc affaire à un système dit « bouclé en phase ».

À l'issue de ces études sur des défauts artificiels, nous nous sommes attachés à des études de cas réels. Le **chapitre 5** avait pour objectif de mettre en exergue la présence de défauts réels sous surface rugueuse. Ces défauts réels ont été engendrés par la variation du paramètre « hatch » du procédé DML, qui provoque l'apparition de porosités multiples au sein de la pièce. Deux méthodes de traitement du signal, l'intercorrélation et l'analyse en composantes principales, ont été employées afin de mettre

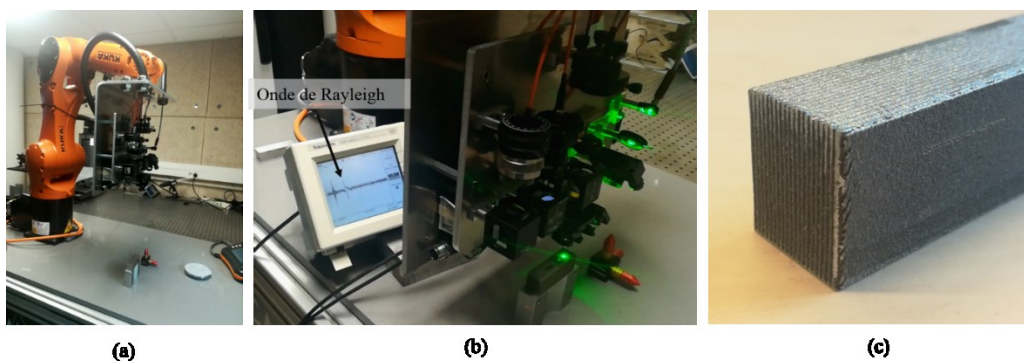
en évidence un taux de porosités subsurfaciques à partir d'une acquisition sur surface rugueuse. Elles exploitent les variations d'amplitude et le déphasage de l'onde de Rayleigh, dues à la diffusion par les porosités. La méthode par intercorrélation est pertinente, lorsque le taux de porosité (ϕ) est significativement plus élevé que celui d'une pièce saine, c'est-à-dire pour environ $\phi \sim 10\%$. Cependant, elle montre ses limites lorsque le taux de porosité est proche de celui de la pièce sans porosités ($\phi \sim 1\%$). L'analyse en composante principale permet d'être sensible à de faibles perturbations du front d'onde de Rayleigh. Elle a permis de différencier l'ensemble des pièces considérées comportant des taux de porosités différents à partir d'acquisitions sur surface rugueuse, pour les échantillons considérés dans notre étude.

Cette thèse est une contribution au développement des UL pour le contrôle *in situ* du procédé DML. Dans les travaux, nous avons œuvré à comprendre les phénomènes de diffraction et de diffusion de l'onde de Rayleigh dans un milieu issu de la fabrication additive. Plusieurs perspectives sont soulevées par nos travaux.

Perspectives

La compréhension des phénomènes de diffusion de l'onde de Rayleigh se propageant sur des surfaces rugueuses reste à approfondir pour exploiter, par exemple, la corrélation des signaux que nous avons exploitée. De plus, les phénomènes de diffusion dues aux porosités sub-surfaciques réelles sont encore à analyser. Des méthodes d'évaluation des dimensions des défauts pourront alors être développées tels que l'utilisation des réseaux de neurones comme l'ont récemment montré les travaux de Li et *al.* [96]. D'autres types de variations du procédé pourraient également être étudiés. On pourrait par exemple d'approfondir sur la quantification des contraintes résiduelles [100].

Par ailleurs, nos travaux ont été menés sur des pièces finies. En vue d'un contrôle *in situ*, il serait pertinent d'évaluer la vitesse des ondes de Rayleigh, se propageant dans une pièce soumise à des gradients thermiques, afin de déterminer les compensations relatives à la vitesse des ondes, nécessaires pour un contrôle. De plus, la vitesse de déplacement de la buse de fabrication est de quelques dizaines de millimètres par seconde ; il serait judicieux d'évaluer les cadences de contrôles ultrasonores possibles pour suivre le procédé de fabrication. Des tests préliminaires ont été faits : le dispositif optique a été transposé sur un robot et des premières mesures ont été effectuées sur un échantillon présentant une surface brute, diffusante. La figure ci-dessous présente un essai sur une pièce réalisée par le procédé DML dont l'état de surface est brut.



Tests préliminaires pour un contrôle en ligne. (a) Le dispositif optique est monté sur un bras robotisé. (b) L'onde de Rayleigh sur l'oscilloscope est obtenue sans moyennage du signal. (c) La pièce inspectée présente une surface brute, rugueuse et diffusante.

Références bibliographiques

- [1] T. DebRoy *et al.*, 'Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties', *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, 2018.
- [2] S. Morville, 'Modélisation multiphysique d'un procédé de fabrication additive', Université européenne de Bretagne, 2012.
- [3] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, and S. M. Thompson, 'An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing. Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control', *Addit. Manuf.*, vol. 8, pp. 12–35, 2015.
- [4] V. Ocelík, I. Furár, and J. T. M. De Hosson, 'Microstructure and properties of laser clad coatings studied by orientation imaging microscopy', *Acta Mater.*, vol. 58, no. 20, pp. 6763–6772, 2010.
- [5] G. P. Dinda, A. K. Dasgupta, and J. Mazumder, 'Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy', *Scr. Mater.*, vol. 67, no. 5, pp. 503–506, Sep. 2012.
- [6] M. Rombouts, G. Maes, W. Hendrix, E. Delarbre, and F. Motmans, 'Surface Finish after Laser Metal Deposition', *Phys. Procedia*, vol. 41, pp. 810–814, 2013.
- [7] P. Peyre, P. Aubry, R. Fabbro, R. Neveu, and A. Longuet, 'Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process', *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 2, 2008.
- [8] D. Boisselier and S. Sankare, 'Influence of Powder Characteristics in Laser Direct Metal Deposition of SS316L for Metallic Parts Manufacturing', *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 455–463, 2012.
- [9] X. Zhou, X. Liu, D. Zhang, Z. Shen, and W. Liu, 'Balling phenomena in selective laser melted tungsten', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 222, pp. 33–42, 2015.
- [10] E. Foroozmehr and R. Kokacevic, 'Modeling of the Effect of Path Planning on Thermokinetic Evolutions in Laser Powder Deposition Process', *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 42, no. 7, pp. 1907–1918, 2011.
- [11] A. H. Nickel, D. M. Barnett, and F. B. Prinz, 'Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 317, no. 1–2, pp. 59–64, 2001.
- [12] R. MEZARI, 'Etude du contrôle de procédé de projection laser pour la fabrication additive: Instrumentation, identification et commandes', Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2014.
- [13] T. Hua, C. Jing, L. Xin, Z. Fendying, and H. Weidong, 'Research on molten pool temperature in the process of laser rapid forming', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 198, no. 1, pp. 454–462, 2008.
- [14] J. T. Hofman, B. Pathiraj, J. Van dijk, D. F. De Lang, and J. Meijer, 'A camera based feedback control strategy for the laser cladding process', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 11, pp. 2455–2462, 2012.
- [15] S. Barua, F. Liou, J. Newkirk, and T. Sparks, 'Vision-based defect detection in laser metal deposition process', *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 1, pp. 77–85, 2014.
- [16] P. C. Collins, L. J. Bond, H. Taheri, T. A. Bigelow, M. R. B. M. Shoaib, and L. W. Koester, 'Powder-based additive manufacturing - a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology', *Int. J. Addit. Subtractive Mater. Manuf.*, vol. 1, no. 2, p. 172, 2017.
- [17] S. Chen, G. Guillemot, and C.-A. Gandin, 'Three-dimensional cellular automaton-finite element modeling of solidification grain structures for arc-welding processes', *Acta Mater.*, vol. 115, pp. 448–467, 2016.

-
- [18] L. Bouffier, 'Modélisation de la fissuration à chaud lors du soudage de l'alliage base nickel IN600', Université de Grenoble, 2018.
 - [19] L. Costa and R. Vilar, 'Laser powder deposition', *Rapid Prototyp. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 264–279, 2009.
 - [20] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, 'Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms', *Int. Mater. Rev.*, vol. 57, no. 3, pp. 133–164, May 2012.
 - [21] L. Wang, S. D. Fellicili, and P. Pratt, 'Residual stresses in LENS-deposited AISI 410 stainless steel plates', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 496, no. 1–2, pp. 234–241, Nov. 2008.
 - [22] M. L. Griffith *et al.*, 'Understanding thermal behavior in the LENS process', *Mater. Des.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 107–113, 1999.
 - [23] D. Boisselier, S. Sankare, and T. Engel, 'Improvement of the Laser Direct Metal Deposition Process in 5-axis Configuration', *Phys. Procedia*, vol. 56, pp. 239–249, 2014.
 - [24] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi, 'An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics', *Addit. Manuf.*, vol. 8, pp. 36–62, Oct. 2015.
 - [25] H. Taheri, 'Powder-based additive manufacturing - a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology', *Int. J. Addit. Subtractive Mater. Manuf.*, vol. 1, no. 2, pp. 172–209, 2017.
 - [26] Y. Liu, S. Yang, and C. Gan, 'Effect of variable cross-section rod on laser-induced surface acoustic waves', in *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016 13th International Conference on*, 2016, pp. 168–173.
 - [27] B. M. Sharratt, 'Non-Destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes', *No March*, 2015.
 - [28] S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, and A. T. Clare, 'Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing', *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 431–445, Apr. 2016.
 - [29] D. Hu and R. Kovacevik, 'Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing', *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, no. 43, pp. 51–60, 2003.
 - [30] P. Balu, P. Leggett, and R. Kokacevic, 'Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 7, pp. 1598–1610, Jul. 2012.
 - [31] L. Tang, J. Ruan, R. G. Landers, and F. Liou, 'Variable Powder Flow Rate Control in Laser Metal Deposition Processes', *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 130, no. 4, p. 041016, 2008.
 - [32] M. Gharbi *et al.*, 'Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 5, pp. 791–800, May 2013.
 - [33] G. Tapia and A. Elwany, 'A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing', *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 136, no. 6, p. 060801, 2014.
 - [34] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, and A. Ghosh, 'Closed loop direct metal deposition: art to part', *Opt. Lasers Eng.*, vol. 34, no. 4–6, pp. 397–414, 2000.
 - [35] A. Fathi, A. Khajepour, M. Durali, and E. Toyserkani, 'Geometry Control of the Deposited Layer in a Nonplanar Laser Cladding Process Using a Variable Structure Controller', *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 130, no. 3, p. 031003, 2008.
 - [36] S. Karnati, N. Matta, T. Sparks, and F. Liou, 'Vision-based process monitoring for laser metal deposition processes', in *Proceedings Solid Freeform Fabrication symposium*, 2013, pp. 88–94.
 - [37] L. Tang and R. G. Landers, 'Melt Pool Temperature Control for Laser Metal Deposition Processes—Part I: Online Temperature Control', *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 132, no. 1, p. 011010, 2010.
 - [38] L. Song, V. Baavath-singh, B. Dutta, and J. Mazumder, 'Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1–4, pp. 247–256, Jan. 2012.

-
- [39] K. Bartkowiak, 'Direct laser deposition process within spectrographic analysis in situ', *Phys. Procedia*, vol. 5, pp. 623–629, 2010.
 - [40] A. R. Nassar, J. S. Keist, E. W. Reutzel, and T. J. Spurgeon, 'Intra-layer closed-loop control of build plan during directed energy additive manufacturing of Ti-6Al-4V', *Addit. Manuf.*, vol. 6, pp. 39–52, Apr. 2015.
 - [41] S. D. Sharples, M. Clark, and M. G. Somekh, 'All-optical adaptive scanning acoustic microscope', *Ultrasonics*, vol. 41, no. 4, pp. 295–299, Jun. 2003.
 - [42] J. Rudlin and D. Cerniglia, 'Inspection of laser powder deposited layers'.
 - [43] H. Gaja and F. Liou, 'Defects monitoring of laser metal deposition using acoustic emission sensor', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 1–4, pp. 561–574, 2017.
 - [44] M. Strantzla, D. Van Hemelrijck, P. Guillaume, and D. G. Aggelis, 'Acoustic emission monitoring of crack propagation in additively manufactured and conventional titanium components', *Mech. Res. Commun.*, vol. 84, pp. 8–13, Sep. 2017.
 - [45] D. Cerniglia, M. Scafidi, A. Pantano, and J. Rudlin, 'Inspection of additive-manufactured layered components', *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 292–298, Sep. 2015.
 - [46] M. Klein and J. Sears, 'Laser ultrasonic inspection of laser clad 316LSS and Ti-6-4', in *23rd International congress on applications of lasers and electro-optics; ICALEO 2004*, 2004.
 - [47] D. Royer and E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides*, Elsevier Masson., vol. 1, 2 vols. .
 - [48] I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb waves: Physical theory and applications*. Plenum Press, 1967.
 - [49] B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Wiley., vol. 2. New York, 1973.
 - [50] J. W. S. Rayleigh, *The theory of sound*. New York, 1894.
 - [51] B. Campagne and H. Voillaume, 'Development of Laser ultrasonics: application to complex shape aeronautical parts', presented at the Cofrend, p. 6.
 - [52] C. B. Scruby and L. E. Drain, *Laser Ultrasonics Techniques and applications*, Adam Hilger. 1990.
 - [53] S. J. Davies, 'Laser-generated ultrasound its properties, mechanisms and multifarious applications', *J. Phys. Appl. Phys.*, no. 26, pp. 329–348, Nov. 1992.
 - [54] R. J. Dewhurst, 'Quantitative measurements of laser-generated acoustic waveforms', *J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 6, p. 4064, 1982.
 - [55] D. A. Hutchins, 'Laser generation as a standard acoustic source in metals', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 9, p. 677, 1981.
 - [56] E. Bossy, M. Talmant, and P. Laugier, 'Effect of bone cortical thickness on velocity measurements using ultrasonic axial transmission: A 2D simulation study', *J Acoust Soc Am*, vol. 112, pp. 297–307, 2002.
 - [57] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, and S. B. Palmer, 'Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, no. 5, pp. 1362–1369, 1981.
 - [58] A. M. Aindow, 'Laser-generation of directional surface acoustic wave pulses in metals', *Opt. Commun.*, vol. 42, no. 2, pp. 116–120, 1982.
 - [59] D. Clorennec, 'Génération et détection optiques d'ondes guidées US sans contact sur une pièce cylindrique', *Acoustique Physique*, Université Paris 7 - Denis Diderot, 2002.
 - [60] Pengzhi Zhang, C. F. Ying, and Jianzhong Shen, 'Directivity patterns of laser thermoelastically generated ultrasound in metal with consideration of thermal conductivity', *Ultrasonics*, vol. 35, pp. 233–240, 1997.
 - [61] P. Cielo, F. Nadeau, and M. Lamontagne, 'Laser generation of convergent acoustic waves for materials inspection', *Ultrasonics*, vol. 23, no. 2, pp. 55–62, 1985.
 - [62] I. Arias and J. D. Achenbach, 'Thermoelastic generation of ultrasound by line-focused laser irradiation', *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, no. 25, pp. 6917–6935, 2003.
 - [63] A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy, and J. Achenbach, 'Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: Scanning laser source technique', *Mater. Eval.*, vol. 58, no. 2, pp. 173–177, 2000.
 - [64] X. Jian, Y. Fan, R. S. Edwards, and S. Dixon, 'Surface-breaking crack gauging with the use of laser-generated Rayleigh waves', *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 6, p. 064907, 2006.

-
- [65] F. Faëse, 'Génération d'ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers : applications à la caractérisation sans contact de défauts', Université de valenciennes, Valenciennes, 2013.
 - [66] S. Krishnaswamy, 'Theory and applications of laser-ultrasonic techniques', *Ultrason. Nondestruct. Eval. Eng. Biol. Mater. Charact.*, pp. 435–494, 2003.
 - [67] P. A. Doyle, 'Calculation of ultrasonic surface waves from an extended thermoelastic laser source', *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 8, no. 3, pp. 147–164, 1989.
 - [68] J.-P. Monchalain, 'Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry Perot interferometer', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 14, no. 47, 1985.
 - [69] J. P. Huignard and A. Marrakchi, 'Two-wave mixing and energy transfer in Bi₁₂SiO₂₀ crystals: application to image amplification and vibration analysis', *Opt. Lett.*, vol. 6, pp. 622–624, 1981.
 - [70] A. Blouin, P. Delaye, J.-P. Monchalain, and G. Roosen, 'Détection d'ultrasons par interférométrie adaptative dans des cristaux photoréfractifs', *Instrum. Mes. Métrologie*, vol. 1, pp. 127–141, 2001.
 - [71] R. K. Ing and J.-P. Monchalain, 'Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 25, p. 3233, 1991.
 - [72] Z. Zhou, K. Zhang, J. Zhou, G. Sun, and J. Wang, 'Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks', *Opt. Laser Technol.*, vol. 73, pp. 173–178, 2015.
 - [73] C. Ni, L. Dong, Z. Shen, and J. Lu, 'The experimental study of fatigue crack detection using scanning laser point source technique', *Opt. LASER Technol.*, vol. 43, no. 8, pp. 1391–1397, 2011.
 - [74] P. A. Doyle and C. M. Scala, 'Review of Crack Depth Measurement by Ultrasonics', *Ultrasonics*, vol. 16, no. 4, pp. 164–177, 1979.
 - [75] J. A. Cooper, R. J. Dewhurst, and S. B. Palmer, 'Characterization of Surface-Breaking Defects in Metals with the Use of Laser-Generated Ultrasound', 1986.
 - [76] R. J. Dewhurst, A. D. W. McKie, and S. B. Palmer, 'Further evidence for two-component surface acoustic wave reflections from surface breaking slots', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 25, p. 1694, 1986.
 - [77] C. Wang, A. Sun, M. Xue, B.-F. Ju, J. Xiong, and X. Xu, 'Width gauging of surface slot using laser-generated Rayleigh waves', *Opt. Laser Technol.*, vol. 92, pp. 15–18, 2017.
 - [78] S.-K. Park, S.-H. Baik, Y.-S. Joo, H.-K. Jung, C.-H. Lim, and H.-K. Cha, 'Signal Processing Techniques to Detect a Surface-Breaking Crack by Using a Laser Surface Wave', *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 51, no. 1, pp. 358–363, 2007.
 - [79] S. Krishnaswamy and Y. Sohn, 'The scanning laser source technique for detection of surface-breaking and subsurface defect', *J. Korean Soc. Non Destr. Test.*, vol. 27, no. 3, pp. 246–254, 2007.
 - [80] A. K. Kromine, 'Detection of subsurface defects using laser based technique', *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, vol. 557, pp. 1612–1617, 2001.
 - [81] D. Cerniglia, M. Scafidi, A. Pantano, and R. Lopatka, 'Laser Ultrasonic Technique for Laser Powder Deposition Inspection', *laser*, vol. 6, no. 150, p. 13, 2013.
 - [82] R. L. Plaut, C. Herrera, D. M. Escriba, P. R. Rios, and A. F. Padilha, 'A Short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance', *Mater. Res.*, vol. 10, no. 4, pp. 453–460, Dec. 2007.
 - [83] A. Cand, J.-P. Monchalain, and X. Jia, 'Detection of in-plane and out-of-plane ultrasonic displacements by a two-channel confocal Fabry–Perot interferometer', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 4, pp. 414–416, Jan. 1994.
 - [84] J. D. Achenbach, *Wave propagation in elastic solids*, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, 1975.
 - [85] E. P. Papadakis, 'Ultrasonic Attenuation and Velocity in Three Transformation Products in Steel', *J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 5, p. 1474, 1964.

-
- [86] M. Odnobokova, A. Kipelova, A. Belyakov, and R. Kaibyshev, 'Microstructure evolution in a 316L stainless steel subjected to multidirectional forging and unidirectional bar rolling', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 63.
 - [87] A. Baelde *et al.*, 'Effect of microstructural elongation on backscattered field: Intensity measurement and multiple scattering estimation with a linear transducer array', *Ultrasonics*, vol. 82, pp. 379–389, 2018.
 - [88] S. Raetz, T. Dehoux, M. Pertont, and B. Audoin, 'Acoustic beam steering by light refraction: Illustration with directivity patterns of a tilted volume photoacoustic source', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 134, no. 6, pp. 4381–4392, 2013.
 - [89] P. L. Marston, 'GTD for backscattering from elastic spheres and cylinders in water and the coupling of surface elastic waves with the acoustic field', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 1, pp. 25–37, 1988.
 - [90] Cuixiang Pei, T. Fukuchi, Haitao Zhu, K. Koyama, K. Demachi, and M. Uesaka, 'A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method', *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 12, pp. 2702–2708, 2012.
 - [91] W. Hassan and P. B. Nagy, 'Circumferential creeping waves around a fluid-filled cylindrical cavity in an elastic medium', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, no. 5, pp. 2496–2503, 1997.
 - [92] L. W. Zachary, 'Quantitative use of Rayleigh waves to locate and size subsurface holes', *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 3, no. 1, pp. 55–63, 1982.
 - [93] P. B. Nagy, M. Blodgett, and M. Golis, 'Weep hole inspection by circumferential creeping waves', *NDT E Int.*, vol. 27, no. 3, pp. 131–142, 1994.
 - [94] H. Überall, *Surface waves in acoustics*, Plenum Press. New York.
 - [95] D. P. Hurst and J. A. G. Temple, 'Calculation of the velocity of creeping waves and their application to non-destructive testing', *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 10, no. 6, pp. 451–464, 1982.
 - [96] H. Gong, 'Generation and detection of defects in metallic parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting and their effects on mechanical properties.', p. 218.
 - [97] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2nd ed. Springer Verlag, 2002.
 - [98] R. B. Cattell, 'The scree test for the number of factors', *Multivar. Behav. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 245–276, 1966.
 - [99] K. Li, Z. Ma, P. Fu, and S. Krishnaswamy, 'Quantitative evaluation of surface crack depth with a scanning laser source based on particle swarm optimization-neural network', *NDT E Int.*, vol. 98, pp. 208–214, 2018.
 - [100] A. A. Karabutov, N. B. Podymova, and E. B. Cherepetskaya, 'Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method', *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, vol. 58, no. 3, pp. 503–510, May 2017.
 - [101] A. A. Maradudin and D. L. Mills, 'Attenuation of Rayleigh surface waves by surface roughness', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 10, p. 573, 1976.
 - [102] M. de Billy, G. Quentin, and E. Baron, 'Attenuation measurements of an ultrasonic Rayleigh wave propagating along rough surfaces', *J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 6, pp. 2140–2145, Mar. 1987.
 - [103] M. A. Biot, 'Generalized Theory of Acoustic Propagation in Porous Dissipative Media', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 9A, pp. 1254–1264, Sep. 1962.
 - [104] D. L. Johnson and T. J. Plona, 'Acoustic slow waves and the consolidation transition', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 72, no. 2, pp. 556–565, Aug. 1982.
 - [105] J. Descheemaeker, J.-P. Groby, P. Leclaire, and W. Lauriks, 'Surface and guided waves in porous materials', p. 7.
 - [106] M. D. Sharma, 'Rayleigh waves in a partially saturated poroelastic solid: Rayleigh waves in porous medium', *Geophys. J. Int.*, vol. 189, no. 2, pp. 1203–1214, 2012.
 - [107] T. Bourbié, O. Coussy, and B. Zinszner, *Acoustics of porous media*, Tecnip., vol. 1. 1987.

Annexes

Annexe A Micrographies des échantillons fabriqués par le procédé DML

L'ensemble des échantillons fabriqués par le procédé DML et inspectés dans ce manuscrit ont été fournis par la société BeAMmachines. Cinq échantillons ont été réalisés en acier inoxydable 316L et trois en acier inconel 718.

A. Échantillons en acier 316L

Les coupes métallurgiques de ces échantillons ont été faites par la société CERB. Les pièces sont tronçonnées selon les plans XZ et YZ pour obtenir des micro sections afin d'observer la réparation des porosités dans la pièce. La Figure A - 1 illustre les différentes coupes réalisées.

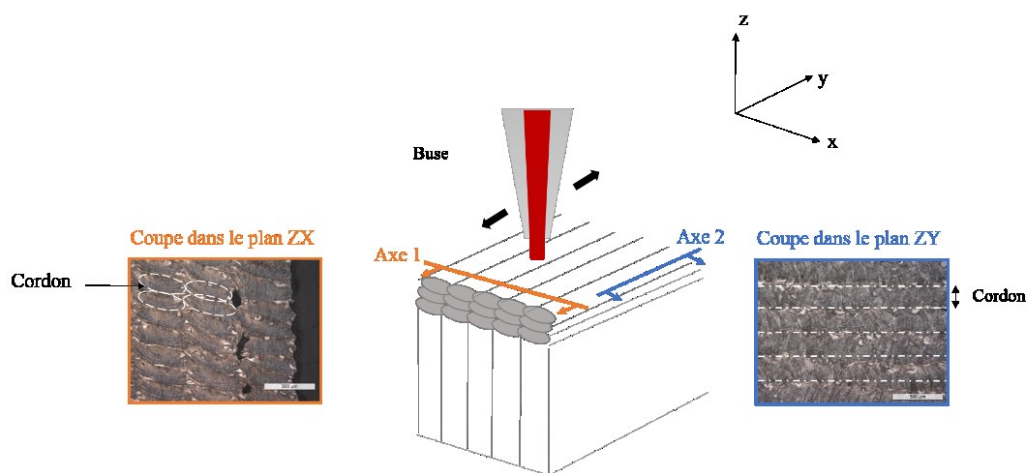


Figure A - 1 Illustration des tronçonnages effectués dans les plans XZ et YZ pour l'obtention des micro sections

Ces coupes sont ensuite enrobées dans de la résine époxy puis polies mécaniquement avec une finition diamant de $0,25\ \mu\text{m}$. Les observations optiques (microscope optique) sont réalisées par CERB avant et après révélation chimique inox. Cinq échantillons en acier 316L ont été fabriqués par la société BeAMmachines et sont présentés sur la Figure A - 2.

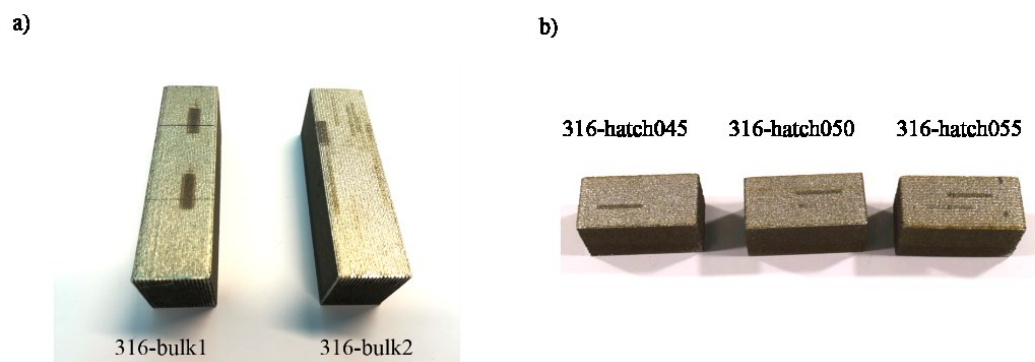


Figure A - 2 Échantillons (a) sains et (b) poreux en acier 316L fabriqués par le procédé DML

Les dimensions des pièces, le paramètre hatch et la qualité des pièces sont donnés dans le Tableau A- 1.

Nomenclature	Dimensions (mm)	Taux de porosités (%)	Tailles des porosités	Aspect des porosités	Paramètre dégradé pour la fabrication
316-bulk1	80 x 20 x 25	1,9	<100 μm	Sphérique	Aucun
316-bulk2	80 x 20 x 25	1,9	<100 μm	Sphérique	Aucun
316-hatch045	40 x 20 x 20	8	>>100 μm	Polyédrique anguleux	Hatch
316-hatch050	40 x 20 x 20	11,8	>>100 μm	Polyédrique anguleux	Hatch
316-hatch055	40 x 20 x 20	10,4	>>100 μm	Polyédrique anguleux	Hatch

Tableau A- 1 Caractéristiques des pièces fabriquées en acier 316L

Les paramètres de fabrication communs à l'ensemble de ces pièces sont les suivants :

Diamètre du faisceau laser (mm)	0,75
Puissance laser (W)	240
Débit massique de poudre (g/mn)	6,5
Vitesse de déplacement de la buse (m/mn)	2
Incréments en Z (mm)	0,26
Stratégie de fabrication	Aller-retour
Temps de fabrication	Temps de fabrication

Tableau A- 2 Paramètres de fabrication.

Les coupes métallurgiques, faites uniquement dans le plan XZ, associées à l'échantillon 316-bulk1 sont présentées sur la Figure A - 3. Les coupes de l'échantillon 316-bulk2 sont similaires.

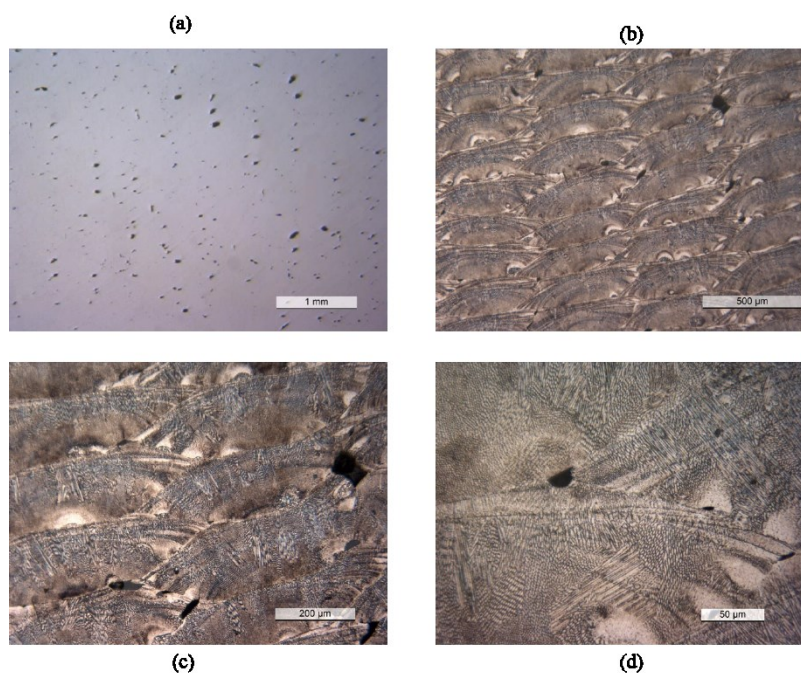


Figure A - 3 Coupes métallurgiques de la pièce 316 bulk1 dans le plan XZ réalisées (a) avant révélation chimique et (b) après révélation chimique.

Sur ces coupes, la présence de porosités dont le diamètre est inférieur à 100 μm est observé, bien que l'échantillon soit considéré comme sain. Les pièces en sortie de fabrication subissent un traitement thermique pour fermer ces porosités. Sur les Figure A - 3 - b et c, l'agencement des différents cordons est présenté, ainsi que les grains coronaires notamment sur la Figure A - 3 - c et d.

Les coupes métallurgiques, faites dans le plan XZ, associées à l'échantillon 316-hatch045 sont présentées sur la Figure A - 4 et dans le plan YZ sur la Figure A - 5. Les coupes des autres échantillons poreux sont similaires.

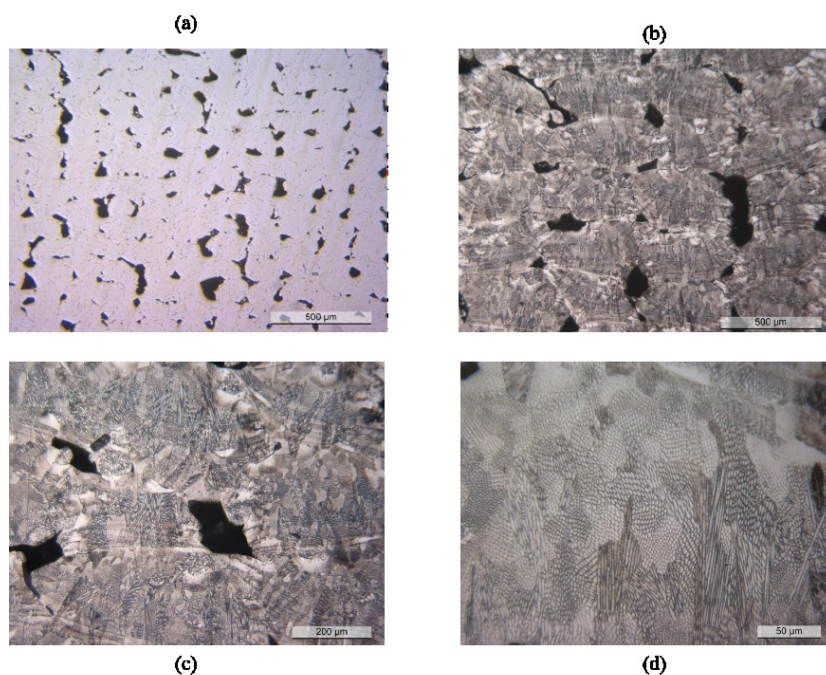


Figure A - 4 Coupes métallurgiques de la pièce 316 hatch045 dans le plan XZ (a) avant révélation chimique (b,c,d) après révélation chimique.

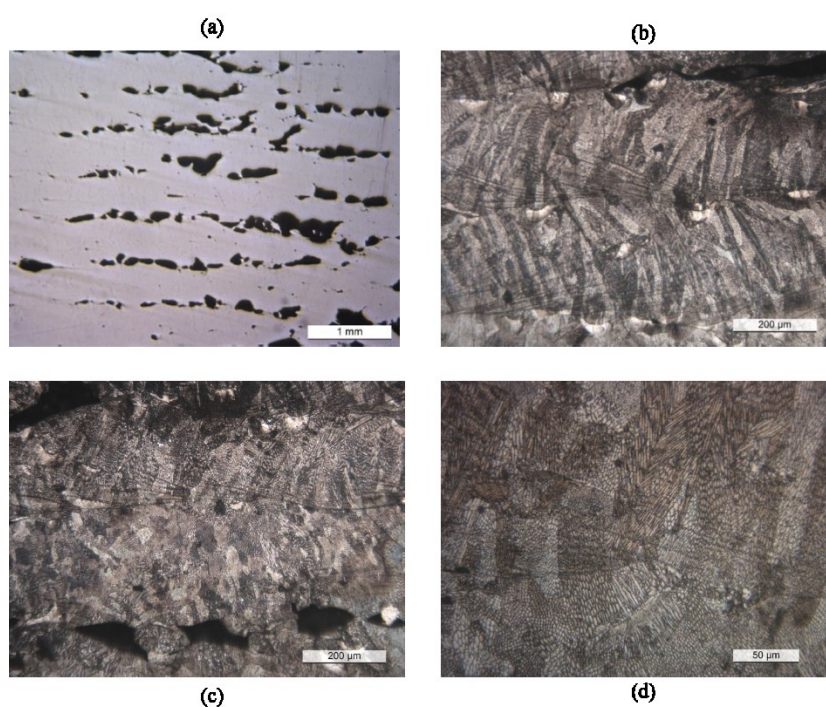


Figure A - 5 Coupes métallurgiques de la pièce 316 hatch045 dans le plan YZ (a) avant révélation chimique (b,c,d) après révélation chimique. Sur ces échantillons, la présence de porosités est importante et les porosités apparaissent entre chaque cordon et dans les deux plans.

B. Échantillons en inconel 718

La Figure A - 6 présente les trois pièces réalisées en inconel 718.

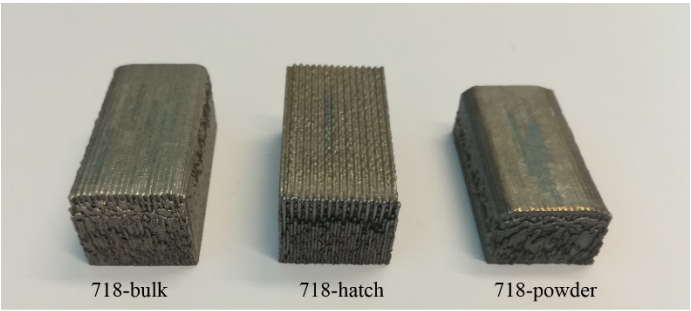


Figure A - 6 Pièces en inconel 718

Les caractéristiques de ces pièces sont détaillées dans le Tableau A- 3 ;

Nomenclature	Dimensions (mm)	Taux de porosités (%)	Tailles des porosités	Aspect des porosités	Paramètre dégradé pour la fabrication
718-bulk	40 x 20 x 15	0,1	<100 µm	Sphérique	Aucun
718-hatch	40 x 20 x 15	0,7	>100 µm	Polyédrique anguleux	Hatch
718-powder	40 x 20 x 10	0,4	<100 µm	Sphérique	Qualité de la poudre

Tableau A- 3 Caractéristiques des pièces en inconel 718

Les coupes métallurgiques des échantillons en inconel 718 ont été réalisés par le CETIM par une attaque au réactif Kalling. Les coupes métallurgiques des trois échantillons sont présentées sur les Figure A - 7 à Figure A - 9.

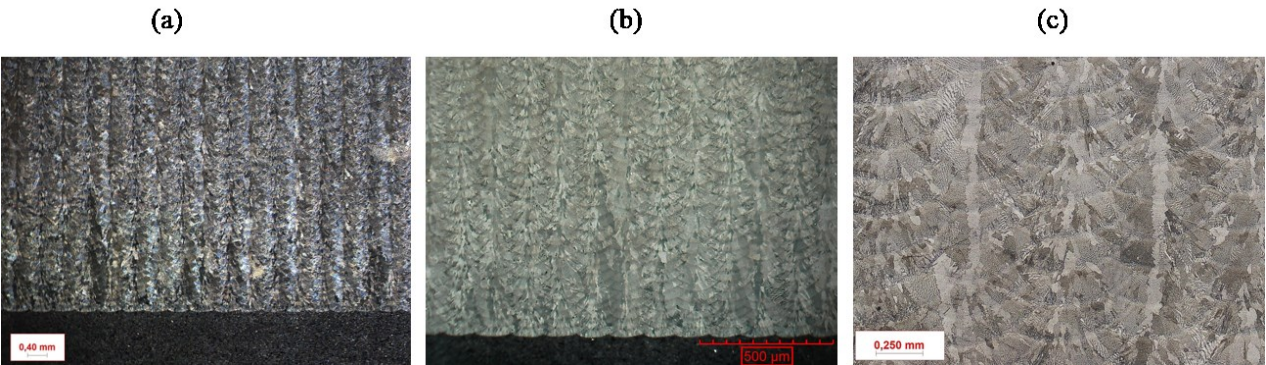


Figure A - 7 Coupes métallurgiques pour la pièce de référence 718-bulk dans le plan XZ

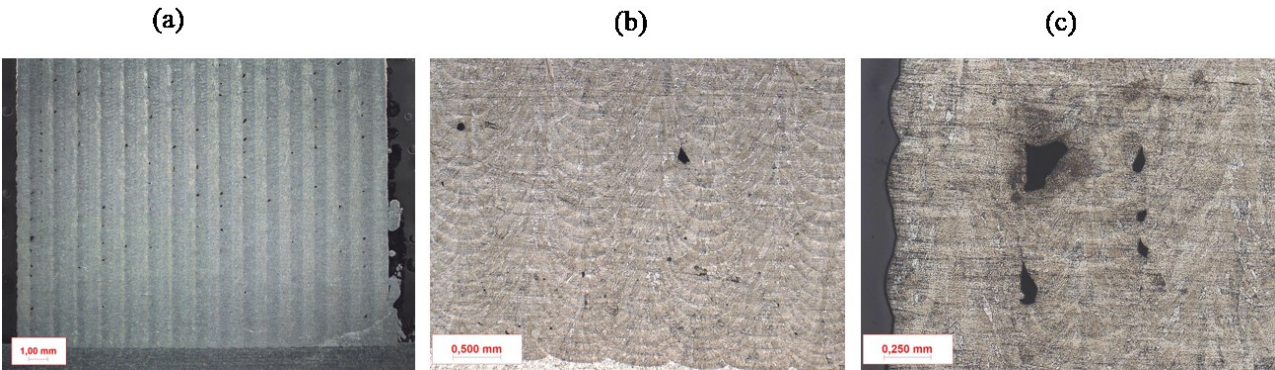


Figure A - 8 Coupes métallurgiques de la pièce 718-hatch dans le plan XZ

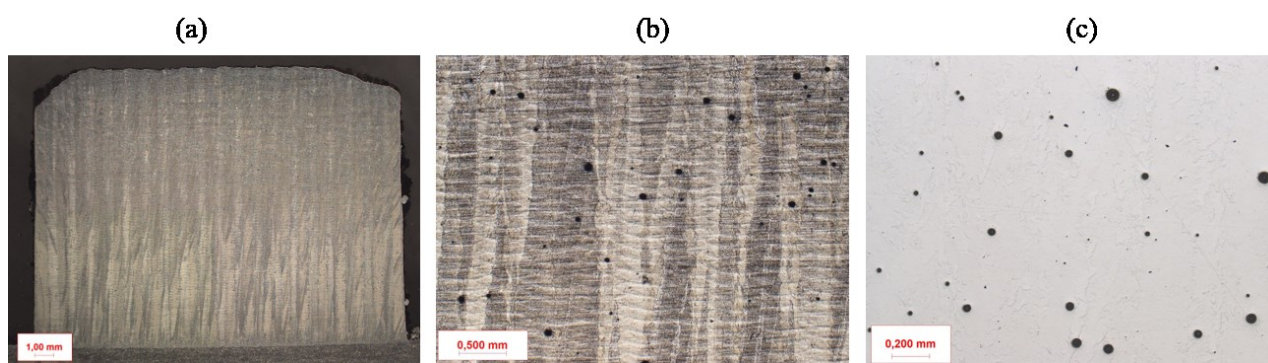


Figure A - 9 Coupes métallurgiques de la pièce 718-powder dans le plan XZ

Annexe B Études exploratoires sur les effets de la rugosité et de la porosité sur l'onde de Rayleigh

L'atténuation et les variations de vitesse des ondes de Rayleigh dues à la porosité et/ou l'état de surface sont déjà en partie abordées dans la littérature [103-107] pour les pièces issues du procédé de forge. De fait, cette annexe s'attache à donner quelques éléments pour contribuer à la littérature sur ce sujet relativement aux pièces réalisées par le procédé DML.

A. Atténuation de l'onde de Rayleigh engendrée par les rugosités de surface

L'état interne de la pièce se répercute sur l'état de surface : les manques de fusion entre les cordons, dus aux variations du « hatch », provoque un état de surface dégradé. La longueur de cohérence effective, a , dévie de la longueur de cohérence nominale paramétrée pour la fabrication. Ainsi, en connaissant le paramètre a d'une surface, et en le comparant à sa valeur nominale, il serait possible d'obtenir des informations sur la présence de porosités au sein de la pièce.

Les travaux de Maradudin *et al.* [101], puis de De Billy *et al.* [102] ont porté sur l'étude de l'atténuation des ondes de Rayleigh se propageant sur des surfaces rugueuses. Ils montrent que l'atténuation dépend des paramètres de rugosité h et a (cf. Figure 5-4) et de la longueur d'onde de Rayleigh, notée λ_R . Le paramètre a , est la longueur de cohérence.

L'atténuation, notée α , varie en fonction f^5 lorsque $\lambda_R > a$. À l'inverse, lorsque $a > \lambda_R$, l'atténuation varie en fonction de la fréquence à la puissance 4 [101]. La loi d'atténuation en fonction de la fréquence donne donc une estimation de la longueur de cohérence, a , par rapport à la longueur d'onde de Rayleigh. Sur une surface polie, et donc une onde cohérente, l'atténuation varie généralement selon f^2 (cf. chapitre 2).

Ainsi, en déterminant l'atténuation de l'onde de Rayleigh se propageant sur une surface rugueuse, il est possible d'estimer les paramètres de rugosité de la pièce.

L'atténuation est évaluée en dB/mm pour une fréquence donnée, donc pour la quantifier, il est nécessaire de relever l'amplitude du spectre pour une distance génération-détection croissante. Pour ce faire, la génération est fixe, et la détection, initialement confondue avec la génération, s'en écarte progressivement. La détection parcourt 15 mm par pas de 0,2 mm. Pour améliorer le rapport signal sur bruit, 400 A-scans sont acquis et moyennés pour chaque position de mesure. L'image B-scan (cf. Figure B - 1-a), reconstituée à partir de cette acquisition, est traitée, comme détaillé ci-après, pour extraire l'atténuation de l'onde de Rayleigh en chaque position. L'atténuation est évaluée d'une part pour la pièce 316L-bulk1 et d'autre part pour la pièce 316L-hatch045 dont on connaît la longueur de cohérence, égale à 0,45 mm. On rappelle que λ_R , correspondant à la fréquence centrale de 4 MHz pour l'acier 316L, est égale à 0,75 mm, donc $\lambda_R > a$.

Pour extraire l'amplitude du spectre de l'onde de Rayleigh, les maxima des fronts d'onde de Rayleigh sont recalés temporellement autour d'une même valeur (cf. Figure B - 1-b). Il est alors aisé de filtrer l'image pour ne conserver que le front d'onde de Rayleigh. Les signaux sont pondérés dans le domaine fréquentiel avec une fonction porte centrée sur la valeur centrale de l'onde Rayleigh. La largeur de la porte correspond à l'étendue temporelle du front d'onde de Rayleigh. Suite au filtrage par cette fonction, seul le front d'onde de Rayleigh persiste sur l'image B-scan (cf. Figure B - 1-c).

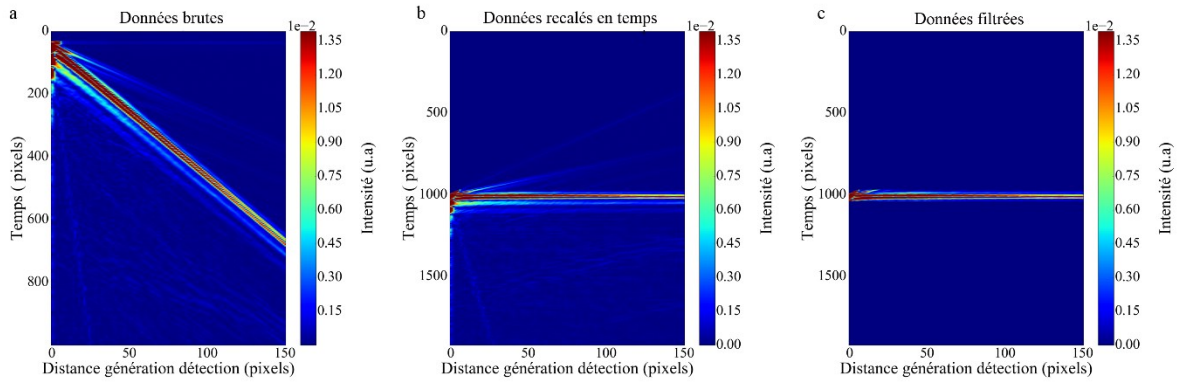


Figure B - 1 Filtrage d'un B-scan pour le calcul de l'atténuation (pièce polie en acier 316L) a) données brutes, b) données recalées en temps, c) données filtrées

À partir du B-scan filtré (Figure B - 1-c), le spectre de l'onde de Rayleigh, présenté sur la Figure B - 2-c en échelle semi-logarithmique, est évalué pour chaque position. Les spectres sont normalisés par rapport à leur maximum, sans cette normalisation, on observe une diminution de l'amplitude du spectre acquis sur la surface rugueuse par rapport à celui de la surface polie.

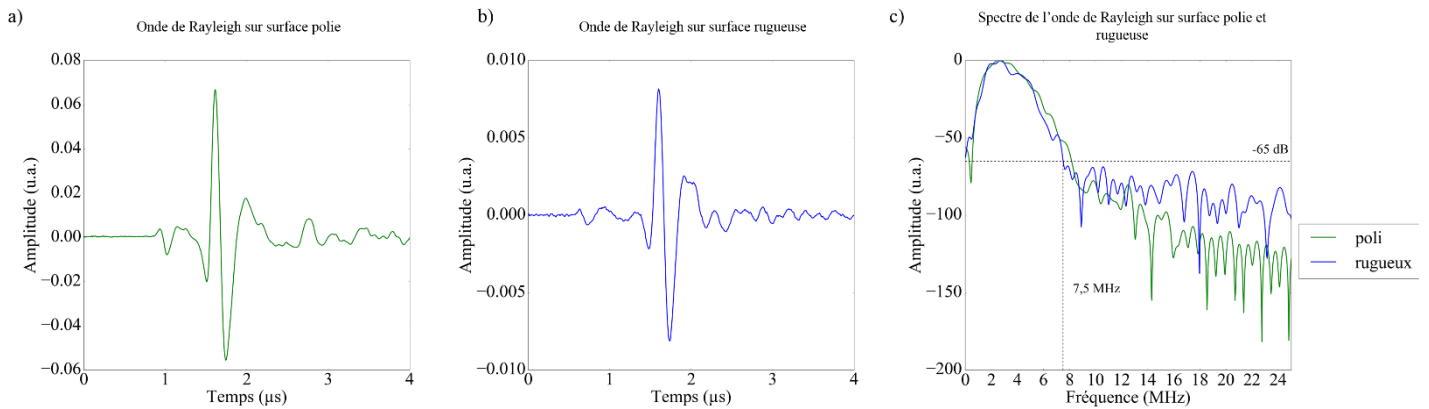


Figure B - 2 a) Fronts d'onde de Rayleigh acquis sur l'échantillon 316-bulk1 sur surface polie et b) sur une surface rugueuse et c) leurs spectres

Les spectres de l'onde de Rayleigh tracés en échelle semi-logarithmique montre que le seuil du bruit peut être fixé à -65 dB sur la Figure B - 2. De fait, à partir de 7,5 MHz, le spectre n'est plus significatif. En conséquence, l'atténuation est déterminée jusqu'à cette fréquence de 7,5 MHz. De plus, la longueur d'onde centrale, aussi bien pour une surface rugueuse que pour une surface polie est d'environ 0,75 mm, donc $\lambda_R > a$. L'atténuation est calculée en dB/mm pour chaque fréquence et tracée sur la Figure B - 3 pour une surface polie (a) et pour une surface rugueuse (b) d'acier 316L, en échelle logarithmique. Pour s'assurer de la répétabilité, trois séries de mesures ont été réalisées en différents points de la pièce et sont représentées en rouge, bleu et vert.

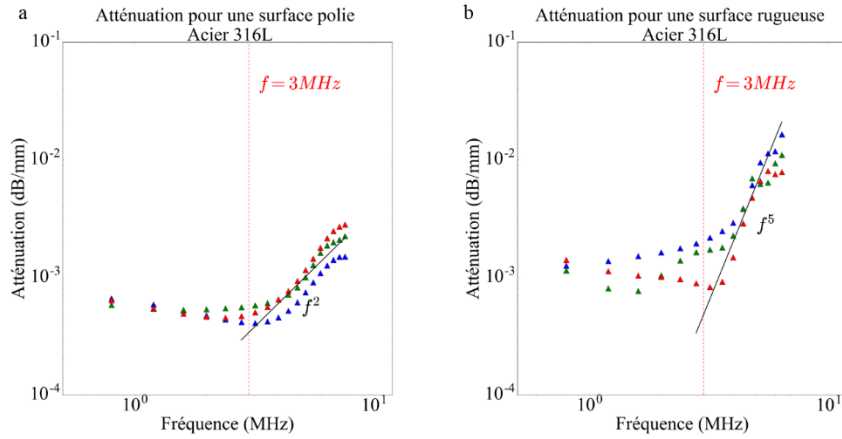


Figure B - 3 Atténuation en fonction de la fréquence en dB/mm pour a) une surface polie et b) une surface rugueuse de paramètre $a = 0,45\text{mm}$ (acier 316L)

Les graphiques, Figure B - 3-a et Figure B - 3-b, semblent présenter deux régimes : le premier pour des fréquences inférieures à 3 MHz, et l'autre pour des fréquences supérieures à 3 MHz. Dans le premier régime, il n'y a pas de variation significative de l'atténuation, elle peut être considérée comme constante et égale à 0,0005 dB/mm sur la surface polie et à 0,001 dB/mm sur la surface rugueuse. L'atténuation, comme attendue, est plus importante sur les surfaces rugueuses. Dans le second régime, l'atténuation suit une loi en puissance d'ordre 5 sur la surface rugueuse et d'ordre deux dans le cas de la surface polie. On retrouve donc, pour des fréquences supérieures à la fréquence centrale, la tendance donnée par Maradudin où $\alpha \propto f^5$ pour $\lambda_R > a$.

Une estimation du paramètre de rugosité, a est donc possible sur des pièces réalisées par le procédé de fabrication additive DML. En se basant sur cette tendance, une étude visant à déterminer pour différentes longueurs de cohérence l'atténuation de l'onde Rayleigh, permettrait d'associer une atténuation à une longueur de cohérence pour une gamme de fréquences donnée. Ainsi, une mesure d'atténuation permettrait de déterminer a , c'est-à-dire le paramètre « hatch » effectif. Cette mesure expérimentale donnerait alors une loi d'échelle de la déviation du « hatch » par rapport à la valeur nominale fixée. Une étude quantitative de l'atténuation sur différents échantillons, de rugosité contrôlée, permettrait de donner des éléments pour établir une telle loi.

B. Vitesse des ondes de Rayleigh en fonction du taux de porosités

D'après la théorie de Biot, la vitesse des ondes dans un milieu poreux est proportionnelle à $1/\sqrt{\Phi}$, où Φ est le taux de porosité du milieu. On donc peut s'attendre à ce que la vitesse de l'onde de Rayleigh diminue lorsque le taux de porosités augmente. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que la quantification de la vitesse de l'onde de Rayleigh pourrait renseigner sur le taux de porosités du milieu dans lequel elle se propage.

On se propose ici de tracer la vitesse de l'onde de Rayleigh pour les différentes pièces. Pour se faire, la génération est fixe et la détection s'éloigne progressivement de celle-ci. La surface de la pièce est polie de telle sorte que seul l'aspect poreux de l'échantillon entre en jeu. Sur le B-scan ainsi acquis, les maxima d'amplitude de l'onde de Rayleigh sont extraits puis une régression linéaire permet d'accéder à la pente de la droite formée par ces maxima qui correspond à la vitesse de l'onde de Rayleigh. La Figure B - 4 montre la vitesse des ondes de Rayleigh pour les échantillons en acier 316L (Figure B - 4-a et 718, Figure B - 4-b). Les barres d'erreurs représentent l'écart-type de la vitesse, calculée pour trois mesures.

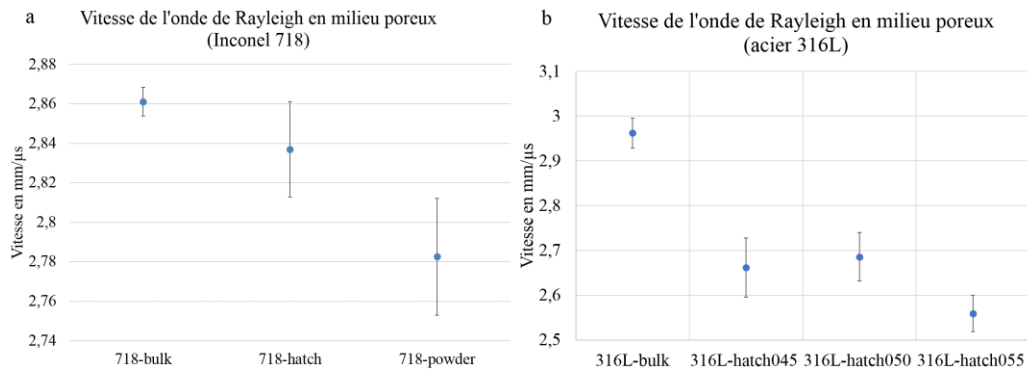


Figure B - 4 Vitesses expérimentales de l'onde de Rayleigh en milieu poreux a) sur une surface polie d'inconel 718, b) sur une surface polie d'acier 316L

Les Figure B - 4-a et b montrent que la vitesse de l'onde de Rayleigh diminue lorsque le taux de porosité augmente. Pour les échantillons en acier 316L, la vitesse de l'onde de Rayleigh perd 20 % de sa vitesse nominale en présence de porosité. Cependant, ces vitesses varient très peu d'un taux de porosités à l'autre étant donné que ces taux sont proches (compris entre 8 et 11%). Concernant les échantillons en inconel 718, pour les trois échantillons ayant des taux de porosités très proches (allant de 0,1 à 0,7 %), il n'est pas possible de les discriminer par une mesure de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh.

En parcourant l'état de l'art relatif à la propagation des ondes acoustiques en milieux poreux, on peut avancer des éléments pour caractériser la porosité en fonction de la vitesse des ondes de Rayleigh.

Un milieu poreux est décrit comme un squelette solide comportant des inclusions de gaz ou liquide que sont les porosités. Ce milieu est caractérisé d'une part par sa fraction solide (équivalent à un taux de porosités), noté ϕ , c'est-à-dire le rapport entre le volume liquide ou gazeux et le volume du squelette, et d'autre part par sa tortuosité, qui correspond à la géométrie du squelette entre les porosités. La Figure B - 5 schématise les milieux poreux décrit par la théorie de Biot.

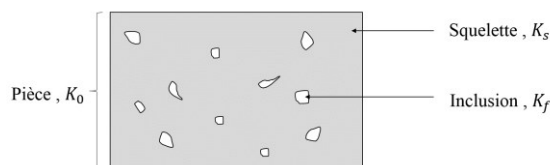


Figure B - 5 Milieu biphasique comportant une phase solide et une phase fluide.

Une particularité acoustique des milieux poreux, prédite par la théorie de Biot [103] et mise en évidence expérimentalement par Johnson *et al.* [104], est la propagation de trois ondes : une onde de compression dite rapide, une onde de cisaillement et une onde de compression dite lente. La vitesse de ces ondes peut s'exprimer en fonction du module d'élasticité du squelette, et du module d'élasticité du volume complet. La vitesse des ondes est liée à la fraction solide du milieu dans lequel ces ondes se propagent.

Suivant la théorie de Biot, les ondes de Rayleigh voient également leur comportement affecté par la présence de porosité. Les travaux de Descheemaeker *et al.* [102] et Sharma *et al.* [106] détaillent la propagation de ces ondes, dans différents milieux poreux (taille et nature solide ou liquide des inclusions). Bourbié *et al.* [107] consigne quelques remarques clés dans son ouvrage consacré à l'acoustique des milieux poreux : les ondes de Rayleigh sont dispersives dans un milieu poreux et leur vitesse s'exprime en fonction de K_s , et K_0 (cf. Figure B - 5), de l'atténuation et du taux de porosités. Pour un rapport des modules du volume et du squelette constant, la vitesse de Rayleigh diminue avec l'augmentation du taux de porosités, mais de façon non linéaire.

Il serait intéressant de poursuivre ces travaux afin d'établir la loi d'échelle entre la vitesse et le taux de porosité dans les pièces de fabrication en se basant sur des pièces dont le taux de porosité est contrôlé.

La rugosité de la surface, caractérisée par la longueur de cohérence a , atténue l'onde de Rayleigh telle que l'atténuation α varie en fonction de la fréquence f , selon une loi en puissance :

$$\text{Pour } \lambda_R > a, \quad \alpha \propto f^5$$

L'évaluation de l'atténuation sur le lot d'échantillon en acier 316L, permet de retrouver une loi en f^5

La vitesse des ondes en milieux poreux s'exprime en fonction de l'atténuation et du taux de porosités. Expérimentalement, on observe une diminution de la vitesse des ondes de Rayleigh lorsque le milieu comporte des porosités. Une étude basée sur des milieux à porosité contrôlée permettrait de vérifier si la loi d'échelle peut être expliquée par le modèle de Biot-Rayleigh.

À travers cette annexe, des relations entre l'atténuation et la vitesse de l'onde de Rayleigh et les caractères poreux et rugueux des pièces ont été traitées dans la littérature. Mises en évidence sur des pièces de forge, nous avons montré qu'il était possible de les retrouver, en partie, sur des pièces de fabrication additive. Les travaux présentés ci-dessus et menés sur des milieux poreux et des états de surface contrôlés permettraient d'initier des études pour comprendre la physique des milieux poreux en fabrication additive. Pour le moment, ces résultats ne sont pas exploitables pour différencier les différents échantillons, notamment concernant le lot en inconel 718.

Les hautes fréquences des ondes de Rayleigh sont fortement atténuées par l'état de surface des pièces en fabrication additive. Cette atténuation dépend du paramètre « hatch », c'est-à-dire de la longueur de cohérence. Les lois d'atténuation, mises en évidence dans la littérature, sont retrouvées pour un échantillon de longueur de cohérence connue. Ce résultat laisse présager qu'une étude quantitative de l'atténuation en fonction du paramètre « hatch » permettrait d'établir une loi d'atténuation reliant à ces deux paramètres. Ainsi, on pourrait remonter à une déviation du paramètre « hatch » grâce à une mesure d'atténuation. Les mesures de vitesses effectuées sur les échantillons ont montré que la vitesse de l'onde de Rayleigh diminue en présence de porosités. L'acoustique des milieux poreux, dont nous avons donné quelques éléments dans cette annexe, montre que la variation de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction du taux de porosité n'est pas linéaire. Aussi, une perspective pour de futurs travaux serait de quantifier cette vitesse en fonction de la taille et du taux de porosités. L'objectif serait alors de pouvoir relier ces deux grandeurs pour contrôler la qualité des pièces de FA.



Célia MILLON

Contribution à l'inspection d'échantillons de fabrication additive métallique par ondes de Rayleigh au moyen d'une méthode ultrasons-laser

Résumé : L'objectif de cette thèse est de contribuer à la détection de défauts dans des pièces réalisées par le procédé de fabrication additive de déposition métallique par laser (DML), en vue d'un contrôle *in situ*. Le contrôle *in situ* envisagé porte sur les derniers cordons déposés par le procédé (acier 316L et Inconel 718), pour lesquels des porosités et fissures peuvent apparaître ($\sim 100 \mu\text{m}$). L'inspection est effectuée par méthode ultrasons-laser (UL), c'est-à-dire tout optique et non intrusive (régime thermoélastique). Le procédé DML engendre une microstructure dite à gros grains et des rugosités de surface qui rendent le contrôle ultrasonore plus délicat. En effet, ces caractéristiques microstructurales provoquent la diffusion des ondes élastiques dans le milieu. Ce travail de thèse participe donc à la compréhension de ces phénomènes et de leurs influences pour mieux détecter des défauts subsurfaciques dont les dimensions sont proches des longueurs d'ondes acoustiques. Ainsi, l'inspection en surface a été optimisée par la conception d'un montage optique, permettant de favoriser la génération de l'onde de Rayleigh, par une ligne source laser fine ($\sim 200 \mu\text{m}$) et présentant des fronts raides. Ainsi, le contenu spectral de l'onde a été augmenté vers les hautes fréquences, c'est-à-dire jusqu'à 10 MHz. La longueur d'onde de Rayleigh (λ_R) a pu être ainsi diminuée à une valeur proche de celle des défauts recherchés, de l'ordre de $700 \mu\text{m}$. Ensuite, les limites de ce dispositif ont été mises en évidence sur des pièces fabriquées par le procédé DML. Ces pièces comportent des défauts usinés, des entailles et des trous génératrice dont les dimensions sont inférieures à λ_R , leur surfaces est rugueuse (diffraction multiple de l'onde de Rayleigh). Puis, l'inspection de défauts réels subsurfaciques est étudiée. Ces défauts sont créés soit par une variation d'un des paramètres du procédé, le hatch (distance inter-cordon), ou encore par l'utilisation d'une poudre métallique de mauvaise qualité. En dégradant volontairement ces paramètres, les échantillons présentent alors des taux de porosités (Φ) pouvant s'étendre de 0,5% à 10%. Enfin, deux méthodes de corrélations ont été exploitées pour discriminer les taux de porosités : à travers l'étude du degré de ressemblance et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La première méthode, simple et rapide à mettre en œuvre, ne permet cependant pas de distinguer les taux de porosités. En revanche, l'ACP indique qu'il est possible de discriminer tous les défauts. Pour finir, des tests préliminaires ont été effectués afin de montrer qu'il est possible d'effectuer des mesures par méthode UL sur surface rugueuse, tout en conservant un bon rapport signal sur bruit, et ce sans moyenniser les signaux, au cours d'un déplacement robotisé.

Mots clés : ultrasons-laser, fabrication additive, onde de Rayleigh, hatch, rugosité, porosités

Abstract: This thesis contributes to the detection of flaws in laser metal deposition (LMD) additive manufacturing process samples towards an *in situ* control of the process. The *in situ* control foreseen concerns the last layers deposited by the process (316L and Inconel 718 steel) for which porosities and cracks may appear ($\sim 100 \mu\text{m}$). The inspection is performed by laser-ultrasonics (LU), an all-optical and non-invasive technic. Experiments are conducted in thermoelastic mode. The LMD process gives rise to coarse grain microstructure and surface roughness, that make the control tricky. Indeed, those characteristics generate scattering elastic waves. Thus, this work contributes to the better comprehension of those phenomena and their effects of the detection on subsurface flaws which dimensions are close to the acoustic wavelength. Surface inspection has been optimized by designing an optical setup, improving the Rayleigh wave generation by using a thin laser line source ($\sim 200 \mu\text{m}$). Hence, the spectral content has been increased until it reaches 10 MHz, that is to say a wavelength equals to $700 \mu\text{m}$ (λ_R). Then, the limits have been brought out through the inspection of LMD samples. Those samples include sided drilled holes and notches which dimensions are less than λ_R , on rough surface (multiple scattering of Rayleigh wave). Moreover, real subsurface flaws inspections have been studied. The flaws have been created by the instability of one of the process parameter: the hatch (distance between each layer), or by a bad powder quality. By intentionally deteriorating those parameters, the samples, then, have porosity rate (Φ) with ranging from 0.5% to 10%. Finally, two correlation methods have been studied to discriminate porosity rate: through the study of the normalized cross correlation function and by Principal Component Analysis (PCA). The first method, simple and fast to implement, does not allow distinguishing the porosity rates. Nevertheless, the PCA indicates that it is possible to discriminate all the flaws. Finally, preliminary tests have been carried out to show that LU measurements is feasible on rough surfaces, while keeping a good signal-to-noise ratio, without averaging, during an automated displacement.

Keywords : laser ultrasonics, additive manufacturing, Rayleigh waves, hatch, roughness, porosities