

Thèse de doctorat

**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**

Spécialité : Electronique

Présentée et soutenue par Vianney NOWINSKI

Le 19/07/2016, à Valenciennes

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie / Département d'Opto-Acousto-Electronique (IEMN/DOAE)

**Contrôle Non Destructif par Ultrasons-Laser de structures pleines à axe de
révolution**

JURY

Président du jury

- LE HUEROU, Jean-Yves. Professeur. Université de Cergy-Pontoise.

Rapporteurs

- BENTAHAR, Mourad. Maître de Conférences. Université du Maine.
- LE HUEROU, Jean-Yves. Professeur. Université de Cergy-Pontoise.

Directeur de thèse

- DUQUENNOY, Marc. Professeur. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Co-directeur de thèse

- JENOT, Frédéric. Maître de Conférences. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Membres invités

- OUAFTOUH, Mohammadi. Professeur. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- CARREROT, Hervé. Responsable local "Business & Product Development". SKF Aerospace.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Jamal Assaad pour son accueil au sein du Département d'Opto-Acousto-Electronique de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie.

Je remercie vivement Frédéric Jenot qui m'a accompagné et soutenu durant ces travaux de recherche. Il fut un co-directeur de thèse remarquable, qui m'a donné suffisant d'autonomie et support pour mener à bien la partie recherche des travaux. Ces conseils avisés ont été déterminants pour la partie expérimentale décrite dans ce manuscrit.

J'exprime toute ma gratitude à Marc Duquennoy, qui m'a fait l'honneur d'être directeur de thèse et pour son temps passé sur l'encadrement des travaux.

Cette thèse a été menée sous une convention CIFRE avec l'entreprise SKF. Je suis très reconnaissant envers Hervé Carrerot pour son soutien et son aide tout au long de ces années et envers Sébastien Desvaux qui a été l'initiateur du projet et qui m'a accueilli au sein de son service avant ma thèse.

Je remercie M. Mourad Bentahar et M. Jean-Yves Le Huérou de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs pour ces travaux de thèse.

J'adresse mes remerciements à Mohammadi Ouafthouh pour son aide lors des échanges que j'ai pu avoir avec les services administratifs de l'Université de Valenciennes et de l'école doctorale.

Ces travaux n'auraient pu être menés sans le support de l'entreprise SKF et de ses salariés impliqués. Je pense en particulier à Hugues Lebrun pour son aide précieuse lors de la création des défauts, Raymond Cuglietta et son équipe du service laboratoire (Emilie, Marc, Joël) pour leur expertise, Jean-Sébastien Joly pour son assistance concernant les défauts naturels et l'analyse de ces échantillons à l'aide des équipements CND industriels, Eric Pala pour la fourniture des rouleaux en acier, Karin Wagner et Oskar Schoeppl pour la fourniture des rouleaux "tonneau" en céramique, Jean-Louis Aglave pour ses connaissances en

mécanique et enfin Charlotte Vieillard pour toutes les connaissances qu'elle m'a transmises sur les matériaux céramiques.

J'ai une pensée pour tous les membres du laboratoire IEMN/DOAE, qu'ils soient doctorants (Frédéric, Martin, Anthony, Bada, Dame, Lynda, Laid, Salah,...), personnels (Nikolay, Frédéric, Françoise, Virginie, Lucie,...) ou enseignants (Eric, Sébastien, Wei Jiang, Marie, François-Xavier, Farouk, Jean-Claude, Samuel,...) et toutes les personnes que j'ai croisées et que je n'ai pas explicitement citées.

Pour m'avoir accompagné et soutenu, j'adresse un merci particulier à Maïté.

Enfin, je remercie toutes les personnes extérieures à l'Université et à SKF, mes grands parents, ma sœur Marion, mes amis, mes anciens collègues, mes professeurs et tous ceux qui ont pu contribuer d'une manière ou d'une autre à ce que je suis devenu et à ce que j'ai pu faire.

A ma mère, pour son amour et sa persévérance

A mon père, pour son amour et son soutien

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I. Les rouleaux en céramique dans les roulements	
I. Les roulements	8
I.1. Principe et fonctionnement	8
I.2. La géométrie des rouleaux	10
I.3. Les matériaux considérés	11
I.4. Les défauts naturels	15
II. Les principales méthodes de Contrôle Non Destructif	18
II.1. L'inspection visuelle	18
II.2. Le ressuage	19
II.3. La thermographie infrarouge active	19
II.4. La magnétoscopie	19
II.5. Les courants de Foucault	20
II.6. La radiographie	20
II.7. Les ondes ultrasonores	20
III. Génération et détection d'ondes acoustiques	22
III.1. Utilisation de transducteurs piézoélectriques	23
III.2. Utilisation de transducteurs électromagnétiques	24
IV. Utilisation de lasers	25
IV.1. Génération	25
IV.2. Détection	29
IV.3. Avantages et inconvénients	34
V. Conclusion	36
VI. Bibliographie	38
Chapitre II. Ondes élastiques dans les structures cylindriques	
I. Ondes élastiques dans un solide homogène et isotrope	45
I.1. Notions de vitesse d'une onde	45
I.2. Contraintes et déformations élastiques dans un solide	46
I.3. Ondes de volume	48
II. Ondes guidées dans une structure cylindrique	50
II.1. Modes de Pochhammer-Chree	50
II.2. Ondes de Rayleigh	54
III. Diagrammes de directivité des ondes acoustiques générées par laser	55
III.1. Diagrammes de directivité des ondes de volume	56
III.2. Diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh	63
IV. Calculs de la vitesse d'une onde de surface	66
IV.1. Onde axiale	66
IV.2. Onde circonférentielle	67

IV.3. Ondes de surface hélicoïdales	72
V. Conclusion	79
VI. Bibliographie	82

Chapitre III. Caractérisation des défauts et Expérimentations

I. Montage expérimental	89
I.1. Instrumentation	89
I.2. Configuration	91
II. Echantillons	93
II.1. Défauts naturels	94
II.2. Défauts artificiels	97
II.3. Validation du régime thermoélastique	109
III. Propagation des ondes de surface dans une direction axiale	113
III.1. Description	113
III.2. Obtention de la vitesse de propagation	114
III.3. Détection d'un défaut créé par micro-scie	116
IV. Propagation des ondes de surface dans une direction circonférentielle	118
IV.1. Description	118
IV.2. Génération d'ondes de surface sur un matériau céramique	120
IV.3. Effet dispersif lié à la géométrie cylindrique	120
IV.4. Détection de défauts	122
V. Conclusion	127
VI. Bibliographie	129

Chapitre IV. Augmentation de la zone contrôlée par utilisation d'une onde de surface hélicoïdale

I. Description de la méthode	135
I.1. Génération des ondes hélicoïdales de surface	135
I.2. Réflexion des ondes acoustiques de surface sur les faces	136
II. Validation de l'approche théorique	137
II.1. Etude de l'amplitude du déplacement en fonction de la hauteur du rouleau	137
II.2. Atténuation des ondes de surface par dépôt d'un gel de couplage	140
III. Détection de défauts	142
III.1. Défaut naturel de type "repli de laminage"	142
III.2. Défaut artificiel créé à l'aide d'une micro-scie	149
III.3. Défaut artificiel créé par ablation avec un laser de marquage	156
III.4. Défaut naturel de type "brûlure"	158
IV. Etude de l'influence d'une légère variation géométrique et de la nuance de l'acier sur les signaux	160
IV.1. Influence d'une variation de diamètre	160
IV.2. Influence de la nuance d'acier	162
V. Conclusion	163
VI. Bibliographie	165

Chapitre V. Essais complémentaires et perspectives

I. Comparaison entre les méthodes de contrôle non destructif industrielles et la méthode Ultrasons-Laser	171
I.1. Contrôle des rouleaux par la méthode des courants de Foucault	172
I.2. Visualisation des défauts grâce à la magnétoscopie	174
I.3. Caractérisation des défauts au microscope optique	175
II. Extension de la méthode aux rouleaux "tonneau" en céramique	177
II.1. Configuration expérimentale pour le contrôle d'un rouleau "tonneau"	177
II.2. Génération et détection d'ondes hélicoïdales de surface	178
II.3. Détection de défaut créé par ablation à l'aide d'un laser	180
III. Pistes d'amélioration de la méthode développée	183
III.1. Augmentation de la bande fréquentielle de l'onde de surface	183
III.2. Amélioration du script prédictif du type de propagation	184
III.3. Analyse théorique de la propagation des ondes de surface sur une géométrie de type tonneau	186
III.4. Système de mise en inclinaison des rouleaux "tonneau"	187
IV. Conclusion	188
V. Bibliographie	190
Conclusion générale	193

INTRODUCTION GENERALE

Le mot "laser", employé régulièrement par toutes et tous, est en réalité un acronyme entré dans le langage courant. Cette abréviation signifie "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", qui peut être traduit par amplification lumineuse par émission stimulée du rayonnement". Cette technologie n'est pas très ancienne mais elle a connue très rapidement un intérêt significatif dans le monde de la recherche mais également dans l'industrie et dans la vie quotidienne.

Le premier à avoir posé les bases théoriques d'un faisceau de lumière cohérente n'est autre que le plus célèbre scientifique du monde, Albert Einstein. En effet, en 1917, Albert Einstein décrit le principe fondamental du laser, l'émission stimulée. Il fallut ensuite attendre trente trois ans pour qu'Alfred Kastler invente le procédé de pompage optique permettant la génération d'un faisceau laser. Deux années de plus furent nécessaires pour valider ce procédé avec la construction du premier maser (faisceau micro-ondes cohérent). C'est en 1964 que Théodore Maiman parvient à concevoir le premier laser à rubis. Le premier laser à gaz et le premier laser à liquide furent quant à eux mis au point dans les années qui suivirent.

La technologie du laser a trouvé des applications dans de nombreux domaines différents, que ce soit dans la mesure, la sidérurgie, la médecine ou même la défense. Les deux utilisations qui nous intéresseront dans ce mémoire sont, la faculté d'un laser impulsionnel à générer des ondes élastiques dans un matériau et la possibilité de mesurer un déplacement de la surface par interférométrie. Ces possibilités seront utilisées dans le cadre du développement d'une méthode innovante de contrôle non destructif par ultrasons de structures cylindriques spécifiques.

Ces travaux ont été financés par l'entreprise SKF Aeroengine France, qui dans le cadre de son activité de fabrication de roulements pour le domaine aéronautique, utilise notamment des billes et des rouleaux. Dans les années 2000, SKF Aeroengine France, anciennement SNFA, a développé avec l'aide du laboratoire IEMN-DOAE de Valenciennes, un équipement basé sur la résonance pour contrôler des billes en céramique. Fort de cette expérience, l'entreprise a souhaité mener une étude sur une nouvelle méthode de contrôle non destructif

dédiée aux rouleaux. Ce projet de recherche a donc été effectué dans le cadre d'un partenariat régi par une CIFRE (Convention Industrielles de Formation par la Recherche). Les travaux ont été menés au sein du groupe de recherche Transduction, Propagation et Imagerie Acoustique (TPIA) du Département d'Opto-Acousto-Electronique (DOAE) de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC).

Nous avons choisi de décomposer ce mémoire en cinq chapitres distincts. Le premier nous servira à présenter le contexte de l'étude et formaliser la problématique. Nous expliquerons ce qui a poussé SKF Aeroengine France à initier ce travail de recherche. Nous définirons en particulier les matériaux, les géométries et les types de défauts à prendre en compte. Sur cette base, nous établirons alors un état des lieux des méthodes disponibles en lien avec notre problématique. Tous ces éléments nous permettront d'expliquer et justifier le choix de la méthode Ultrasons-Laser pour générer et détecter des ondes ultrasonores de surface.

Dans un deuxième chapitre, nous nous efforcerons de poser les bases théoriques, et les hypothèses associées, permettant de décrire et de comprendre les phénomènes de propagation des ondes ultrasonores dans une structure cylindrique. Nous nous concentrerons alors sur les ondes de surface qui semblent être les plus pertinentes pour répondre à nos objectifs en termes de détection de défauts. L'utilisation d'un laser impulsionnel permet de générer facilement des ondes acoustiques sans contact sur des structures non planes. La méthode Ultrasons-Laser est compatible avec les contraintes géométriques, le temps de contrôle, les types de matériaux considérés et les types de défauts à détecter. Grâce à divers éléments optiques, il est possible de modifier la forme du faisceau laser. Nous étudierons donc l'influence d'une tâche focale ponctuelle, circulaire et linéique sur les diagrammes de directivité. Nous montrerons alors qu'une des formes est particulièrement bien adaptée pour générer des ondes de surface dans des directions spécifiques. Cette observation nous permettra de définir trois types de chemins de propagation, impliquant chacune, une approche analytique différente. Ce travail théorique nous permettra de comprendre les phénomènes mis en jeu et d'interpréter de manière fiable les signaux acquis lors des expérimentations que nous présenterons dans les chapitres suivants.

Dans un troisième chapitre, nous présenterons la configuration expérimentale mise en œuvre pour les essais. Nous décrirons les instruments utilisés, en particulier le laser impulsionnel et l'interféromètre qui sont les deux piliers de la méthode Ultrasons-Laser. Nous

préciserons leurs positionnements l'un par rapport à l'autre afin d'obtenir une configuration adaptée à nos objectifs. Nous nous intéresserons ensuite aux différents échantillons utilisés et sur lesquels des défauts peuvent être présents. Ces défauts peuvent être de deux types, naturels ou artificiels. En effet, dans le cadre de nos travaux, nous avons été amenés à créer des défauts particuliers à l'aide de différentes méthodes mécaniques ou optiques. Avant toute expérimentation, nous tâcherons de valider l'aspect non destructif de la méthode envisagée. Puis nous vérifierons la cohérence entre les prédictions théoriques et les expériences effectuées pour deux types particuliers de chemins de propagation, l'un axial et l'autre circonférentiel, des ondes de surface. Ces essais nous permettront également d'aborder la détection de différents types de défauts.

Nous étudierons ensuite la détection de défauts pour une direction de propagation plus originale des ondes de surface. Nous inclinerons la source ligne pour générer des ondes de surface dont le chemin de propagation est de type hélicoïdal. Nous mènerons alors des essais dont l'objectif sera de vérifier la nature hélicoïdale de l'onde de surface générée. Puis nous nous intéresserons à cette approche pour la détection de défauts, en tâchant de montrer qu'elle apporte un véritable atout dans le contrôle non destructif de structures cylindriques principalement en termes de temps de contrôle. Nous évaluerons l'interaction entre cette onde et divers types défauts, naturels et artificiels. Nous tenterons alors de mettre en évidence les avantages et les limites de la méthode.

Finalement, dans un cinquième et dernier chapitre, nous proposerons une comparaison entre les méthodes industrielles utilisées par notre partenaire SKF Aeroengine France pour le contrôle des rouleaux en acier et la méthode développée dans ce manuscrit. Nous présenterons ensuite quelques remarques en ce qui concerne l'utilisation des ondes de surface hélicoïdales pour l'inspection de rouleaux "tonneau". Pour terminer, nous proposerons des pistes d'amélioration de la méthode de contrôle non destructif par Ultrasons-Laser des rouleaux cylindriques et "tonneau" servant à la fabrication de roulements.

CHAPITRE I. LES ROULEAUX EN CERAMIQUE DANS LES ROULEMENTS

I. Les roulements	8
I.1. Principe et fonctionnement.....	8
I.2. La géométrie des rouleaux.....	10
I.3. Les matériaux considérés	11
a) Les principales propriétés des aciers.....	12
b) Les principales propriétés de la céramique.....	12
c) Intérêts de la céramique	14
I.4. Les défauts naturels	15
a) Les défauts d'élaboration.....	15
b) Les défauts d'usinage	17
II. Les principales méthodes de Contrôle Non Destructif.....	18
II.1. L'inspection visuelle.....	18
II.2. Le ressuage.....	19
II.3. La thermographie infrarouge active	19
II.4. La magnétoscopie.....	19
II.5. Les courants de Foucault.....	20
II.6. La radiographie	20
II.7. Les ondes ultrasonores	20
III. Génération et détection d'ondes acoustiques.....	22
III.1. Utilisation de transducteurs piézoélectriques	23
a) Génération et détection	23
b) Avantages et inconvénients	23
III.2. Utilisation de transducteurs électromagnétiques	24
a) Génération et détection	24
b) Avantages et inconvénients	24
IV. Utilisation de lasers	25
IV.1. Génération	25
a) Seuil d'ablation.....	26
b) Interaction Laser / Matière.....	27
IV.2. Détection.....	29

a) Sondes à diffraction et à déflexion.....	30
b) Sondes interférométriques	32
IV.3. Avantages et inconvénients	34
a) Avantages.....	34
b) Inconvénients	35
V. Conclusion	36
VI. Bibliographie	38

Introduction

Le domaine aéronautique a toujours été une industrie à l'avant-garde des avancées techniques et est un modèle de qualité et de précision. Elle est, avec l'industrie militaire, à l'origine du développement de nombreuses nouvelles technologies que l'on retrouve par la suite dans notre vie quotidienne. Pour ce secteur, la performance et un très haut niveau de qualité sont des enjeux de premières importances. La performance est caractérisée par le développement technologique et la qualité par toute une série de procédures et d'équipement de contrôle.

L'arrivée de nouveaux matériaux aux propriétés physiques particulières permettent d'accroître les performances de certains équipements, c'est notamment le cas des roulements. SKF Aeroengine en tant que fabricant de roulements aéronautiques développe des roulements dont les éléments roulants ne sont plus nécessairement en acier mais peuvent être en céramique. La céramique de par ses propriétés physiques, possède un potentiel certain pour des applications particulières ou pour augmenter la performance des roulements déjà existants.

L'utilisation de ce nouveau matériau apporte de nouvelles problématiques liées à son contrôle. Dans le domaine aéronautique, la performance n'autorise pas tout, la qualité et la fiabilité doivent également être au rendez-vous.

Ce chapitre sera consacré au contexte qui entoure le sujet de cette thèse.

Avant toute chose, nous présenterons le principe de fonctionnement d'un roulement, pour nous attarder ensuite sur la géométrie particulière des rouleaux, puis nous aborderons les matériaux considérés. Enfin, après avoir mis en évidence, les points forts et les limites de ces matériaux, nous tacherons de caractériser les défauts naturels importants à détecter.

Dans un deuxième temps, nous aborderons le contrôle non destructif et présenterons succinctement les principales méthodes utilisées en industrie en s'efforçant d'intégrer leurs points forts et leurs limites à notre réflexion. Nous exposerons également la problématique initiatrice du projet porté conjointement par le laboratoire et l'entreprise. En mettant en parallèle la problématique et les méthodes de contrôle existantes, nous justifierons notre choix technique, à savoir la méthode Ultrasons-Laser.

Dans un troisième temps, nous détaillerons les différentes méthodes et outils permettant de générer et de détecter les ondes ultrasonores dans un matériau, en mettant en évidence les conditions et les limites à prendre en compte.

Puis dans une dernière partie, nous nous pencherons sur la méthode retenue, les Ultrasons-Laser. Nous apporterons alors les principes physiques et théoriques, pour notre application.

I. Les roulements

Le roulement est un élément de première importance en mécanique de façon générale. Il est présent systématiquement lorsqu'un arbre est en rotation. Il permet de découpler les mouvements de rotation entre deux parties.



Figure I-1 : Coupe 3D d'un roulement à bille. [1]

I.1. Principe et fonctionnement

Un roulement est un assemblage de différentes pièces mécaniques. Cet ensemble est composé d'une bague intérieure, d'une bague extérieure, d'une cage et de plusieurs éléments roulants. Ces éléments roulants peuvent avoir diverses géométries, ils sont nommés par famille, les billes, les aiguilles et les rouleaux. L'une ou l'autre de ces géométries sera privilégiée en fonction des contraintes appliquées au roulement, si bien que chaque roulement différera en fonction des conditions mécaniques et environnementales.

Comme nous le voyons sur la Figure I-2, la bague extérieure possède une piste de roulement interne sur laquelle les éléments roulants se déplacent aussi bien dans un sens que dans l'autre. On utilise généralement les billes ou les rouleaux. Pour simplifier notre explication, nous considérerons des éléments de type billes comme sur la Figure I-2.

Ces billes ne sont pas en contact les unes avec les autres, mais maintenues par une cage. Cette cage tourne librement par rapport aux bagues intérieures et extérieures, en fonction du déplacement des billes dans le roulement.

La bague intérieure a la même fonction que la bague extérieure, à savoir offrir aux billes une piste de roulement. Etant à l'intérieur du roulement cette piste se situe sur la partie externe de la bague.

Les bagues, intérieures et extérieures, sont destinées à être intégrées dans un mécanisme. Ces bagues ont donc des géométries particulières et spécifiques afin de s'adapter à l'environnement pour lequel le roulement a été conçu.

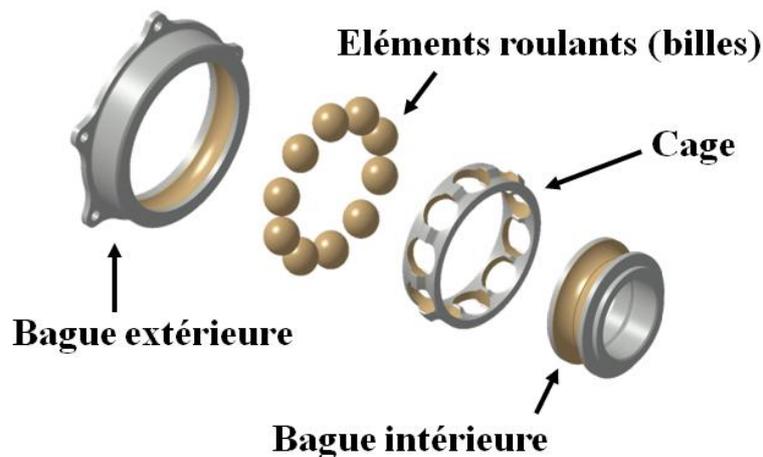


Figure I-2 : Eléments constitutifs d'un roulement

Comme nous venons de le voir, ils existent différents types d'éléments roulants. SKF a déjà travaillé et développé un équipement de contrôle non destructif ayant pour objectif le contrôle des billes en céramique. Les demandes de ses clients poussent aujourd'hui l'entreprise à explorer de nouvelles pistes technologiques pour développer une nouvelle méthode de contrôle non destructif dédiée aux rouleaux.

I.2. La géométrie des rouleaux

Les rouleaux sont des éléments roulants au même titre que les billes ou les aiguilles. Ils permettent d'assurer une rotation indépendante entre la bague intérieure et la bague extérieure.

Pour assurer la fonction qui est la sienne, un rouleau possède une géométrie particulière composée de plusieurs zones distinctes (cf. Figure I-3).

La principale est la partie cylindrique. Cette zone est en contact avec les pistes du roulement de la bague intérieure et de la bague extérieure. Lors de chargements mécaniques importants, cette zone subit des contraintes extrêmement élevées. Un défaut sur cette partie fortement contrainte pourrait se révéler critique et entraîner une défaillance du roulement.

En s'éloignant du centre pour aller vers les faces du rouleau, nous arrivons sur une zone appelée la dépouille. Il s'agit d'une zone créée afin d'éviter des singularités géométriques et relier la partie cylindrique au rayon de raccordement. En effet, toute singularité géométrique soumise à des forces concentrera localement des contraintes, qui pourront se révéler trop élevées pour le matériau utilisé.

Le rayon de raccordement permet, comme son nom l'indique, de raccorder la dépouille à l'une des faces du rouleau.

Chacune de ces zones subit des contraintes lors du fonctionnement du roulement mais la zone la plus critique reste malgré tout la partie cylindrique.

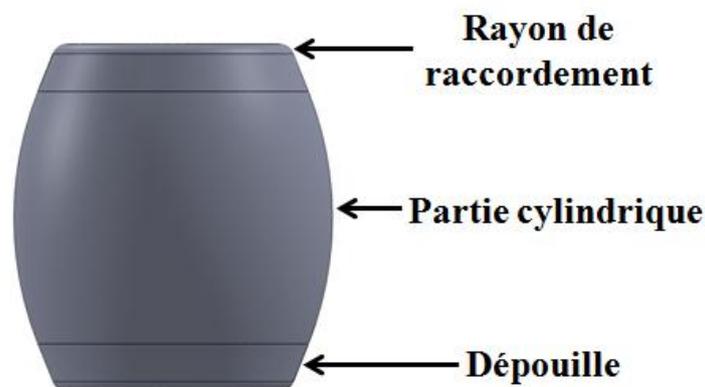


Figure I-3 : Description géométrique d'un rouleau.

Les dimensions des rouleaux n'évoluent pas proportionnellement entre elles. La longueur, le diamètre maximal et le rayon de la partie cylindrique varient de manière indépendante en fonction du cahier des charges établi pour le rouleau.

Afin de partager le même vocabulaire dans ce mémoire et pour une meilleure compréhension des travaux et des essais, nous allons introduire les notions de rouleaux cylindriques et de rouleaux "tonneau". Lorsque la partie cylindrique est droite, nous parlerons de rouleaux cylindriques, en opposition aux rouleaux "tonneau" qui, eux, possèdent une partie cylindrique dont le rayon varie en fonction de la hauteur, comme illustré sur la Figure I-4, ci-dessous.

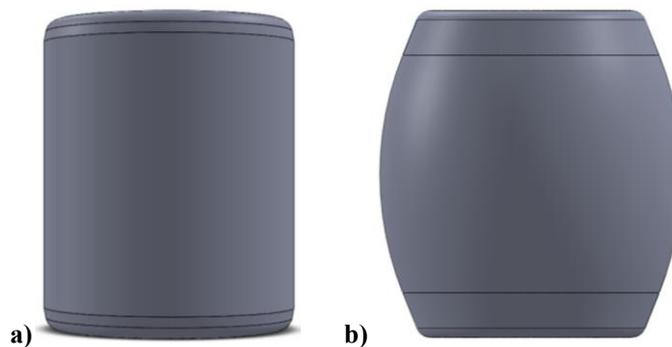


Figure I-4. Différentes géométries des rouleaux. -a) Rouleau cylindrique, -c) Rouleau "tonneau".

De plus, lorsque nous parlerons de concepts théoriques, nous utiliserons le terme "cylindre" qui est plus juste d'un point de vue mathématique et nous utiliserons le terme de rouleau pour décrire nos échantillons, car ils possèdent une géométrie plus complexe qu'un simple cylindre.

I.3. Les matériaux considérés

La fabrication de roulements de haute précision subissant des contraintes importantes nécessitent l'utilisation de matériaux particuliers. Ils peuvent être retenus pour leurs caractéristiques singulières ou spécialement élaborés pour des applications extrêmes. Il en existe principalement deux types pour la conception des rouleaux : les céramiques et les aciers.

Cependant toutes les céramiques et tous les aciers ne sont pas forcément pertinents pour assurer pleinement la fonction recherchée. Ces matériaux doivent répondre à un certain

nombre d'exigences en termes de dureté, de résistance et de tenue. Plusieurs nuances d'acier sont utilisées mais les deux nuances les plus courantes sont le M50 et le 100C6.

a) Les principales propriétés des aciers

L'acier est un alliage métallique composé majoritairement de fer et entre 0,008 et 2% de carbone. L'apport de carbone au fer permet d'obtenir un matériau dur et résistant à l'allongement. Son traitement thermique et l'ajout d'éléments chimiques modifient les caractéristiques. De par ses propriétés physiques, ce métal est utilisé dans de nombreuses et diverses applications comme les structures architecturales, les châssis de véhicules, les bagues de cadenas ou les roulements.

Le M50 est un composé de fer, de carbone, de molybdène, de chrome et de vanadium et est également connu sous le nom "80MoCrV42-16". Cet acier est élaboré sous vide et refondu par électrode consommable. Il possède une dureté élevée, une bonne résistance à l'adoucissement, une bonne tenue à la compression et une résistance élevée à la fatigue. Ces caractéristiques font que cet acier ait un excellent comportement face aux sollicitations mécaniques jusqu'à une température de 300°C tout en assurant une bonne tenue à la fatigue.

Le 100C6 est quant à lui composé de fer, de carbone et de chrome. Le nom 100C6 est celui utilisé par l'usine SKF, dans la littérature ou dans les fonderies, cet acier est connu sous le nom 100Cr6. Ce matériau possède une bonne résistance à l'usure et à l'enfoncement. Tout comme le M50, il est élaboré par induction sous vide et est refondu par électrode consommable.

b) Les principales propriétés de la céramique

La céramique est une matière frittée, c'est à dire qui subit un procédé de frittage qui a pour but de la densifier. Ce processus complexe nécessite un haut niveau de maîtrise des paramètres de fabrication.

La céramique est initialement une poudre synthétisée chimiquement. Cette poudre est mélangée dans un solvant, à des additifs de frittage et à des liants, améliorant la densification et facilitant l'éjection du comprimé. Un pressage à sec, puis un pressage isostatique à froid sont effectués pour mettre en forme la pièce. Suite à cette étape, une première élévation de température très lente jusqu'à 600°C est prodiguée pour obtenir un comprimé délianté dans lequel les liants ont été évacués.

L'étape suivante est l'une des plus importantes car elle va donner à ce matériau ses caractéristiques définitives, il s'agit du frittage. Le frittage permet de souder les grains de poudre et réduire la porosité. Ce processus doit être parfaitement maîtrisé pour obtenir une céramique de qualité avec une densité élevée et une microstructure fine et homogène. Il est possible pour cette étape de ne faire qu'un seul pressage à chaud avec encapsulage du comprimé. Ce frittage direct permet de réduire le temps d'élaboration mais le résultat final est de moins bonne qualité. L'idéal est de passer par une étape de préfrittage.

Le préfrittage consiste à monter la température des comprimés à 1500°C afin d'obtenir une ébauche dont la densité sera égale à 95% de la densité théorique et une porosité ouverte quasiment nulle. Suite à ce préfrittage vient le véritable frittage qui lui monte à 1800°C sous une pression isostatique de gaz inerte de 200 MPa. Ce processus est appelé "HIP" (Hot Isostatic Pressure). Grâce à ce frittage, le matériau obtenu possède une densité supérieure à 99% de la densité théorique, quasiment plus aucun pore fermé résiduel, une microstructure fine (cf. Figure I-5, obtenue par les travaux de R. Rodriguez [2]) et un taux de phase vitreuse au niveau des joints de grains limité.

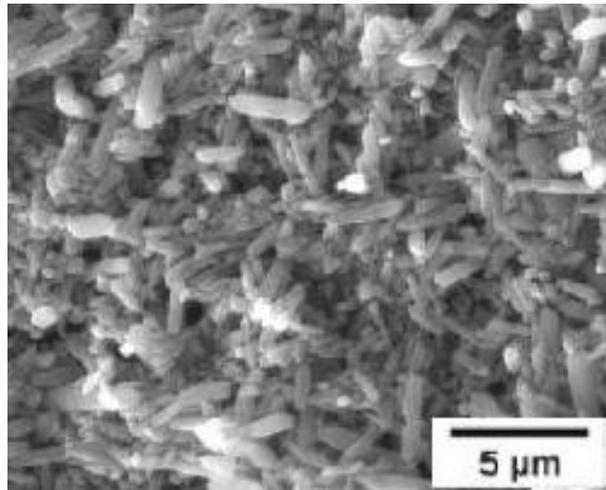


Figure I-5 : Microstructure du nitrure de silicium (préfrittage + HIP)

Après le frittage, les ébauches sont usinées pour obtenir des rouleaux avec un état de surface finement polie et respectant précisément les côtes nominales imposées.

Ce procédé de fabrication et les éléments chimiques choisis (poudre, additifs, liants) permettent d'obtenir un matériau d'une grande qualité pour une application aéronautique des roulements. La céramique répondant au mieux à tous ces critères est le nitrure de silicium de formule brute Si_3N_4 .

A l'image de l'acier, les fabricants de roulement ne produisent pas eux-mêmes la céramique mais l'achètent à un fournisseur extérieur. En effet, la complexité du processus, les installations conséquentes et les compétences nécessaires pour leur production ne font pas partie du domaine d'expertise de ces manufacturiers.

c) Intérêts de la céramique

Bien que fondamentalement différents, les rouleaux en acier et en céramique ont la même finalité. Ils ont en commun une excellente résistance à la compression, une dureté élevée et une plage d'utilisation en température large.

Lorsque l'on s'intéresse en détail à leurs propriétés physiques respectives, il est possible de les comparer et d'en déduire leurs avantages et leurs inconvénients (cf. Tableau I-1) [3].

Caractéristiques techniques du matériau	Acier à roulements	Nitrure de Silicium
Masse volumique (kg.m ⁻³)	7800	3200
Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ .°C ⁻¹)	20 - 600°C 20 - 1000°C	12,3 -
Module d'élasticité (GPa)	210	315
Coefficient de Poisson	0,30	0,26
Dureté HV	700	1600
Résistance à la compression (MPa)	880	2500
Résistance à la traction (MPa)	800	800
Ténacité (MPa.m ^{1/2})	25	5 à 7
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	40 à 50	18 à 25
Température limite de fonctionnement (°C)	~300	~1000
Résistance à la corrosion	Mauvaise	Bonne
Magnétisme	Présent	Absent
Caractéristique électrique	Conducteur	Isolant

Tableau I-1 : Propriétés physiques des matériaux

La céramique en nitrure de silicium (Si₃N₄) étant un nouveau matériau, fruit des avancées techniques récentes, il possède quelques avantages sur l'acier au regard de nos critères. Parmi ces points forts, nous pouvons citer :

Sa légèreté, qui permet évidemment de réduire le poids global du roulement mais qui autorise également des vitesses de rotation beaucoup plus élevées grâce à la diminution de la force centrifuge.

Son faible coefficient de dilatation thermique qui réduit les variations dimensionnelles provoquées par l'échauffement ou le refroidissement de la matière.

Sa dureté qui détruit les particules ou corps étrangers, susceptibles d'être présents dans un roulement, par écrasement sans détérioration de l'élément roulant.

Sa résistance à la compression, qui autorise des chargements importants et qui avec la dureté réduit la dimension du point de contact entre l'élément roulant et la piste de roulement, limitant ainsi les frottements et augmentant par la même occasion l'efficacité du roulement.

Son utilisation sur une plage de température étendue, qui accepte un environnement cryogénique ou de haute température.

Son excellente résistance à l'oxydation et à un grand nombre de produits chimiques, qui permet une faible lubrification ou une installation dans un environnement agressif.

Son isolation électrique et son absence de magnétisme peuvent être de grands avantages dans certains environnements magnétiques ou pour isoler électriquement la partie fixe et la partie en rotation (contre la foudre par exemple).

L'inconvénient majeur de la céramique par rapport à l'acier concerne sa faible ténacité. La ténacité correspond à la résistance à la rupture. De manière plus intuitive, elle traduit la facilité pour une fissure de se propager dans un matériau suite à un choc. Plus la ténacité est faible, plus le matériau est "cassant". A une température de 20°C, une fissure se propagera donc plus facilement sur un rouleau en céramique ayant une ténacité autour de 6 MPa.m^{1/2} que sur un rouleau en acier ayant une ténacité égale à 25 MPa.m^{1/2}, à noter que cette propriété varie fortement pour un acier en fonction de la température.

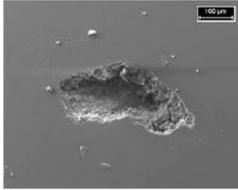
Maintenant que nous avons défini et présenté les matériaux concernés dans ce mémoire, nous allons nous intéresser aux caractéristiques particulières des défauts.

I.4. Les défauts naturels

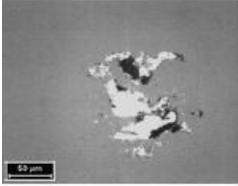
Par défaut naturel, nous entendons un défaut involontairement généré lors des phases de fabrication ou par accident de manipulation par opposition aux défauts artificiels que nous créons volontairement pour les besoins de l'étude.

a) Les défauts d'élaboration

Ces défauts peuvent être créés lors de l'élaboration de la céramique ou de l'acier, suite à un manquement ou une erreur dans le processus de fabrication. Certains sont spécifiques à un matériau alors que d'autres peuvent être observés sur les deux matières.



Une cavité caractérise un manque local de matière. Dans le cas, d'un manque local de matière dans le cœur d'une pièce en acier nous parlons plutôt de retassure.



Des inclusions peuvent être présentes dans la céramique ou dans l'acier et peuvent être de natures différentes.



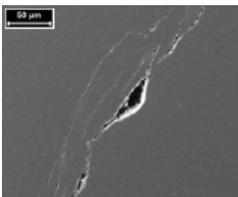
Des zones de faible densification peuvent apparaître dans les matériaux en céramique. Ce sont des zones au niveau desquelles la densité de matière est plus faible que pour le reste de la bille.



Des différences de composition peuvent se faire au niveau de la céramique suite à un mauvais mélange des poudres. Ces différences peuvent être visibles car elles produisent de petites taches noires ou blanches.



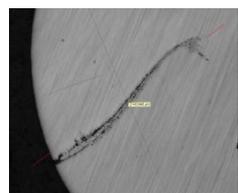
Des fissures peuvent être provoquées par un non respect des températures lors du déliantage de la céramique ou du refroidissement du métal. Dans le cas de la céramique, nous parlerons de fissures de déliantage et de criques ou de tapures pour l'acier.



Un autre type de fissure peut apparaître si le refroidissement après pressage isostatique est trop brutal. Il s'agit alors d'une fissure de densification.



La porosité peut être présente sur l'acier comme sur la céramique.



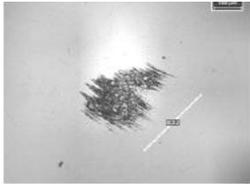
Les repliures sont des fissures dues à un repli du métal lors du laminage.

b) Les défauts d'usinage

Dans les défauts d'usinage, nous intégrerons les défauts créés par les outils d'usinage et des mauvaises manipulations ou des conditions de transport inappropriées.



L'entaille est une abrasion mécanique due à un outil d'usinage. Elle peut avoir des dimensions importantes en fonction de l'outil à l'origine de sa formation. Elle peut être présente sur l'acier et la céramique.



Tout comme l'entaille, la marque d'usinage est provoquée par les conditions d'usinage aussi bien sur l'acier que sur la céramique.



Le C-Crack est un type de fissure très spécifique qui apparaît lorsque deux pièces bombées en céramique s'entrechoquent. En fonctionnement, il peut engendrer un écaillage de l'élément roulant et aboutir à une défaillance.



Lorsqu'un rouleau en céramique subit localement une surcharge sur une particule abrasive, une fissure en étoile peut se créer. En général, ce type de défaut est généré lors du fonctionnement du roulement.



Un usinage mal paramétré peut engendrer une brûlure ou une surchauffe. Ce défaut provoque une modification locale de la structure de l'acier. Ce défaut peut être mis en évidence par une attaque chimique (Nital ou Niteau).

Un défaut spécifique à l'acier est l'oxydation du métal. Ce défaut peut apparaître à n'importe quel moment si les conditions environnementales sont réunies.

Les défauts naturels sont majoritairement des défauts de surface ou de sous-surface et de type manque de matière ou fissure. Dans cette zone corticale se localise le maximum des contraintes lors du fonctionnement du roulement. Cette zone du rouleau est l'une des plus critiques et nous nous concentrerons donc sur celle-ci.

Le rôle primordial des éléments roulants n'autorise pas la présence de défauts susceptibles d'engendrer une détérioration de la fonction du roulement voir pire sa destruction. Les processus de fabrication des rouleaux sont bien maîtrisés et validés mais un défaut est toujours susceptible d'apparaître. Il est donc essentiel de pouvoir contrôler l'absence de défaut sur un rouleau avant qu'il ne soit monté dans un roulement. Ce contrôle ne doit bien entendu pas détruire ou modifier le rouleau. Ce type de contrôle est appelé contrôle non destructif.

Si nous faisons le bilan des défauts présentés, nous pouvons constater que la majorité des défauts se situent en surface. De plus, les calculs et l'expérience montrent que la zone la plus critique pour présence de défauts est justement en surface et en sous-surface, car à cet endroit, ils engendrent des écaillages et des défaillances. Nous pouvons également observer que les défauts sont, soit un manque de matière, soit une fissure, soit une variation locale de matière. Ces caractéristiques seront importantes pour le choix de la méthode à mettre en œuvre pour la détection de défauts.

II. Les principales méthodes de Contrôle Non Destructif

Le contrôle non destructif est largement utilisé dans l'industrie, en particulier dans l'aéronautique, où le coût des pièces est très important et les conséquences d'une défaillance dramatiques.

A l'heure actuelle, il existe de nombreux équipements de contrôle non destructif. Ils ont tous des limites et des avantages. Parmi les principales méthodes utilisées en industrie pour détecter des défauts de type "fissure", nous pouvons citer :

II.1. L'inspection visuelle

L'observation d'une pièce à l'œil nu est la méthode la moins coûteuse et la plus simple pour contrôler l'état d'une pièce. Il est possible d'améliorer le niveau de contrôle à l'aide d'un instrument optique comme par exemple une loupe ou une caméra. Ces méthodes permettent d'observer des défauts débouchants, des fissures, des criques, des trous, des variations de couleurs et d'aspects.

Tous ces procédés optiques ont pour principal intérêt leur simplicité, mais ils sont fortement limités par leur fiabilité et leur temps d'analyse.

II.2. Le ressuage

Cette méthode utilise un liquide que l'on appelle le pénétrant capable de s'introduire par capillarité dans de petits interstices et de révéler visuellement ces défauts après évacuation de l'excédent de fluide.

Le ressuage permet de mettre en évidence des défauts fins et débouchants en surface. Il n'est pas possible d'observer via cette méthode des défauts larges ou non débouchants. De plus, le ressuage ne permet pas le dimensionnement précis du défaut, impose l'utilisation de consommables souvent polluants et la nature du matériau peut rendre impossible ce contrôle (rugosité, incompatibilité chimique,..). Ces limites sont contrebalancées par son faible coût de mise en œuvre et sa simplicité, qui en fait une méthode de contrôle non destructif très utilisée dans l'industrie.

II.3. La thermographie infrarouge active

La thermographie infrarouge active se différencie de la thermographie infrarouge passive par l'utilisation d'une excitation extérieure. Celle-ci peut être électrique, optique, mécanique ou acoustique et a pour but de faire varier la température de la pièce à inspecter. Ce changement de température permet de mettre en évidence un défaut par une variation anormale du flux thermique. Grâce à ce procédé, il est possible de détecter des hétérogénéités comme par exemple des fissures. L'un des points forts de cette méthode est l'obtention d'une cartographie de l'échantillon. La vitesse d'analyse aura une forte dépendance aux propriétés thermiques du matériau, rapide pour les métaux et plus lente pour les composites ou plastiques et ne permettra pas de dimensionner la profondeur du défaut.

II.4. La magnétoscopie

La magnétoscopie est le procédé le plus connu reposant sur le principe des fuites magnétiques. Un défaut est vu comme un obstacle au flux magnétique et provoque une dispersion dans les lignes de flux. Cette dispersion est mise en évidence grâce à une accumulation de poudre de fer ou de liquide ferromagnétique dans le cas de la magnétoscopie.

Cette méthode permet de révéler des défauts débouchants et perpendiculaires aux lignes de champs. Elle est très sensible à la présence de défauts de surface de type "fissure" et démontre une bonne fiabilité. Par contre, elle n'est applicable que sur un matériau conducteur et est peu quantitative.

II.5. Les courants de Foucault

Ce contrôle se base sur l'utilisation d'un champ magnétique générant des courants induits dans un conducteur qui modifient à leur tour l'impédance de la bobine d'excitation. Les variations d'impédance permettent de mettre en évidence les défauts de surface.

Cette méthode permet une bonne sensibilité aux défauts débouchants et autorise une automatisation du contrôle. Le principe même de ce contrôle implique que le matériau à analyser soit électriquement conducteur.

II.6. La radiographie

La radiographie est une méthode utilisant un rayonnement de courte longueur d'onde (X ou γ) traversant l'objet à analyser. Le flux traversant la pièce est capté, généralement à l'aide d'un film ou d'un écran. Les variations d'intensité du flux permettent d'observer les défauts internes.

Cette méthode de contrôle non destructif performante a malgré tout des limites, un coût important, une mise en œuvre complexe, un temps de contrôle relativement long et la non détection de fissures se présentant dans l'axe du faisceau.

La tomographie est basée sur le même principe mais un décalage du faisceau permet d'obtenir un modèle en trois dimensions, en conséquence le temps de mesure et de traitement est beaucoup plus long. Cette dernière méthode extrêmement performante reste, pour la majorité des cas, trop coûteuse et lente pour un contrôle industriel efficace.

II.7. Les ondes ultrasonores

Les ondes élastiques ont la particularité de se propager dans un solide, que ce soit en surface ou dans le volume, sans dommage pour celui-ci. Ces caractéristiques s'avèrent particulièrement intéressantes dans le cadre d'une méthode de contrôle non destructif [4] [5].

Les méthodes utilisant des ultrasons ont démontré leurs capacités en termes de détection de défauts internes et débouchants. Les ondes acoustiques ne reposant pas sur la propriété de conduction électrique, elles sont utilisables sur la plupart des matériaux, y compris les isolants comme les polymères ou les céramiques. Les avantages de ce type de contrôle ne s'arrête pas là, en effet, il est possible d'analyser une pièce de manière manuelle ou automatique et il existe de nombreuses méthodes pour générer et détecter des ondes ultrasonores. Certaines contraintes sont néanmoins présentes, car l'interprétation peut se révéler délicate et l'environnement de travail doit être maîtrisé pour éviter toutes perturbations extérieures, telles que les vibrations générées par des machines tournantes.

Nous faisons le bilan des différentes méthodes de contrôle non destructif en fonction des objectifs et des contraintes liés à la problématique.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Inspection visuelle	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité • Coût • Applicable sur tout type de matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Intervention humaine • Type de défauts détectés • Fiabilité
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de défauts débouchants • Applicable sur tout type de matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Intervention humaine • Utilisation de consommable
Thermographie infrarouge active	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable sur tout type de matériau • Détection de fissures 	<ul style="list-style-type: none"> • Forme des pièces contrôlables • Intervention humaine
Magnétoscopie	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de défauts débouchants 	<ul style="list-style-type: none"> • Non applicable à la céramique • Utilisation de consommable • Intervention humaine
Courants de Foucault	<ul style="list-style-type: none"> • Détection efficace des défauts de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Non applicable à la céramique
Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de tout type de défaut • Applicable sur tout type de matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de contrôle • Coût
Ondes ultrasonores	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de tout type de défaut • Applicable sur tout type de matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement de signal • Coût d'acquisition

Tableau I-2. Avantages et inconvénients par rapport aux objectifs et aux contraintes.

La méthode sélectionnée doit être applicable sur des matériaux métalliques et sur la céramique, ce qui exclu immédiatement la magnétoscopie et les courants de Foucault.

Elle doit également pouvoir détecter efficacement tout type de défauts, et particulièrement des défauts de surface et de sous-surface, débouchants ou non. Cette

contrainte ne permet pas d'envisager l'utilisation de l'inspection visuelle et du ressuage, qui demandent en plus une expertise humaine.

L'objectif principal étant de proposer une méthode dédiée au domaine industriel, le temps d'analyse doit être le plus court possible et ne pas excéder quelques minutes par pièce. La radiographie est sur ce point inadaptée.

Il ne reste donc à notre disposition que la thermographie infrarouge active ou les ondes ultrasonores. La thermographie est une méthode dont les paramètres dépendent fortement du matériau, qui est difficile à mettre en œuvre pour des pièces épaisses et qui nécessite généralement l'appréciation humaine pour exploiter les résultats.

Par élimination, nous sélectionnons les méthodes basées sur les ondes ultrasonores pour le développement de la méthode de contrôle non destructif dédiée aux rouleaux en acier et en céramique car elles sont les plus adaptées à nos objectifs et aux contraintes imposées.

III. Génération et détection d'ondes acoustiques

Parmi les différentes méthodes de contrôle non destructif existantes, une semble particulièrement pertinente pour répondre aux problématiques du contrôle des rouleaux, il s'agit des ultrasons [6] [7] [8] [9]. En effet, elle permet de détecter des défauts de surface et de sous-surface, est utilisable sur l'ensemble des matériaux visés par cette étude et se propage sur toutes les géométries décrites précédemment. De nombreux auteurs ont utilisés ces ondes dans le but de caractériser des cylindres pleins, mais également des tubes [10] [11]. De plus, l'analyse par ultrasons est suffisamment rapide pour absorber une cadence industrielle de production et le coût global de ce type de contrôle non destructif est généralement assez faible, surtout en comparaison avec la méthode de la radiographie qui, elle aussi, est efficace sur les matériaux métalliques et céramiques.

Il existe plusieurs méthodes de génération et de détection des ultrasons dans un solide. Classiquement on identifie trois options différentes :

- la voie mécanique avec les transducteurs piézoélectriques
- la voie magnétique avec les EMAT
- la voie optique avec les lasers

III.1. Utilisation de transducteurs piézoélectriques

a) Génération et détection

Les transducteurs piézoélectriques sont basés, comme leurs noms l'indiquent, sur le phénomène de piézoélectricité mis en évidence en 1881 par Pierre et Jacques Curie [12]. Certains corps possèdent la propriété de se polariser électriquement lorsqu'on leur applique une contrainte mécanique et inversement de provoquer un déplacement lorsque leur est appliquée une tension électrique [13].

En conséquence, les transducteurs piézoélectriques sont utilisables pour la génération et pour la détection des ondes ultrasonores. Les premiers éléments utilisés étaient des cristaux naturels comme le quartz, mais leurs facteurs de couplage sont faibles ce qui engendre des performances limitées. Par la suite avec le développement des matériaux et des techniques, des céramiques piézoélectriques ont été synthétisées ce qui a permis d'améliorer les systèmes piézoélectriques grâce à des coefficients de conversion entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique plus importants. Enfin parmi les dernières évolutions notables au sein de l'utilisation de la piézoélectricité nous retenons les films polymères qui sont des membranes déformables et extrêmement fines.

La transmission des vibrations à la pièce oblige à certaines contraintes. Généralement un contact direct avec l'échantillon ou l'utilisation d'un agent de couplage est nécessaire pour cette méthode de génération et de détection d'ondes ultrasonores.

Un même transducteur peut aussi bien être utilisé en génération qu'en détection, bien que la configuration de celui-ci peut être optimisée afin de privilégier soit la génération, soit la détection.

Il existe également diverses configurations possibles pour la fabrication d'un transducteur, comme le transducteur droit, focalisé, d'angle ou double. L'une ou l'autre sera privilégiée en fonction des besoins et des contraintes identifiés.

b) Avantages et inconvénients

De par nature et indépendamment de leurs configurations ou de leurs utilisations, les transducteurs piézoélectriques possèdent un certain nombre d'avantages mais également des limites.

La conception et l'utilisation de ces transducteurs sont bien maîtrisées. En effet, à l'heure actuelle, ils sont largement utilisés dans le monde industriel ou médical, ce qui en fait une technologie possédant une certaine maturité. Ils sont utilisables sur tout type de matériau en large bande ou en bande étroite. En revanche, ils peuvent être assez délicats à mettre en œuvre sur certaines géométries complexes et nécessitent généralement une mise en contact avec le solide à étudier et/ou l'utilisation d'un couplant, ce qui joue sur la rapidité globale du contrôle en complexifiant le passage d'une pièce à l'autre.

III.2. Utilisation de transducteurs électromagnétiques

Le terme "EMAT" est l'acronyme du terme anglais "ElectroMagnetic Acoustic Transducer" que l'on peut traduire par transducteur acoustique électromagnétique.

a) Génération et détection

Un EMAT est un transducteur utilisant les propriétés électriques et magnétiques du solide dans lequel on souhaite générer ou détecter des ondes ultrasonores [13] [14] [15].

Ce type de transducteur est composé d'un aimant permanent (ou d'un électro-aimant) générant un champ magnétique et d'une bobine alimentée par un courant électrique qui provoque l'appariation de courants de Foucault dans le matériau à analyser. Ces courants de Foucault interagissent avec le champ magnétique précédemment décrit ce qui induit des forces de Lorentz dans le solide. Ces forces de Lorentz génèrent alors des ondes ultrasonores.

Il s'agit tout comme pour le phénomène piézoélectrique d'un effet réversible, ce qui permet d'utiliser ce type de transducteur aussi bien en émission qu'en réception. En détection, le déplacement des particules dans le champ magnétique produit une variation de tension dans la bobine, ainsi en analysant ce signal, il est possible de mesurer les déplacements dus au passage d'une onde. Les EMAT connaissent actuellement un développement important et leurs commercialisations sont de plus en plus communes.

b) Avantages et inconvénients

Les transducteurs EMAT possèdent de nombreux avantages pour le développement de méthodes de contrôle non destructif par ultrasons.

Comme nous l'avons vu un EMAT permet à la fois la génération et la détection d'ondes ultrasonores, bien que la détection soit qualitativement meilleure que la génération. Cette génération et cette détection des ondes se font directement au sein du matériau et le

principe de fonctionnement de ces transducteurs permet de générer des ondes de surface. Un autre de ses atouts importants par rapport aux transducteurs piézoélectriques est son utilisation à distance (quelques millimètres) et sans agent couplant. Face à ces avantages, il existe des inconvénients comme un rapport signal sur bruit moins bon et un encombrement des capteurs plus important. Malgré tout, l'aspect le plus inapproprié à notre problématique concerne la nature même des matériaux accessibles via les EMAT. Il est impossible d'utiliser ces transducteurs sur des matériaux non conducteurs. La céramique étant un matériau isolant électriquement, les forces de Lorentz ne peuvent être générées dans celui-ci. Les travaux de recherche décrits dans ce mémoire portent sur le développement d'une méthode de contrôle non destructif innovante pour détecter des défauts de surface et de sous-surface sur des rouleaux en acier et en céramique. En conséquence, malgré leurs nombreux avantages, les transducteurs EMAT ne peuvent répondre à notre problématique.

IV. Utilisation de lasers

La dernière possibilité pour générer et détecter des ondes ultrasonores dans un solide passe par l'utilisation de lasers, cette méthode est couramment appelée Ultrasons-Laser [16]. Contrairement aux deux précédents transducteurs qui possèdent un principe de réciprocité, la méthode Ultrasons-Laser nécessite une différenciation entre la génération et la détection des ondes.

IV.1. Génération

Comme l'a démontré R.M. White en 1963 [17], il est possible d'utiliser une onde monochromatique pour générer des ondes acoustiques sur un solide par échauffement. En pratique, la génération d'ondes par laser se fait à l'aide d'un laser impulsionnel de forte puissance. On utilise généralement des lasers dont la période d'illumination est de l'ordre de la nanoseconde ou de la picoseconde pour ce genre d'application.

L'interaction du faisceau laser avec la matière crée une élévation locale de la température [18] et provoque donc une dilatation locale du matériau. Cette variation de volume engendre un déplacement de particules qui produit une onde élastique. Lorsqu'il y a élévation importante de la température, il peut y avoir un phénomène de sublimation de la matière. Il est donc absolument nécessaire dans une optique de contrôle non destructif de ne

pas affecter l'échantillon et donc de définir deux types de régimes, le régime thermoélastique et le régime ablatif.

a) Seuil d'ablation

Il existe un seuil, différent pour chaque matériau, définissant dans quel régime la génération se situe. Ce seuil correspond à une densité de puissance absorbée et s'exprime en W/m^2 . Au delà de cette limite, l'échantillon est partiellement vaporisé et le modèle théorique sera celui du régime d'ablation. En deçà, nous conservons un régime thermoélastique. Ce calcul se base sur une distribution spatiale gaussienne de la densité de puissance et nous donne [19] :

$$I > \left(\frac{\pi K \rho C}{4\Delta} \right)^{1/2} (\theta_v - \theta_i) \quad (I.1)$$

Cette condition dépend des propriétés intrinsèques du matériau comme la conductivité thermique (K), la masse volumique (ρ), la capacité thermique massique (C) et la température de vaporisation (θ_v) mais également de paramètres extérieurs liés au laser avec la durée de l'impulsion (Δ) et aux conditions de l'environnement avec la température initiale (θ_i).

Les calculs ont été fait pour les deux types de matériaux qui nous intéressent dans cette étude. L'objectif étant de conserver un régime thermoélastique et en se basant sur l'équation (I.1), dans le cas de l'acier nous devons avoir une puissance absorbée inférieure à 7 MW/cm² et inférieure à 4 MW/cm² dans le cas de la céramique. Pour la céramique, la température de vaporisation n'a pas sens car au delà de 1850°C, les atomes de silicium et d'azote se dissocient. En conséquence, nous considérons cette température comme température critique au même titre que la température de vaporisation pour l'acier.

Le passage d'un régime à l'autre implique une modélisation théorique différente des phénomènes, notamment pour le calcul des directivités des ondes ultrasonores.

Le régime thermoélastique se caractérise par la non affectation de l'échantillon et par une génération plus efficace des ondes de surface. Le régime d'ablation engendre une dégradation, même partielle, du matériau et provoque des forces dont les directions sont majoritairement dirigées vers le cœur de l'échantillon. Cette répartition des forces est due au phénomène de transfert de quantité de mouvement. Ce régime privilégie donc la génération les ondes de volume.

Dans le cadre d'une étude portant sur le développement d'une méthode de contrôle non destructif, nous utiliserons le régime thermoélastique. La sublimation de la matière ou la modification structurelle de celle-ci ne sont pas admises pour notre application.

b) Interaction Laser / Matière

La description du phénomène d'interaction entre l'onde lumineuse et la matière dépend de la nature du matériau. Dans notre cas, il faut distinguer l'acier qui est un métal et la céramique qui est électriquement isolante et non magnétique.

i. Cas de l'acier

L'acier est un métal et possède des propriétés ferromagnétiques particulières. Dans ce cas, les interactions électromagnétiques sont prédominantes dans l'interaction du faisceau laser et de la matière. R.M. White a montré que sur un métal, l'utilisation des propriétés électromagnétiques permettaient la génération d'onde dans le solide [20]. Les équations de Maxwell régissent alors les phénomènes de pénétration et d'absorption de l'onde électromagnétique monochromatique provenant du laser dans l'échantillon en métal.

B.I. Bleaney et B. Bleaney montrent dans leur livre "Electricity and Magnetism" [21] qu'il est possible de calculer la profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique monochromatique dans un métal grâce à l'équation suivante :

$$\gamma = \left(\frac{\Lambda_0}{\pi \sigma c \mu} \right)^{1/2} \quad \text{(I.2)}$$

où :

Λ_0 : Longueur d'onde du faisceau provenant du laser
 σ : Conductivité électrique du matériau
 c : Vitesse de l'onde ultrasonore
 $\mu = \mu_0 \mu_r$: Perméabilité du métal

Ce calcul est très important car il nous permet deux choses. La première est bien évidemment la faculté de connaître la profondeur de pénétration du faisceau laser générateur et donc de s'assurer que nous obtenons une interaction génératrice d'ondes au niveau de la surface et non pas enterrée. Cette vérification permet d'utiliser par la suite les modèles de directivités qui seront présentés dans le chapitre II de ce manuscrit. En nous basant sur les caractéristiques physiques de l'acier considérées dans ces travaux et du laser utilisé (Nd:YAG doublé en fréquence portant la longueur d'onde à 532 nm), nous calculons une profondeur de pénétration de 1 nm. Il s'agit donc bien d'une source thermoélastique localisée en surface et

nous pouvons utiliser le modèle SCOE (Surface Center Of Expansion). Ce modèle proposé par C.B. Scruby [22] et affiné par L.R.F. Rose [23] est valable pour les métaux.

Le second intérêt de ce calcul est qu'il permet d'estimer le coefficient d'absorption (I.3). Si ce coefficient et la puissance émise en sortie du laser sont connus il est alors possible d'estimer théoriquement le seuil d'ablation au delà duquel s'établira le régime ablatif.

$$\eta = \frac{4\pi\gamma}{\Lambda_0} \quad (\text{I.3})$$

A partir de la profondeur de pénétration du faisceau laser, nous calculons un coefficient d'absorption entre 2% et 3% ce qui montre que la majorité de l'énergie est réfléchie par le matériau.

$$\Delta\theta(r, z, t) = \frac{Q}{\pi K} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi}} \int_0^t \frac{q(t-t')}{\sqrt{t'(4\kappa t'+a^2)}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t'} - \frac{r^2}{4\kappa t'+a^2}\right) dt' \quad (\text{I.4})$$

Où :

- Q : Energie absorbée
- K : Conductivité thermique
- $\kappa = K/\rho C$: Diffusivité thermique
- q(t) : variation temporelle de la puissance lumineuse
- z : Profondeur
- a : Rayon du faisceau laser

Dans la littérature, le temps de refroidissement de l'ordre de 500ns pour l'acier, étant donné que la cadence de tir est de 10Hz, chaque tir est indépendant.

Le calcul numérique a également été largement utilisé pour décrire les phénomènes de génération d'ondes par source thermique [24].

ii. Cas de la céramique

N'étant pas un conducteur électrique, la céramique ne possède pas d'écran d'électrons. Lorsque nous utilisons la formule proposée (I.2), nous trouvons une profondeur de pénétration extrêmement élevée [25] [26]. D'après les calculs, si nous ne prenons en compte que l'interaction électromagnétique entre le faisceau laser et la matière, nous devrions avoir une profondeur de pénétration de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Cette incohérence illustre le fait que cette formule, basée sur l'interaction électromagnétique prédominante pour les métaux, ne s'applique pas à la céramique. Pour ce matériau, le phénomène électromagnétique est négligeable. Le modèle à prendre en compte doit se baser sur le phénomène d'absorption. La question est donc d'estimer la profondeur de pénétration en

utilisant les lois régissant l'absorption et d'identifier si la génération doit être considérée comme une source en surface (SCOE) ou une source enterrée. Toutefois nous savons que l'utilisation de lasers pour générer des ondes ultrasonores dans ce type de matériau reste possible comme l'a montré K.L. Telschow [27]. Nos essais et la littérature nous montrent que la génération d'ondes de surface sur un matériau céramique grâce à un laser impulsif de forte puissance est réalisable.

Pour la céramique de formule brute Si_3N_4 et en considérant une onde électromagnétique monochromatique possédant une longueur d'onde de 532 nm, nous obtenons un coefficient d'extinction égal à 0,11509. A partir cette donnée, il est possible d'estimer la longueur d'absorption (I.5) [28].

$$L_a = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{I.5})$$

Où :

k : Coefficient d'extinction

λ : Longueur d'onde du faisceau

Dans notre cas, ce calcul nous donne une longueur de 368 nm. Cette valeur est bien supérieure à la profondeur de pénétration de l'onde lumineuse dans l'acier, mais reste relativement faible. Il s'agit d'une source enterrée [29]. Comme l'a montré M. Dubois [30], la profondeur de pénétration de l'onde a une importance centrale dans la génération d'ondes. Il existe des modèles analytiques pour simuler les phénomènes de génération d'ondes acoustiques par absorption avec prise en compte de la diffusion thermique, mais les solutions sont complexes. Une autre possibilité de modélisation consiste à utiliser la méthode des éléments finis. C'est ce qu'a fait J. Wang, en orientant ses simulations sur un matériau non métallique [31] [32]. Il a ainsi mis en évidence une différence de front d'onde entre sa modélisation FEM basée sur la pénétration optique de l'onde électromagnétique et la diffusion thermique et le modèle SCOE utilisé pour les métaux.

IV.2. Détection

Lorsqu'une onde se propage dans un solide, elle provoque un déplacement des particules qui le composent. Dans le cas de nos travaux, les déplacements engendrés sont inférieurs au nanomètre.

Contrairement à la génération d'ondes par laser, la détection du déplacement provoqué par le passage d'une onde ne dépend pas des propriétés électriques du solide mais des conditions de réflexion. Les sondes basées sur les lasers fonctionnent aussi bien sur les métaux que sur les matériaux isolants. De plus, l'utilisation d'un faisceau laser assure une mesure sans contact.

En génération ou en détection, la méthode Ultrasons-Laser est à 100% sans contact. Pour effectuer cette mesure du déplacement induit par une onde, il est possible d'utiliser différents équipements [33].

a) Sondes à diffraction et à déflexion

Ces sondes sont capables de mesurer une ondulation de la surface, mais ce ne sont pas des sondes interférométriques car elles ne fonctionnent pas sur le principe d'interférence d'un faisceau sonde avec un faisceau référence. Elles possèdent comme avantage notoire d'avoir une conception plus simple que les sondes interférométriques.

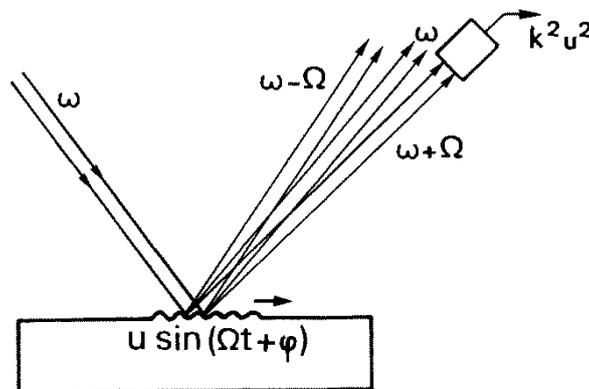


Figure I-6. Principe de détection d'ondes par diffraction. [7]

Une sonde à diffraction utilise l'ondulation de la surface provoquée par une onde pour diffracter un faisceau laser à l'image d'un réseau de phase. Un photodétecteur mesure l'intensité du faisceau réfléchi, ce qui permet de connaître le déplacement. Nous posons comme hypothèse que la tâche focale d est très supérieure à la longueur d'onde acoustique.

Dans le cas d'une réflexion parfaite, nous obtenons les équations suivantes [33] :

$$\sin\theta_n = \sin\theta_0 \pm \frac{n\Lambda}{\lambda} \quad (\text{I.6})$$

Où :

θ_n : Angles des faisceaux diffractés
 θ_0 : Angle d'incidence du faisceau
 n : Ordre du faisceau ($n = 0, 1, \dots$)
 λ : Longueur d'onde de l'onde ultrasonore
 Λ : Longueur d'onde du faisceau laser

Ce qui se traduit en termes de puissance :

$$P_n = P_L (J_n(\Delta\Phi))^2 \quad (\text{I.7})$$

Où :

P_n : Puissance du faisceau d'ordre n
 P_L : Puissance du faisceau incident
 J_n : Fonction de Bessel de première espèce d'ordre n
 $\Delta\Phi$: Déphase avec $\Delta\Phi = 2 Ku \cos\theta_0$

Pour le cas dans lequel l'ordre vaut 1, nous pouvons écrire :

$$P_1 \cong P_L (\Delta\Phi/2)^2 = P_L (Ku \cos\theta_0)^2 \quad (\text{I.8})$$

Où :

K : Nombre d'onde optique ; $K = (2\pi)/\Lambda$
 u : Amplitude du déplacement normal à la surface

La différence entre une sonde à diffraction et une sonde à déflexion se fait au niveau de la dimension de la tâche focale dans le sens de la propagation de l'onde à analyser. Soit cette dimension est inférieure à la longueur d'onde acoustique et nous sommes en présence d'une sonde à déflexion, soit celle-ci est très supérieure à la longueur d'onde acoustique et nous parlerons alors de sonde à diffraction.

D. Royer et E. Dieulesaint ont présenté le développement mathématique permettant de relier le déplacement u normal à la surface à l'intensité du courant $i(t)$ provenant du photodétecteur [33].

$$i(t) = \frac{4d}{\lambda} KuI_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (I.9)$$

Où :

- d : Diamètre de la tâche focale
- λ : Longueur d'onde de l'onde ultrasonore
- u : Déplacement normal à la surface
- I_0 : Partie continue du courant mesuré par le photodétecteur
- ω : Pulsation de l'onde ultrasonore
- φ : Retard de phase

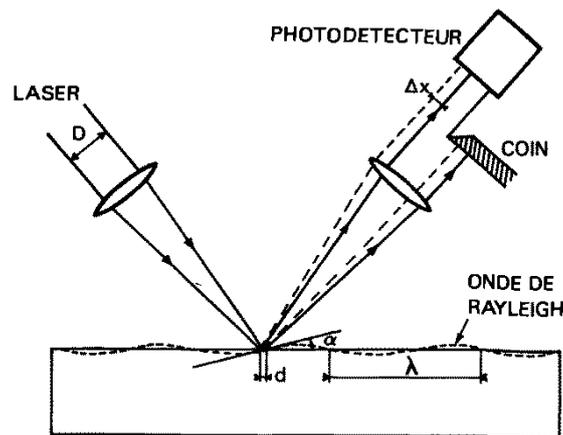


Figure I-7. Principe de détection d'ondes ultrasonores par une sonde à déflexion. [7]

L'utilisation d'une sonde à déflexion doit se faire sur un bon état de surface, ne permet une détection que sur une plage de fréquences limitée et est insensible à une réponse transitoire.

b) Sondes interférométriques

Les sondes interférométriques ont pour principe de fonctionnement l'interférence optique entre un faisceau sonde et un faisceau référence.

i. Sonde homodyne

Dans un interféromètre homodyne, le faisceau laser sortant d'une cavité optique est séparé en deux faisceaux, un qui servira de référence et un second qui interagira avec la surface à analyser que l'on appellera le faisceau sonde.

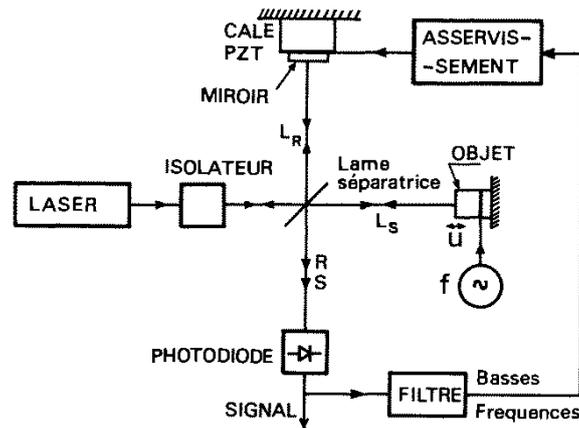


Figure I-8. Schéma d'un interféromètre stabilisé. [33]

Ce type d'interféromètre possède une sensibilité maximale autour d'un point de fonctionnement. Un asservissement est nécessaire pour rester autour de ce point de fonctionnement, à l'image de l'interféromètre de Michelson stabilisé présenté à la Figure I-8.

La relation reliant le courant électrique sortant du photodétecteur au déplacement normal de la surface est de la forme :

$$I = I_0 [1 + 2Ku \cos(\omega t + \varphi)] \quad (\text{I.10})$$

Avec pour une sensibilité maximale :

$$I_0 = \frac{SP_L}{2} \quad (\text{I.11})$$

Où :

S : Facteur de réponse du photodétecteur
 P_L : Puissance du faisceau laser

L'équation (I.10) montre que le courant mesuré par le photodétecteur est proportionnel au déplacement normal de la surface.

ii. Sonde hétérodyne

La structure générale d'un interféromètre hétérodyne est la même que celle d'un homodyne à l'exception d'un modulateur acousto-optique. L'ajout de cet élément permet un décalage fréquentiel d'un ou des deux faisceaux qui diminue la sensibilité au bruit environnant et rend inutile l'asservissement décrit dans le paragraphe précédent. Ce décalage a pour effet notoire de diminuer la sensibilité au bruit de la sonde. La SH140 utilisée dans nos travaux est composée d'une structure de type Mach-Zehnder dont seule la fréquence du faisceau sonde est décalée de 70 MHz. Cet interféromètre permet d'obtenir une plage de fréquence importante

allant de 200 kHz à 45 MHz [33]. Nous décrirons plus en détails les caractéristiques de cet interféromètre et sa configuration interne plus loin dans ce mémoire. Ce type d'interféromètre est associé à un traitement de signal qui permet une détection cohérente à large bande.

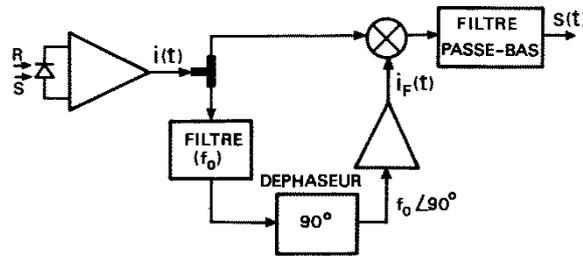


Figure I-9. Schéma de la partie traitement de signal associée à une détection large bande. [33]

Nous retiendrons qu'après ce traitement du courant mesuré par le photodétecteur, nous obtenons la proportionnalité :

$$s(t) \propto \sin[2Ku \cos(\omega t + \varphi)] \cong 2Ku \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{I.12})$$

Pour :

$$Ku \ll 1$$

Le principal inconvénient de ce type de sonde pour leur utilisation comme moyen de détection concerne la réflexion de faisceau sonde sur l'échantillon. En effet, l'état de surface de cet échantillon doit être bon. Cette contrainte n'est pas un problème dans notre cas car les éléments roulants à contrôler sont finement polis et possèdent un excellent état de surface.

IV.3. Avantages et inconvénients

Comme toutes méthodes, la méthode Ultrasons-Laser possède des avantages et des inconvénients.

a) Avantages

Parmi les avantages, nous pouvons mettre en avant que cette méthode est :

- Sans contact [34]. La génération et la détection d'ondes acoustiques se font à distance grâce à l'utilisation de faisceaux lasers, ce qui permet de ne pas utiliser de couplant, rend possible le déplacement de l'objet pendant l'analyse et permet d'envisager le contrôle de pièce portée à haute température.

- Génératrice d'ondes de volume et d'ondes de surface. L'utilisation d'un laser impulsif permet de générer des ondes de volume et de surface en même temps.
- Utilisable sur l'acier et la céramique. Les ondes ultrasonores peuvent se propager dans tout type de matériaux. La difficulté réside au niveau des phénomènes physiques utilisés pour générer et détecter ces ondes. La génération et la détection par laser peut se faire si le matériau n'est pas transparent.
- Utilisable sur des géométries complexes. La source génératrice d'onde étant la tache focale du faisceau laser impulsif, cette méthode permet de générer des ondes dans sur des zones où l'encombrement des équipements des autres méthodes serait délicat voir impossible.

b) Inconvénients

Parmi les principaux inconvénients, nous pouvons dire que les Ultrasons-Laser sont:

- Dangereux. Les densités de puissances utilisées par l'interféromètre et surtout par le laser impulsif sont susceptibles de provoquer des lésions irréversibles au corps humain. De plus, si le laser impulsif n'est pas correctement paramétré pour la génération d'ondes en régime thermoélastique, il engendrera une vaporisation locale de la matière, ce qui dans le cas du développement d'une méthode de contrôle non destructif n'est pas souhaitable.
- Chers à l'achat. Les équipements tels que l'interféromètre et le laser impulsif ont un coût très important à l'achat de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'euros. Ce coût est bien plus élevé que les transducteurs piézoélectriques.
- Sensibles et fragiles. L'interféromètre est sensible aux vibrations mécaniques et la partie optique supporte mal les transports.

En prenant en compte les avantages et les inconvénients, nous en déduisons que la méthode Ultrasons-Laser est adaptée pour répondre à la problématique du contrôle non destructif de structures pleines à axe de révolution.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte de nos travaux. L'entreprise SKF Aeroengine souhaite développer une nouvelle méthode de contrôle non destructif dédiée à des rouleaux utilisés dans la fabrication de roulements. Nous avons donc dans un premier temps décrit le principe de fonctionnement d'un roulement. Puis nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux pièces qui nous concernent, les éléments roulants de type rouleaux. Nous avons alors différencié deux types de géométries différentes, le rouleau cylindrique et le rouleau "tonneau". Notre étude doit en plus de ces géométries prendre en compte deux types de matériaux différents, l'acier et la céramique. SKF dispose déjà de méthodes de contrôle industrielles utilisées pour détecter des défauts sur les rouleaux en acier et validées par ses clients mais pas pour les rouleaux en céramique car celles-ci ne sont pas applicables sur un matériau isolant et non magnétique.

A l'heure actuelle, il existe une multitude de méthodes de contrôle non destructif, nous avons listé et décrit différentes méthodes non destructives utilisées dans le domaine industriel et susceptibles de détecter des défauts afin d'identifier celles qui pourraient nous permettre de répondre à la problématique. Nous avons conclu que les ondes ultrasonores étaient une bonne approche étant donnée nos objectifs. Nous tâcherons de valider ce point au chapitre IV grâce à une étude comparative entre la méthode ultrasonore et deux autres méthodes utilisées actuellement par SKF Aeroengine pour contrôler des rouleaux en acier.

Nous avons alors cherché à générer et détecter ces ondes acoustiques. Nous avons exploré plusieurs méthodes différentes que sont les transducteurs piézoélectriques, les EMAT et les Ultrasons-Laser. En considérant, les contraintes liées au contrôle de rouleaux cylindriques et "tonneau" en acier ou en céramique, nous avons mis en évidence que les Ultrasons-Laser sont la réponse technique la plus adaptée et ceux pour plusieurs raisons. Les propriétés physiques de la céramique ne permettent pas l'utilisation de méthodes basées sur les phénomènes électromagnétiques ce qui exclut les transducteurs électromagnétiques (EMAT). Seuls les transducteurs piézoélectriques et les Ultrasons-Laser peuvent générer et détecter des ondes acoustiques dans ce type de matériau. Le second critère permettant de choisir une méthode plutôt qu'une autre est la géométrie des pièces. Nous avons vu que les pièces à contrôler sont de géométrie et de dimensions diverses, ce qui nous pousse à privilégier une méthode sans contact.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à l'aspect théorique de la génération d'ondes ultrasonores par laser, et plus particulièrement aux ondes de surface, et leur propagation dans une structure cylindrique.

VI. Bibliographie

- [1] F. Deneuille, «Contribution au contrôle non-destructif de billes en céramique par spectroscopie ultrasonore de résonances de modes sphéroïdaux,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.
- [2] R. Rodriguez, «Influence de la microstructure du nitrure de silicium sur son aptitude à la rectification,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003.
- [3] D. Allen, «Effect of composition and physical properties of silicon nitride on rolling wear and fatigue performance,» *Tribology Transactions*, vol. 37, n° 12, pp. 410-414, 1994.
- [4] F. Faëse, F. Jenot, M. Ouafouh, M. Duquennoy et M. Ourak, «Fast slot characterization using laser ultrasonics and mode conversion,» *Measurement Science and Technology*, vol. 24, n° 19, 2013.
- [5] N. Saad, «Caractérisation par ondes acoustiques des surfaces fonctionnalisées,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis et Université Libanaise de Beyrouth, 2012.
- [6] D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, Propagation libre et guidée, Paris: Masson, 1996.
- [7] D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, Génération, interaction acousto-optique, applications, Paris: Masson, 1996.
- [8] J. Rose, Ultrasonic waves in solid media, Cambridge University Press, 1999.
- [9] M. Duquennoy, «Analyse ultrasonore des contraintes résiduelles dans les alliages d'aluminium par ondes de Rayleigh,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1997.
- [10] G. Valsamos, F. Casadei et G. Solomos, «A numerical study of wave dispersion curves in cylindrical rods with circular cross-section,» *Applied and Computational Mechanics*,

vol. 7, pp. 99-114, 2013.

- [11] C. Valle, J. Qu et L. Jacobs, «Guided circumferential waves in layered cylinders,» *International Journal of Engineering Science*, vol. 37, pp. 1369-1387, 1999.
- [12] J. Curie et P. Curie, «Comptes-rendus de l'Académie des Sciences,» 1881.
- [13] J. Dumont-Fillon, «Contrôle non destructif (CND),» 1996.
- [14] R. Ribicini, F. Cegla, P. Nagy et P. Cawley, «Study and Comparison of Different EMAT Configurations for SH Wave Inspection,» *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 58, n° 112, pp. 2571-2581, 2011.
- [15] Cetim, «Les ultrasons par EMAT».
- [16] C. Scruby et L. Drain, *Laser Ultrasonics, Techniques and applications*, Adam Hilger, 1990.
- [17] R. White, «Generation of elastic waves by transient surface heating,» *Journal of Applied Physics*, 1963.
- [18] T. Sanderson, C. Ume et J. Jarzynski, «Hyperbolic heat equations in laser generated ultrasound models,» *Ultrasonics*, vol. 33, n° 16, pp. 415-421, 1995.
- [19] J. Ready, *Effect of High Power Laser Radiation*, New-York: Academic Press, 1971.
- [20] R. White, «Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption,» *Journal of Applied Physics*, vol. 34, pp. 2123-2124, 1963.
- [21] B. Bleany et B. Bleany, *Electricity and magnetism*, Oxford: Oxford University Press, 1965.
- [22] C. Scruby, R. Dewhurst, D. Hutchins et S. Palmer, «Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals,» *Applied Physics*, 1980.
- [23] L. Rose, «Point-source representation for laser-generated ultrasound,» *Acoustical Society of America*, 1984.

- [24] I. Veres, T. Berer et P. Bugholzer, «Numerical modeling of thermoelastic generation of ultrasound by laser irradiation in the coupled thermoelasticity,» *Ultrasonics*, vol. 53, n° 11, pp. 141-149, 2013.
- [25] D. Ségur, A. Shuvalov, B. Audoin et Y. Pan, «Experimental and theoretical study of acoustic waves generated by a laser line pulse in an optically absorptive isotropic cylinder,» *Acoustical Society of America*, vol. 127, n° 11, pp. 181-185, 2010.
- [26] S. Raetz, T. Dehoux et B. Audoin, «Effect of laser beam incidence angle on the thermoelastic generation in semi-transparent materials,» *Acoustical Society of America*, vol. 130, n° 16, pp. 3691-3697, 2011.
- [27] K. Telschow, J. Walter et G. Garcia, «Laser ultrasonic monitoring of ceramic sintering,» *American Institute of Physics*, vol. 68, n° 112, pp. 6077-6082, 1990.
- [28] C. Langlade-Bomba, B. Vannes, P. Sallamand et D. Grevey, «Lasers de puissance et traitements superficiels,» *Technique de l'Ingénieur*.
- [29] C. Pekeris et H. Lifson, «Motion of the Surface of a Uniform Elastic Half-Space Produced by a Buried Pulse,» *Acoustical Society of America*, vol. 29, n° 111, pp. 1233-1238, 1957.
- [30] M. Dubois, P. Lorraine, R. Filkins, T. Drake, K. Yawn et S.-Y. Chuang, «Experimental verification of the effects of optical wavelength on the amplitude of laser generated ultrasound in polymer-matrix composites,» *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 809-812, 2002.
- [31] J. Wang, Z. Shen, B. Xu, X. Ni, J. Guan et J. Lu, «Simulation on thermoelastic stress field and laser ultrasound waveform in non-metallic materials by using FEM,» *Applied Physics A*, vol. 84, pp. 301-307, 2006.
- [32] J. Wang, Z. Shen, B. Xu, X. Ni, J. Guan et J. Lu, «Numerical simulation of laser-generated ultrasound in non-metallic material by the finite element method,» *Optics & Laser Technology*, vol. 39, n° 14, pp. 806-813, 2007.
- [33] D. Royer et E. Dieulesaint, «Mesures optiques de déplacements d'amplitude $10e^{-4}$ à $10e^2$ Angström. Application aux ondes élastiques,» *Revue de Physique Appliquée*, vol.

24, pp. 833-846, 1989.

[34] R. Green, «Non-contact ultrasonic techniques,» *Ultrasonics*, vol. 42, pp. 9-16, 2004.

[35] S. Petit, «Spectroscopie de résonance ultrasonore des ondes de surface - Application au contrôle non destructif de billes en céramique,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003.

CHAPITRE II. ONDES ELASTIQUES DANS LES STRUCTURES CYLINDRIQUES

I. Ondes élastiques dans un solide homogène et isotrope.....	45
I.1. Notions de vitesse d'une onde	45
I.2. Contraintes et déformations élastiques dans un solide	46
I.3. Ondes de volume	48
a) Onde longitudinale.....	48
b) Onde transversale.....	49
II. Ondes guidées dans une structure cylindrique.....	50
II.1. Modes de Pochhammer-Chree	50
a) Ondes de compression	51
b) Ondes de torsion	52
c) Ondes de flexion	53
II.2. Ondes de Rayleigh	54
III. Diagrammes de directivité des ondes acoustiques générées par laser	55
III.1. Diagrammes de directivité des ondes de volume.....	56
a) Onde longitudinale.....	56
b) Onde transversale.....	60
III.2. Diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh	63
IV. Calculs de la vitesse d'une onde de surface.....	66
IV.1. Onde axiale	66
IV.2. Onde circonférentielle	67
IV.3. Ondes de surface hélicoïdales.....	72
a) Trajet principal de l'onde de surface	72
b) Calcul des courbes de dispersion	74
c) Calcul de vitesse.....	77
V. Conclusion	79
VI. Bibliographie	82

Introduction

Le chapitre I nous a permis de définir la problématique, explorer les possibilités techniques qui s'offraient à nous et justifier notre choix de la méthode Ultrasons-Laser [1] pour apporter une réponse aux besoins de l'acteur industriel, SKF.

Le choix technique étant effectué, nous pouvons maintenant poser les bases théoriques nécessaires au développement d'une méthode de contrôle non destructif. Dans le cadre des Ultrasons-Laser, nous utilisons les ondes ultrasonores générées par un faisceau laser afin de caractériser la pièce à analyser [2]. Les ondes ultrasonores sont des ondes élastiques se propageant dans un solide en provoquant des déformations locales de celui-ci. Ces déformations restent dans le domaine élastique, c'est à dire que les particules composant le solide conservent la même position avant et après le passage de l'onde. Il n'existe pas de phénomène d'allongement irréversible. Le matériau ne subit pas de déformations plastiques. De nombreux scientifiques ont travaillé sur les problématiques présentées. De leurs travaux ont émergé divers outils théoriques de modélisation qui nous aident à comprendre et décrire les déplacements et les interactions mis en jeu. Les formulations théoriques présentées sont valables dans des conditions précises, ainsi dans ce chapitre, nous considérerons uniquement des milieux isotropes, homogènes et non piézoélectriques.

Dans un premier temps, nous nous pencherons sur les ondes en elles-mêmes. Nous nous efforcerons de développer les bases théoriques capables de décrire et caractériser des ondes élastiques.

Dans une deuxième partie, nous nous intéresserons aux ondes ultrasonores utilisant la géométrie cylindrique comme un guide. Nous tâcherons de définir ces ondes et d'identifier celles qui pourraient nous aider à caractériser les structures cylindriques, notamment en termes de défauts.

Dans un troisième sous-chapitre, nous aborderons l'interaction faisceau laser / matériau, en étudiant plus particulièrement les directivités pour les différents types de sources les plus communes pour les ondes de volumes et les ondes de Rayleigh.

Dans une quatrième partie, nous développerons les outils mathématiques nécessaires à la compréhension des phénomènes de propagation suivant trois directions différentes.

I. Ondes élastiques dans un solide homogène et isotrope

La particularité d'une onde élastique concerne sa nature et son mode de propagation. Ce type d'onde peut être considéré comme une onde progressive. Cette formalisation permet d'aborder la notion de vitesse. Les propriétés physiques du matériau sont déterminantes pour les vitesses de propagation des ondes élastiques. Les expressions présentées dans ce chapitre ne sont valables que dans le cas d'un matériau homogène et isotrope. La littérature nous montre que l'acier respecte cette condition pour les fréquences que nous considérons. Ce constat est moins évident pour la céramique car elle a peu été étudiée dans ce contexte. Comme nous l'avons vu, la céramique est une matière créée par frittage, elle est donc par nature très différente d'un métal. Les céramiques utilisées par l'industrie roulementière dédiée à l'aérospatial sont composées de grains allongés sans orientation particulière dont la longueur varie entre 2 μm et 5 μm et la largeur entre 0,5 μm et 1 μm [3]. Ces dimensions sont petites en comparaison des longueurs d'onde considérées et l'orientation aléatoire des grains, ce qui nous amènent à poser l'hypothèse d'un matériau possédant une structure fine, homogène et isotrope. Cette hypothèse a été accréditée par les travaux de Sébastien Petit [4] et François Deneuille [5] et nos propres expériences.

I.1. Notions de vitesse d'une onde

Le phénomène de propagation d'une onde élastique dans un matériau est assimilable à une onde progressive et est régie par la description mathématique présentée par l'équation (II.1) :

$$u = A \cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{c}\right) = A \cos(\omega t - kx) \quad (\text{II.1})$$

Où :

A : Coefficient d'atténuation du matériau
 ω : Pulsation
 k : Nombre d'onde
 c : Vitesse

La dernière partie de cette égalité (II.1) permet de mettre en évidence la phase globale de l'onde qui s'exprime comme suit :

$$\varphi = \omega t - kx \quad (\text{II.2})$$

Cette phase, et plus particulièrement la pulsation et le nombre d'onde, permet de calculer la vitesse de phase de l'onde.

Cette vitesse de phase peut être estimée par :

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (\text{II.3})$$

Cette vitesse n'est pas la seule qui compte lorsque l'on parle de propagation d'ondes. Une onde peut être caractérisée par deux vitesses qui ne sont pas forcément égales, la vitesse de phase et la vitesse de groupe.

Dans le cas d'une onde plane monochromatique, la vitesse de phase est égale à la vitesse de l'onde. Pour le calcul de cette vitesse, nous devons prendre en compte le milieu qu'elle utilise comme support. Il existe deux cas, le milieu non dispersif et le milieu dispersif. Dans un milieu dispersif, la vitesse de phase dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore.

Une onde plane monochromatique n'existe pas dans la réalité. Les ondes rencontrées lors d'essais sont des combinaisons d'ondes planes monochromatiques. Si l'onde est composée de plusieurs composantes, la notion de vitesse de groupe devient pertinente. En effet, cette vitesse correspond à la vitesse du "paquet d'ondes" émis.

La vitesse de groupe est calculée grâce à la vitesse de phase par la relation :

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (\text{II.4})$$

Nous notons la vitesse de phase V_φ et la vitesse de groupe V_g .

I.2. Contraintes et déformations élastiques dans un solide

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un matériau, elle provoque des déformations de petites dimensions. Ces déformations peuvent être modélisées à l'aide de la physique. Mécaniquement, un solide peut être décrit par un tenseur des déformations et un tenseur des contraintes.

La loi de Hooke est une loi permettant de modéliser le comportement d'un matériau dans le domaine élastique. Pour les petites déformations, cette loi nous dit que la relation liant les contraintes aux déformations est de la forme suivante :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (\text{II.5})$$

Où :

σ_{ij} : Tenseur des contraintes
 c_{ijkl} : Tenseur contenant les constantes élastiques
 ε_{kl} : Tenseur des déformations

La matrice c_{ijkl} est un tenseur caractéristique du matériau. Il permet notamment d'estimer les propriétés élastiques comme le coefficient de Poisson et le module de Young.

Les déformations engendrées sont dues à de petits déplacements locaux. Ces déplacements d'une particule par rapport à l'autre dans un repère orthonormé caractérisent cette déformation du solide. Le tenseur des déformations s'exprime de la façon suivante :

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (\text{II.6})$$

En réaction à une déformation, des contraintes naissent au sein du matériau. Ces contraintes sont dues aux forces atomiques qui tendent à ramener le solide dans son état initial (position de repos).

Le tenseur des contraintes s'établit à partir de l'équation d'équilibre (II.7) entre les forces extérieures provoquant la déformation et les contraintes.

$$\int_S T_i(\vec{n}) dS + \int_V F_i dV = 0 \quad (\text{II.7})$$

Où :

V : Volume considéré
 S : Surface délimitant V
 $T_i(\vec{n})$: Tension mécanique
 F_i : Force extérieure

La transformation de l'intégrale de volume en intégrale de surface montre que la tension mécanique exercée par la matière située du côté de la normale n_j à l'élément de surface est égale à :

$$T_i(\vec{n}) = \sigma_{ij} n_j \quad (\text{II.8})$$

Les déplacements observés dans le cas d'une onde élastique sont extrêmement petits, typiquement de l'ordre de l'Angström. Les instruments utilisés pour la détection de ce type de déplacement doivent posséder une excellente sensibilité.

I.3. Ondes de volume

La terre possède un phénomène que l'on appelle la tectonique des plaques. Le déplacement de ces plaques gigantesques provoque par endroit des frictions, qui par moment libèrent une énergie très importante sous forme d'ondes. Lors d'un séisme, différents types d'ondes sont générés au niveau de l'épicentre. Dès 1830, S.D. Poisson a prédit l'existence de deux types d'ondes, une onde de compression (dilatation) et une onde de cisaillement. Ce n'est que bien plus tard avec le développement des premiers sismographes que ces ondes ont pu être détectées. Elles sont connues sous le nom d'ondes longitudinale et transversale. Il s'agit des ondes de volume.

a) Onde longitudinale

L'onde longitudinale est également appelée onde P pour "*primaire*", car lors d'un séisme, elle est la première onde ressentie du fait de sa vitesse de propagation plus élevée.

Le déplacement des particules provoqué par le passage d'une onde longitudinale se fait dans le sens de propagation de l'onde, par un phénomène de compression et de dilatation (Figure II-1), à l'image d'un ressort que l'on comprime. Lorsqu'une de ces ondes se propage, le déplacement normal à la surface est extrêmement faible et donc délicat à mesurer.

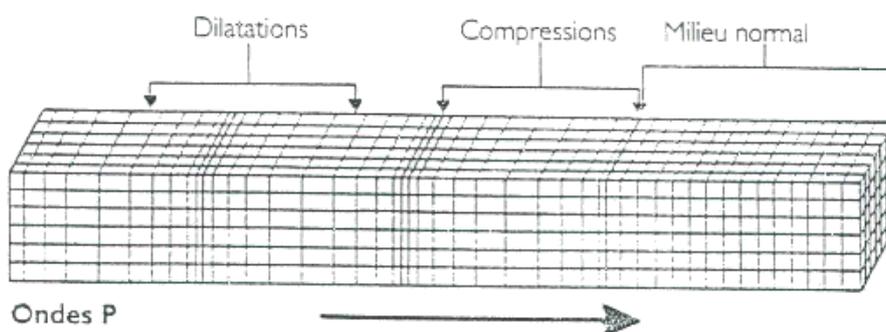


Figure II-1. Propagation d'une onde longitudinale. [6]

La vitesse d'une onde longitudinale dépend du milieu de propagation. Dans le cas d'un matériau isotrope et homogène la formule (II.9) permet de calculer cette vitesse. Elle

s'exprime en fonction des propriétés intrinsèques du matériau, la masse volumique et les coefficients de Lamé.

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (\text{II.9})$$

Où :

λ : Premier coefficient de Lamé
 μ : Second coefficient de Lamé
 ρ : Masse volumique (kg.m^{-3})

L'estimation des vitesses longitudinales, pour les matériaux étudiés dans nos essais, nous donne une vitesse $V_L = 6020 \text{ m.s}^{-1}$ pour l'acier (M50) et $V_L = 10913 \text{ m.s}^{-1}$ pour la céramique (Si_3N_4).

b) Onde transversale

Pour la même raison que l'on appelle l'onde longitudinale, onde P, il est également communément admis que l'onde transversale peut être appelée onde S pour onde "*secondaire*" ou encore onde de cisaillement à cause de la nature des déplacements qu'elle provoque. En effet cette onde induit un déplacement des particules perpendiculaire à sa direction de propagation (Figure II-2), d'où le nom de cisaillement. Une analogie peut être faite avec une vague, qui provoque un déplacement vertical des molécules d'eau. Lorsqu'une bouée est posée sur un plan d'eau et qu'une vague se propage, cette bouée se déplace verticalement lors du passage de la vague, mais aucun déplacement horizontal ne se produit.

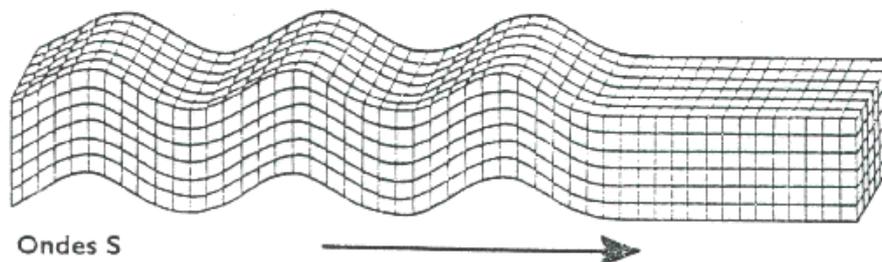


Figure II-2. Propagation d'une onde transversale. [6]

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{II.10})$$

Où :

μ : Second coefficient de Lamé
 ρ : Masse volumique (kg.m^{-3})

Basée sur l'équation (II.10), l'estimation des vitesses transversales pour les matériaux étudiés dans ces travaux nous donne une vitesse $V_T = 3218 \text{ m.s}^{-1}$ pour l'acier (M50) et $V_T = 6126 \text{ m.s}^{-1}$ pour la céramique (Si_3N_4).

Comme l'a montré Y. Pan [7], les vitesses des ondes longitudinales et transversales se propageant dans un cylindre plein permettent d'estimer les coefficients élastiques d'un matériau. Notre étude portant sur la détection de défauts, cette méthode n'est pas une priorité mais elle peut être une réponse à une problématique d'évaluation non destructive des coefficients élastiques.

II. Ondes guidées dans une structure cylindrique

Un cylindre ou un solide semi-infini est d'un point de vue physique limité. Une onde se propageant sur ce type de structures est susceptible de se réfléchir, le solide sert alors de guide. Les modèles mathématiques présentés dans cette section se basent sur l'hypothèse d'un solide homogène et isotrope.

Un cylindre peut servir de guide aux ondes, on parle alors d'ondes guidées. Ces ondes sont intimement liées au guide et à ses limites. Il existe plusieurs types d'ondes identifiables. Nous nous concentrons en premier lieu sur les modes de Pochhammer-Chree.

II.1. Modes de Pochhammer-Chree

Nous nous intéressons aux ondes de compression, de torsion et de flexion dans le cas d'un cylindre infini entouré de vide. Ces modes résultent de multiples réflexions des ondes longitudinales et transversales au sein de la pièce.

Les déformations provoquées par une onde dans un cylindre sont décrites par trois types de déplacements :

- u_z suivant l'axe z du cylindre
- u_r suivant l'axe r du cylindre
- u_θ suivant le sens de rotation θ

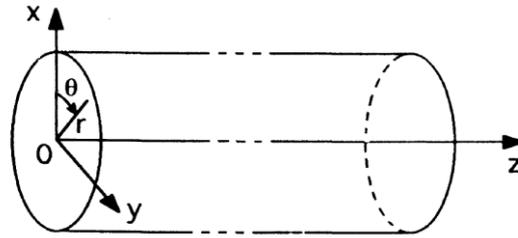


Figure II-3. Système de coordonnées cylindriques adopté pour la description mathématique d'un cylindre plein (z, r, θ). [8]

a) Ondes de compression

Les déformations provoquées par une onde de compression sur un cylindre se caractérisent par des déplacements u_r et u_z indépendants de l'angle θ .

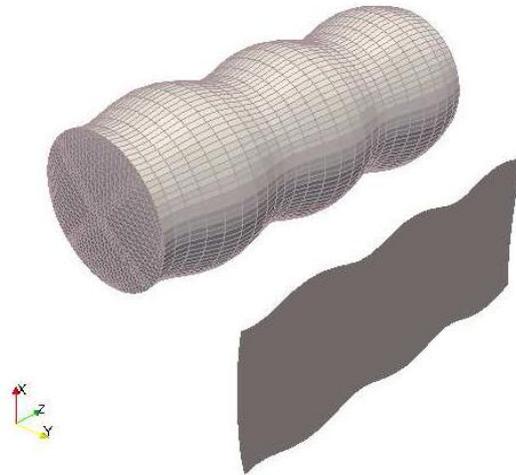


Figure II-4. Déformation d'un guide cylindrique infini en acier de diamètre 20 mm à une fréquence de 0,2 MHz due à une onde de compression d'après V. Baronian [9]. ($\rho = 7932 \text{ kg.m}^{-3}$; $c_p = 5,960 \text{ mm.}\mu\text{s}^{-1}$; $c_s = 3,260 \text{ mm.}\mu\text{s}^{-1}$).

Les courbes de dispersion des ondes de compression peuvent être obtenues en résolvant l'équation (II.11) comme l'ont démontré D. Royer et E. Dieulesaint [8].

$$\frac{2p}{a} (q^2 - k^2) J_1(pa) J_1(qa) - (q^2 - k^2)^2 J_0(pa) J_1(qa) - 4k^2 pq J_1(pa) J_0(qa) = 0 \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$p^2 = \frac{\omega^2}{V_L^2} - k^2$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{V_T^2} - k^2$$

Où :

a : Rayon du cylindre

k : Nombre d'onde

J_n : Fonction de Bessel de première espèce d'ordre n

Nous constatons que ce type d'onde provoque des dilatations et des compressions perpendiculairement à l'axe de révolution du cylindre en fonction de la distance z. Ce type de déformation est détectable par un interféromètre comme la SH140, mesurant le déplacement normal de la surface.

b) Ondes de torsion

Contrairement à l'onde de compression, l'onde de torsion ne génère pas de déplacements u_r et u_z mais un déplacement u_θ indépendant de l'angle θ . La Figure II-5 illustre le type de déformations obtenues pour une onde de torsion.

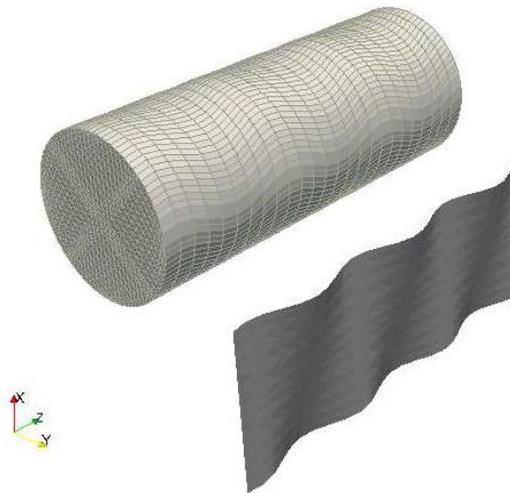


Figure II-5. Déformation d'un guide cylindrique infini en acier de diamètre 20 mm à une fréquence de 0,2 MHz due à une onde de torsion d'après V. Baronian [9]. ($\rho = 7932 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $c_p = 5,960 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$; $c_s = 3,260 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$).

Les courbes de dispersion des ondes de torsion peuvent être calculées en recherchant les racines de l'équation (II.12) comme l'ont publié D. Royer et E. Dieulesaint [8].

$$qaJ_0(qa) - 2J_1(qa) = 0 \quad \text{(II.12)}$$

L'onde de torsion engendre des déformations totalement différentes de l'onde de compression. En effet nous notons l'absence de déplacement u_r , la déformation s'apparente à un déplacement rotationnel en fonction de la hauteur z .

c) Ondes de flexion

Le dernier type d'onde utilisant le cylindre comme guide est l'onde de flexion. Les déplacements générés u_θ , u_r et u_z dépendent de l'angle θ . Ces déplacements étant plus complexes, la formulation mathématique permettant l'obtention des courbes de dispersion l'est également.

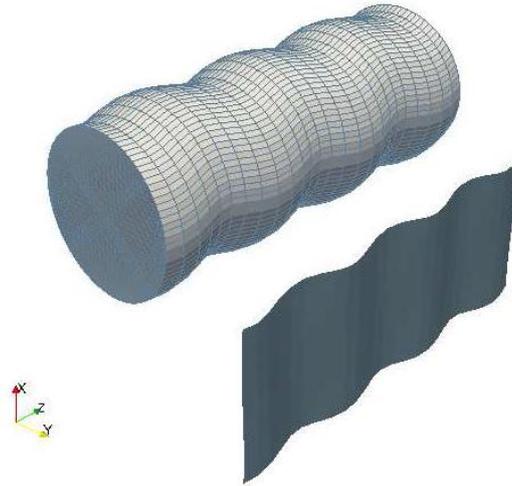


Figure II-6. Déformation d'un guide cylindrique infini en acier de diamètre 20 mm à une fréquence de 0,2 MHz due à une onde de flexion d'après V. Baronian [9]. ($\rho = 7932 \text{ kg.m}^{-3}$; $c_p = 5,960 \text{ mm.}\mu\text{s}^{-1}$; $c_s = 3,260 \text{ mm.}\mu\text{s}^{-1}$).

Les courbes de dispersion des ondes de flexion peuvent être obtenues en résolvant l'équation (II.13) comme l'a présenté V. Baronian [9] :

$$\text{Det}(d) = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad \text{(II.13)}$$

Où :

$$d_{11}(a) = \mu \left((k^2 - k_{rT}^2) J_n(k_{rL}a) + \frac{k_{rL}}{a} \cdot f_1(J_n(k_{rL}a)) \right); \quad d_{12}(a) = \mu \left(\frac{k_{rT}^2}{2} \cdot f_3(J_n(k_{rT}a)) \right);$$

$$d_{13}(a) = \mu \left(-2k_{rT} \cdot ik \cdot J_n(k_{rT}a) + \frac{ik}{a} f_1(J_n(k_{rT}a)) \right); \quad d_{21}(a) = -\mu ik \cdot k_{rL} \cdot f_2(J_n(k_{rL}a));$$

$$d_{22}(a) = -\mu \frac{ink}{a} J_n(k_{rT} a); \quad d_{23}(a) = -\mu \left(\frac{k_{rT}^2 - k^2}{2} f_2(J_n(k_{rT} a)) \right); \quad d_{31}(a) = -\mu \frac{k_{rL}^2}{2} f_3(J_n(k_{rL} a));$$

$$d_{32}(a) = \mu \left(k_{rT}^2 J_n(k_{rT} a) - \frac{k_{rT}}{a} f_1(J_n(k_{rT} a)) \right); \quad d_{33}(a) = -\mu \frac{k_{rT}^2 \cdot ik}{2} f_3(J_n(k_{rT} a))$$

Avec :

$$f_1(J_n(\kappa a)) = (n+1)J_{n+1}(\kappa a) + (n-1)J_{n-1}(\kappa a)$$

$$f_2(J_n(\kappa a)) = J_{n+1}(\kappa a) - J_{n-1}(\kappa a)$$

$$f_3(J_n(\kappa a)) = J_{n+2}(\kappa a) - J_{n-2}(\kappa a)$$

$$f_4(J_n(\kappa a)) = J_{n+2}(\kappa a) + J_{n-2}(\kappa a)$$

Où :

$$\kappa = k_{rL} \text{ ou } k_{rT}$$

Un autre aspect des ondes guidées concerne les ondes de surface. Comme leur nom l'indique, les ondes de surface se propagent au niveau de la surface d'un solide. De façon générale, ces ondes sont observées à l'interface entre deux milieux dans notre cas, air/solide.

II.2. Ondes de Rayleigh

L'onde de Rayleigh doit son nom à Lord J.W.S. Rayleigh qui en 1885 [10] a démontré l'existence d'une onde localisée en surface dont la vitesse est inférieure à la vitesse de propagation de l'onde transversale.

Cette onde se propage dans un solide possédant une épaisseur très supérieure à la longueur d'onde. L'ondulation observée en surface décroît avec la profondeur et dépend de la fréquence, de telle sorte que l'on considère que la profondeur de pénétration est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde acoustique. Il s'agit d'une onde localisée au niveau de la surface du solide.

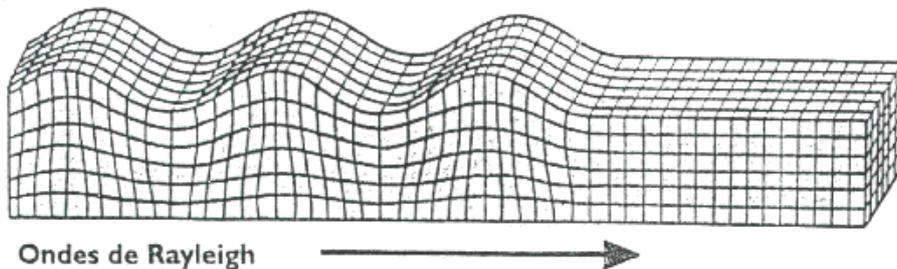
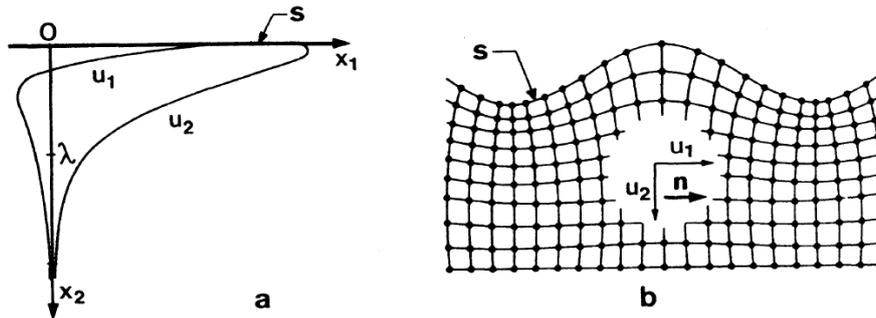


Figure II-7. Propagation d'une onde de Rayleigh. [6]

Cette onde de Rayleigh est due à l'interaction d'une onde longitudinale et d'une transversale au niveau de la surface. Ainsi l'onde de Rayleigh possède une composante

longitudinale et une composante transversale qui sont déphasées de $\pi/2$. Ces deux composantes provoquent un mouvement elliptique rétrograde des particules du solide en surface, qui devient prograde au-delà d'une certaine profondeur.



Nous avons vu que Lord Rayleigh avait pu expliquer la présence d'une onde sismique après le passage de l'onde transversale par une onde qui porte maintenant son nom. Ce décalage dans l'apparition des ondes s'explique par leurs vitesses. Nous pouvons dire que de façon générale $V_L > V_T > V_R$, mais pour le moment nous ne connaissons pas cette vitesse V_R . Cette vitesse sera calculée par la suite. Les caractéristiques de cette onde de surface sont intéressantes dans le cadre de la détection de défauts proche de la surface.

III. Diagrammes de directivité des ondes acoustiques générées par laser

Lorsque des ondes ultrasonores sont générées via une source laser [11] [12], celles-ci se propagent dans le solide suivant une certaine directivité. Pour certaines directions, l'amplitude des déplacements sera maximale alors que pour d'autres elle sera quasi-nulle. Les diagrammes de directivité permettent de définir les amplitudes de déplacements en fonction de la direction de propagation. Le calcul des diagrammes a été étudié par de nombreux auteurs et la littérature est riche à ce sujet [13] [14] [15] [16]. Pour ce paragraphe, nous considérons une source génératrice en surface selon le modèle SCOE (Surface Center Of Expansion) [17]. Ce modèle est exact pour les métaux, et permet d'établir les formules pour le calcul des directivités en considérant une force ponctuelle. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, cette hypothèse est valide pour le cas de l'acier mais litigieuse pour la céramique, pour laquelle nous devons considérer une source enterrée. L'utilisation d'un modèle analytique

prenant en compte une source enterrée complexifie grandement les calculs, nous établirons les bases théoriques selon le modèle SCOE [17] et nous comparerons ces résultats aux données expérimentales obtenues sur un échantillon en céramique.

III.1. Diagrammes de directivité des ondes de volume

Les ondes de volume sont, avec les ondes de Rayleigh, les ondes ultrasonores les plus intéressantes pour répondre l'objectif du développement d'une méthode de contrôle non destructif dédiée aux rouleaux en acier et en céramique. Nous allons présenter les modèles permettant de calculer ces diagrammes en fonction des hypothèses posées pour l'onde longitudinale, l'onde transversale et l'onde de Rayleigh en considérant le régime thermoélastique. Les calculs des diagrammes de directivité varient en fonction des régimes de génération.

a) Onde longitudinale

Dans un premier temps, nous posons l'hypothèse d'une source ponctuelle, c'est-à-dire assimilable à un point sans dimension. Il s'agit du modèle le plus simple décrivant la directivité des ondes longitudinales, mais il n'est valable que si la source est de petite dimension devant la longueur d'onde acoustique.

La génération d'une onde ultrasonore est due à l'échauffement rapide et locale de la matière. Cette élévation de température provoque une dilatation localisée, qui elle-même engendre des contraintes. Comme nous l'avons vu plus haut, les phénomènes mécaniques présents dans le cas des ondes élastiques sont régis par la loi de Hooke. La contrainte de la dilatation thermique peut donc se décrire comme suit :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T) = c_{ijkl} \epsilon_{kl} - \sigma_{ij}^T \quad (\text{II.14})$$

Où :

- σ_{ij} : Tenseur des contraintes
- c_{ijkl} : Tenseur contenant les coefficients élastiques
- ϵ_{kl} : Tenseur des déformations
- α_{kl} : Coefficient de dilatation linéique
- ΔT : Elévation de température
- σ_{ij}^T : Contrainte due à la dilatation thermique

Formaliser la création de contraintes dues à un échauffement local ne suffit pas pour déterminer les déplacements induits. K. Aki et G. Richards [18] ont développé une

formulation capable de relier l'excès de contraintes aux déplacements en utilisant les fonctions de Green.

$$u_n(x_i, t) = \int_V \sigma_{ij}^T(s_i, t) \otimes \frac{\partial G_{ni}}{\partial s_j}(x_i, s_i, t) dV(s_i) \quad (\text{II.15})$$

Où :

- x_i : Position du point d'observation
- s_i : Position du point source
- G_{ni} : Fonction de Green
- dV : Elément de volume
- \otimes : Produit de convolution

La fonction de Green permet d'obtenir par convolution le déplacement provoqué par une impulsion spatio-temporelle. Le produit de convolution peut être rapproché de l'idée d'une moyenne glissante.

De nombreux auteurs ont affiné l'approche théorique de la directivité des ondes longitudinales générées par laser, nous utiliserons le modèle présenté par L.R.F. Rose [17] établi pour un champs lointain. Dans le cas d'une onde longitudinale, nous devons nous concentrer sur le déplacement radial. La divergence de la fonction de Green s'exprime selon l'équation (II.16).

$$g_r^H(r, \theta, t) = \frac{1}{\pi r V_L (\lambda + 2\mu)} D_L(\theta) \delta\left(t - \frac{r}{V_L}\right) \quad (\text{II.16})$$

Où :

- D_L : Déplacement
- θ : Angle
- δ : Fonction Dirac

La formule permettant de tracer le diagramme de directivité de l'onde longitudinale pour une source ponctuelle s'exprime alors :

$$D_L(\theta) = \frac{(\sin\theta \cdot \sin 2\theta) \cdot \sqrt{\eta^2 - \sin^2\theta}}{(\eta^2 - 2\sin^2\theta)^2 + (2\sin\theta \cdot \sin 2\theta) \cdot \sqrt{\eta^2 - \sin^2\theta}} \quad (\text{II.17})$$

La formule (II.17) nous donne le diagramme ci-dessous (Figure II-9), avec $\eta = V_L/V_T$. La partie droite du cercle, de 90° à 270° dans le sens horaire, représente le solide alors que la partie gauche, l'air. L'interaction faisceau laser / matière générant les ondes ultrasonores suivant le modèle SCOE [17] est localisé au niveau de l'origine. Nous observons que deux

lobes sont présents autour de 70° et 290°. Nous en concluons que les amplitudes maximales du déplacement seront localisés pour ces angles.

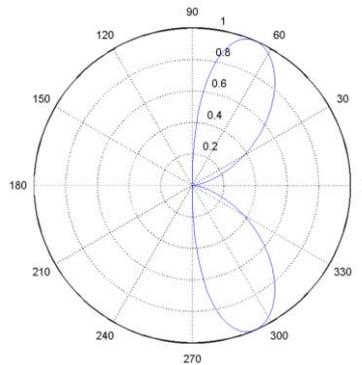


Figure II-9. Diagramme de directivité des ondes longitudinales pour une source ponctuelle et basé sur le modèle SCOE.

Si la dimension de la source n'est plus négligeable devant la longueur d'onde acoustique, il est nécessaire de se diriger vers un modèle prenant en compte la dimension de la source, nous parlons alors de source point. Un modèle source point avec une dimension finie a été développé par G.F. Miller et H. Pursey [13]. En utilisant les fonctions de Bessel, ils ont défini le terme correctif multiplicatif (II.18).

$$S_{CL} = \frac{J_1\left(\frac{\pi d}{\Lambda_L} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi d}{\Lambda_L} \cdot \sin(\theta)} \quad (\text{II.18})$$

Où :

J_1 : Fonction de Bessel de première espèce du premier ordre

d : Diamètre de la source

Λ_L : Longueur d'onde acoustique longitudinale

Avec cette équation, la dimension de la source prend une importance prépondérante dans le calcul de la directivité de l'onde longitudinale. L'utilisation d'une source plus ou moins grande provoque la modification de cette directivité. Le calcul dépendant également de la longueur d'onde acoustique, le rapport d/Λ_L nous permet de mettre en avant l'influence du diamètre par rapport à la longueur d'onde acoustique.

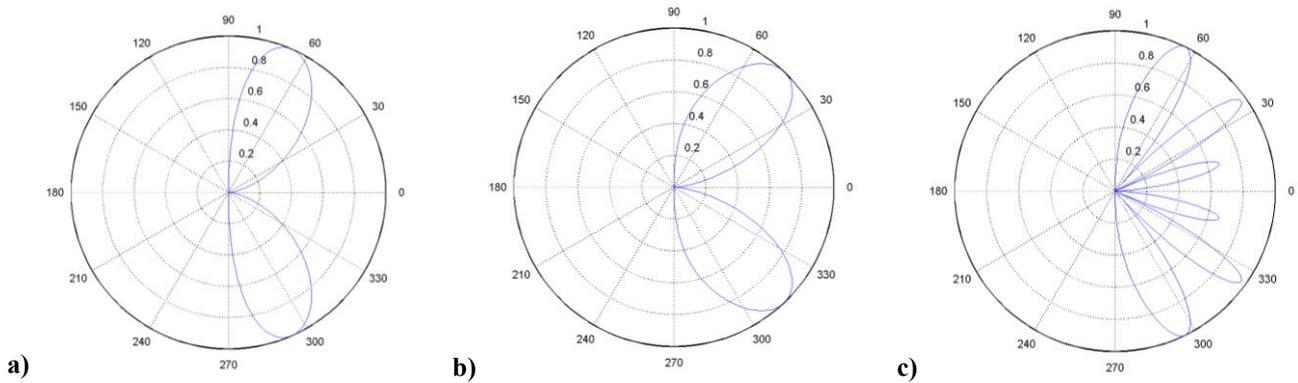


Figure II-10. Diagrammes de directivité des ondes longitudinales pour une source point de dimension finie et basés sur le modèle SCOE. -a) $d/\Lambda_L = 0,2$, -b) $d/\Lambda_L = 1$, -c) $d/\Lambda_L = 3$.

Dans le cas d'un rapport d/Λ_L égal à 0,2 (a), soit un diamètre inférieur à la longueur d'onde considérée, le diagramme de directivité est assimilable au cas de la source ponctuelle. Lorsque nous augmentons ce rapport à 1 (b), nous observons une variation dans le diagramme. Les lobes sont décalés, plus larges et n'ont pas tout à fait la même forme. Lorsque pour finir nous passons à un rapport égal à 3 (c), nous constatons l'apparition de nouveaux lobes. Des amplitudes de déplacements importantes apparaissent à différents angles. La maîtrise ou la connaissance des paramètres expérimentaux permettent d'affiner les prédictions théoriques.

Le point est la source la plus simple et la plus naturelle car en sortant de la cavité du laser, le faisceau forme un point et qu'une simple lentille convergente sphérique permet de focaliser le faisceau au niveau de la surface. Toutefois, l'utilisation d'une source moins commune est possible, voir dans certains cas, souhaitable [19]. En utilisant une lentille convergente cylindrique à la place d'une lentille convergente sphérique, nous pouvons changer la forme du faisceau. En prenant certaines précautions, nous pouvons focaliser le faisceau laser afin d'obtenir une tâche focale linéique. Nous parlons alors de source linéique.

A.E. Lord a proposé en 1996 [16] les facteurs de correction à même de prédire les directivités d'une source ligne pour les ondes longitudinales (II.19) et transversales (II.24) [14].

$$S_{LL} = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\Lambda_L} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi a}{\Lambda_L} \cdot \sin(\theta)} \quad (\text{II.19})$$

Où :

a : Longueur de la source linéique

Λ_L : Longueur d'onde acoustique longitudinale

En se basant sur l'équation précédente et posant l'hypothèse d'une ligne infiniment fine, nous obtenons les diagrammes de directivité de la Figure II-11.

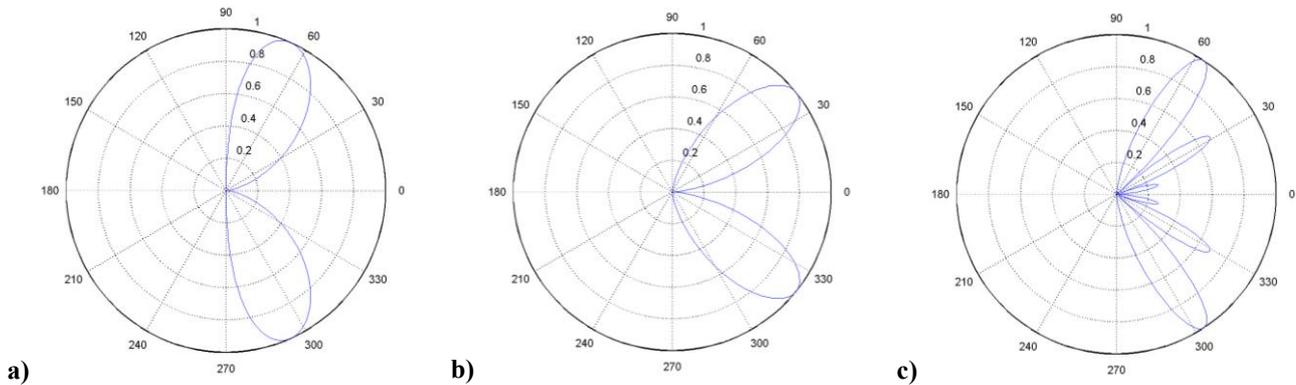


Figure II-11. Diagrammes de directivité des ondes longitudinales pour une source linéique et basés sur le modèle SCOE. -a) $a/\Lambda_L = 0,2$, -b) $a/\Lambda_L = 1$, -c) $a/\Lambda_L = 3$.

A l'image des diagrammes de directivité calculés dans le cas d'une source point, la dimension de la ligne influence la directivité des ondes longitudinales. Nous avons évalué cette influence grâce au rapport a/Λ . Pour $a/\Lambda_L = 0,2$ nous sommes dans le cas d'une source quasi-punctuelle, nous retrouvons donc un diagramme analogue au cas source punctuelle (sans dimension). Pour $a/\Lambda_L = 1$, nous obtenons une modification de la directivité par rapport au modèle source punctuelle mais également par rapport au cas source point $d/\Lambda_L = 1$. Nous constatons que la source linéique est plus directive que la source point à rapport dimension de source sur longueur d'onde équivalent. Dans le cas d'une source linéique $a/\Lambda_L = 3$, l'apparition de lobes supplémentaires est visible.

b) Onde transversale

La directivité d'une onde transversale est calculée en posant les hypothèses identiques aux ondes longitudinales, source punctuelle, source point et source linéique.

Dans le cas d'une source punctuelle, L.R.F. Rose a établi que pour une onde transversale, la divergence de la fonction de Green devient :

$$g_r^H(r, \theta, t) = \frac{1}{2V_T r \pi (\lambda + 2\mu)} \left[B_1(\theta) \delta\left(t - \frac{r}{V_T}\right) - \frac{B_2(\theta)}{\pi(t - r/V_T)} \right] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$D_T(\theta) = B_1(\theta) + i B_2(\theta) \quad (\text{II.21})$$

Dans le cas d'une onde transversale avec source ponctuelle, la formule devient :

$$D_T(\theta) = \frac{\sin 2\theta \cos 2\theta}{\cos^2 2\theta + (2 \sin \theta \cdot \sin 2\theta) \cdot \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \theta}} \quad (\text{II.22})$$

Tout comme pour l'onde longitudinale, cette équation nous permet de tracer le diagramme de directivité (Figure II-12).

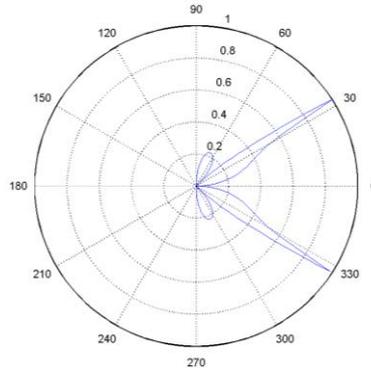


Figure II-12. Diagramme de directivité des ondes transversales pour une source ponctuelle et basé sur le modèle SCOE.

Les lobes obtenus sont très différents de ceux calculés pour l'onde longitudinale. Deux lobes extrêmement localisés sont observés à 30° par rapport à l'axe du faisceau laser, mais nous notons également l'apparition de deux lobes secondaires de moindre importance. Nous en concluons que pour une source ponctuelle, les ondes longitudinales et transversales provoqueront des déplacements maximaux pour des directions différentes. Ainsi si nous avons souhaité analyser une de ces ondes en particulier, il serait intéressant d'adapter la configuration expérimentale afin d'optimiser la détection d'une onde par rapport à l'autre.

La prise en compte de la dimension de la source point est donnée par l'équation (II.23) [13].

$$S_{PT} = \frac{J_1\left(\frac{\pi d}{\Lambda_T} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi d}{\Lambda_T} \cdot \sin(\theta)} \quad (\text{II.23})$$

Où :

J_1 : Fonction de Bessel de première espèce du premier ordre

d : Diamètre de la source

Λ_T : Longueur d'onde acoustique transversale

Cette source point nous donne un diagramme de directivité proche de la source ponctuelle pour $d/\Lambda_T = 0,2$ mais un diagramme sensiblement différent pour les autres cas, en particulier lorsque le rapport d/Λ_T est égal à 3. Pour ce rapport, le diamètre de la source devient important par rapport à la longueur d'onde acoustique. Nous observons la quasi-disparition des deux lobes secondaires et le rétrécissement des pics identifiés sur le cas de la source ponctuelle, ainsi que l'apparition de deux nouveaux lobes plus proches de zéro. La Figure II-13 permet de nous rendre compte de l'importance des hypothèses de travail et de l'influence de la dimension de la source sur la directivité des ondes transversales.

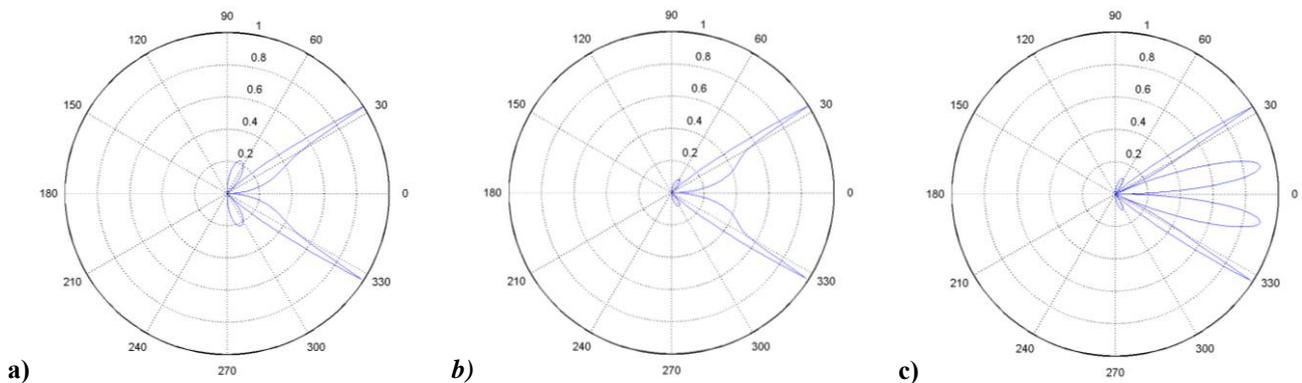


Figure II-13. Diagrammes de directivité des ondes transversales pour une source point et basés sur le modèle SCOE. -a) $d/\Lambda_T = 0,2$, -b) $d/\Lambda_T = 1$, -c) $d/\Lambda_T = 3$.

L'utilisation d'une source linéique permet également de modifier les diagrammes de directivité. L'utilisation d'une forme particulière de source peut présenter un intérêt certain en fonction des besoins expérimentaux.

Afin de prévoir les diagrammes de directivité dans le cas d'une source linéique, nous utilisons l'expression (II.24) [16].

$$S_{LT} = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\Lambda_T} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi a}{\Lambda_T} \cdot \sin(\theta)} \quad (\text{II.24})$$

Où :

a : Longueur de la ligne

Λ_T : Longueur d'onde acoustique transversale

Cette équation nous permet de tracer les diagrammes de directivité suivants (Figure II-14). Nous constatons une directivité plus importante vers le centre du matériau pour un rapport a/Λ_T élevé. Ce constat est vrai également dans le cas d'une source ponctuelle, mais aussi pour le cas d'une onde longitudinale.

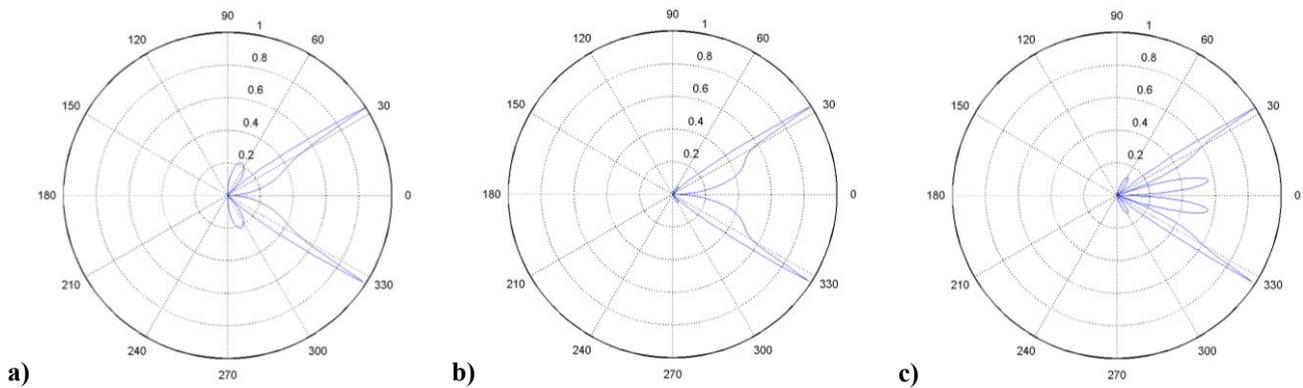


Figure II-14. Diagrammes de directivité des ondes transversales pour une source linéique et basés sur le modèle SCOE. -a) $a/\Lambda_T = 0,2$, -b) $a/\Lambda_T = 1$, -c) $a/\Lambda_T = 3$.

De façon générale, nous remarquons que les dimensions de la source génératrice d'ondes a une importance primordiale sur les résultats. Il est nécessaire de comprendre les hypothèses posées et vérifier qu'elles correspondent bien aux configurations expérimentales. De plus, l'utilisation d'une forme particulière de source permet de modifier la directivité des ondes ultrasonores, ce constat est très important dans le cadre du développement d'une méthode destinée à un contrôle non destructif car le choix de la forme pourra permettre d'optimiser la configuration pour la détection d'une onde de volume en particulier.

III.2. Diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh

Les ondes de volume ne sont qu'une approche partielle pour répondre à la problématique du contrôle des rouleaux en acier et en céramique. Etant donné les contraintes et les objectifs, les ondes de Rayleigh semblent plus adaptées à la détection de défauts de

surface et de sous-surface [20]. Dans ces conditions, il paraît inévitable d'étudier la directivité des ondes de Rayleigh pour les différentes sources envisagées [21].

Nous savons qu'à l'image des ondes de volume, les dimensions de la tâche focale du faisceau laser ont un effet sur les ondes de Rayleigh [22]. Toutefois, le calcul du diagramme de directivité des ondes de Rayleigh basé sur une source ponctuelle n'a pas d'intérêt car l'amplitude des déplacements générés par ce type de source est égale dans toutes les directions. La prise en compte du facteur dimension d'une source point n'apporte aucun changement au diagramme car la forme du diagramme est liée à la forme même du point. La source point peut être intéressante dans la mesure où l'on souhaite propager une onde de surface dans toutes les directions en même temps et avec la même amplitude.

Dans le cadre du développement d'une méthode de contrôle non destructif, il peut être plus intéressant d'orienter les ondes de Rayleigh suivant une ou plusieurs directions principales. Pour modifier la forme du diagramme de directivité obtenue par laser, la seule possibilité consiste à transformer la forme de la source.

A l'image des calculs précédemment effectués pour l'onde longitudinale et l'onde transversale, nous allons utiliser un modèle mathématique décrivant la directivité de l'onde de Rayleigh générée par une source linéique. A.M. Aindow, R.J. Dewhurst et S.B. Palmer ont travaillé sur la directivité de l'onde de surface générée par impulsion laser dans un métal [23] et ont proposé le formalisme (II.25) afin de prévoir ces directivités.

$$D_R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\Lambda_R} \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi a}{\Lambda_R} \sin(\theta)} \quad (\text{II.25})$$

Où :

a : Longueur de la ligne

Λ_R : Longueur d'onde acoustique de l'onde de Rayleigh

L'utilisation de cette relation dans un script de calcul nous donne les diagrammes de la Figure II-15.

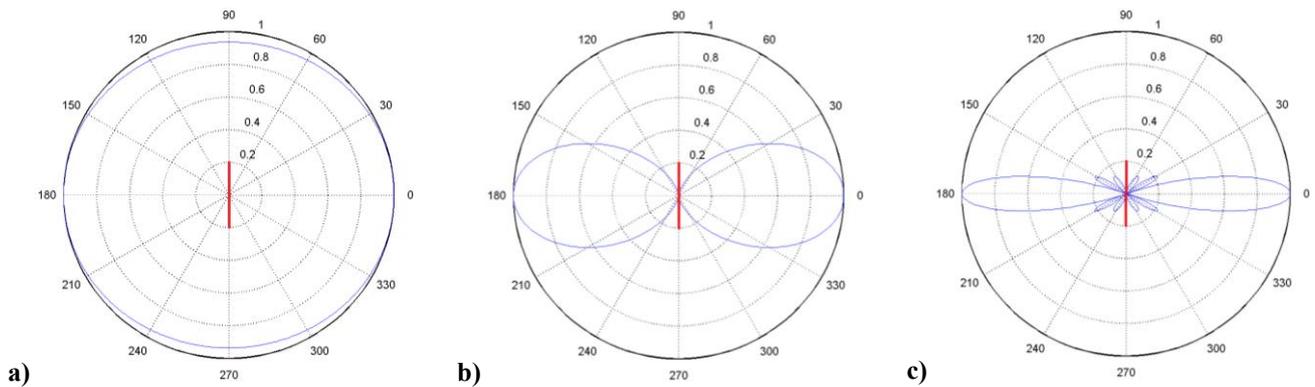


Figure II-15. Diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh basés sur le modèle SCOE. -a) $a/\lambda_R = 0,2$, -b) $a/\lambda_R = 1$, -c) $a/\lambda_R = 3$.

Les diagrammes de la Figure II-15 illustrent les directivités des ondes de Rayleigh dans le matériau vu de dessus. La source linéique se situe à l'origine du repère avec la longueur coïncidente avec l'axe $90^\circ / 270^\circ$. Dans le cas a), la dimension de la ligne est faible vis-à-vis de la longueur d'onde ce qui provoque une directivité peu marquée. En effet, nous constatons l'apparition d'une ellipse dont le rayon minimal est proche du rayon maximal. Le second diagramme, b), nous montre une directivité bien plus marquée avec la présence d'un lobe de chaque côté de la source ligne alors qu'à ces deux extrémités, l'amplitude est égale à zéro. Notons que le rapport a/λ_R est égal à un, ce qui signifie que la longueur de ligne est égale à la longueur d'onde acoustique.

Pour finir, nous avons tracé le diagramme de directivité en considérant un rapport a/λ_R égal à trois. Ce cas est le plus proche de notre configuration expérimentale. Nous remarquons immédiatement une forte directivité des ondes pour les deux directions perpendiculaires à la source ligne et l'apparition de plusieurs lobes secondaires de moindre importance, cinq fois inférieurs aux deux lobes principaux en termes d'amplitude. L'utilisation d'une source ligne permet d'accroître les amplitudes de déplacements des ondes dans une ou plusieurs directions particulières. Avec une détection par interférométrie localisée en un point précis, l'utilisation d'une directivité particulière peut apporter un intérêt certain pour le contrôle de surface par propagation d'ondes ultrasonores.

En pratique, l'utilisation de la directivité bidirectionnelle obtenue grâce à une source ligne permet d'obtenir trois types de propagations différentes en fonction de l'inclinaison de la source ligne et donc de la direction principale des ondes de surface.

Le premier type de propagation est appelé axiale. Elle est obtenue grâce à une source ligne inclinée à 90° par rapport à l'axe de révolution du cylindre. Cette configuration permet de générer une onde le long de l'axe du rouleau.

Pour la deuxième configuration, nous considérons une source ligne alignée sur l'axe de révolution du cylindre. Nous générons alors une onde de surface circonférentielle qui se propage autour du cylindre.

Pour finir, nous pouvons incliner la source ligne entre ces deux valeurs et obtenir un troisième type de propagation décrivant une hélice autour du cylindre. Nous parlerons alors d'ondes de surface hélicoïdales.

Chacun de ces cas modifie l'approche théorique. Nous devons donc pour chaque configuration définir les expressions capables de décrire les phénomènes de propagation.

IV. Calculs de la vitesse d'une onde de surface

IV.1. Onde axiale

Pour cette direction de génération, l'onde peut être assimilable à une onde se propageant dans un solide semi-infini possédant une surface plane. Nous posons comme hypothèses, un matériau isotrope et un solide dont l'épaisseur est très supérieure à la longueur d'onde acoustique considérée, ainsi nous conservons les conditions nécessaires à l'apparition d'une onde de Rayleigh. Sa vitesse peut être calculée en résolvant l'équation (II.26) [8].

$$\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^4 + 8\left(3 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right)\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^2 - 16\left(1 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right) = 0 \quad (\text{II.26})$$

Cette résolution (II.26) étant assez complexe, la formule approchée (II.27) est plus souvent utilisée. Cette relation donne très simplement une bonne estimation de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction des seules propriétés physiques du matériau ν présent directement dans cette formulation et μ et ρ , à travers la vitesse V_T (II.10).

$$V_R \approx V_T \cdot \frac{0,87 + 1,12 \nu}{1 + \nu} \quad (\text{II.27})$$

En utilisant cette formule approchée et les équations (II.9) et (II.10), nous calculons les différentes vitesses susceptibles de nous intéresser dans le cadre de nos travaux, à partir des données fournies par notre partenaire SKF. Nous prenons comme référence les valeurs définies dans le Tableau I-2 pour l'acier et pour la céramique. Pour le duralumin, nous nous référons à la littérature et considérons les données suivantes :

- Masse volumique : $\rho = 2790 \text{ kg.m}^{-3}$
- Module de Young : $E = 74 \text{ GPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,33$

Toutes ces valeurs nous permettent de calculer les différentes vitesses présentées au Tableau II-1.

	$V_L \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$V_T \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$V_R \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$
Duralumin	6269	3158	2943
Acier (M50)	6020	3218	2985
Céramique (Si₃N₄)	10913	6126	5655

Tableau II-1. Comparatif des vitesses longitudinales, transversales et de Rayleigh pour différents matériaux considérés dans ce mémoire.

Ce calcul de vitesse est correct dans les conditions posées mais il n'est plus vrai pour la géométrie qui nous intéresse, le cylindre.

IV.2. Onde circonférentielle

La forme cylindrique contrarie la condition du solide semi-infini possédant une surface plane. La courbure entraîne un effet dispersif sur les ondes de Rayleigh. Ce phénomène complexifie le calcul des vitesses car la vitesse d'une onde de surface se propageant autour d'un cylindre dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore [24]. Il est donc nécessaire de calculer les courbes de dispersion permettant de relier le nombre d'onde k à la pulsation ω . Comme l'a montré I.A. Viktorov [25], ce calcul des courbes de dispersion sur un cylindre se fait à l'aide de l'expression suivante :

$$\frac{J_{n+2}(x) + J_{n-2}(x) - 2\left(\frac{k_T^2}{k_L^2} - 1\right)J_n(x)}{J_{n+2}(x) - J_{n-2}(x)} = \frac{J_{n+2}(y) - J_{n-2}(y)}{J_{n+2}(y) + J_{n-2}(y)} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$x = k_L \cdot a$$

$$y = k_T \cdot a$$

a : Rayon du cylindre

J_n : Fonction de Bessel de première espèce d'ordre n

La littérature scientifique est riche de courbes de dispersion obtenues par différents auteurs. Ayant développé nos propres scripts de calcul, nous avons souhaité comparer nos résultats théoriques aux données publiées.

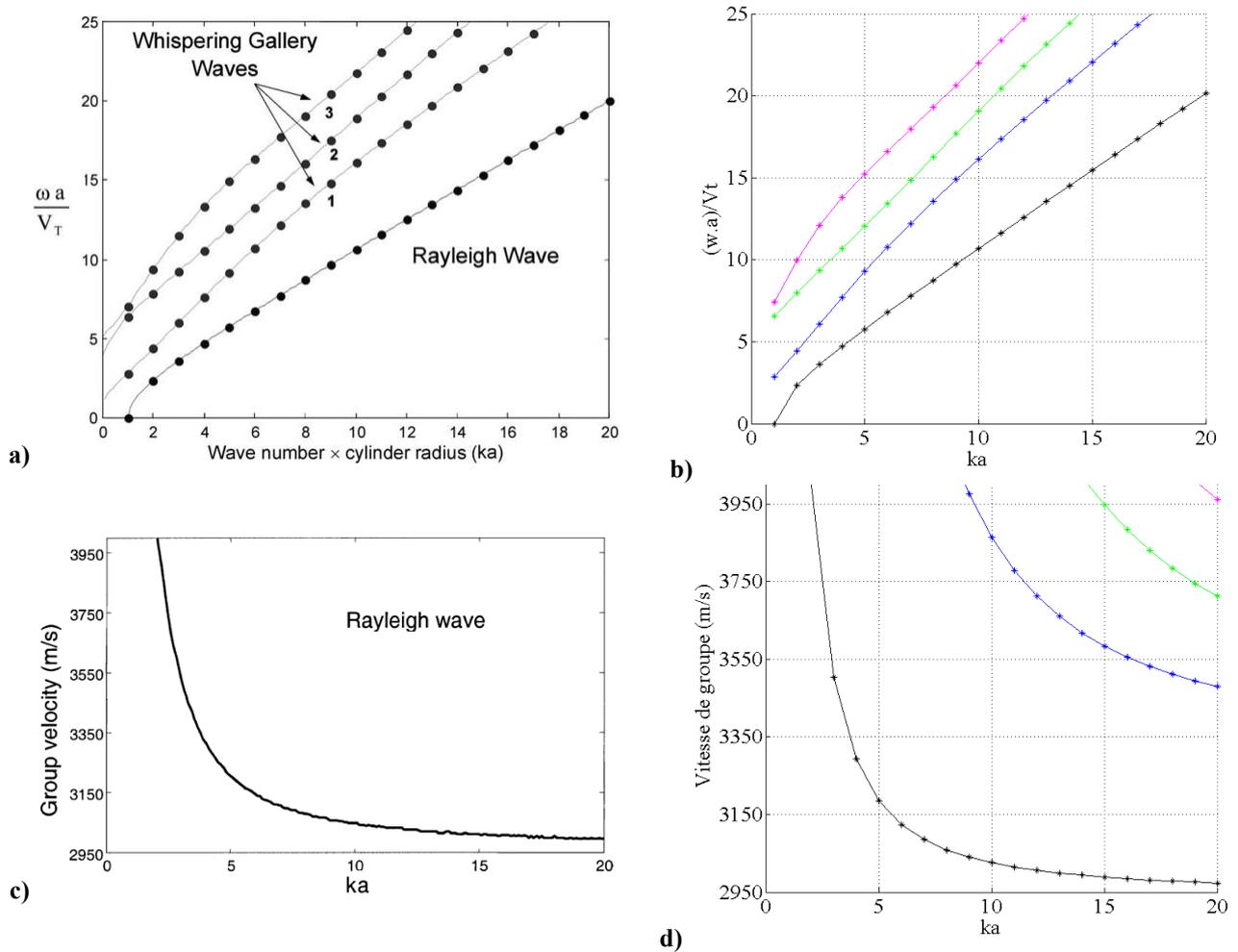


Figure II-16. Comparaison des résultats obtenus pour le script de calcul avec la littérature pour le duralumin. -a) Courbes de dispersion obtenues par D. Clorennec [26], -b) Courbes de dispersion calculées, -c) Vitesses de groupe du mode de Rayleigh obtenues par D. Clorennec [26], - d) Vitesses de groupe calculées.

Nous avons sélectionné les travaux de D. Clorennec qui dans ses recherches de thèse a présenté des courbes de dispersion pour un cylindre en duralumin (alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium et de manganèse, couramment utilisé dans l'industrie) [26].

La Figure II-16 met en parallèle les résultats publiés par D. Clorennec [26] et les nôtres. Les graphiques a et b présentent les courbes de dispersion des quatre premiers modes avec en abscisse le nombre d'onde multiplié par le rayon du cylindre ($k.a$ et $k.R$) et en ordonnée la pulsation multipliée par le rayon le tout divisé par la vitesse de l'onde transversale ($\frac{\omega.a}{V_T}$ et $\frac{\omega.R}{V_T}$). Le premier mode correspond à l'onde de Rayleigh (en noir pour le graphique b) alors que les trois autres font parties des galeries à échos. Nous pouvons remarquer immédiatement l'excellente concordance de ces courbes.

Le graphique c) présente la courbe liant la vitesse de groupe au nombre d'onde pour le premier mode, c'est à dire correspondant à l'onde de Rayleigh. Le graphique d) montre un profil de vitesse similaire avec en plus les courbes obtenues pour les modes suivants. Les graphiques c) et d) permettent de valider la notion de dispersion suivant laquelle la vitesse de propagation dépend de la fréquence de l'onde acoustique. En effet, le nombre d'onde k peut être directement relié à la fréquence de l'onde.

Fort de ces résultats, nous avons utilisé nos scripts pour effectuer des calculs similaires pour les matériaux qui nous intéressent et qui sont l'acier et la céramique. Nous avons obtenus les graphiques de la Figure II-17.

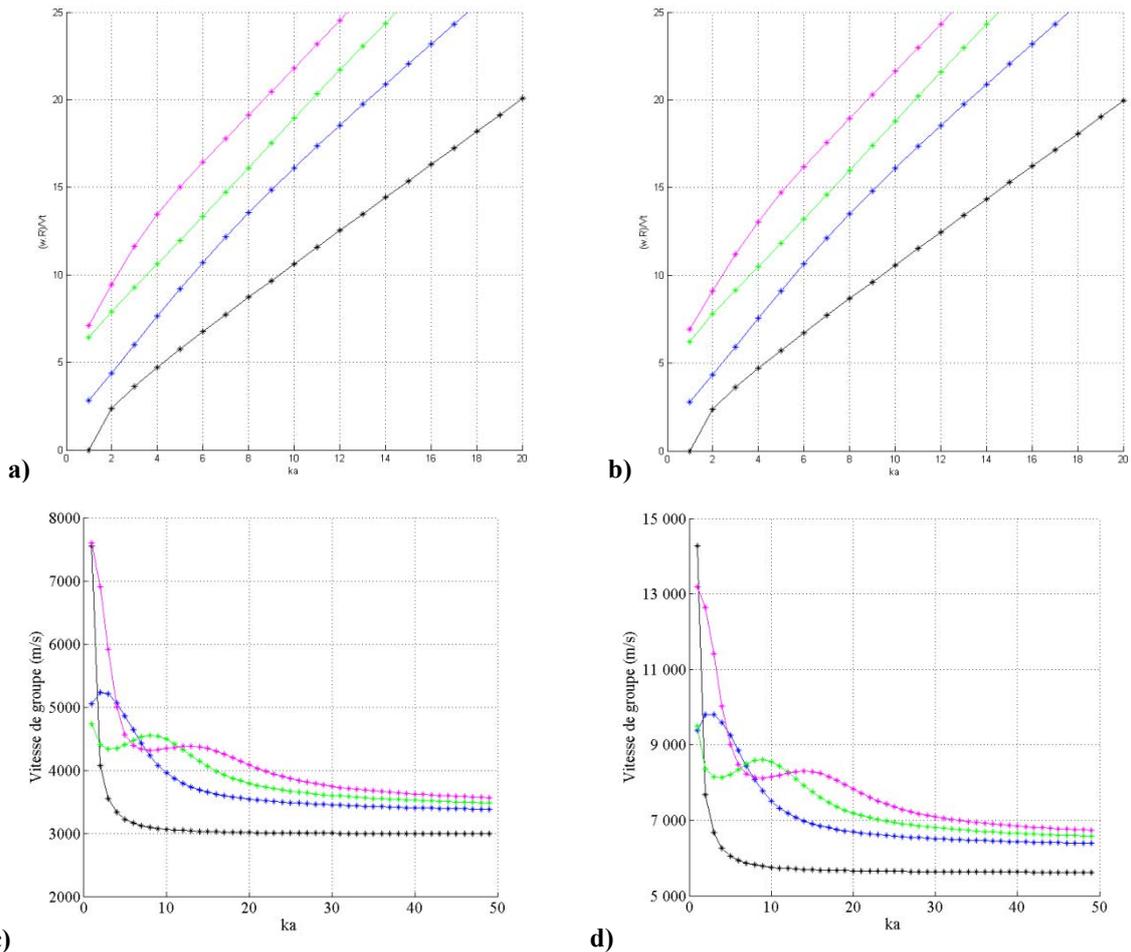


Figure II-17. Calculs des courbes de dispersion des quatre premiers modes et des vitesses de groupe associées pour l'acier et la céramique. -a) Courbes de dispersion sur acier, -b) Courbes de dispersion sur céramique, -c) Vitesses de groupe sur acier, - d) Vitesses de groupe sur céramique.

Nous retrouvons sur les courbes des vitesses (graphiques c et d) le constat déjà fait sur la différence de vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh entre l'acier et la céramique. Les vitesses tendent pour ka élevé vers la vitesse de l'onde de Rayleigh dans un solide semi-infini possédant une surface plane, ce qui signifie qu'à haute fréquence la vitesse de l'onde de surface se propageant autour d'un cylindre et proche de la vitesse de Rayleigh se propageant dans un solide plan semi-infini.

Les vitesses dépendent de la courbure du cylindre. Afin d'évaluer l'influence de la courbure sur cette vitesse, nous avons calculé pour différents diamètres le profil de la vitesse de phase en fonction de la fréquence acoustique (Figure II-18).

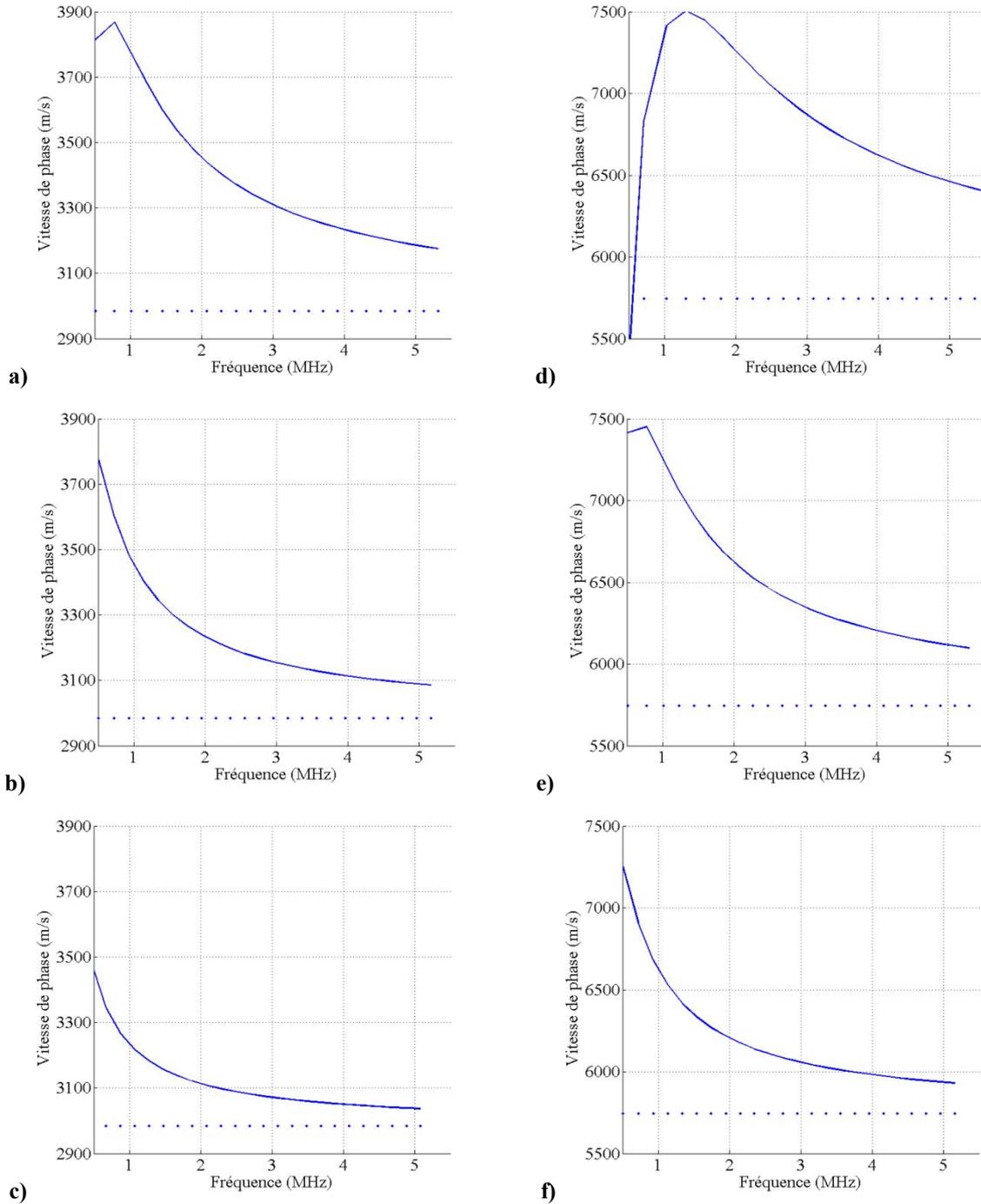


Figure II-18. Vitesses de phase à échelle fixe pour l'acier et pour la céramique pour des rayons de courbures différents. -a) Cylindre en acier avec rayon de 5 mm, -b) Cylindre en acier avec rayon de 10 mm, -c) Cylindre en acier avec rayon de 20 mm, -d) Cylindre en céramique avec rayon de 5 mm, -e) Cylindre en céramique avec rayon de 10 mm, -f) Cylindre en céramique avec rayon de 20 mm.

La figure ci-dessus présente les vitesses de phase pour l'acier (a, b, c) et pour la céramique (d, e, f) pour trois rayons différents, 5 mm (a, d), 10 mm (b, e) et 20 mm (c, f).

Les graphiques obtenus pour l'acier, à échelle fixe, nous montrent que la vitesse varie fortement en fonction du rayon considéré. Plus le diamètre du cylindre est grand, plus la vitesse de phase s'approche rapidement de la vitesse de l'onde de Rayleigh sur une surface plane. Ce constat est également fait pour la céramique. Il s'agit d'une règle générale, plus la courbure est grande, plus nous nous approchons d'une surface plane et donc plus la vitesse de l'onde est proche de celle d'une onde de Rayleigh dans un solide semi-infini possédant une surface plane. De même, plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde acoustique est petite et plus nous nous rapprochons du cas précité avec une vitesse de propagation de l'onde proche d'une onde de Rayleigh.

IV.3. Ondes de surface hélicoïdales

Dès 1958, R.M. White a publié un article sur l'utilisation d'un front d'onde incident pour générer des ondes à travers un cylindre [27]. Par la suite, d'autres auteurs ont également travaillé sur le sujet, comme H. Überall [28] ou J.M. Conoir [29]. Dans notre cas, nous utilisons un faisceau laser dont nous modifions la forme afin d'obtenir une source ligne et générer ainsi des ondes de surface dans une direction particulière. La directivité d'une source ligne permet de faire parcourir une onde de surface suivant un axe particulier perpendiculaire à la source ligne. En considérant la forme de nos échantillons deux types de propagation deviennent rapidement évidentes, le long de l'axe du cylindre ou autour de celui-ci de façon circonférentielle. Une propagation de type axiale est assimilable à une propagation dans un plan car aucune courbure n'est présente suivant cet axe. La propagation de type circonférentielle a été étudié lors des calculs de courbes de dispersion sur un cylindre. Il existe un autre chemin de propagation pour les ondes de surface, l'hélice [30]. Cette propagation se situe entre la propagation de type axiale et de type circonférentielle et se caractérise par un angle d'inclinaison de la source ligne situé entre 0° et 90° . Ce chemin de propagation devrait permettre de couvrir une zone plus importante que les deux autres.

a) Trajet principal de l'onde de surface

Afin d'identifier l'origine des déplacements détectés par l'interféromètre lors de la propagation d'une onde de surface hélicoïdale, nous avons développé une représentation basée sur les lois de Snell-Descartes. L'objectif étant de détecter des défauts grâce à ces ondes de surface, il est nécessaire d'estimer les chemins de propagation privilégiés et connaître ainsi les zones contrôlées. L'échantillon étant un cylindre et les ondes considérées des ondes de

surface, nous pouvons dérouler le cylindre afin d'obtenir une représentation plane de la géométrie cylindrique et un chemin de propagation. La courbure du cylindre est prise en compte dans le calcul de la vitesse de propagation des ondes.

En connaissant le diamètre et la hauteur du cylindre, ainsi que la position et l'angle d'inclinaison de la source ligne, il est possible de tracer les chemins de propagation principaux comme présenté sur la Figure II-19. Ces chemins sont théoriques, ils correspondent aux directions pour lesquelles l'amplitude des déplacements est maximale, c'est à dire perpendiculairement à la source ligne. En réalité, l'onde n'est pas unidirectionnelle mais s'écarte de ces chemins principaux. De ce fait, il est possible de détecter le passage d'une onde en dehors du chemin principal de propagation. A noter que plus la ligne sera longue (ou plus la fréquence acoustique sera élevée), plus notre représentation sera proche de la réalité.

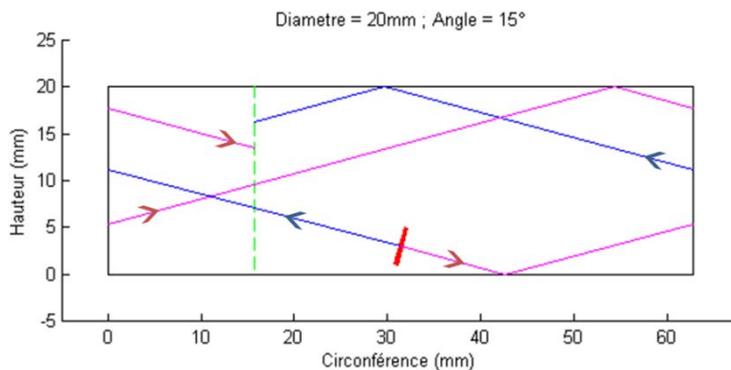


Figure II-19. Schéma simplifié décrivant les chemins principaux d'une onde de surface générée par une source ligne avec une inclinaison par rapport à l'axe du rouleau $\beta=15^\circ$ sur un cylindre dont le diamètre et la hauteur valent 20 mm.

Sur cette représentation (Figure II-19), nous ne prenons pas en compte la forme réelle des lobes et considérons qu'il existe des réflexions régies par les lois de Snell-Descartes au niveau des faces (bases du cylindre), condition vraie si le rayon de raccordement est petit devant les longueurs d'onde acoustiques.

Le segment rouge incliné correspond à la source ligne génératrice des ondes de surface. Cette génération possède une symétrie par rapport à son axe, générant une onde à droite (magenta) et une à gauche (bleu). La ligne discontinue verte correspond aux positions possibles de l'interféromètre lorsque l'on respecte un angle entre le faisceau du laser impulsionnel et le faisceau laser continu de l'interféromètre de 90° . Cet interféromètre est posé sur une table de translation en Z qui permet de monter ou baisser le point de détection.

L'ajout d'un comparateur nous permet par ailleurs de mesurer précisément la valeur de ce déplacement en hauteur.

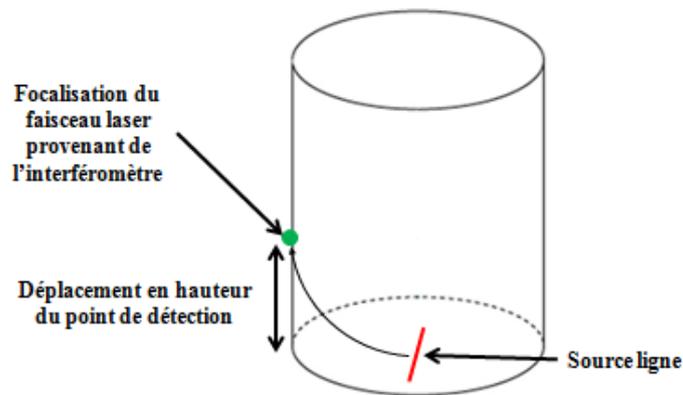


Figure II-20. Configuration expérimentale de génération et de détection des ondes de surface hélicoïdales.

b) Calcul des courbes de dispersion

A partir des travaux de I.A. Viktorov [25], X.L. Bao [31] a développé un formalisme (II.37) permettant le calcul des courbes de dispersion pour des ondes de surface hélicoïdales dans le cas d'un cylindre isotrope. Cette formulation donnée par X.L. Bao s'obtient à partir de l'expression du vecteur de déplacement (II.29). Cette équation relie le potentiel scalaire et le potentiel vectoriel au vecteur de déplacement noté \vec{u} .

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\varphi + \vec{\nabla} \wedge \vec{\psi} \quad (\text{II.29})$$

Où :

\vec{u} : Vecteur de déplacement

φ : Potentiel scalaire

$\vec{\psi}$: Potentiel vectoriel

Avec :

$\vec{\nabla}\varphi$: Gradient du potentiel scalaire

$\vec{\nabla} \wedge \vec{\psi}$: Rotationnel du potentiel vectoriel

Ce potentiel scalaire et ce potentiel vectoriel respectent les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V_L^2 \nabla^2 \varphi &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \\ V_T^2 \nabla^2 \psi &= \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

∇^2 : Opérateur Laplacien pour des coordonnées cylindriques

En coordonnées cylindriques, les solutions tridimensionnelles des équations (II.30) utilisant l'opérateur Laplacien passent par l'utilisation des fonctions de Bessel. Ces solutions pour des ondes de surface sont de la forme :

$$\begin{aligned}\varphi &= AJ_p(ha) \exp(ip\theta) \exp(ik_z z) \\ \psi_r &= -iBJ_{p+1}(ka) \exp(ip\theta) \exp(ik_z z) \\ \psi_\theta &= -BJ_{p+1}(ka) \exp(ip\theta) \exp(ik_z z) \\ \psi_z &= -iCJ_p(ka) \exp(ip\theta) \exp(ik_z z)\end{aligned}\quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$\begin{aligned}k_z &= \frac{p}{\tan(\alpha) \cdot a} \\ h &= \sqrt{\frac{\omega^2}{V_L^2} - k_z^2} \\ k &= \sqrt{\frac{\omega^2}{V_T^2} - k_z^2}\end{aligned}\quad (\text{II.32})$$

Afin d'obtenir une expression capable de modéliser les courbes de dispersion des ondes de surface hélicoïdales, nous devons prendre en compte les conditions aux limites imposées par la géométrie cylindrique. Nous utilisons les notations définies à la Figure II-3. Ces conditions nous donnent pour $r = a$, le rayon du cylindre :

$$T_{rr} = T_{rz} = T_{r\theta} = 0 \quad (\text{II.33})$$

Les différentes composantes de la contrainte (T_{rr} , T_{rz} et $T_{r\theta}$) s'expriment à partir du déplacement u et des coefficients de Lamé du matériau (λ et μ) suivant :

$$\begin{aligned}T_{rr} &= \lambda \operatorname{div}(\vec{u}) + 2\mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \\ T_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \\ T_{r\theta} &= \mu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta \right) + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right]\end{aligned}\quad (\text{II.34})$$

Comme nous considérons dans ces calculs une géométrie cylindrique, nous pouvons écrire :

$$\text{div}(\vec{u}) = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (\text{II.35})$$

et

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_\theta}{\partial z} \\ u_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_r}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial r} \\ u_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\psi_r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (\text{II.36})$$

En combinant les équations (II.31) avec la condition aux limites (II.33), nous obtenons l'expression (II.37). Le calcul des solutions pour lesquelles le déterminant s'annule permet de tracer des courbes de dispersion des ondes de surface hélicoïdales sur un cylindre en fonction de l'angle de génération.

$$|M| = \begin{vmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$\begin{aligned} M_{11} &= [2p(p-1) - (k^2 - k_z^2)a^2] * J_p(ha) + 2haJ_{p+1}(ha) \\ M_{12} &= 2k_zka^2J_p(ka) - 2(p+1)k_zkJ_{p+1}(ka) \\ M_{13} &= -2p(p-1)J_p(ka) + 2pkaJ_{p+1}(ka) \\ M_{21} &= 2p(p-1)J_p(ha) - 2phaJ_{p+1}(ha) \\ M_{22} &= 2(p+1)k_zkJ_{p+1}(ka) - k_zka^2J_p(ka) \\ M_{23} &= -[2p(p-1) - (ka)^2]J_p(ka) - 2kaJ_{p+1}(ka) \\ M_{31} &= 2pk_zkJ_p(ha) - 2k_zha^2J_{p+1}(ha) \\ M_{32} &= pkaJ_p(ka) - (k^2 - k_z^2)a^2J_{p+1}(ha) \\ M_{33} &= -pak_zJ_p(ka) \end{aligned}$$

L'intérêt de la formulation de X.L. Bao [31] est de tracer les courbes de dispersion d'une onde de surface hélicoïdale pour différents angles d'inclinaison de la source ligne. Nous constatons que cet angle modifie ces courbes.

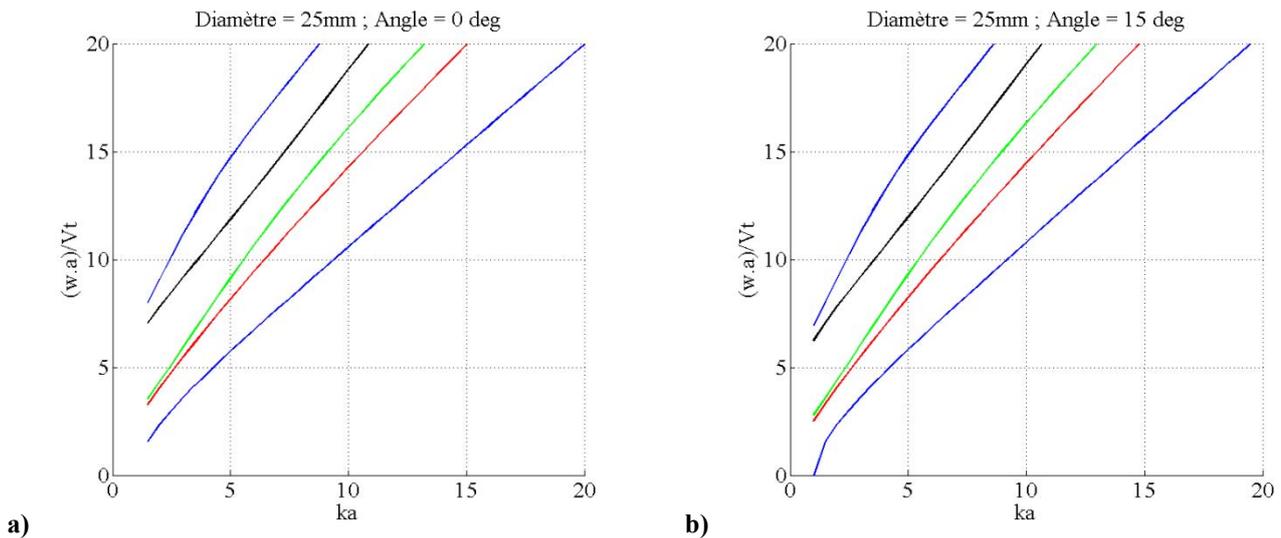


Figure II-21. Courbes de dispersion de l'onde de surface hélicoïdale basée sur la formulation de X.L. Bao pour un angle d'inclinaison de 0° et de 15° de la source ligne pour un cylindre en céramique.

Cette propagation de type hélicoïdale a été étudiée par J.M. Conoir, qui a utilisé deux transducteurs pour générer des ondes ultrasonores. Cette méthode est difficile à mettre en œuvre dans le cas d'un système de contrôle industriel capable d'accepter une multitude de rouleaux de dimensions différentes. La méthode Ultrasons-Laser est bien plus adaptée à la génération et la détection des ondes de surface hélicoïdales notamment grâce à la directivité d'une source ligne.

c) Calcul de vitesse

Le calcul des courbes de dispersion permet d'estimer les vitesses pour chaque composante fréquentielle de l'onde de surface pour un diamètre de cylindre et un angle d'inclinaison de la source ligne définis. En considérant un angle égal à zéro dans la formulation de X.L. Bao [31], nous devons retrouver le cas d'une onde circonférentielle décrite par I.A. Viktorov [25]. Nous traçons sur les mêmes graphiques les résultats obtenus pour la formulation de I.A. Viktorov et pour celle de X.L. Bao dans le cas d'un angle de la source ligne égal à zéro pour deux diamètres différents (II.20). Nous constatons que la concordance des deux modèles est excellente.

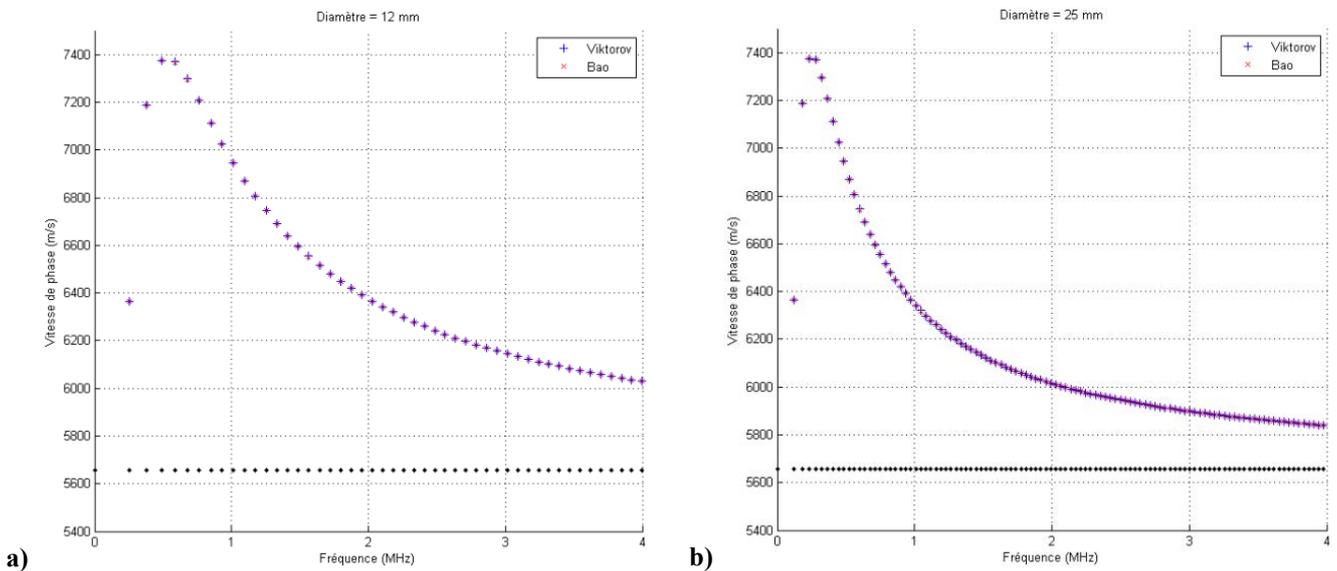


Figure II-22. Courbes de la vitesse de phase de l'onde de surface basée sur la formulation de Viktorov et de Bao pour un angle de 0° en considérant des cylindres en céramique de différentes dimensions en fonction de la fréquence acoustique. -a) Cylindre en céramique de diamètre 12 mm, -b) Cylindre en céramique de diamètre 25 mm.

Suite à cette vérification, nous souhaitons mettre en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison de la source ligne sur la vitesse de phase. Nous calculons, à l'aide d'un script Matlab, celle-ci en fonction de la fréquence de l'onde considérée pour différents angles d'inclinaison de la source ligne.

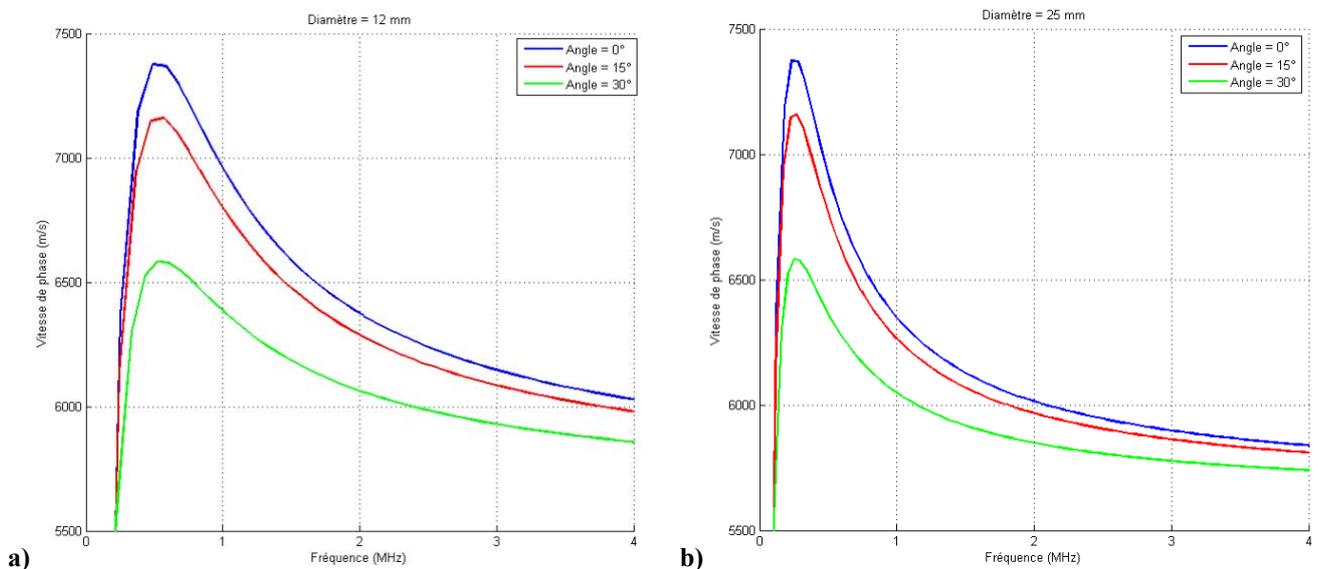


Figure II-23. Vitesses de phase de l'onde de surface basée sur la formulation de Bao pour différents angles d'inclinaison en considérant des cylindres en céramique de différentes dimensions en fonction de la fréquence acoustique. -a) Cylindre de diamètre 12 mm, -b) Cylindre de diamètre 25 mm.

La Figure II-23 présente les résultats obtenus pour des cylindres en céramique de diamètres 12 et 25 mm en considérant trois angles d'inclinaison différents, 0° , 15° et 30° .

Les courbes montrent qu'à fréquence acoustique constante et en considérant un angle $\beta = 0^\circ$, la vitesse de l'onde de surface est plus élevée que pour un angle $\beta = 15^\circ$ à cette même fréquence. De même pour $\beta = 15^\circ$, la vitesse de propagation de l'onde de surface est plus rapide que pour $\beta = 30^\circ$. En effet, si nous considérons un diamètre de 12 mm et une fréquence fixe de 2,5 MHz (Figure II-23), pour $\beta = 0^\circ$ la vitesse est de 6240 m.s^{-1} tandis que pour $\beta = 15^\circ$ la vitesse est proche de 6160 m.s^{-1} et de 5980 m.s^{-1} pour $\beta = 30^\circ$. Cette variation est importante et significative. Elle doit être prise en compte dans nos expériences. Comme nous l'avons vu les effets dispersifs des ondes de surface n'existent pas pour une surface plane, mais ils apparaissent pour des géométries cylindriques et ce phénomène de dispersion est plus marqué pour un petit diamètre. Les composantes fréquentielles d'une onde ne possèdent pas toutes la même vitesse. Plus l'angle β se rapproche de 90° , plus nous nous approchons de la configuration donnant naissance à une onde axiale et donc plus la vitesse de l'onde de surface hélicoïdale tend vers la vitesse d'une onde de Rayleigh dans un solide semi-infini et possédant une surface plane.

V. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de poser les modèles mathématiques et les hypothèses associées nécessaires à la description des phénomènes ondulatoires ultrasonores dans un solide et en particulier pour une géométrie cylindrique.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux ondes élastiques en elles-mêmes, en introduisant la notion de vitesses de phase et de groupe. En nous basant sur la loi de Hooke, nous avons formalisé un modèle physique pour décrire les déplacements provoqués par la passage d'une onde ultrasonore dans un solide homogène et isotrope.

Ces hypothèses d'homogénéité et d'isotropie des matériaux considérés nous ont permis d'utiliser des modèles théoriques et d'estimer les vitesses de propagation d'une onde longitudinale et d'une onde transversale dans l'acier et dans la céramique.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux ondes utilisant le cylindre comme guide à l'image des ondes de compression, de torsion et flexion calculées à partir des modes de

Pochhammer-Chree, mais également l'onde de Rayleigh. En fonction des objectifs, des contraintes expérimentales et des limites physiques, nous avons conclu que les types d'ondes les plus pertinentes et prometteuses pour nos travaux de recherche sont les ondes de volume, longitudinale et transversale, mais aussi et surtout l'onde de Rayleigh.

A partir de ce constat, nous avons étudié les phénomènes de directivités de ces ondes pour différentes formes de tâches focales servant de source thermoélastique selon le modèle SCOE. Ce travail nous a montré que l'utilisation d'une source ligne pouvait se révéler particulièrement intéressante pour la génération d'ondes de surface. En effet, celle-ci permet d'obtenir un diagramme de directivité des ondes de surface proche d'un modèle bidirectionnel. Grâce à l'utilisation d'une source ligne, nous avons déterminé que nous pouvions générer des ondes selon trois chemins de propagation différents en fonction de l'inclinaison de la source ligne et de la direction principale des ondes de surface.

Le premier cas étudié correspond à une ligne source inclinée de 90° par rapport à l'axe de révolution du cylindre. Nous obtenons ainsi une onde de surface axiale. Son étude revient à considérer un solide semi-infini possédant une surface plane.

Dans un deuxième cas, nous considérons une source ligne alignée sur l'axe de révolution du cylindre. Nous générons alors principalement une onde de surface circonférentielle. Ce type de propagation, autour du cylindre, engendre un effet dispersif sur les ondes de surface, d'autant plus marqué que le diamètre est petit, à fréquence acoustique constante.

Pour finir nous nous sommes concentrés sur l'aspect théorique d'une approche innovante de la problématique de détection de défauts sur un cylindre plein et borné, la propagation de type hélicoïdale des ondes de surface. Nous avons développé un script basé sur les lois de Snell-Descartes capable de prédire le trajet principal d'une onde de surface générée par une source linéique inclinée par rapport à l'axe du cylindre. Ce script permet de comprendre et d'optimiser le chemin principal de propagation de l'onde de surface dans le but de détecter un défaut. La propagation de type hélicoïdale modifie les courbes de dispersion précédemment obtenues, nous avons donc du recalculer ces courbes au cas par cas et ce pour estimer précisément les profils de vitesses.

Les travaux présentés dans le chapitre II serviront de base aux interprétations des chapitres III et IV en considérant une génération en surface (modèle SCOE), des matériaux

homogènes et isotropes et des diagrammes de directivité valident malgré la courbure du cylindre dans le cas d'une source ligne inclinée. Les expérimentations devront nous permettre de valider ces hypothèses dans la configuration retenue et mise en place, ainsi qu'avec les échantillons disponibles.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats obtenus lors de différents essais. Pour ces expérimentations, nous mesurerons par interférométrie les déplacements caractérisés par leurs temps d'arrivée (temps de vol de l'onde). Ces signaux temporels dépendront donc directement de la distance parcourue par l'onde et de sa vitesse. Par conséquent, posséder des modèles prédictifs pour connaître les chemins de propagation et les vitesses de propagation des ondes est primordial pour l'interprétation des essais.

VI. Bibliographie

- [1] C. Scruby et L. Drain, *Laser Ultrasonics, Techniques and applications*, Adam Hilger, 1990.
- [2] R. White, «Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption,» *Journal of Applied Physics*, vol. 34, pp. 2123-2124, 1963.
- [3] R. Rodriguez, *Influence de la microstructure du nitrure de silicium sur son aptitude à la rectification*, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003.
- [4] S. Petit, «Spectroscopie de résonance ultrasonore des ondes de surface - Application au contrôle non destructif de billes en céramique,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2003.
- [5] F. Deneuille, «Contribution au contrôle non-destructif de billes en céramique par spectroscopie ultrasonore de résonances de modes sphéroïdaux,» Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.
- [6] J.-P. Fournon, «Les Ondes Sismiques,» 31 Octobre 2004. [En ligne]. Available: http://junon.u-3mrs.fr/ms422aww/webdocs/mst/Geomus/ondes_sismiques.htm .
- [7] Y. Pan, C. Rossignol et B. Audoin, «Acoustic waves generated by a laser line pulse in cylinders; Application to the elastic constants measurement,» *Acoustical Society of America*, vol. 115, n°114, pp. 1537-1545, 2004.
- [8] D. Royer et E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides, Propagation libre et guidée*, Paris: Masson, 1996.
- [9] V. Baronian, «Couplage des méthodes modale et éléments finis pour la diffraction des ondes élastiques guidées,» Ecole doctorale de l'Ecole Polytechnique, 2009.
- [10] J. Rayleigh, «On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid,» *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 1, n°111, pp. 4-11, 1885.

- [11] I. Arias et J. Achenbach, «Thermoelastic Generation of Ultrasound by Line-Focused Laser Irradiation,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, n°125, pp. 6917-6935, 2003.
- [12] J. Achenbach, «Laser excitation of surface wave motion,» *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 51, pp. 1885-1902, 2003.
- [13] G. Miller et H. Pursey, «The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of semi-infinite isotropic solid,» *The Royal Society*, vol. 223, n°11155, 1954.
- [14] D. Hurley et J. Spicer, «Line source representation for laser-generated ultrasound in an elastic transversely isotropic half-space,» *Acoustical Society of America*, vol. 116, n°15, pp. 2914-2922, 2004.
- [15] D. Hutchins, R. Dewhurst et S. Palmer, «Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum,» *Acoustical Society of America*, vol. 70, n°15, pp. 1362-1369, 1981.
- [16] A. Lord, «Geometric diffraction loss in longitudinal and shear wave attenuation measurements in an isotropic half-space,» *Acoustical Society of America*, vol. 39, n°14, p. 650, 1966.
- [17] L. Rose, «Point-source representation for laser-generated ultrasound,» *Acoustical Society of America*, vol. 75, n°113, pp. 723-732, 1984.
- [18] K. Aki et G. Richards, *Quantitative seismology*, vol. 1, San Francisco: Freeman, 1980.
- [19] F. Faëse, «Génération d'ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers - Applications à la caractérisation sans contact de défauts,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2013.
- [20] D. Royer et C. Chenu, «Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source,» *Ultrasonics*, vol. 38, pp. 891-895, 2000.
- [21] A. Aindow, R. Dewhurst et S. Palmer, «Laser-generation of directional surface acoustic

- wave pulses in metals,» *Optics Communications*, vol. 42, n°12, pp. 116-120, 1982.
- [22] C. Scala et P. Doyle, «Time-and frequency-domain characteristics of laser-generated ultrasonic surface waves,» *Acoustical Society of America*, vol. 85, n°14, pp. 1569-1576, 1989.
- [23] A. Aindow, R. Dewhurst, D. Hutchins et S. Palmer, «Laser-generated ultrasonic pulses at free metal surfaces,» *Acoustical Society of America*, vol. 62, n°12, pp. 449-455, 1981.
- [24] D. Royer et D. Clorennec, «Theoretical and Experimental Investigation of Rayleigh Waves on Spherical and Cylindrical Surfaces,» chez *Laser Ultrasonics*, Montréal, 2008.
- [25] I. Viktorov, *Rayleigh and Lambs Waves, Physical Theory and Applications*, New York: Plenum Press, 1967.
- [26] D. Clorennec, D. Royer et H. Walaszek, «Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics,» *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 783-789, 2002.
- [27] R. White, «Elastic Wave Scattering at a Cylindrical Discontinuity in a Solid,» *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 30, n°18, pp. 771-785, 1958.
- [28] H. Überall, «Helical surface waves on cylinders and cylindrical cavities,» *Traitement du Signal*, vol. 2, n°15, pp. 381-385, 1985.
- [29] J. Conoir, P. Rembert, O. Lenoir et J. Izbicki, «Relation between surface helical waves and elastic cylinder resonances,» *Acoustical Society of America*, vol. 93, n°13, pp. 1300-1307, 1993.
- [30] X. Bao, «Echoes and helical surface waves on a finite elastic cylinder excited by sound pulses in water,» *Acoustical Society of America*, vol. 94, n°13, pp. 1461-1466, 1993.
- [31] X. Bao, H. Cao et H. Überall, «Resonances and surface waves in the scattering of an obliquely incident acoustic field by an infinite elastic cylinder,» *Acoustical Society of America*, vol. 87, n°11, pp. 106-110, 1990.
- [32] D. Clorennec, «Génération et détection optiques d'ondes guidées sur une pièce cylindrique. Application au contrôle non destructif sans contact,» Université Paris 7,

2002.

- [33] H. Lamb, «On Waves in a Elastic Plate,» *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 93, pp. 114-128, 1917.
- [34] R. Stoneley, «Elastic waves at the surface of separation of two solids,» *Proceeding of the Royal Society of London*, vol. 106, pp. 416-428, 1924.
- [35] L. Tang et S. Liu, «Guided elastic waves in infinite free-clamped hollow cylinders,» *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 313-320, 2009.
- [36] Y. Pan, N. Chigarev, C. Rossignol et B. Audoin, «Acoustic waves generated by a laser line source on the surface of a cylindrical rod or cavity,» chez *Laser Ultrasonics*, Montréal, 2008.
- [37] Y. Pan, L. Li, C. Rossignol, B. Audoin et N. Chigarev, «Acoustic waves generated by a laser line pulse in a hollow cylinder,» *Ultrasonics*, vol. 44, pp. 843-847, 2006.
- [38] U. Kawald, C. Desmet, L. W., C. Glorieux et T. J., «Investigation of the dispersion relations of surface acoustic waves propagating on a layered cylinder,» *Acoustical Society of America*, vol. 99, n°12, pp. 926-930, 1996.

CHAPITRE III. CARACTERISATION DES DEFAUTS ET EXPERIMENTATIONS

I. Montage expérimental	89
I.1. Instrumentation.....	89
I.2. Configuration.....	91
II. Echantillons	93
II.1. Défauts naturels.....	94
a) Le repli de laminage.....	94
b) Les criques de rectification.....	96
c) La brûlure.....	96
II.2. Défauts artificiels.....	97
a) Défaut créé par abrasion mécanique.....	97
b) Défaut créé par laser.....	102
II.3. Validation du régime thermoélastique.....	109
a) Expérimentation.....	109
b) Expertise métallurgique.....	110
III. Propagation des ondes de surface dans une direction axiale	113
III.1. Description.....	113
III.2. Obtention de la vitesse de propagation.....	114
III.3. Détection d'un défaut créé par micro-scie.....	116
IV. Propagation des ondes de surface dans une direction circonférentielle	118
IV.1. Description.....	118
IV.2. Génération d'ondes de surface sur un matériau céramique.....	120
IV.3. Effet dispersif lié à la géométrie cylindrique.....	120
IV.4. Détection de défauts.....	122
V. Conclusion	127
VI. Bibliographie	129

Introduction

Les deux premiers chapitres nous ont permis de définir les choix techniques les plus pertinents pour répondre à la problématique du contrôle industriel de rouleaux et de développer les outils théoriques utiles à la prédiction et l'interprétation des signaux expérimentaux. Nous avons à disposition les équipements nécessaires à la génération et à la détection des ondes élastiques par laser au sein du laboratoire [1]. Nous validerons donc expérimentalement les bases théoriques et vérifierons que la méthode est capable de détecter un défaut présent sur un rouleau [2] [3] [4]. Nous nous efforcerons ensuite de prouver la pertinence de notre approche et nous livrerons les clés permettant la détection de défauts.

Dans un premier temps, nous présenterons la configuration expérimentale choisie et mise en place dans cette thèse en prenant soin d'expliquer pourquoi nous avons installé les équipements dans cette configuration.

Dans un deuxième temps, nous décrirons les défauts que nous avons caractérisé pour nos essais. Sachant qu'ils seront classés en trois grands groupes, les échantillons sains, les échantillons avec défaut naturel et les échantillons avec défaut artificiel. Nous développerons des méthodes de création de défauts afin d'obtenir des défauts artificiels dont les dimensions sont maîtrisées aussi bien sur l'acier que sur la céramique.

Dans un troisième temps, nous nous intéresserons au chemin axial de propagation des ondes ultrasonores de surface, qui s'apparente à une propagation dans un solide semi-infini de surface plane pour les ondes considérées, afin de valider notre approche théorique et prouver que la détection de défauts est possible [5].

Dans un quatrième et dernier temps, nous nous pencherons sur les ondes de surface se propageant selon un chemin circonférentiel. Tout comme pour la propagation d'ondes de surface axiales, nous tâcherons de valider les prédictions théoriques, notamment l'effet dispersif et la génération des ondes dans un matériau céramique. Nous profiterons également de cette configuration pour vérifier la détectabilité d'un défaut créé à l'aide d'une micro-scie. Des essais plus complets sur la détection de divers défauts seront proposés au chapitre IV.

Pour finir nous conclurons sur ce chapitre III en tirant un bilan de nos essais.

I. Montage expérimental

Il existe de multiples façons de configurer un banc d'essai. Dans notre cas, nous utilisons comme premier critère la géométrie des échantillons. Nous avons l'avantage de travailler sur des structures cylindriques bornées possédant une face à chaque extrémité. Nous utilisons ces faces, qui sont assimilables aux bases d'un cylindre, pour poser le rouleau de manière stable. De plus, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre I, la face n'est pas une zone critique contrairement au chemin de roulement (partie cylindrique).

L'échantillon est déposé sur une table de translation de précision à trois dimensions, afin de maîtriser la position exacte du rouleau. Sur le plateau de cette table, nous installons un coin de faible hauteur afin de caler les rouleaux avec une grande fiabilité et ainsi d'éviter des réglages à chaque changement d'échantillons de mêmes dimensions et assurer une bonne répétabilité des essais.

Maintenant que nous avons défini le positionnement de l'échantillon, nous devons déterminer comment installer les équipements de génération et de détection des ondes ultrasonores. La méthode Ultrasons-Laser repose sur deux équipements primordiaux, le laser impulsionnel de puissance pour la génération et l'interféromètre pour la détection du déplacement normal à la surface induit par le passage d'une onde acoustique.

I.1. Instrumentation

Le laser impulsionnel utilisé est un SLI-10 fabriqué par l'entreprise américaine Continuum. Il est composé d'une source laser Nd:YAG doublée en fréquence qui produit un faisceau laser possédant une longueur d'onde de 532 nm. Ce laser impulsionnel émet de brèves ondes lumineuses à une fréquence de 10 Hz, soit une onde toutes les 100 ms, ce qui au regard des temps de refroidissement, 500 ns pour l'acier, permet de considérer chaque tir indépendant. En termes de puissance et à la longueur d'onde considérée, ce laser peut générer une énergie maximale de 200 mJ et émet une impulsion de courte durée, entre 4 et 20 ns. D'un point de vue optique, la divergence est donnée à 0,5 mrad et le faisceau possède un diamètre de 6 mm. Ce laser de puissance correspond à une classe 4 au niveau de la dangerosité.

L'interféromètre utilisé est le SH140 commercialisé par la société Thalès et développé à partir des travaux de D. Royer et E. Dieulesaint pour détecter des ondes élastiques dans un

matériau [6]. Cet interféromètre utilise une source laser basée sur un cristal Nd:YAG pompé par diode et utilise une structure de type Mach-Zehnder hétérodyné avec une porteuse à 70 MHz. La Figure III-1 présente la structure interne de la partie optique du SH140. Le faisceau noir correspond au faisceau laser provenant de la source Nd:YAG sans modification. Un prisme séparateur est placé sur son trajet afin de séparer ce faisceau principal en deux faisceaux n'ayant pas le même chemin optique, le faisceau référence et le faisceau sonde.

Le faisceau référence n'est pas modifié, il permet la création d'interférences avec le faisceau sonde au niveau du photodétecteur. A partir du signal de ce photodétecteur, nous pouvons mesurer le déplacement normal de la surface au niveau de la focalisation du faisceau sonde.

Le faisceau sonde (en rouge sur la figure) sortant du premier prisme séparateur traverse une cellule de Bragg. Cet élément est un modulateur opto-acoustique qui permet de décaler la fréquence du signal, nous obtenons ainsi une porteuse à 70 MHz. Après la lentille (7), le faisceau est réfléchi par l'échantillon. Le faisceau sonde est modifié lors de cette interaction et retourne dans la cavité avec une information liée au déplacement. Ce faisceau est représenté par la flèche verte.

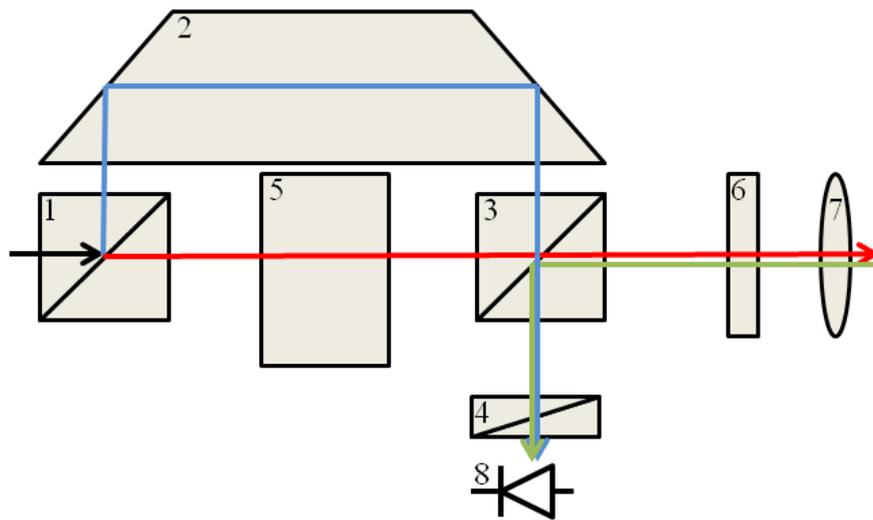


Figure III-1. Structure interne de la sonde SH140. -1) Prisme séparateur, -2) Prisme de Dove, -3) Prisme séparateur, -4) Analyseur, -5) Cellule de Bragg, -6) Lame quart d'onde, -7) Lentille de focalisation, -8) Photodétecteur. [6]

Le prisme séparateur permet de rendre colinéaire les deux faisceaux et engendre la création d'interférences entre le faisceau référence et le faisceau sonde ayant interagi avec l'échantillon.

Le faisceau laser continu possède une longueur d'onde de 532 nm et une puissance de 100 mW, caractéristiques qui range la sonde en classe 3B au niveau des risques optiques. Les caractéristiques données par le fabricant décrivent une large bande passante (200 kHz à 45 MHz). De plus, du fait de son hétérodynage, cet interféromètre est peu sensible au bruit environnant.

La distance de focalisation peut être réglée manuellement à l'aide d'une bague ce qui nous permet le contrôle de plusieurs échantillons possédant des dimensions différentes sans déplacer l'interféromètre ou la table 3D sur laquelle est posé le rouleau. Nous pouvons faire varier la distance focale de 5 cm à 20 cm. Nous affinons ce réglage en cas de variations de diamètre. Les autres caractéristiques remarquables de cette sonde interférométrique concernent ses capacités de détection. En effet, celle-ci possède une sensibilité de 10 mV/Å et une détectivité supérieure à $10^{-4} \text{ Å}/\sqrt{\text{Hz}}$ lorsque la réflexion au niveau de l'échantillon est bonne (métal finement poli) et autour de $5.10^{-4} \text{ Å}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour les matériaux composites.

Le boîtier de commande intègre une partie traitement du signal composée de trois filtres différents (4, 18 ou 45 MHz), que l'on sélectionne en fonction des besoins, et d'un système de réglage automatique de gain. Une sortie de contrôle permet de valider la qualité du signal retour afin d'assurer que la réflexion au niveau de l'échantillon est optimale.

I.2. Configuration

Les instruments de génération et de détection étant maintenant définis, il est légitime de se poser la question de la configuration du banc d'essais.

Le laser de puissance étant encombrant et délicat à déplacer, nous évitons une configuration du banc demandant le déplacement de cet instrument. Comme nous le précisons plus haut, une table 3D sert pour déposer l'échantillon mais, afin d'augmenter les possibilités expérimentales, nous utilisons également une table de translation en hauteur suffisamment robuste pour soutenir la sonde de l'interféromètre. Nous pouvons ainsi déplacer, monter ou descendre, le point de détection indépendamment de l'échantillon et du point de focalisation du laser de puissance.

La détection du déplacement par interférométrie nous oblige à respecter des contraintes optiques, la principale étant d'obtenir un faisceau incident perpendiculaire à la surface au niveau de la focalisation du faisceau laser, et ainsi obtenir un faisceau retour

d'intensité maximale et une interférence optimale entre le faisceau sonde et le faisceau référence.

En respectant la condition de réflexion au niveau de l'échantillon pour la génération et la détection, nous pouvons positionner les lasers à 360° autour du rouleau [7]. Nous devons définir l'angle idéal entre le faisceau du laser de puissance (génération) et le faisceau du laser de l'interféromètre (détection) pour le contrôle par ondes ultrasonores d'un rouleau.

Une première possibilité serait de rendre colinéaires les deux faisceaux avec un angle entre le faisceau générateur et le faisceau de détection égal à zéro à l'aide d'éléments optiques. L'avantage de cette configuration est de réduire l'encombrement de l'installation et de permettre un accès facilité à l'échantillon. Cette configuration est obligatoire pour une propagation d'une onde de surface axiale. Ces points positifs doivent être mis en parallèle avec les inconvénients. Le fait de générer et de détecter les ondes au même endroit complexifie les réglages pour une raison d'encombres des éléments optiques (Figure III-2).

Une deuxième approche est de placer l'interféromètre à l'opposé du laser de génération, et obtenir un angle faisceau sonde / faisceau générateur égal à 180° . Cette configuration peut présenter plusieurs avantages. Comme nous l'avons déjà vu avec cette configuration, il est possible d'estimer les coefficients élastiques du matériau mais également d'obtenir un déplacement plus prononcé grâce à la sommation des ondes se propageant dans le sens horaire et dans le sens antihoraire lors d'une propagation circonferentielle. Ces avantages sont à mettre en regard avec l'encombrement de cette configuration.

Une autre possibilité est de définir un angle entre le faisceau provenant de l'interféromètre et celui du laser impulsif de 90° par rapport à l'échantillon. Chaque instrument peut être réglé indépendamment de l'autre et facilite donc le réglage du banc. Cette configuration limite l'encombrement de l'équipement global. Lors de la génération d'une onde circonferentielle, il est possible d'identifier les ondes parcourant le cylindre dans le sens horaire et celles le parcourant dans le sens anti-horaire et ainsi récupérer une information sur la position du défaut.

Nous prenons en compte les avantages et inconvénients de chaque configuration et nous faisons le choix d'un angle détection / génération de 90° . La table micrométrique sur laquelle est déposé l'échantillon et le laser impulsif étant fixes nous ajoutons des miroirs

sur le trajet du faisceau du laser impulsif et une lentille convergente afin de focaliser ce faisceau au niveau de l'échantillon. Cette configuration est présentée sur la Figure III-2.

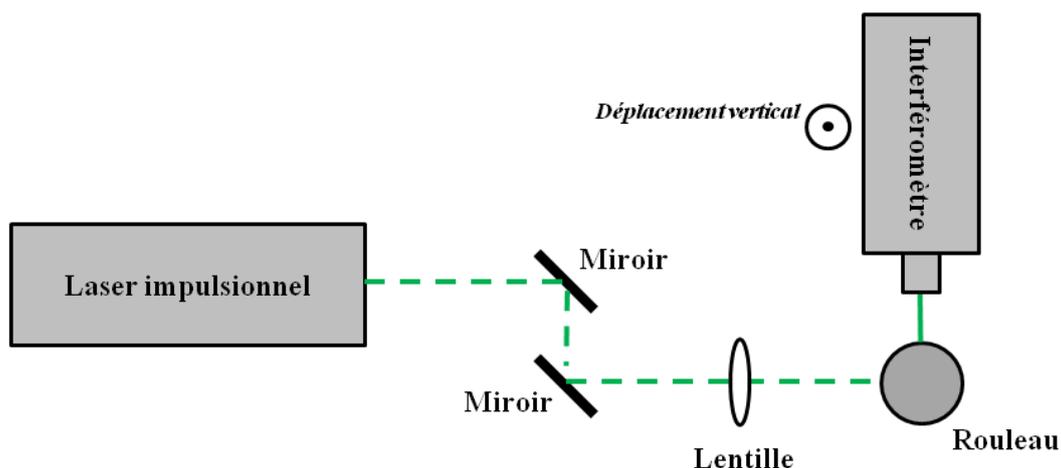


Figure III-2. Configuration expérimentale utilisée dans nos travaux de recherche en vue de dessus.

Comme nous utiliserons une configuration permettant de générer des ondes de surface hélicoïdales, nous plaçons la sonde de l'interféromètre sur une table de translation en hauteur. Cette table n'étant pas suffisamment précise sur la mesure de l'élévation, nous utilisons un comparateur pour mesurer le déplacement relatif de l'interféromètre par rapport au banc d'essai.

Un objectif réglable permettant de faire varier la distance focale est présent sur l'interféromètre mais ce n'est pas le cas pour le laser impulsif. Nous installons donc une lentille à l'extérieur de la sonde directement sur le banc d'essai. Cette lentille peut être sphérique et convergente afin d'obtenir une source ponctuelle ou elle peut être cylindrique et convergente pour générer une source linéique.

Maintenant que nous avons défini la configuration utilisée durant nos essais, nous nous intéressons aux échantillons et plus particulièrement aux défauts.

II. Echantillons

Dans nos travaux, nous nous sommes efforcés de rester le plus proche possible des défauts considérés comme critiques et donc devant être détectés. L'entreprise SKF nous a fourni les spécifications qui nous ont permis de créer des défauts artificiels aux dimensions

spécifiques. Ce partenariat nous a également permis d'obtenir des échantillons en acier qui ont été rejetés par les équipements de contrôle non destructif utilisés en usine.

II.1. Défauts naturels

Les défauts naturels peuvent être dus au matériau ou provoquer par un usinage. Nous utilisons le nom de "naturel" pour définir ce type de défauts car ils ne sont pas créés volontairement et doivent être détectés lors de contrôles ou d'analyses au cours du procédé de fabrication.

Grâce à notre collaboration avec SKF, nous avons eu en notre possession des rouleaux en acier sur lesquels des défauts ont été détectés lors de contrôles industriels. Les défauts identifiés sont des fissures de laminages, des criques et des brûlures. Les rouleaux en céramique sont contrôlés par le fournisseur grâce à la méthode du ressuage, actuellement seule méthode envisageable pour le contrôle de rouleaux en quantité industrielle. Les rouleaux en céramique reçus ne sont donc pas contrôlés en interne, en conséquence il est très difficile d'obtenir des rouleaux en céramique avec défauts.

Les défauts naturels sur les rouleaux en acier sont plus faciles à obtenir car ils sont fabriqués et contrôlés sur place par notre partenaire. Pour chaque rouleau possédant un défaut, nous avons pu obtenir un rouleau sain identique, ainsi nous pourrions comparer les signaux acquis.

Nous allons maintenant présenter les trois types de défauts naturels, le repli de laminage, la crique de rectification et la brûlure.

a) Le repli de laminage

Le repli de laminage est un défaut dit d'élaboration car il trouve son origine avant l'usinage, lors de la mise en forme du lingot d'acier. Ce type de défauts est très intéressant pour nos essais car il présente une rupture brutale dans la matière. Il provoque un changement d'impédance acoustique. Cette caractéristique est optimale pour sa détection par ondes ultrasonores. En effet, le repli de laminage est certes une fissure fine mais surtout longue et profonde. Les rouleaux disponibles et présentant ce défaut sont traversés d'une face à l'autre par la fissure (Figure III-3) et une coupe métallurgique nous a permis de mesurer une profondeur d'un peu plus de deux millimètres et une largeur d'environ 70 μm (Figure III-4). A l'œil nu, il est extrêmement difficile de remarquer cette fissure.

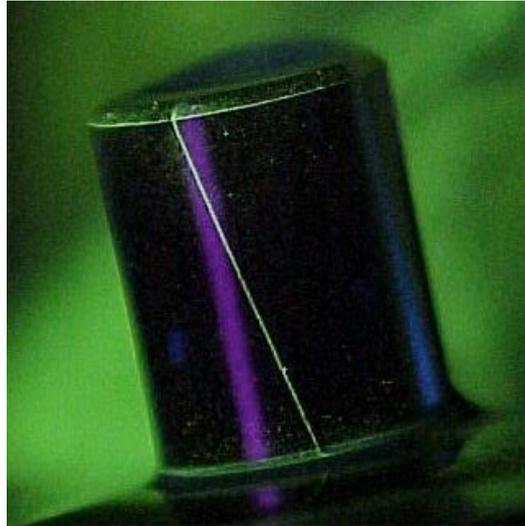


Figure III-3. Photographie d'un repli de laminage mis en évidence par magnétoscopie sur un rouleau en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5 mm.

La photographie ci-dessous nous prouve que le repli de laminage est caractérisé par sa finesse et sa profondeur relativement grande. Cette coupe a été effectuée au laboratoire de l'entreprise SKF Aeroengine, car il possède tout le matériel nécessaire et une expertise reconnue dans l'analyse des métaux. Le plan de découpe du rouleau est parallèle à ses faces. La partie grise correspond au rouleau et la noire à la résine d'enrobage. La photographie a été prise à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement x25. Le rouleau en question possède un diamètre de 6 mm.



Figure III-4. Coupe circonférentielle d'un rouleau en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5mm présentant un repli de laminage caractérisé par une profondeur d'environ 2 mm.

Grâce à ce type de défauts, nous avons pu analyser des échantillons naturels possédant un défaut particulier dont les caractéristiques sont pleinement connues. De plus, SKF a pu

nous fournir avec ces échantillons, des rouleaux sains appartenant au même lot de fabrication. Seule la fissure diffère entre ces différentes pièces, ce qui nous permettra d'identifier facilement les modifications du signal imputables à la présence du défaut.

b) Les criques de rectification

Les criques de rectification peuvent être créées lors de l'usinage du rouleau, il ne s'agit donc plus d'un défaut d'élaboration mais d'usinage. Elles apparaissent lors de grandes différences de température et sont généralement observées au niveau des brûlures. Elles sont assimilables à de petites fissures localisées. La Figure III-5 présente un rouleau sur lequel des criques sont visibles. Elles ont été mises en évidence à l'aide de la méthode de la magnétoscopie.



Figure III-5. Photographie de criques de rectification mis en évidence par la méthode de la magnétoscopie sur un rouleau en acier dont le diamètre et la hauteur valent 8 mm.

Ce défaut complète le repli de laminage en conservant le type "fissure" mais en modifiant l'importance des dimensions. Ces criques sont invisibles à l'œil nu. Par conséquent nous ne connaissons pas leurs positions par rapport à la zone de génération et le point de détection des ondes ultrasonores lors de nos essais.

c) La brûlure

La brûlure provoque une modification de la structure du métal. Elle n'est pas visible à l'œil nu et doit être révélée par une attaque Nital (ou Niteau). Une fois ce traitement effectué, la brûlure reste visible sur le rouleau. Il s'agit d'un défaut particulier ne correspondant pas à une fissure ou un manque local de matière générant une rupture de continuité, mais une modification structurelle du matériau, en l'occurrence l'acier.



Figure III-6. Photographie d'une brûlure mis en évidence suite à une attaque Nital sur un rouleau en acier dont le diamètre et la hauteur valent 8 mm.

La Figure III-6 est une photographie d'un rouleau brûlé après avoir subi une attaque chimique. La brûlure est visible par un changement de coloration, plus précisément un assombrissement.

Si nous faisons le point sur les défauts naturels, nous pouvons dire que nous possédons des défauts de différents types possédant diverses caractéristiques, mais dont nous ne maîtrisons pas les dimensions puisqu'il s'agit par définition de défauts involontaires. Nous pouvons seulement caractériser ces défauts après les avoir identifiés.

II.2. Défauts artificiels

Contrairement aux défauts naturels, nous pouvons contrôler, au moins partiellement, la dimension des défauts artificiels. Il s'agit là d'un avantage non négligeable dans l'optique du développement d'une méthode de contrôle pour laquelle nous devons identifier les limites.

a) Défaut créé par abrasion mécanique

La manière la plus simple pour créer un défaut artificiel consiste à utiliser des outils mécaniques permettant l'abrasion de la matière. Ce type d'outils est largement répandu dans les entreprises manufacturières ou dans les laboratoires, toutefois l'utilisation d'éléments abrasifs sur la céramique n'est possible que sous condition, à cause de la dureté élevée de ce matériau.

i. Pointe Vickers

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux pointes utilisées dans les machines de mesure de dureté. Il existe plusieurs types de machines de mesure de dureté, celui que nous

retenons est l'appareil de dureté Vickers. Cet outil applique une force à l'aide d'une pointe pyramidale sur la pièce à analyser. Une empreinte se crée sur le matériau, la mesure de celle-ci permet alors de calculer la dureté. Pour créer une empreinte nette dans des matériaux tels que l'acier ou la céramique, il faut nécessairement une pointe encore plus dure. Ce matériau existe, il s'agit du diamant. Le bout de la pointe servant à créer l'empreinte est un diamant taillé en forme de pyramide avec un angle au sommet de 136° . Dans ces essais nous nous concentrons sur l'acier.

Nous fixons une pointe Vickers sur un tour ce qui nous permet de maîtriser la profondeur de pénétration de la pointe puis de déplacer cette pointe le long d'un axe, et ainsi créer une rayure plus ou moins profonde.

La forme de la pointe provoque la création d'un défaut bien plus large que profond. L'utilisation d'une pointe Vickers provoque un transfert de matière qui se manifeste par l'apparition d'un pic de matière de chaque côté de la zone creusée. Les profondeurs mesurées correspondent aux différences entre la surface de l'échantillon et la profondeur maximale du creux. Nous avons créé cinq défauts différents et nous présentons dans ce paragraphe deux profils caractéristiques des résultats obtenus, la Figure III-7 et la Figure III-8. La Figure III-7 correspond à un défaut de petites dimensions alors que la Figure III-8 correspond au défaut le plus important créé par cette méthode. Il est difficile de créer des défauts de plus grandes importances étant donné les moyens disponibles.

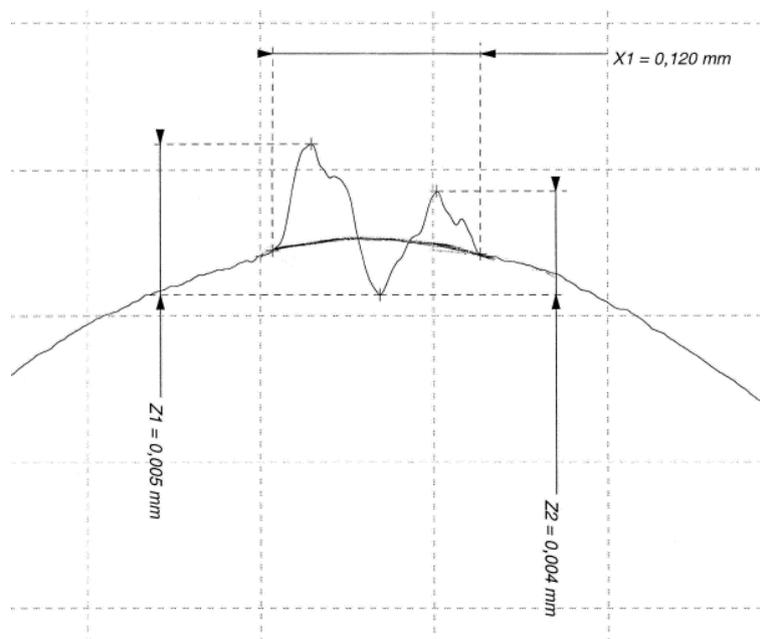


Figure III-7. Profil d'un défaut créé à l'aide d'une pointe Vickers sur un rouleau en acier dont la profondeur vaut environ $5 \mu\text{m}$.

Pour créer le défaut de la Figure III-7, nous paramétrons le tour afin d'enfoncer la pointe Vickers d'une profondeur de 25 μm , ce qui nous a donné un défaut d'une largeur de 120 μm et d'une profondeur réelle d'environ 2 μm . La largeur est donc 60 fois supérieure à la profondeur dans ce cas.

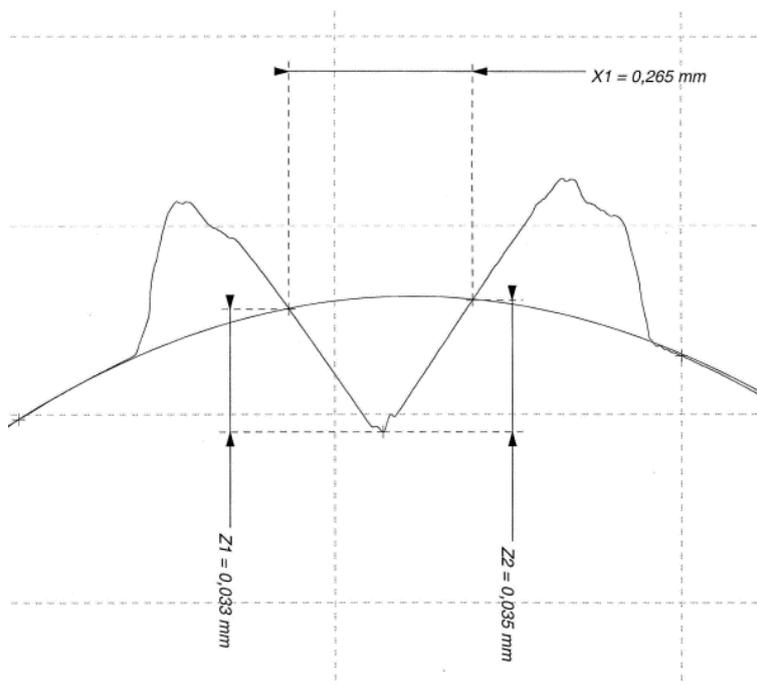


Figure III-8. Profil d'un défaut créé à l'aide d'une pointe Vickers sur un rouleau en acier dont la profondeur vaut environ 35 μm .

Le second profil présenté (Figure III-8) correspond à un enfoncement théorique de la pointe Vickers de 250 μm . Nous obtenons dans ce cas une largeur de 256 μm et une profondeur réelle de 35 μm , soit un rapport largeur sur profondeur d'un peu plus de 7. Lors de la création de cette rayure, nous avons observé, la présence de copeaux d'acier. L'enfoncement plus important de la pointe dans le matériau a modifié le comportement celui-ci et permis de créer un défaut plus intéressant pour nos essais. En effet, dans le cadre de notre étude et en considérant le type de défauts à détecter, nous cherchons à créer des défauts dont la profondeur et la largeur sont du même ordre, voir une profondeur supérieure à la largeur.

Nous avons décidé de tester la méthode "pointe Vickers" sur un rouleau acier car il s'agit des échantillons les plus faciles à récupérer et possédant une ductilité plus importante que la céramique. Ce que nous pouvons retenir de ces tests est que la création de défauts par cette méthode est possible mais que les défauts obtenus ne sont pas optimaux pour une détection par ondes ultrasonores. Toutefois, il pourrait être envisagé d'utiliser des défauts de

type "rayures" décrits ici, afin d'évaluer finement les limites et possibilités de la méthode en termes de détection de défauts.

ii. Micro-scie

La seconde méthode explorée pour créer des défauts artificiels par abrasion mécanique a consisté à utiliser une micro-scie. Les micro-scies sont des équipements généralement présents dans les laboratoires universitaires ou industriels. Ils servent à découper des échantillons de manière précise. Les disques utilisés dans ces appareils sont relativement fins, et typiquement inférieurs au millimètre. La problématique de la dureté liée à la céramique reste toujours d'actualité, il est donc inévitable d'utiliser un disque diamanté. Les dimensions du défaut ne sont que partiellement maîtrisables, seules la position du défaut, la vitesse de coupe et la durée de coupe peuvent être contrôlées. La largeur du défaut dépend de l'épaisseur du disque, la longueur sera influencée par le diamètre du disque, la profondeur et la forme de l'échantillon au niveau de la coupe. La vitesse de coupe nous permet de contrôler la profondeur maximale du défaut. Comme nous l'avons vu plus haut, l'utilisation d'un outil de coupe peut engendrer des brûlures ou des surchauffes. En prenant quelques précautions sur la vitesse de rotation du disque et l'utilisation d'un filet d'eau, nous nous assurons que la découpe ne s'accompagne pas d'une affectation thermique du matériau.

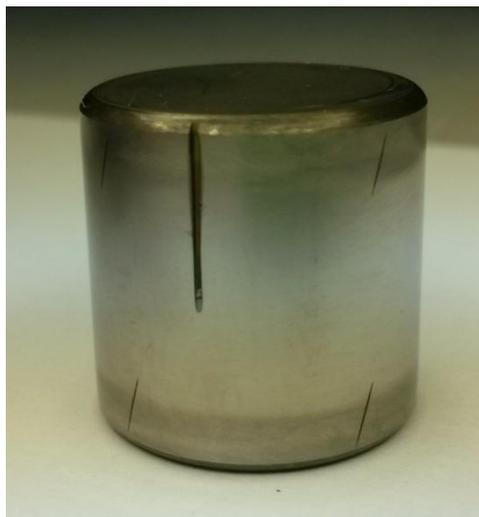


Figure III-9. Photographie d'un défaut possédant une profondeur d'environ 250 μm créé par à l'aide d'une micro-scie sur un rouleau en acier.

Nous programmons une vitesse de coupe et calculons la durée de découpe afin d'obtenir un défaut dont la profondeur visée est de l'ordre 250 μm . Nous nous retrouvons donc avec un défaut dont nous contrôlons la profondeur. Nous avons tout d'abord testé cette

méthode sur des rouleaux en acier, puis étant donné les résultats obtenus, nous avons étendu la méthode à la céramique.

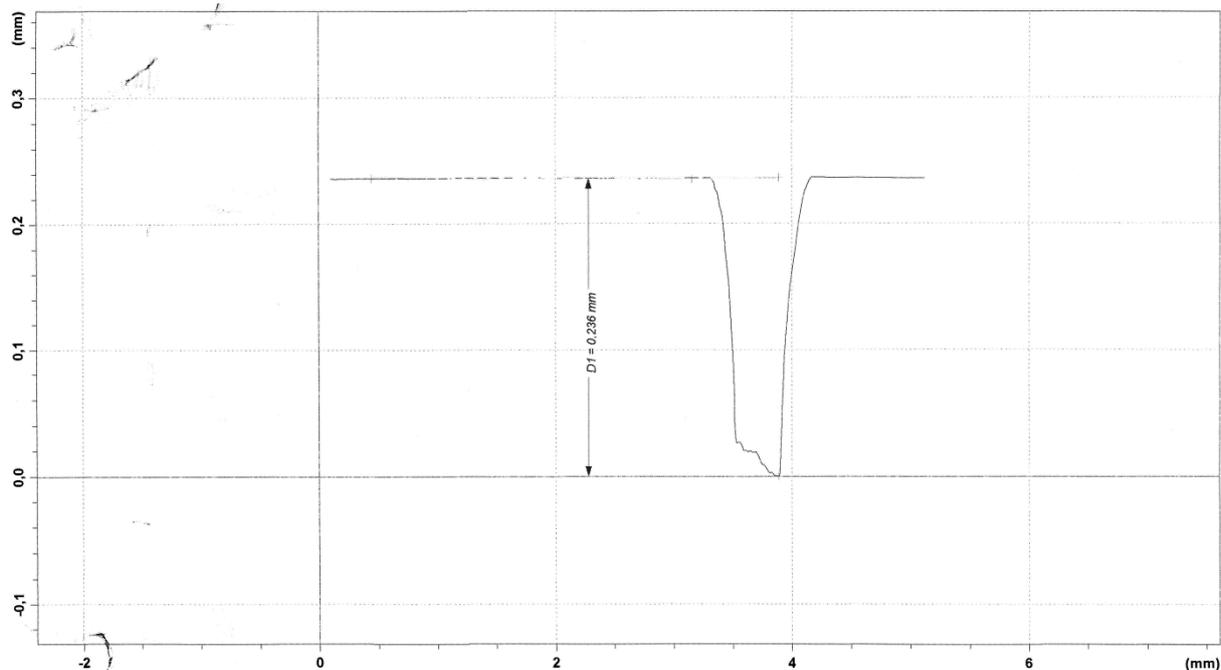


Figure III-10. Profil d'un défaut créé par une micro-scie sur un rouleau en céramique localisé perpendiculairement à l'axe du rouleau. Ce relevé nous indique que le défaut possède une largeur de 500 μm et une profondeur de 236 μm .

Avec cette méthode, nous créons des défauts suivant deux orientations différentes. L'une est perpendiculaire à l'axe de révolution du rouleaux afin d'accroître les chances de détection en utilisant une propagation de type axiale. L'autre est située le long de cet axe afin d'augmenter la zone d'interaction onde / défaut dans le cas d'une propagation d'une onde de surface circonférentielle. La Figure III-10 présente le profil du défaut créé perpendiculairement à l'axe du rouleau à l'aide d'une micro-scie. Ce profil est tracé grâce à l'un des systèmes de palpage que possède l'usine SKF de Valenciennes. Le relevé est effectué au centre du défaut, où la profondeur est maximale sur le défaut créé le long de l'axe de révolution sur un rouleau en céramique.

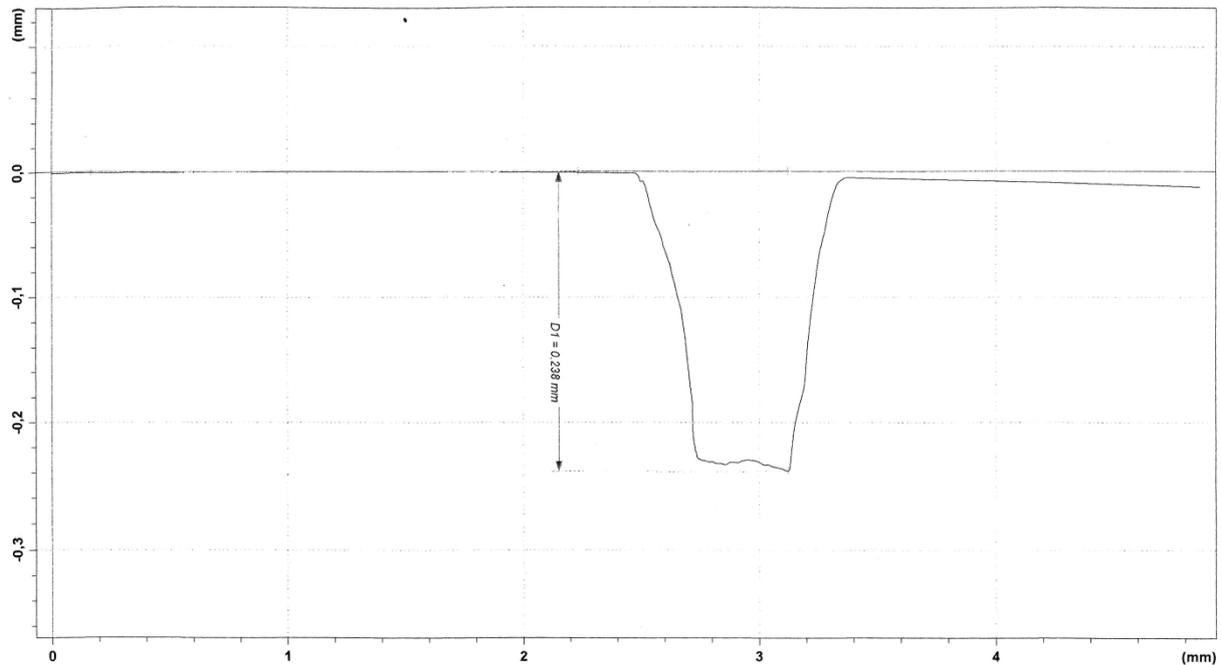


Figure III-11. Profil d'un défaut créé par une micro-scie sur un rouleau en céramique localisé le long de l'axe du rouleau. Ce relevé nous indique que le défaut possède une largeur d'environ 500 μm et une profondeur de 238 μm .

Les profondeurs des deux défauts sont extrêmement proches car la même durée et la même vitesse sont utilisées. Cette méthode est un moyen efficace et rapide pour créer des défauts importants dont l'on souhaite maîtriser la profondeur. Toutefois la géométrie du défaut n'est pas paramétrable et sa largeur dépend de l'épaisseur du disque de coupe. La création de défauts de plus petites dimensions ou possédant une forme spécifique ne sera pas possible avec ce procédé.

Contrairement à la méthode pointe Vickers, les défauts possèdent un rapport largeur / profondeur bien plus intéressants pour les profondeurs supérieures 100 μm et présentent une discontinuité brutale dans le matériau. Ce changement de milieu (matière / air) provoque une rupture d'impédance acoustique importante.

b) Défaut créé par laser

Dans le paragraphe précédent, nous avons identifié deux méthodes distinctes pour créer des défauts artificiels sur l'acier et la céramique à l'aide d'une abrasion mécanique de matière. Toutefois, force est de constater que ces méthodes ont des limites qui ne permettent pas d'atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés.

Il nous faut nous affranchir des méthodes classiques d'enlèvement mécanique de matière et aborder le sujet avec une nouvelle approche.

Des échantillons de références sont utilisés régulièrement à SKF afin de vérifier les performances et calibrer les équipements de contrôle non destructif. Certaines de ces pièces possèdent des défauts de petites dimensions pouvant correspondre à nos besoins expérimentaux. Ces défauts sont générés par électroérosion. Cette méthode est malheureusement chère et incompatible avec la céramique. Nous retrouvons un problème déjà mis en avant dans ce manuscrit, l'impossibilité d'utiliser les méthodes basées sur les propriétés électriques des matériaux. La réponse doit donc se trouver dans un autre aspect de la physique.

Lors de la présentation de la méthode Ultrasons-Laser, nous avons du différencier deux cas lors de la génération des ondes, le régime thermoélastique et le régime d'ablation. Ce dernier ne nous intéressait pas pour le développement d'une méthode de contrôle non destructif mais il peut nous aider dans le cadre de la création de défauts. En effet, comme nous l'avons écrit, la puissance d'un laser est capable de vaporiser localement un solide, ce qui est exactement ce que nous cherchons à faire dans le cas présent. L'utilisation du laser SLI-10 est possible car il peut atteindre les densités de puissance nécessaires à la vaporisation de l'acier mais également l'ablation de la céramique [8] [9]. L'inconvénient majeur reste la maîtrise des dimensions du défaut sur ce type de laser. Notre partenaire industriel, SKF, en tant que fabricant pour le milieu aéronautique, est à la pointe des dernières technologies et utilise des lasers de marquages afin d'identifier les pièces qu'il livre à ses clients. Ces lasers permettent d'inscrire un texte ou une géométrie par gravure sur les pièces métalliques mais leurs puissances doivent théoriquement permettre d'affecter la céramique. Avec le support de SKF, nous avons utilisé l'un de ces lasers pour effectuer des essais de création de défauts sur un échantillon en céramique.

Nous avons choisi d'ablater ce matériau en créant un enlèvement local de matière en forme de ligne dont nous maîtrisons la largeur et la longueur. La profondeur est contrôlée par la puissance, la vitesse de déplacement du laser et le nombre de passages. La calibration de la profondeur s'est faite grâce à l'expérimentation en variant les paramètres cités, ainsi nous avons obtenu un gabarit permettant de contrôler correctement la profondeur du défaut. Nous avons généré deux défauts identiques sur le même rouleau en modifiant simplement sa position et son orientation (axiale et circonférentielle).

Les défauts créés par laser ont été faits sur deux types de rouleaux en céramique dont les dimensions sont différentes. Les rouleaux identifiés "25x40" possèdent une hauteur de 40

mm et un diamètre de 25 mm alors que les "12x12" ont un diamètre et une hauteur valant 12 mm tous deux.

Référence du rouleau	Référence de l'échantillon	Dimensions du défaut	
		Profondeur visée	Longueur
25x40	Echantillon 1	90 μm	5 mm
	Echantillon 2	60 μm	5 mm
	Echantillon 3	25 μm	2 mm
	Echantillon 4	10 μm	1 mm
12x12	Echantillon 1	90 μm	2 mm
	Echantillon 2	60 μm	2 mm
	Echantillon 3	25 μm	1 mm
	Echantillon 4	10 μm	0,5 mm



Figure III-12 Photographie de l'échantillon 1 d'un rouleau 25x40.

La Figure III-12 illustre une photographie du défaut axial de l'échantillon 1 des rouleaux "25x40". Il s'agit du défaut le plus important généré par laser, sur le rouleau possédant les dimensions les plus importantes que nous possédons. Le défaut obtenu est net et localisé. Ce type de défaut est donc idéal pour l'évaluation d'une méthode de contrôle non destructif.

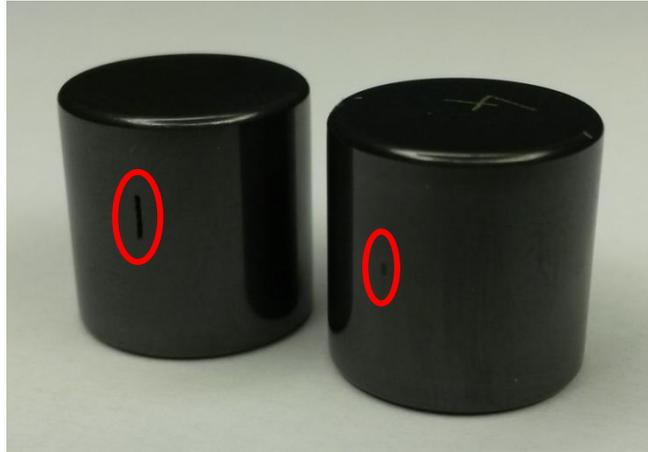


Figure III-13. Photographie de deux rouleaux "12x12" présentant des défauts de différentes tailles créés par laser. Le rouleau de gauche correspond à l'échantillon 1 et celui de droite à l'échantillon 4.

La Figure III-13 présente deux rouleaux différents en céramique de type "12x12", l' "échantillon 1" (à gauche) et l' "échantillon 4" (à droite), c'est à dire avec d'un coté le défaut le plus important pour le 1 ($L = 2 \text{ mm}$) et le défaut le plus petit pour le 4 ($L = 0,5 \text{ mm}$).

Les rouleaux que nous venons de mettre en avant n'ont subit aucun usinage, ni aucune finition après la création du défaut. Les propriétés physiques de la céramique sont telles que les échantillons sont directement utilisables en essai. Aucune modification de la structure ou de la forme ne sont visibles.

Afin de caractériser complètement, les défauts générés, nous avons utilisé une machine particulière qui permet d'obtenir le profil interne du défaut. Cet équipement s'appelle le Surfascan. Il permet de représenter de manière visible, notamment à l'aide d'une échelle de couleur, les irrégularités de surface sur une pièce mécanique. Un palpeur adapté aux irrégularités que l'on souhaite mettre en évidence est installé sur la machine et des systèmes de déplacement permettent de cartographie une zone définie.

Grâce à cet équipement nous pouvons mesurer la profondeur de l'ensemble du défaut et tracer une représentation visuelle du défaut en couleur dans laquelle chaque couleur correspond à une profondeur. Ainsi nous visualisons précisément et facilement le profil du défaut créé.

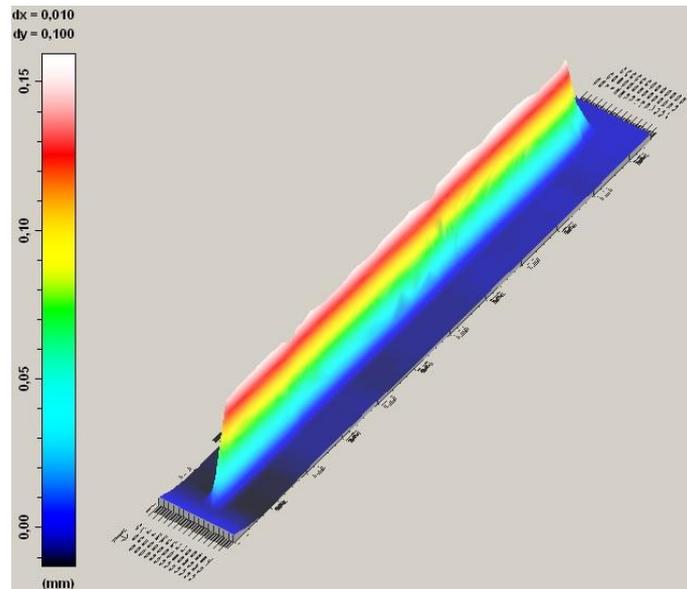


Figure III-14. Profil "Surfscan" d'un défaut créé par laser sur un rouleau en céramique de type "25x40" et correspondant à l'échantillon 1.

Pour un défaut important, le profil (Figure III-14) montre une grande régularité en ce qui concerne la profondeur. Cette remarque semble moins vraie pour les défauts de plus petites dimensions. Comme nous l'observons sur la Figure III-15, un trou plus important et localisé à une extrémité du défaut est présent. Cette zone de profondeur est extrêmement limitée mais existe tout de même. Il semblerait qu'elle soit due à la méthode de génération. Sa localisation nous pousse à penser qu'elle a été créée soit au démarrage du laser qui aurait produit un pic d'intensité, soit au fait que l'on effectue plusieurs passages pour creuser la céramique et donc provoque localement une durée d'illumination plus longue. En termes de grandeur, nous constatons que ce pic vaut environ deux fois la profondeur moyenne du défaut, ce qui peut paraître non négligeable mais étant donné les dimensions affectées, nous considérons que le défaut global reste homogène. L'utilisation d'un laser dont les impulsions sont courtes (nanoseconde) permet de limiter les dégradations du matériau, en particulier la création de microfissures dans le cas de la céramique.

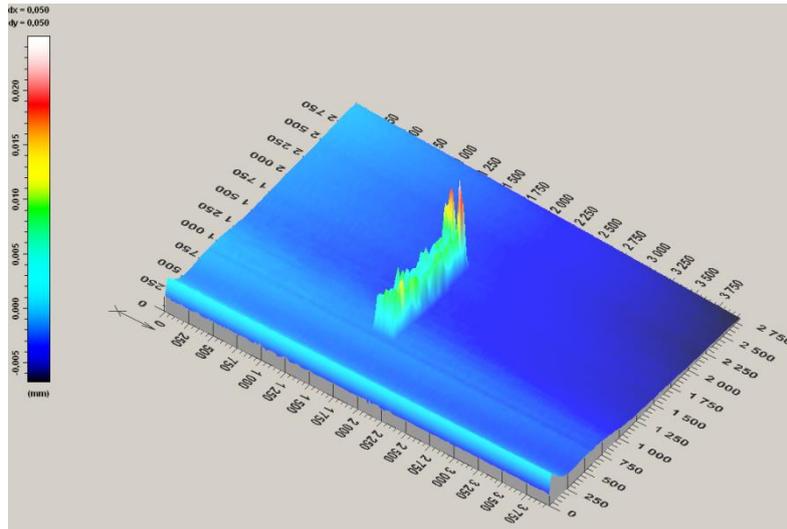


Figure III-15. Profil "Surfascan" d'un défaut créé par laser sur un rouleau en céramique de type "25x40" et correspondant à l'échantillon 1.

La céramique et l'acier sont des matériaux totalement différents et ils ne réagissent pas de la même façon à l'élévation brutale de température. La céramique reste très stable et nous pouvons créer rapidement et proprement un défaut avec un laser impulsionnel, alors que pour l'acier, cette méthode est plus délicate. En effet lors de l'échauffement, l'acier voit sa microstructure affectée et la forme du rouleau modifiée.

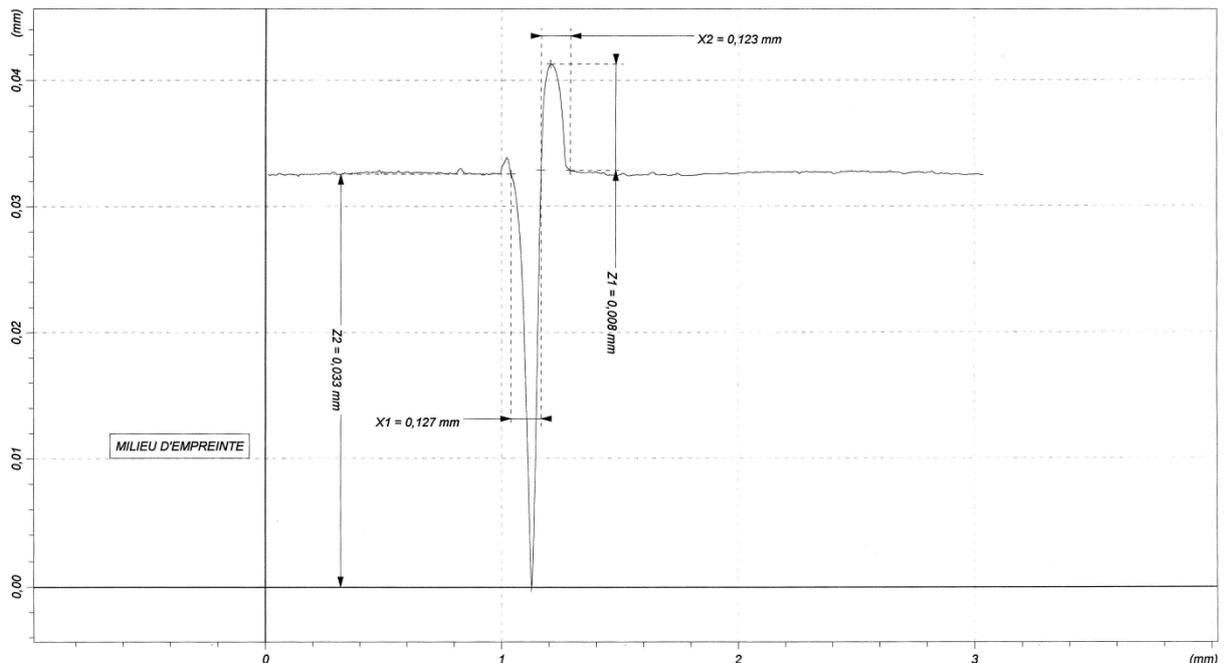


Figure III-16. Profil d'un défaut créé par laser sur un rouleau en acier sans usinage de finition. Nous constatons une largeur de 127 μm et une profondeur de 33 μm .

Les réglages nous ont permis d'éviter la variation de microstructure mais pas le transfert de matière. La Figure III-16 correspond à un profil relevé au niveau d'un défaut généré par laser sur un rouleau en acier juste après sa création sans usinage. Nous constatons un défaut s'apparentant à une fissure, mais également l'apparition de deux boursoufflures, correspondant à un transfert de matière. La plus importante de ces boursoufflures possède une largeur de 123 μm , soit quasiment la largeur du défaut lui-même et une hauteur de 8 μm , donc quatre fois inférieure à la profondeur du défaut.

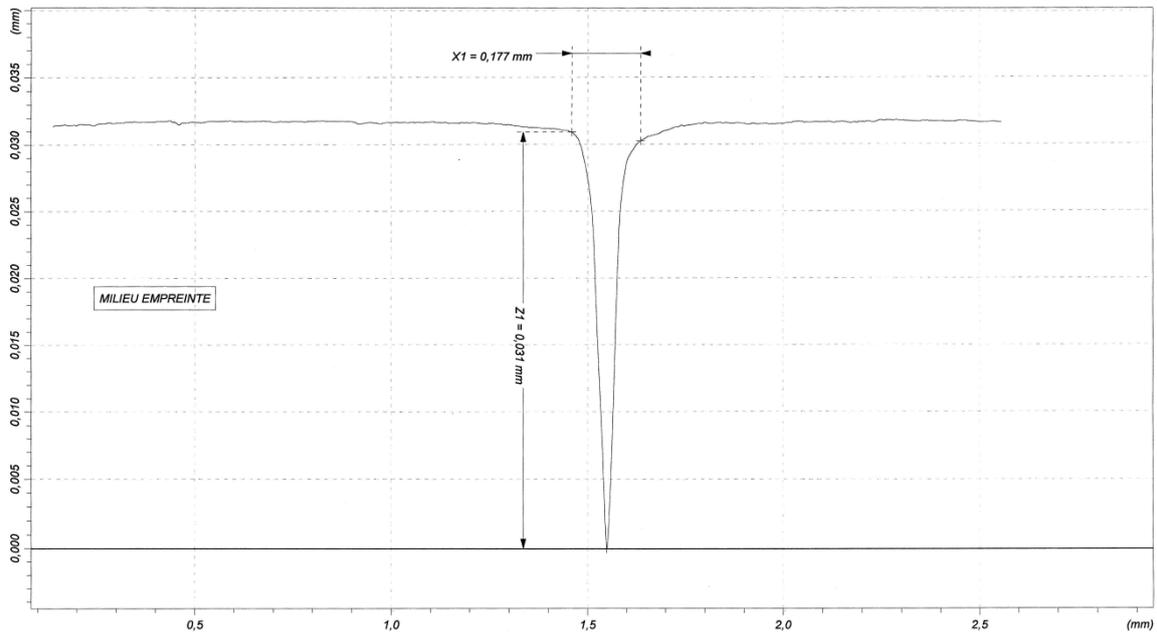


Figure III-17. Profil d'un défaut créé par laser sur un rouleau acier après usinage de finition. Nous constatons une largeur de 177 μm et une profondeur de 31 μm .

Afin de créer des défauts par laser sur l'acier, nous avons dû effectuer de nombreux essais et réusinier la géométrie du rouleau après l'utilisation du laser. En effet, un usinage post-crédation est nécessaire pour supprimer les boursoufflures. Malgré cela, nous sommes parvenus à créer de petits défauts artificiels par laser sur des rouleaux dont la profondeur est de l'ordre de 30 μm sur l'acier, ce qui est inférieur aux possibilités offertes par la céramique puisque nous parvenons à atteindre une profondeur de l'ordre de 150 μm .

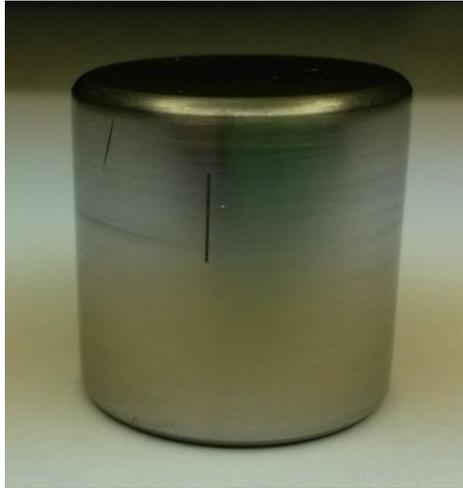


Figure III-18. Photographie d'un défaut créé grâce à la méthode du laser sur un rouleau en acier.

Les défauts artificiels ont plusieurs avantages. Premièrement, ils permettent d'obtenir facilement des échantillons utilisables pour les expérimentations. Deuxièmement, comme nous l'avons montré il est possible de contrôler, dans une certaine mesure, les dimensions du défaut. Cette maîtrise, même partielle, permet d'évaluer les limites de détection dans le cadre du développement d'une méthode de contrôle non destructif destinée aux rouleaux.

II.3. Validation du régime thermoélastique

Comme nous venons de le montrer, l'utilisation d'un laser impulsionnel est capable d'affecter profondément les rouleaux, qu'ils soient en acier ou en céramique. Le laser impulsionnel SLI-10 possède une densité de puissance maximale suffisante pour modifier la microstructure de l'acier ou creuser les matériaux. Il est donc nécessaire de valider expérimentalement notre hypothèse de non affection de la matière.

a) Expérimentation

Nous avons donc avant toute chose mis en place un essai de validation de non-affectation de la matière par le laser. Pour ce faire, nous avons fait varier le paramètre Q-Switch lors de plusieurs tirs. Le délai Q-Switch s'exprime en microseconde et permet de faire varier l'énergie du faisceau laser. En contrôlant un commutateur optique, comme une cellule de Pockel, nous provoquons une inversion de population dans la cavité optique mais des atténuateurs empêchent retour de la lumière dans le milieu amplificateur. La commutation permet le retour de la lumière dans le milieu amplificateur qui possède un niveau d'énergie

élevé, l'émission stimulée peut alors commencer. Etant donné ces conditions, une brève impulsion possédant une énergie importante est émise.

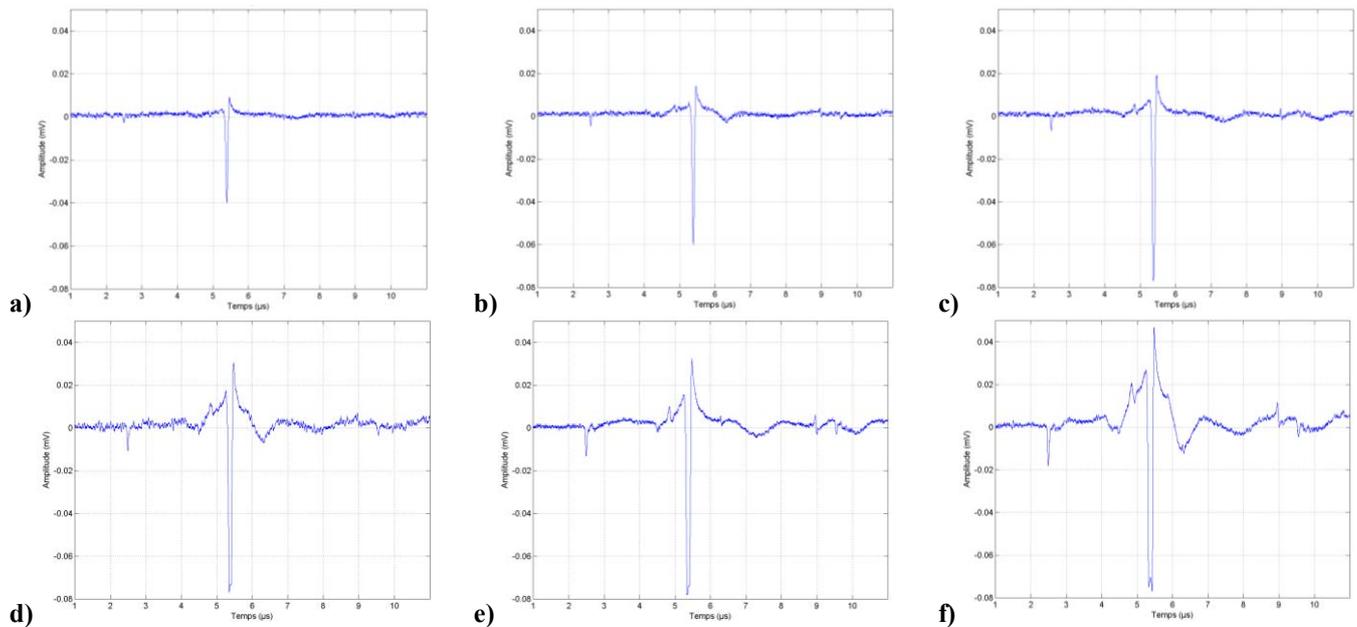


Figure III-19. Influence de la valeur du délai Q-Switch sur les ondes générées sur un rouleau en acier. -a) Q-Switch = 400 µs. -b) Q-Switch = 390 µs. -c) Q-Switch = 380 µs. -d) Q-Switch = 370 µs. -e) Q-Switch = 360 µs. -f) Q-Switch = 350 µs.

La Figure III-19 présente les signaux obtenus pour des valeurs de délai Q-Switch différentes. En diminuant la durée Q-Switch (et donc en augmentant la densité de puissance incidente), nous constatons l'apparition de nouveaux signaux et l'amélioration du rapport signal sur bruit. Il semble donc intéressant de paramétrer le délai Q-Switch le plus bas possible sans pour autant affecter la matière.

b) Expertise métallurgique

A la suite de ces essais, nous avons fait subir au rouleau des tests utilisés par SKF pour détecter des défauts (Nital, Courants de Foucault, Microscope optique). Pour un délai Q-Switch égal à 350 µs, ce qui correspond à la densité de puissance la plus élevée utilisée dans nos essais, le rouleau a été affecté comme nous pouvons le constater sur les images ci-dessous (Figure III-20). L'image a) montre une modification dimensionnelle de la surface du rouleau. Ce changement de forme s'accompagne d'une variation locale de la microstructure, que nous pouvons clairement identifier sur l'image b). En effet, nous constatons une coloration particulière à la surface de l'échantillon analysé. Cette variation de coloration est due à l'attaque Niteau permettant révéler une variation de microstructure de l'acier.

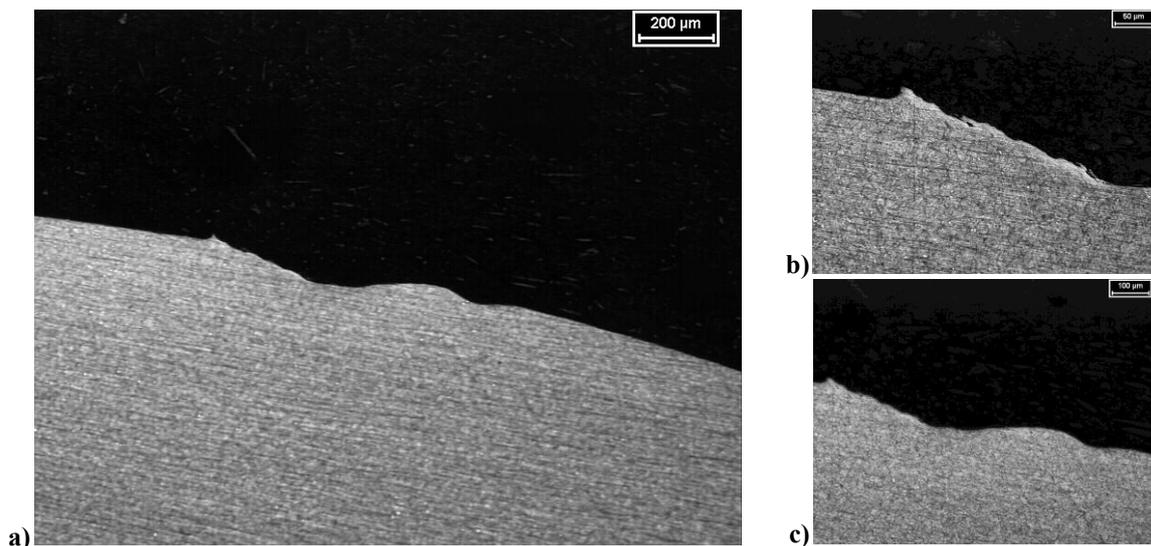


Figure III-20. Affectation d'un rouleau en acier due à l'utilisation d'un délai Q-Switch égal à 350 μ s. -a) Echelle 200 μ m. -b) Echelle 50 μ m. -c) Echelle 100 μ m.

Afin de conserver une bonne capacité d'interprétation de nos résultats, nous analysons les autres marques laissées par le laser aux mêmes échelles. Ainsi nous pouvons dire que la modification provoquée par l'utilisation d'un délai Q-Switch réglé à 360 μ s (Figure III-21) est moins importante et que l'affectation de microstructure est moins profonde.

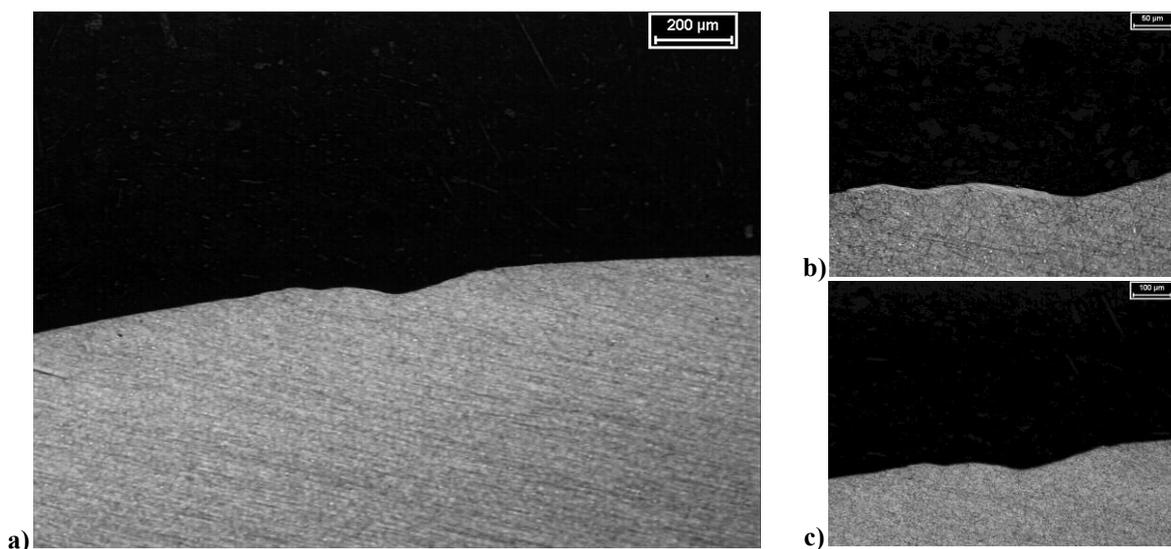


Figure III-21. Affectation d'un rouleau en acier due à l'utilisation d'un délai Q-Switch égal à 360 μ s. -a) Echelle 200 μ m. -b) Echelle 50 μ m. -c) Echelle 100 μ m.

Dans le cas d'un délai Q-Switch paramétré à 370 μ s, l'acier est toujours affecté mais dans une moindre mesure. Une analyse fine est nécessaire pour détecter les modifications engendrées par le laser. Celles-ci sont analogues aux cas précédents, à savoir un transfert de matière et une légère variation locale de la microstructure de l'acier en surface. L'utilisation de

ces valeurs de Q-Switch sont à exclure dans le cadre du développement d'une méthode de contrôle non destructif.

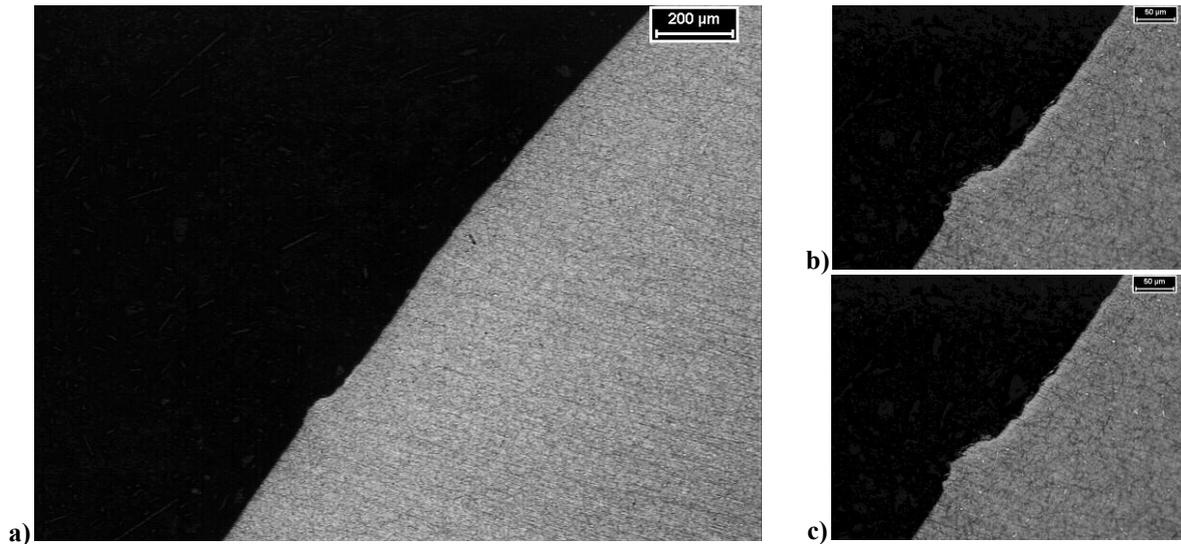


Figure III-22. Affectation d'un rouleau en acier due à l'utilisation d'un délai Q-Switch égal à 370 μ s. -a) Echelle 200 μ m. -b) Echelle 50 μ m. -c) Echelle 100 μ m.

L'utilisation d'un délai Q-Switch de 380 μ s et plus engendrent des densités de puissance générées par le laser insuffisantes pour affecter localement la matière dans notre configuration (dimension et forme de la tâche focale). En effet, les analyses menées ne permettent pas de mettre en évidence une affectation détectable par les procédés habituellement utilisés pour contrôler les pièces industrielles. Ces résultats sont confirmés par une attaque Nital et par un contrôle basé sur les courants de Foucault. En conséquence, nous considérons qu'un délai Q-Switch égal à 380 μ s est le minimum acceptable dans le cadre de nos travaux et dans notre configuration car il correspond à une densité de puissance surfacique ($W.m^{-2}$) inférieure au seuil d'ablation défini au chapitre I. En se rapportant à la Figure III-19, nous constatons que la valeur du délai Q-Switch permet de générer un signal dont le rapport signal sur bruit est plus que correct pour la détection et l'analyse d'une onde de Rayleigh.

Ce sous-chapitre dédié aux échantillons a permis de définir et de caractériser les défauts de natures différentes en notre possession et de valider l'aspect non destructif de la méthode mise en place. Grâce à notre partenariat avec SKF, nous pouvons obtenir des échantillons sains et des échantillons avec défaut en quantité suffisante pour mener à bien nos expérimentations. Les rouleaux sains en céramique et en acier, ainsi que les méthodes de création de défauts utilisées, nous ont permis d'obtenir un nombre conséquent d'échantillons

"témoins" (sains) et les mêmes échantillons (même dimension, même lot de fabrication) mais avec des défauts caractérisés. Ces éléments nous seront très utiles dans le but de valider la faisabilité du contrôle non destructif et d'observer les modifications de signaux mesurés. Dans un second temps, les défauts naturels nous permettront de confronter la méthode de détection de défauts dans des cas réels. Contrôler un défaut dont l'on connaît la présence, la taille et l'emplacement est une chose mais identifier les rouleaux défectueux provenant de la production industrielle sans connaître les dimensions, la présence ou l'absence du défaut et sa localisation en est une autre. Le dernier apport important de ce sous-chapitre concerne la validation de non affectation de la matière pour certaines valeurs de Q-Switch et la conservation d'un rapport signal sur bruit correct pour l'analyse des ondes de Rayleigh.

Maintenant que les bases expérimentales ont été posées et que les hypothèses ont été validées, nous pouvons nous concentrer sur les essais dédiés aux rouleaux en eux-mêmes et proposer nos interprétations.

Dans la littérature scientifique de nombreux auteurs ont utilisé la méthode Ultrasons-Laser pour analyser des cylindres. De manière générale deux types de propagation sont étudiés, une propagation des ondes de surface dans la direction axiale et une autre dans la direction circonférentielle. Elles sont a priori les plus naturelles pour le contrôle d'un rouleaux, ou du moins les premières qui viennent à l'esprit.

III. Propagation des ondes de surface dans une direction axiale

III.1. Description

La propagation de type axiale est, comme son nom l'indique, une propagation privilégiant une direction particulière des ondes le long de l'axe de révolution du cylindre [10]. Une fois le rouleau posé sur sa partie cylindrique (longueur du rouleau), la zone de génération et le point de détection sont l'un à coté de l'autre. Pour ce faire la configuration expérimentale est modifiée, l'interféromètre est décalé et nous ajoutons un miroir à 45° afin de dévier le faisceau sonde. La dernière modification consiste à effectuer une rotation de la lentille cylindrique utilisée pour générer une source ligne de telle sorte qu'elle soit perpendiculaire à l'axe du rouleau.

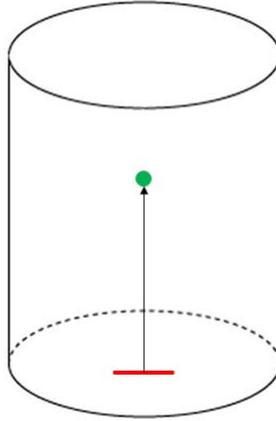


Figure III-23. Propagation de type axiale avec le point vert correspondant à la tâche focale du faisceau interférométrique, la ligne rouge représentant la tâche de focalisation du faisceau laser impulsif et la flèche noire, le sens de propagation des ondes de surface.

Cette direction de propagation des ondes de surface permet de s'affranchir de l'effet dispersif lié à la géométrie cylindrique. Ce qui est une simplification intéressante pour les premières expérimentations. Le développement d'une méthode de contrôle non destructif basée sur ce type de propagation rend obligatoire l'utilisation d'un système de mise en rotation du rouleau sur son axe et suppose un positionnement parfaitement centré car dans le cas contraire, les distances focales ne seraient plus respectées et compromettraient l'analyse.

III.2. Obtention de la vitesse de propagation

L'association d'une table 3D de précision et de la direction de propagation axiale offre l'avantage de pouvoir estimer la vitesse de l'onde de Rayleigh facilement et de manière fiable, à une erreur systématique près. En effet, nous focalisons les faisceaux laser correspondant à la génération et à la détection à une certaine distance l'un de l'autre, non connue. Cette distance ne peut être mesurée avec suffisamment de précision pour être utile à nos calculs. Elle nous sert de référence pour la suite de l'essai. A chaque mesure, nous réduisons la distance génération / détection d'un millimètre grâce à une table de translation. Notons que cette valeur peut être erronée, elle peut donc engendrer une erreur systématique qui est répétée à chaque déplacement. Nous effectuons cinq cycles. La Figure III-24 présente les signaux obtenus sur un rouleau en céramique pour les deux distances les plus extrêmes, la "Mesure_0" avec une distance génération/détection maximale et la "Mesure_5" avec la distance la plus faible.

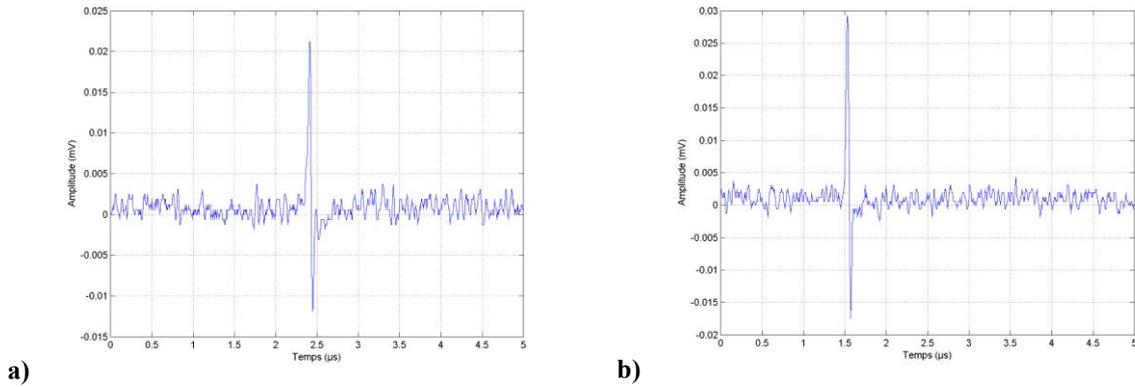


Figure III-24. Signaux obtenus pour une direction de propagation axiale des ondes de surface sur un rouleau en céramique avec une distance génération / détection différente. -a) Mesure_0. -b) Mesure_5.

La position temporelle des signaux correspond au temps de vol de l'onde entre la zone de génération et le point de détection. La vitesse ici considérée étant supposée constante, la variation de distance provoque un décalage du signal dans le temps.

Référence	Position	Temps de vol
Mesure_0	0 mm	2,41 µs
Mesure_1	1 mm	2,24 µs
Mesure_2	2 mm	2,06 µs
Mesure_3	3 mm	1,89 µs
Mesure_4	4 mm	1,71 µs
Mesure_5	5 mm	1,56 µs

Tableau III-1. Localisation temporelle des signaux en fonction de la distance génération / détection mesurée sur un rouleau en céramique.

Le Tableau III-1 rassemble les données obtenues pour cet essai. Grâce à ces temps, il est possible d'estimer la vitesse entre chaque point de mesure et la comparer à la valeur théorique calculée dans le chapitre II. Pour rappel, la vitesse théorique de l'onde de Rayleigh pour le matériau céramique en question a été estimée à 5655 m.s^{-1} dans le chapitre II.

Nous estimons expérimentalement la vitesse entre le point "Mesure_0" et "Mesure_5" de la manière suivante $(\text{Position}_5 - \text{Position}_0) / (\text{Temps}_0 - \text{Temps}_5)$, ce qui nous donne une vitesse de 5714 m.s^{-1} . La différence de 59 m.s^{-1} ne représente que 1% de la vitesse théorique. Cet écart peut s'expliquer par l'utilisation de valeurs approximatives dans le calcul théorique (les coefficients élastiques pris en compte ne sont que des moyennes pour ce type de

céramique), par une erreur systématique sur le déplacement ou par un mauvais étalonnage de l'oscilloscope.

Etant donné que nous possédons plusieurs mesures, nous calculons les vitesses entre plusieurs points de détection, afin d'observer d'éventuelles variations de vitesse qui peuvent apparaître pour un matériau non homogène. L'ensemble des calculs effectués nous donne la même valeur. Nous en concluons que la céramique utilisée est bien homogène et isotrope dans nos conditions expérimentales. De plus, des travaux sur cette matière ont déjà été menés par S. Petit [11] et F. Deneuille [12] qui ont permis de montrer la validité de cette hypothèse.

III.3. Détection d'un défaut créé par micro-scie

L'objectif de nos travaux restant la détection de défauts, nous profitons de cette direction de propagation simplifiant les hypothèses pour étudier l'interaction onde acoustique / défaut. La détection de défauts par ondes ultrasonores a largement été étudiée, tant expérimentalement que théoriquement [5] [13] [14] [15] [16] [17]. Nous travaillons par comparaison entre le signal provenant d'un cylindre sain et le signal obtenu sur un cylindre avec défaut et dont le défaut se situe sur le trajet de l'onde (entre la génération et la détection).

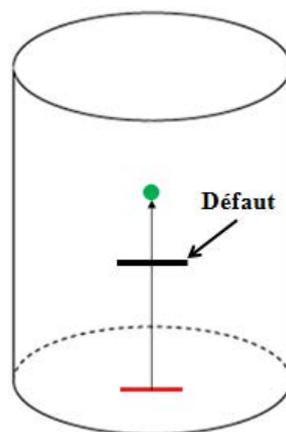


Figure III-25. Position du défaut de type "micro-scie" par rapport à la source ligne (en rouge) et la tâche de focalisation du faisceau de l'interféromètre (en vert).

La Figure III-26 présente les résultats obtenus avec cette procédure. Les graphiques a) et c) sont les signaux temporels (signaux bruts) acquis directement sans traitement de signal pour trois mesures, en sachant qu'une mesure représente la moyenne sur 8 tirs. Malgré des conditions expérimentales identiques, les trois signaux relevés sur le rouleau sans défaut sont similaires alors que les signaux acquis sur le rouleau avec défaut sont légèrement différents.

De plus si nous calculons le rapport signal sur bruit, nous obtenons une valeur moyenne de 15 dB pour le signal sans défaut et de 8 dB pour le signal avec défaut.

Les graphiques b) et d) rassemblent les deux FFT calculées à partir des signaux. Afin d'assurer une comparaison fiable entre les deux tracés, nous utilisons la même échelle au niveau de l'axe des abscisses. Nous constatons que le défaut modifie le spectre du signal. Les composantes haute fréquence du signal sont supprimées. Comme nous l'avons mentionné précédemment, une onde de Rayleigh possède une profondeur de pénétration dans l'échantillon dépendant de sa fréquence. En fonction de leurs fréquences et des dimensions du défaut, les composantes fréquentielles de l'onde de surface peuvent soit ne pas voir le défaut et considérer le solide comme continu, soit voir le défaut comme une rupture d'impédance. En cas de continuité, la composante fréquentielle de l'onde poursuit son chemin dans son sens de propagation alors qu'en cas de rupture de continuité, elle est réfléchiée par le défaut [18] [19].

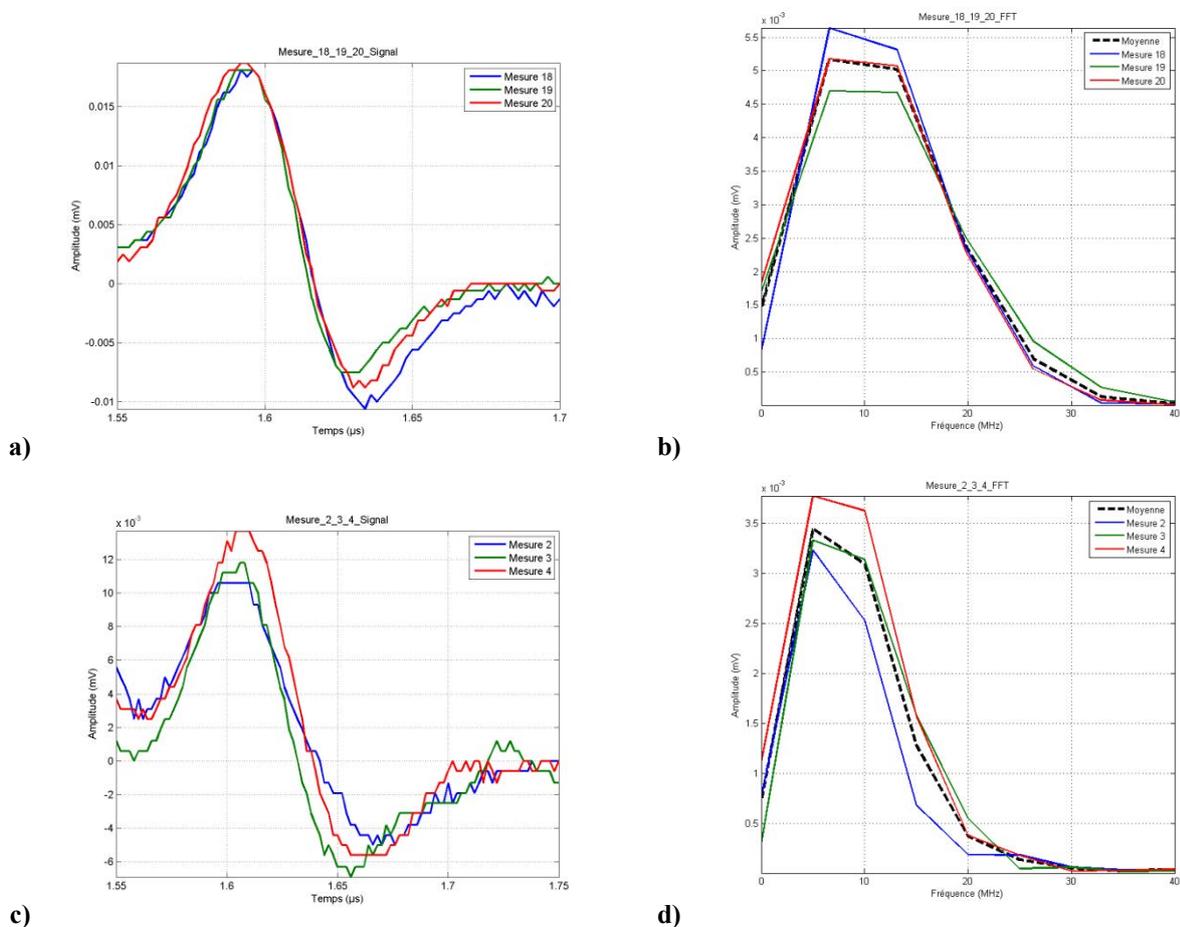


Figure III-26. Détection de défauts grâce à une direction de propagation axiale de l'onde de surface sur un rouleau en céramique. -a) Signal temporel de l'onde de Rayleigh sans défaut. -b) FFT du signal sans défaut. -c) Signal temporel de l'onde de Rayleigh avec défaut créé à l'aide d'une micro-scie. -d) FFT du signal avec défaut créé à l'aide d'une micro-scie.

L'utilisation d'une onde de surface axiale nous permet de valider la faisabilité du contrôle non destructif sur un rouleau en céramique en nous affranchissant de l'aspect dispersif de la géométrie.

IV. Propagation des ondes de surface dans une direction circonférentielle

IV.1. Description

Le second type de propagation commune dans la littérature sur ce type de structure est la propagation des ondes de surface dans la direction circonférentielle [20] [21]. Le rouleau est positionné de la même façon que pour la propagation de type axiale, c'est à dire sur une de ses faces. A l'image de la Figure III-27, la source ligne générant les ondes ultrasonores est parallèle à l'axe du rouleau, ce qui privilégie grâce à la directivité due à la forme de la source, une propagation des ondes de surface autour du cylindre. Ne rencontrant pas d'obstacles sur leurs trajets, les ondes de surface effectuent plusieurs tours autour du rouleau, jusqu'à ce que l'atténuation et l'effet dispersif lié à la géométrie rendent inexploitable les signaux acquis à cause d'un mauvais rapport signal sur bruit.

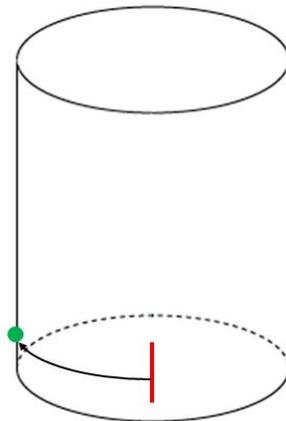


Figure III-27. Propagation de type circonférentielle avec le point vert correspondant la tâche focale du faisceau laser de l'interféromètre, la ligne rouge représentant la tâche focale du faisceau laser de puissance et la flèche noire, le sens de propagation des ondes de surface.

La source ligne générant une onde de chaque côté, la configuration expérimentale facilite l'interprétation des signaux acquis. Sur la Figure III-28, nous observons le signal acquis correspondant à une onde de surface circonférentielle. Nous constatons la présence de

plusieurs signaux d'amplitude. Cette amplitude est directement liée au déplacement normal de la surface au niveau du point de focalisation du faisceau laser de l'interféromètre. Nous numérotons chaque signal provoqué par le passage d'une onde de surface afin d'expliquer son origine.

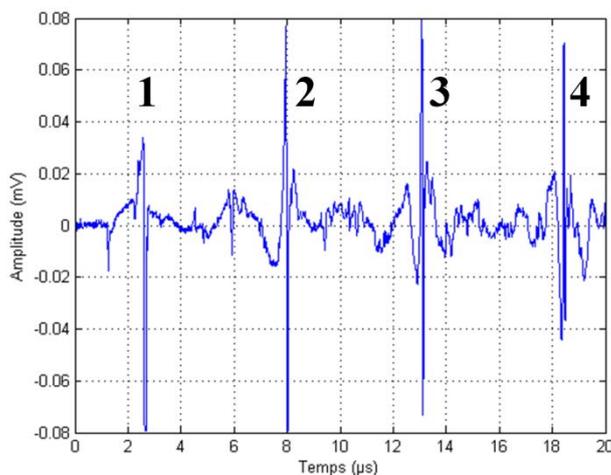


Figure III-28. Interprétation des signaux détectés sur un signal temporel pour un chemin de propagation de type circonférentiel sur un rouleau en acier sans défaut de diamètre 10mm.

Le signal n°1 correspond à l'onde se propageant vers la gauche et ayant parcourue un quart du rouleau (Figure III-31). Notons que l'amplitude de ce signal est faible par rapport aux signaux n°2 et n°3 car la distance de propagation est réduite (diamètre de 10 mm) et que l'onde n'est pas encore bipolaire. Nous nous situons à la limite du champ proche et du champ lointain. Le signal n°2 est engendré par le passage de l'onde de surface se propageant vers la droite de la source ligne et ayant parcourue trois quarts de tour du rouleau. La vitesse étant constante pour une fréquence donnée et la distance plus grande, l'onde est détectée à un temps plus long. Le signal n°3 correspond à la même onde que le signal n°1 mais ayant parcourue un tour supplémentaire. Nous constatons que l'amplitude du signal n°2 est supérieure à l'amplitude du signal n°3. Cette observation est due à l'atténuation de l'onde par le matériau. Le signal n°4 est engendré par la même onde que le signal n°2 mais ayant parcouru un tour de plus, soit un total de un tour trois quart. Les autres signaux identifiés pour des temps plus éloignés seront à considérer avec la même logique.

IV.2. Génération d'ondes de surface sur un matériau céramique

La céramique n'étant pas un matériau couramment utilisé dans le cadre de la méthode Ultrasons-Laser, nous testons la capacité de génération et de détection sur cette matière en utilisant un chemin de propagation circonférentiel afin d'étudier les signaux sur un temps long et sur un tour complet.

La Figure III-29 rassemble les résultats principaux de nos essais. Nous remarquons que le rapport signal sur bruit est bon et qu'il permet l'identification des signaux. Toutefois, nous constatons que les amplitudes du déplacement normal à la surface sont inférieures aux signaux relevés pour l'acier dans les mêmes conditions. Notons que pour un délai Q-Switch égal à $360 \mu\text{s}$, le rouleau ne semble pas avoir été affecté.

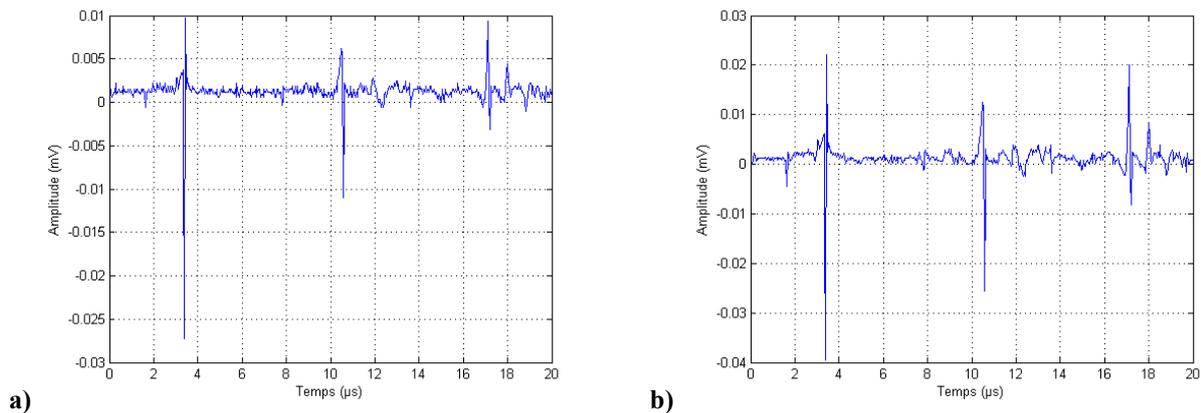


Figure III-29. Génération d'ondes ultrasonores sur un rouleau en céramique de diamètre 25 mm pour différents délais Q-Switch. -a) Q-Switch = $380 \mu\text{s}$. -b) Q-Switch = $360 \mu\text{s}$.

La génération et la détection d'ondes ultrasonores ne posent pas de problèmes particuliers sur la céramique, bien que la source soit considérée comme enterrée [22]. Malgré une amplitude du déplacement plus faible que dans le cas de l'acier, le rapport signal sur bruit reste très bon, même avec un délai Q-Switch égal à $380 \mu\text{s}$.

IV.3. Effet dispersif lié à la géométrie cylindrique

L'étude théorique nous a montré que la géométrie circulaire d'un cylindre engendre un effet dispersif sur l'onde de surface. Les composantes fréquentielles de cette onde ultrasonore n'ont pas la même vitesse. L'onde de surface s'étale dans le temps. Nous souhaitons vérifier cet effet prédit théoriquement. Pour ce faire, nous observons les ondes sur des distances de

propagation plus importantes et nous utilisons un rouleau cylindrique dont le diamètre est petit dans le but d'observer un effet dispersif marqué.

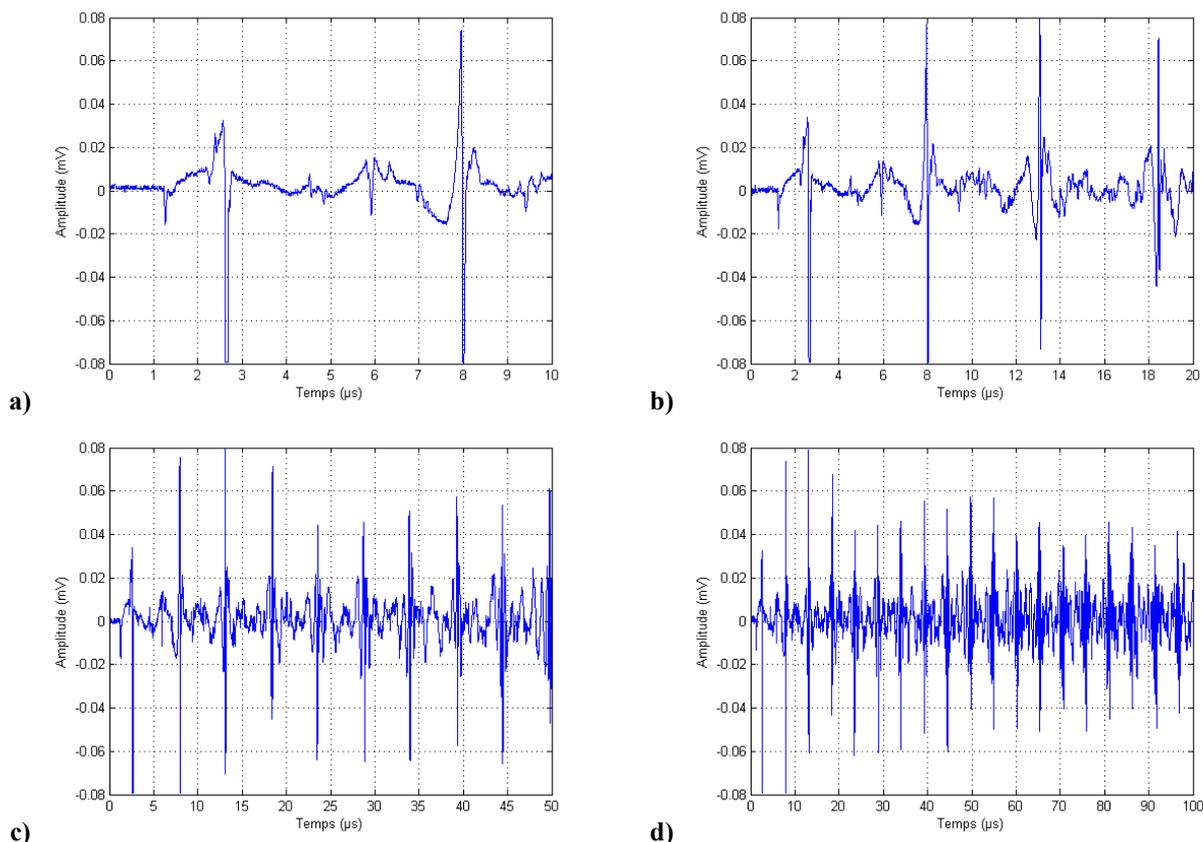


Figure III-30. Signaux obtenus grâce à une propagation de type circonférentielle sur un rouleau en acier de diamètre 10 mm pour des durées d'acquisition différentes. -a) De 0 à 10 μs, -b) De 0 à 20 μs, -c) De 0 à 50 μs, -d) De 0 à 100 μs,

La Figure III-30 illustre l'effet dispersif de la géométrie cylindrique. Nous constatons un étalement temporel de l'onde de surface. Cet étalement temporel est dû à la différence de vitesse entre les différentes composantes fréquentielles de l'onde de surface. Chaque composante n'ayant pas la même vitesse de propagation et la distance étant strictement identique, le temps auquel les composantes arrivent au niveau du point de détection n'est pas le même. D'après la théorie, les composantes basse fréquence sont plus rapides et sont donc détectées avant les composantes haute fréquence. Ce phénomène est de plus en plus visible au fur et à mesure que le temps s'écoule.

Nous constatons par ailleurs sur les graphiques de la Figure III-30 une diminution des amplitudes des signaux en fonction du temps. Le graphique d) est particulièrement révélateur à ce sujet. Cette baisse s'explique par deux phénomènes, le coefficient d'atténuation et l'étalement de l'onde dans le temps causé de la dispersion.

IV.4. Détection de défauts

Comme dans le cas précédant où la direction de propagation des ondes de surface était axiale, nous cherchons à détecter des défauts présents sur un rouleau à l'aide d'un chemin de la propagation circonférentiel. Afin de faciliter l'interprétation des signaux, nous définissons deux positions possibles du défaut (Figure III-31).

Les images a) et b) sont toutes deux des vues de dessus de la configuration expérimentale. L'image a) décrit le sens de propagation des ondes de surface dans les deux directions privilégiées. L'une, générée vers la gauche, a une propagation dans le sens horaire, alors que l'autre, générée vers la droite, possède une propagation dans le sens anti-horaire. La compréhension de ces chemins de propagation est essentielle pour l'interprétation des signaux acquis.

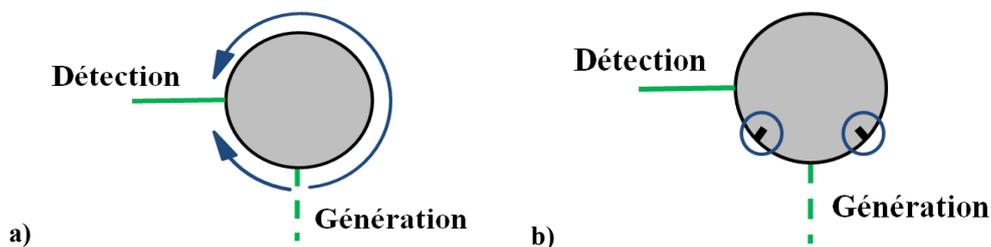


Figure III-31. Description de la propagation de type circonférentielle. -a) Sens de propagation des ondes de surface. -b) Positions des défauts par rapport à la détection et la génération.

L'image b) de la Figure III-31 localise les deux positions possibles utilisées dans nos essais. Il n'y a qu'un défaut présent sur le rouleau, il sera sur l'une ou l'autre de ces positions.

La Figure III-32 présente les résultats obtenus pour trois configurations différentes :

- sans défaut sur le rouleau.
- avec un défaut hors du trajet théorique de l'onde de surface.
- avec défaut sur le trajet théorique de l'onde.

Nous nous concentrons, dans un premier temps, sur le premier signal acquis, correspondant à l'onde générée vers la gauche par la source ligne. Lors de la configuration avec le défaut hors du trajet, nous positionnons le trait de scie à droite de la zone de

génération. Alors que pour la configuration avec le défaut sur le trajet, nous tournons le rouleau afin que le défaut soit entre la zone de génération et le point de détection.

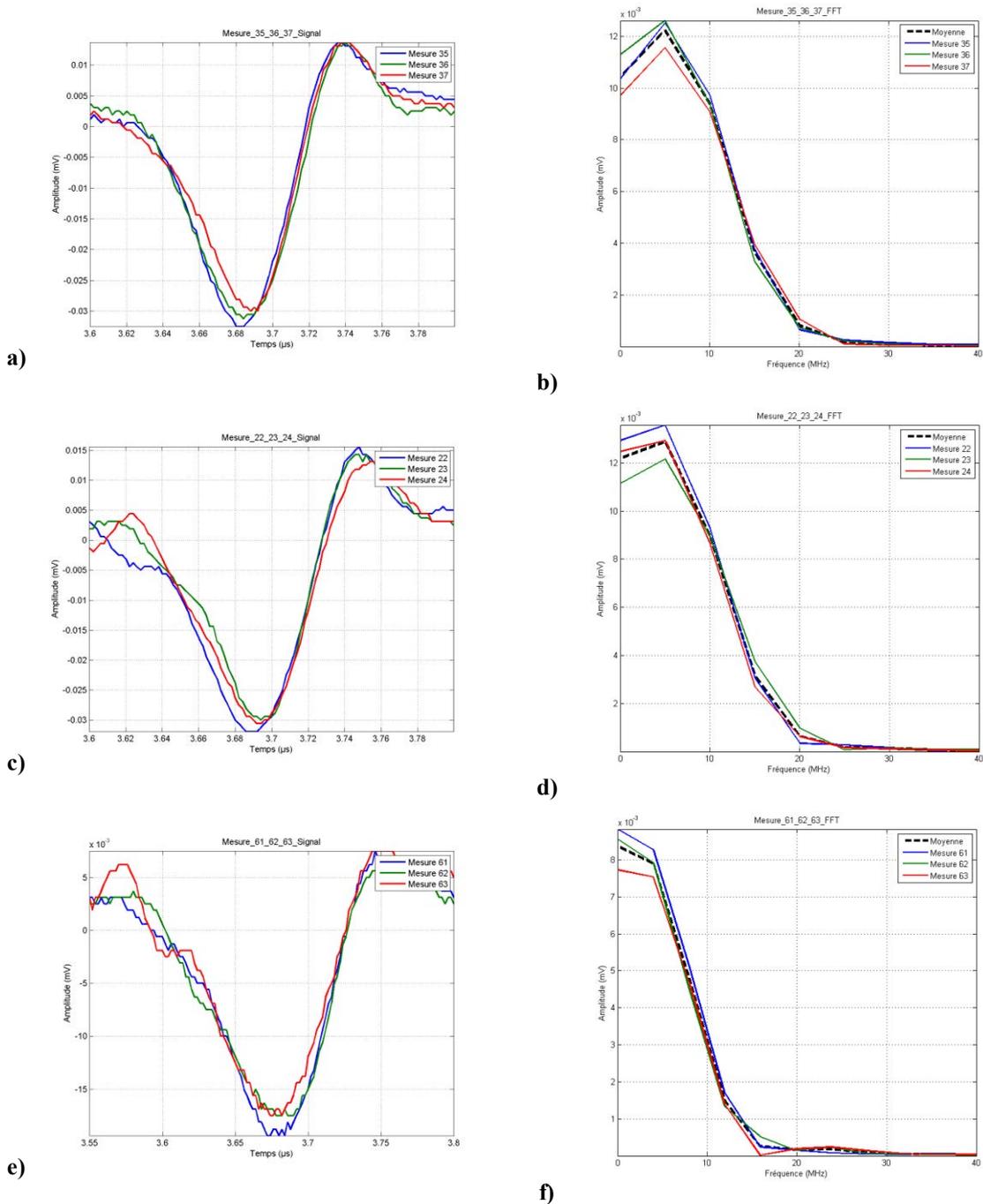


Figure III-32. Détection d'un défaut de type "micro-scie" présent sur un rouleau en céramique de type "25x40" grâce à l'analyse du premier signal détecté. -a) Signal temporel sans défaut. -b) FFT sans défaut. -c) Signal temporel avec défaut hors du trajet. -d) FFT avec défaut hors du trajet. -e) Signal temporel avec défaut sur le trajet. -f) FFT avec défaut sur le trajet.

Logiquement dans cet essai les deux premières configurations doivent avoir des signaux identiques alors que la troisième doit montrer une variation importante du spectre fréquentiel à cause de l'interaction onde acoustique / défaut, décrite plus haut.

En l'absence totale de défauts sur le rouleau, nous relevons le signal temporel de l'image a), sur lequel est calculé par FFT le spectre b). Ces graphiques nous servent de références pour l'interprétation des signaux acquis lors des expérimentations.

Le signal de l'image c) est mesuré dans la configuration du défaut présent en dehors du trajet de l'onde de surface considérée. Nous constatons une bonne corrélation avec les signaux correspondant aux mesures sans défaut. Constat que nous pouvons faire également pour le spectre fréquentiel. Le défaut n'ayant pas interagi avec l'onde, il n'est pas possible de le détecter. Les dernières images de cette figure correspondent au cas où le défaut se retrouve sur le trajet de l'onde de surface. Il est délicat d'observer les variations significatives entre les différents signaux temporels. En revanche, le calcul de la FFT permet d'identifier clairement l'effet du défaut sur l'onde de surface. Nous observons de manière évidente que le défaut a modifié le spectre fréquentiel de l'onde de surface. Nous constatons que les composantes haute fréquence de cette onde ultrasonore n'ont pas été transmises. Il s'agit d'un phénomène de filtrage laissant passer les basses fréquences dont la longueur d'onde est plus grande et réfléchissant les hautes fréquences dont la profondeur de pénétration est plus faible.

Les conclusions de ce premier essai sont claires, un défaut a un effet "filtre" sur les ondes de surface et la méthode n'est capable de détecter que des défauts ayant interagi avec une onde acoustique. Pour le deuxième essai, nous nous intéressons au deuxième signal détecté et correspondant à l'onde générée vers la droite par la source ligne et ayant parcouru les trois quarts du rouleau dans le sens anti-horaire en vue de dessus.

Dans cet essai (Figure III-33), nous ne nous intéressons pas au cas du défaut en dehors du trajet de l'onde pour les raisons qui ont été données plus haut. Le signal temporel avec le défaut présente une amplitude relativement faible mais ne pose pas de problème pour le calcul de la FFT, qui nous permet une interprétation fiable. L'effet de filtrage est marqué et ne laisse planer aucun doute sur l'interaction de l'onde de surface avec le défaut.

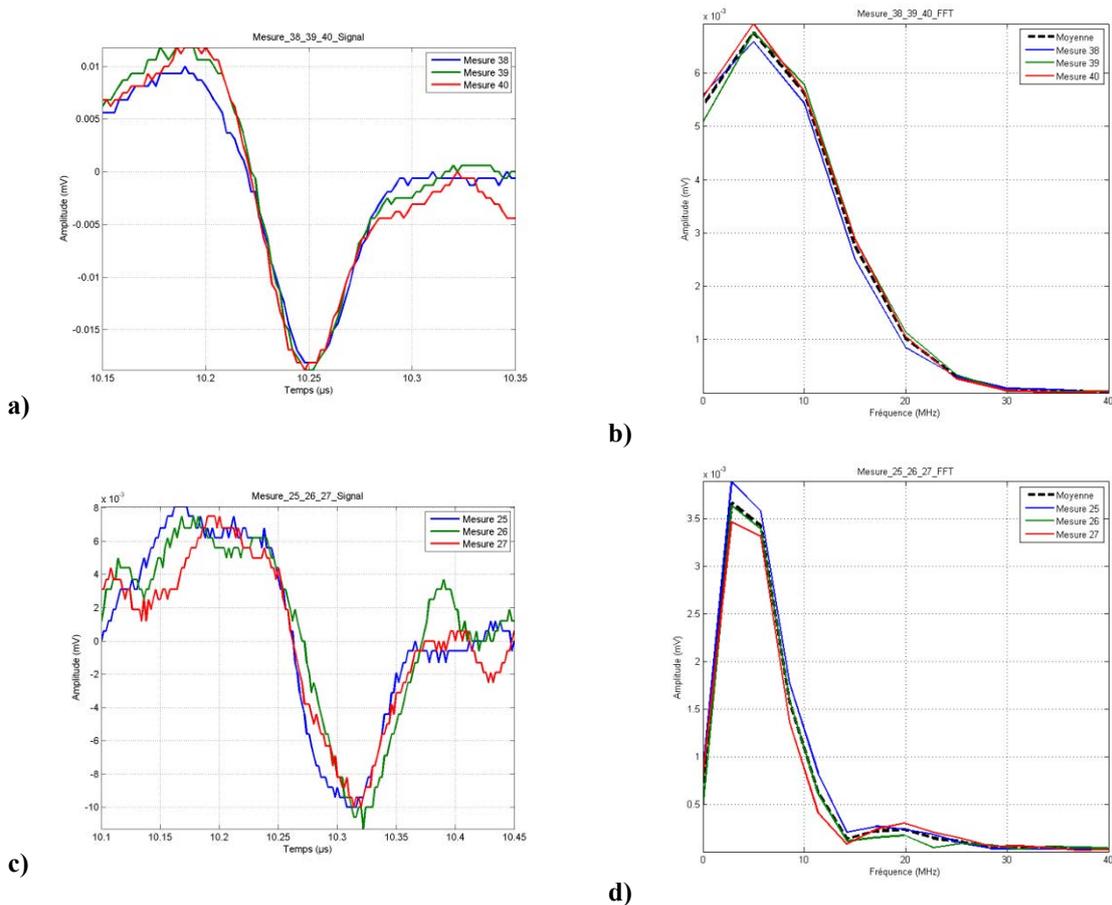


Figure III-33. Détection d'un défaut créé par la méthode de la micro-scie présent sur un rouleau en céramique de type "25x40" grâce à l'analyse du deuxième signal détecté. -a) Signal temporel sans défaut. -b) FFT sans défaut. -c) Signal temporel avec défaut sur le trajet. -d) FFT avec défaut sur le trajet.

Les deux essais dont nous venons de présenter les résultats montrent qu'il est possible d'utiliser la propagation de type circonférentielle pour détecter la présence de défauts sur un rouleau.

Afin de compléter les essais précédents, nous analysons le troisième signal détecté. L'onde de surface provoquant ce signal a été générée vers la gauche, est passée une première fois par le défaut et a continué sa propagation suivant la direction de génération pour repasser une seconde fois sur le défaut. Après un tour complet, l'onde a donc interagi deux fois avec le même défaut. Nous notons une variation du rapport signal sur bruit entre les signaux sans défaut et ceux avec défaut. Le rapport moyen vaut 15 dB dans le premier cas, alors qu'il est égal à 8 dB dans le second.

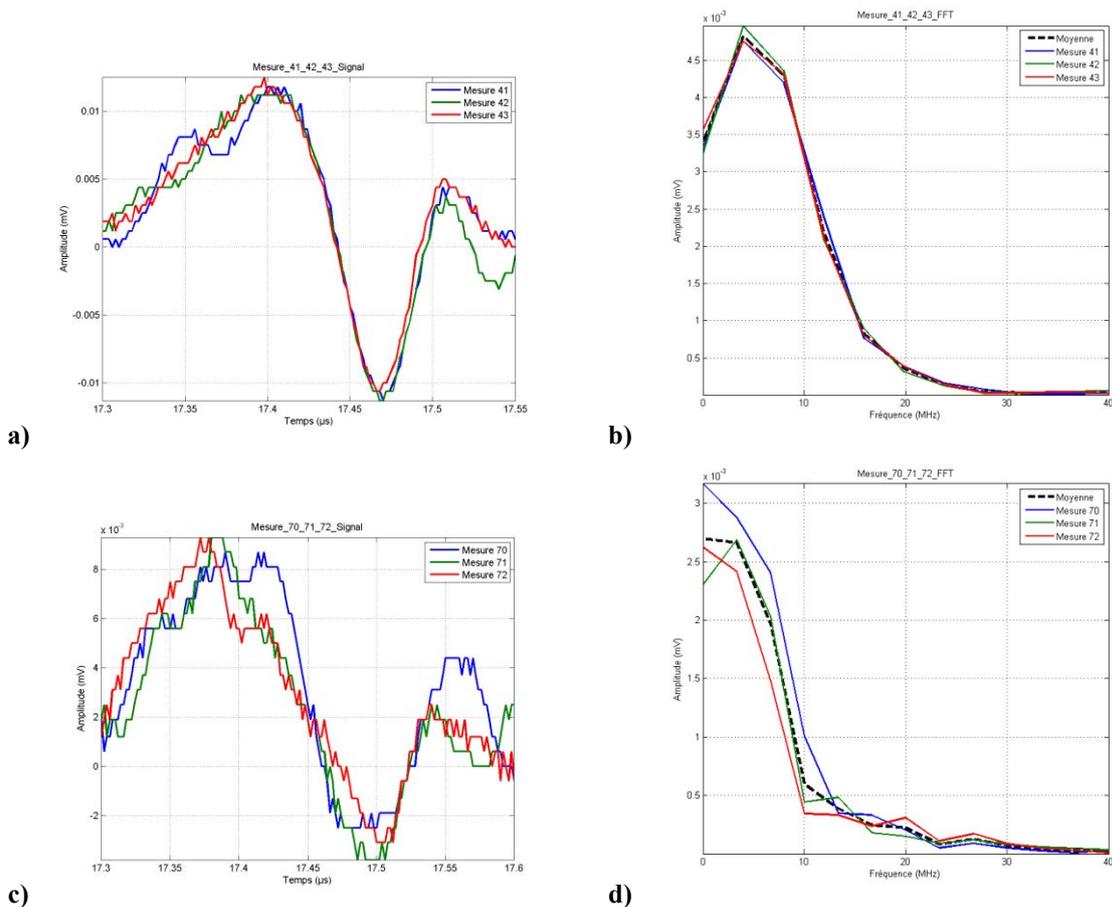


Figure III-34. Détection d'un défaut de type "micro-scie" sur un rouleau en céramique de diamètre 25 mm grâce à l'analyse du troisième signal détecté. -a) Signal temporel sans défaut. -b) FFT sans défaut. -c) Signal temporel avec double passage de l'onde par le défaut. -d) FFT avec double passage de l'onde par le défaut.

La première constatation que nous faisons concerne la qualité du signal temporel. L'atténuation, la dispersion et les passages par le défaut ont diminué l'amplitude du déplacement et donné un signal dont le rapport signal sur bruit est mauvais. Il vaut 13 dB en l'absence de défaut et 8 dB avec la présence d'un défaut. A titre de comparaison, les valeurs du rapport signal sur bruit des signaux présentés à la Figure III-32, c'est à dire pour le premier signal détecté, nous avons calculé un rapport valant 17 dB dans le cas d'une absence de défaut, 16 dB lorsque le défaut est en dehors du trajet de l'onde de surface et enfin 12 dB si l'onde traverse le défaut. Une analyse similaire a été effectuée pour les signaux temporels de la Figure III-33, sans défaut le rapport vaut 15 dB. Le défaut réduit cette valeur à 8 dB.

Le spectre fréquentiel montre bien un filtrage mais les courbes obtenues pour les trois mesures ne sont pas aussi proches que pour les essais précédents.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une partie des résultats expérimentaux de nos travaux. L'aspect expérimental passe premièrement par la définition du banc d'essais mis en place pour répondre au mieux aux objectifs. Nous avons choisi une configuration basée sur un angle entre le faisceau laser de génération et le faisceau de détection égal à 90° avec plusieurs tables de déplacements et éléments optiques.

Nous avons en suite décrit les échantillons utilisés et plus particulièrement les défauts présents sur ces rouleaux cylindriques. Nous avons séparé ces défauts en deux catégories, les défauts naturels et les défauts artificiels. Chacun de ces types de défauts ont leurs intérêts, et posséder les deux nous permet de cumuler leurs avantages. Les défauts naturels sont des défauts non volontaires créés lors de la fabrication du rouleau ou présent dans la matière. Contrairement à ces défauts, les défauts artificiels ont été créés volontairement à l'aide de diverses méthodes sur des rouleaux afin d'être utilisés durant nos essais.

Dans le chapitre I, nous avons différencié deux régimes de génération des ondes ultrasonores par laser, le régime thermoélastique et le régime d'ablation. Nous avons précisé que dans le cadre du développement d'une méthode de contrôle non destructif, il était impératif de ne pas affecter la matière et donc de générer des ondes en régime thermoélastique. Des essais ont donc été menés afin de déterminer dans quelle mesure, le laser de puissance pouvait affecter le matériau. Nous en avons conclu qu'au delà d'une valeur du délai Q-Switch particulière et pour la configuration mise en place, nous conservons un régime thermoélastique et que nous ne modifions pas l'échantillon, tout en obtenant des signaux exploitables.

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les résultats obtenus pour des directions de propagation des ondes de surface largement étudiées dans la littérature que sont le chemin axial et le chemin circonférentiel. Le premier nous a permis de valider les résultats théoriques en terme de vitesse de propagation et d'homogénéité du matériau. Nous avons également pu confirmer qu'il était possible de détecter un défaut important de type "manque de matière" grâce à l'analyse fréquentielle de l'onde de surface.

L'utilisation d'un chemin de propagation circonférentiel complexifie l'approche théorique vis à vis de la propagation de type axiale, mais simplifie la mesure physique. Pour

contrôler l'ensemble d'un rouleau grâce à une onde de surface circonférentielle, nous devons simplement monter ou baisser l'échantillon par rapport à la source génératrice et au point de mesure du déplacement. Ce mouvement se fait très facilement avec la table de translation de précision sur laquelle est posée le rouleau. La géométrie cylindrique permet théoriquement de conserver les distances focales lors d'un déplacement en hauteur de l'échantillon. La validation de l'approche théorique a également été faite pour ces ondes de surface circonférentielles. En effet, nous avons pu vérifier les prédictions analytiques sur l'effet dispersif de la géométrie étudiée et affirmer la faisabilité de la génération et de la détection d'ondes ultrasonores sur la céramique par la méthode Ultrasons-Laser. A l'image de ce qui a été fait pour les ondes axiales sur un rouleau en acier, nous avons démontré qu'il était possible de détecter un défaut présent sur un rouleau en céramique.

Cette méthode basée sur les Ultrasons-Laser apporte un avantage non négligeable dans la perspective du développement d'une méthode industrielle de contrôle mais n'est pas encore idéale à cause du nombre de mesures nécessaire pour inspecter un rouleau entier et par conséquence du temps de mesure. Lors de nos travaux nous avons envisagé et utilisé un autre type de chemins de propagation hybrides, la propagation des ondes de surface hélicoïdales.

VI. Bibliographie

- [1] A. Aindow, R. Dewhurst, D. Hutchins et S. Palmer, «Laser-generated ultrasonic pulses at free metal surfaces,» *Acoustical Society of America*, vol. 62, n° 12, pp. 449-455, 1981.
- [2] D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, Propagation libre et guidée, Paris: Masson, 1996.
- [3] D. Royer et E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, Génération, interaction acousto-optique, applications, Paris: Masson, 1996.
- [4] D. Clorennec, «Génération et détection optiques d'ondes guidées sur une pièce cylindrique. Application au contrôle non destructif sans contact,» Université Paris 7, 2002.
- [5] F. Faëse, «Génération d'ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers - Applications à la caractérisation sans contact de défauts,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2013.
- [6] D. Royer et E. Dieulesaint, «Mesures optiques de déplacements d'amplitude $10e-4$ à $10e2$ Angström. Application aux ondes élastiques,» *Revue de Physique Appliquée*, vol. 24, pp. 833-846, 1989.
- [7] D. Clorennec et D. Royer, «Analysis of surface acoustic wave propagation on a cylinder using laser ultrasonics,» *Applied Physics Letters*, vol. 82, n° 125, pp. 4608-4610, 2003.
- [8] J. Ready, «Effects Due to Absorption of Laser Radiation,» *Journal of Applied Physics*, vol. 36, n° 12, pp. 462-468, 1965.
- [9] J. Ready, Effect of High Power Laser Radiation, New-York: Academic Press, 1971.
- [10] A. Aindow, R. Dewhurst et S. Palmer, «Laser-generation of directional surface acoustic wave pulses in metals,» *Optics Communications*, vol. 42, n° 12, pp. 116-120, 1982.
- [11] S. Petit, «Spectroscopie de résonance ultrasonore des ondes de surface - Application au

contrôle non destructif de billes en céramique,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2003.

- [12] F. Deneuille, «Contribution au contrôle non-destructif de billes en céramique par spectroscopie ultrasonore de résonances de modes sphéroïdaux,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
- [13] P. Yang, S. Liu et J. Sung, «Transient response of SH waves in a layered half-space with sub-surface and interface cracks,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32, n° 14, pp. 595-609, 2008.
- [14] V. Tournat, C. Ni, N. Chigarev, N. Delorme, Z. Shen et V. Gusev, «Probing of crack breathing by pulsed laser-generated acoustic waves,» chez *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Montréal, 2013.
- [15] Y. Sohn et S. Krishnaswamy, «Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic line source with a surface-breaking flaw,» *Acoustical Society of America*, vol. 115, n° 11, pp. 172-181, 2004.
- [16] C. Scruby et L. Drain, *Laser Ultrasonics, Techniques and applications*, Adam Hilger, 1990.
- [17] D. Clorennec, D. Royer et H. Walaszek, «Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics,» *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 783-789, 2002.
- [18] A. Lomonosov, P. Grigoriev et P. Hess, «Sizing of partially closed surface-breaking microcracks with broadband Rayleigh waves,» *Applied Physics*, vol. 105, 2009.
- [19] J. Li, H. Zhang, C. Ni et Z. Shen, «Analysis of laser generated ultrasonic wave frequency characteristics induced by a partially closed surface-breaking crack,» *Optical Society of America*, vol. 52, n° 118, pp. 4179-4185, 2013.
- [20] D. Royer et D. Clorennec, «Theoretical and Experimental Investigation of Rayleigh Waves on Spherical and Cylindrical Surfaces,» chez *Laser Ultrasonics*, Montréal, 2008.
- [21] F. Jenot, «Génération et détection d'ondes élastiques par sources lasers - Applications au

contrôle non destructif,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2003.

- [22] J. Achenbach, «Calculation of surface wave motions due to a subsurface point force : An application of elastodynamic reciprocity,» *Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 14, pp. 1892-1897, 2000.

CHAPITRE IV. AUGMENTATION DE LA ZONE CONTROLEE PAR UTILISATION D'UNE ONDE DE SURFACE HELICOÏDALE

I. Description de la méthode	135
I.1. Génération des ondes de surface hélicoïdales	135
I.2. Réflexion des ondes acoustiques de surface sur les faces	136
II. Validation de l'approche théorique	137
II.1. Etude de l'amplitude du déplacement en fonction de la hauteur du rouleau...	137
II.2. Atténuation des ondes de surface par dépôt d'un gel de couplage	140
III. Détection de défauts	142
III.1. Défaut naturel de type "repli de laminage"	142
a) Description des essais et définition de la référence	142
b) Analyse du défaut à la hauteur 0.....	144
c) Analyse du défaut à la hauteur + 2 mm	146
d) Analyse du défaut à la hauteur + 4 mm	147
e) Analyse du défaut à la hauteur + 6 mm	149
III.2. Défaut artificiel créé à l'aide d'une micro-scie.....	149
a) Description.....	149
b) Détection d'un défaut en position 1	151
c) Détection d'un défaut en position 2.....	153
d) Détection d'un défaut en position 3	154
e) Détection d'un défaut en position 4.....	155
III.3. Défaut artificiel créé par ablation avec un laser de marquage	156
a) Défaut créé sur un rouleau en acier.....	156
a) Défaut créé sur un rouleau en céramique.....	157
III.4. Défaut naturel de type "brûlure"	158
IV. Etude de l'influence d'une légère variation géométrique et de la nuance de l'acier sur les signaux	160
IV.1. Influence d'une variation de diamètre.....	160
IV.2. Influence de la nuance d'acier.....	162
V. Conclusion	163
VI. Bibliographie	165

Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus pour un chemin de propagation particulier des ondes de surface générées par Ultrasons-Laser décrivant une hélice autour d'un rouleau cylindrique et nos interprétations. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, cette propagation de type hélicoïdale est un type de propagation particulier obtenu en inclinant la source ligne [1] entre 0 et 90° par rapport à l'axe de révolution du rouleau. Les bases théoriques [2] [3] [4] et expérimentales [5] [6] de ce chemin de propagation sur un cylindre plein sont disponibles dans la littérature mais également sur un tube [7]. Cette propagation d'une onde à travers un cylindre a notamment été utilisée pour estimer le tenseur de raideur par M. Perton [8]. La propagation d'une onde hélicoïdale se situe entre la propagation de type circonférentielle et la propagation de type axiale et présente un avantage certain pour le contrôle de structures cylindriques pleines et bornées. Jusqu'à présent, nous avons présenté le concept et proposé une étude théorique en s'appuyant sur des publications scientifiques. Nous allons maintenant tenter de valider nos hypothèses et prouver la faisabilité et la pertinence de cette approche pour nos travaux grâce à l'expérimentation.

Dans une première partie, nous décrirons plus en détail la propagation d'ondes de surface hélicoïdales et ses avantages. Nous profiterons de ce sous-chapitre pour mettre en avant l'aspect innovant de nos travaux et qui nous a poussé à envisager le dépôt d'un brevet.

Dans un deuxième temps, nous utiliserons nos essais pour vérifier et valider les hypothèses de travail, notamment la réalité de l'existence d'une onde se propageant suivant une direction principale décrivant une hélice à la surface d'un rouleau.

Dans une troisième partie, nous nous pencherons sur la détection de défauts à l'aide de cette méthode en utilisant tous les types de défauts que nous possédons et qui ont été présentés dans le chapitre précédent.

Dans un dernier sous-chapitre, nous nous intéresserons aux influences que peuvent avoir des variations géométriques et de matière sur les signaux acquis.

Par l'intermédiaire de ces essais, nous apporterons nos conclusions sur cette propagation particulière des ondes de surface hélicoïdales et nous préciserons ses avantages et ses inconvénients.

I. Description de la méthode

I.1. Génération des ondes de surface hélicoïdales

La direction principale d'une onde de surface hélicoïdale décrit une hélice autour du rouleau. Pour générer une onde de cette nature, nous devons incliner la source ligne par rapport à l'axe de révolution du rouleau à un angle compris entre 0° et 90° ($0^\circ < \beta < 90^\circ$) [9].

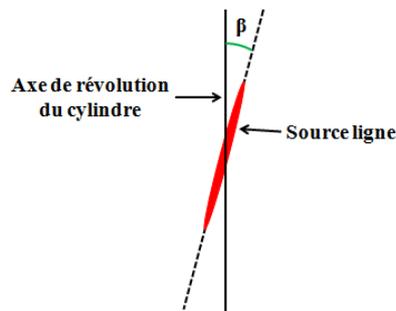


Figure IV-1. Représentation de l'angle β entre la source ligne et l'axe de révolution du cylindre.

La valeur de l'angle β est prédominante dans l'utilisation de ce chemin de propagation. Il nous permet de faire varier le pas de l'hélice. Il peut être intéressant de modifier ce pas en fonction des dimensions du rouleau à contrôler. Dans le cadre de ce type de propagation, il est a priori possible d'utiliser les réflexions des ondes au niveau des faces pour augmenter la distance de parcours des ondes de surface.

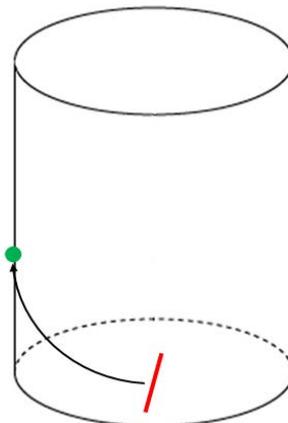


Figure IV-2. Propagation d'une onde de surface hélicoïdale. Le point vert correspond à la focalisation du faisceau interférométrique, la ligne rouge à la focalisation du faisceau laser de puissance sur le rouleau et la flèche noire décrit la direction de propagation des ondes de surface.

Comme nous le voyons sur la Figure IV-2, nous conservons un angle entre le faisceau de génération et le faisceau de l'interféromètre égal à 90° par rapport au centre du rouleau, mais les contraintes d'encombrement et de sommation des ondes n'étant plus les mêmes, il est possible de modifier cette valeur, afin d'optimiser le temps de contrôle. Nous utilisons la forme du rouleau à notre avantage, en permettant aux ondes de parcourir un maximum de surface.

I.2. Réflexion des ondes acoustiques de surface sur les faces

En respectant les conditions précédentes sur l'angle de la ligne source, nous générons des ondes de surface hélicoïdales. Ces ondes se propagent suivant une hélice autour du rouleau.

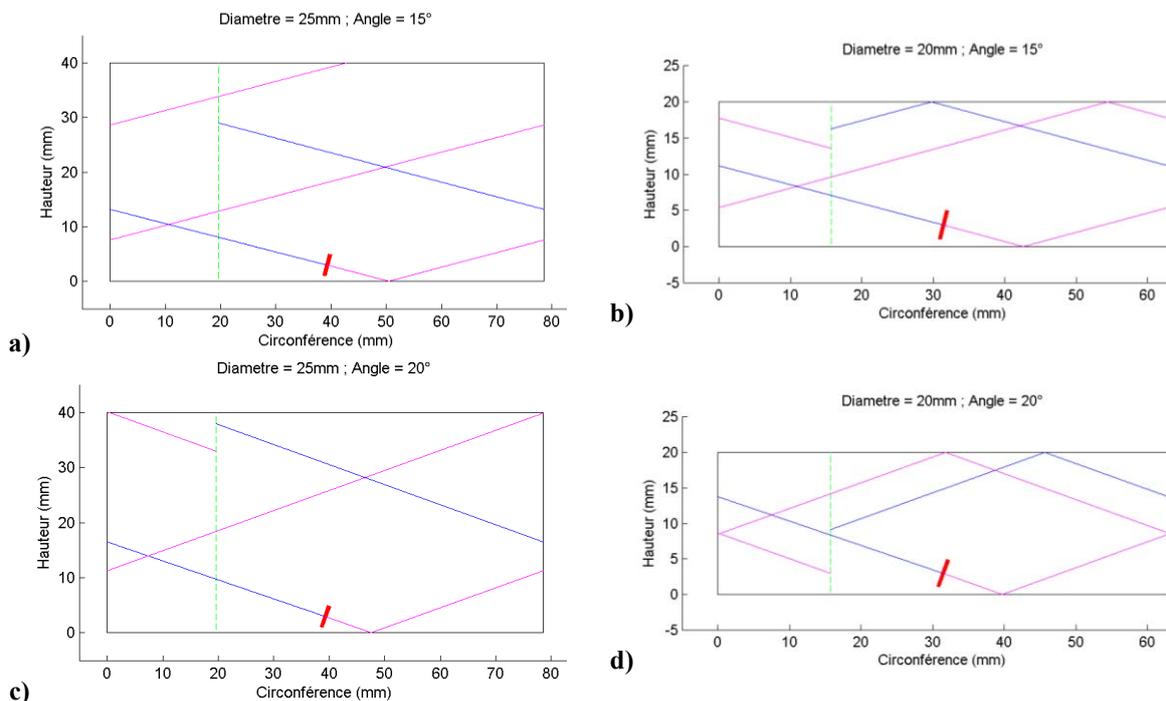


Figure IV-3. Chemin principal de propagation des ondes hélicoïdales pour deux géométries différentes pour un angle de génération de 15° et de 20° . -a) Cylindre de diamètre 25 mm et de hauteur 40 mm avec un angle de la source ligne à 15° , -b) Cylindre de diamètre et de hauteur 20 mm avec un angle de la source ligne à 15° , -c) Cylindre de diamètre 25 mm et de hauteur 40 mm avec un angle de la source ligne à 20° , -d) Cylindre de diamètre et de hauteur 20 mm avec un angle de la source ligne à 20° .

La variation de l'angle d'inclinaison de la source ligne et de sa position permet de modifier rapidement et simplement le trajet principal de propagation des ondes de surface. Nous pouvons ainsi optimiser les zones contrôlées pour chaque géométrie.

Nous avons étudié théoriquement la propagation de type hélicoïdale, il nous faut maintenant la confronter à l'épreuve de la réalité expérimentale. Avant toute chose, nous allons donc vérifier que les ondes générées sont bien des ondes de surface hélicoïdales et valider la représentation 2D que nous avons présenté à la Figure IV-3.

II. Validation de l'approche théorique

II.1. Etude de l'amplitude du déplacement en fonction de la hauteur du rouleau

L'une de nos premières expérimentations a consisté à vérifier notre approche théorique de la propagation d'un onde de surface hélicoïdale. Pour effectuer cette vérification, nous évaluons la variation d'amplitude du déplacement normal à la surface du rouleau du au passage d'une onde. La difficulté principale de cet essai vient du fait que l'amplitude relevée dépend de plusieurs facteurs. La puissance du laser impulsif peut fluctuer avec la température et la qualité de la mesure par interférométrie dépend l'énergie lumineuse du laser réfléchi par l'échantillon. Une légère variation de la distance focale au niveau de l'interféromètre peut perturber la mesure. L'utilisation de l'amplitude du déplacement est donc délicate et nécessite de nombreuses précautions. La Figure IV-5 présente les amplitudes de différents signaux relevés le long de l'axe du rouleau.

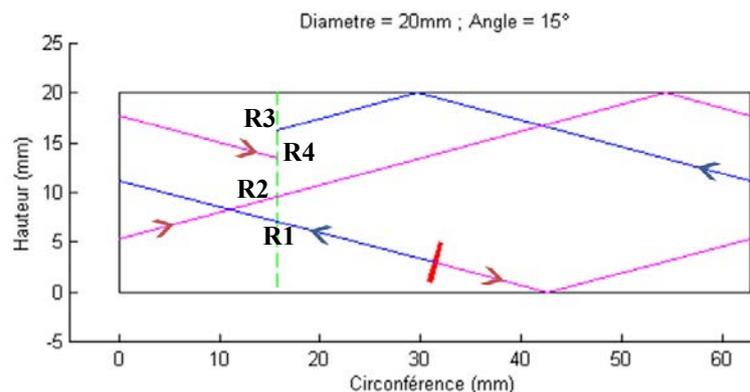


Figure IV-4. Correspondance entre les différents signaux détectés et le chemin de propagation principal des ondes de surface générées.

Les signaux R3bis et R4bis de la Figure IV-5 correspondent à des signaux extrêmement proches de R3 et R4. Ces signaux sont a priori dus à l'effet dispersif de la géométrie, qui provoque un étalement temporel de l'onde de surface.

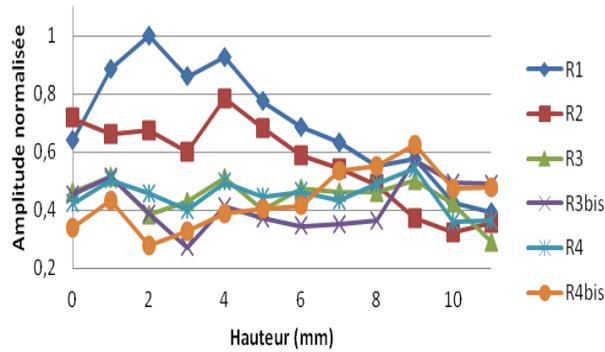


Figure IV-5. Données expérimentales de l'amplitude normalisée par rapport à l'amplitude maximale du déplacement normal à la surface d'un rouleau de diamètre et de hauteur 20 mm, en fonction de la hauteur de détection de l'interféromètre.

Ce graphique (Figure IV-5) montre que l'amplitude du déplacement des ondes n'est pas constante mais qu'elle varie en fonction de la position du point de mesure selon la hauteur. Nous observons que le signal R1 montre la variation la plus significative. Les amplitudes maximales correspondent aux trajets principaux théoriques estimés à l'aide du script développé sous Matlab et basé sur les lois de Snell-Descartes. Cet essai permet de montrer que les ondes générées se propagent sur l'ensemble du rouleau. De plus si nous nous concentrons sur le signal R1, qui correspond au premier signal acquis par l'interféromètre et qui devrait logiquement correspondre à l'onde de surface générée vers la gauche de la source ligne tracer par notre script, nous constatons que ces deux informations sont cohérentes et appuient notre approche.

Une autre manière de confirmer la nature hélicoïdale de l'onde de surface générée par une source ligne inclinée consiste à observer sur le même graphique les signaux correspondant à une onde particulière acquis à différentes hauteurs (Figure IV-6).

Un décalage du signal dans le temps est observé. Il est dû à une différence de temps de vol qui a pour origine la variation de distance entre le point de détection et la zone de génération. À noter que cette variation est possiblement accentuée par la différence de vitesses des ondes de surface. En effet entre deux points de mesure la trajectoire de l'onde varie de quelques degrés ce qui modifie la vitesse de propagation de l'onde de surface comme nous avons pu le montrer au chapitre II par le calcul des courbes de dispersion.

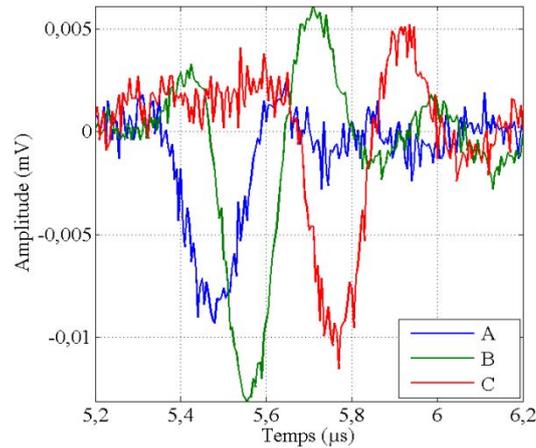


Figure IV-6. Signaux associés à la première onde de surface détectée par l'interféromètre (R1) pour différentes hauteurs d'acquisition sur un rouleau de diamètre et de hauteur 20 mm.

Le signal A correspond à la hauteur de référence. Le signal B est relevé deux millimètres plus haut que la hauteur de référence. Enfin le signal C est acquis quatre millimètres au dessus de la hauteur. Bien qu'ayant parcouru une distance moins grande que l'onde de surface du signal B, l'onde du signal A possède une amplitude liée au déplacement moins élevée. Cette observation signifie que l'atténuation du au matériau est bien plus faible que l'effet induit par le diagramme de directivité de la source ligne. L'amplitude crête à crête maximale du déplacement du à l'onde de surface sur le signal B est plus élevée que celle du signal C. Le trajet principal de l'onde de surface hélicoïdale pour cet angle de génération, se trouve autour de 2 mm au dessus de la hauteur de référence.

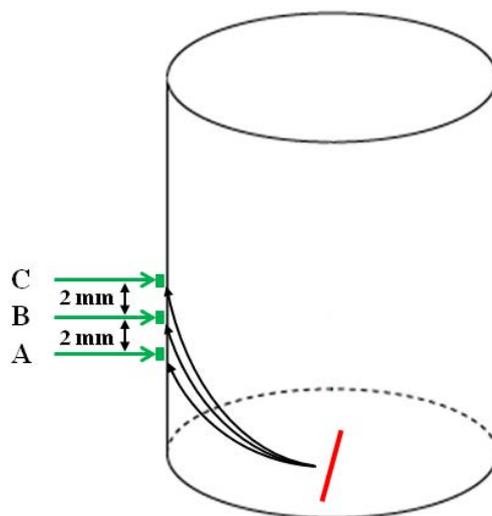


Figure IV-7. Positions en hauteur des différentes mesures présentées à la Figure IV-6.

La validation de la nature hélicoïdale de la propagation est appuyée par un autre essai que nous avons effectué et que nous présentons maintenant.

II.2. Atténuation des ondes de surface par dépôt d'un gel de couplage

Pour ce second essai, nous utilisons du gel échographique que nous déposons sur des zones spécifiques du cylindre. Ce gel provoque la conversion d'une partie des ondes de surface. L'énergie des ondes de surface diminue au fur et à mesure des conversions. Ainsi nous pouvons atténuer les ondes de surface. Cette expérimentation permet d'atténuer localement les ondes ultrasonores.

L'échantillon utilisé est un rouleau en acier possédant un diamètre et une hauteur de 20 mm et sur lequel un défaut est présent. Dans cet essai nous ne nous intéressons pas à l'effet du défaut sur les ondes de surface. La présence de ce défaut n'influe pas sur le phénomène que nous souhaitons mettre en évidence. Nous calculons grâce au script développé le parcours théorique des ondes de surface dans notre configuration afin de pouvoir interpréter les résultats.

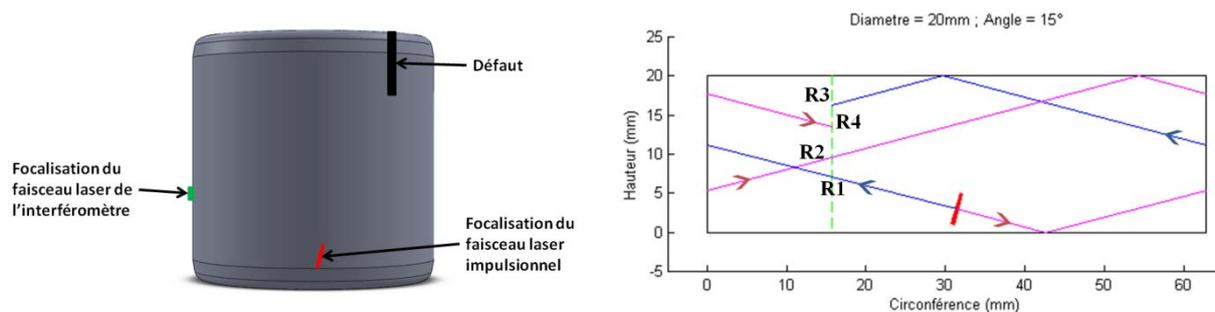


Figure IV-8. Configuration expérimentale de l'essai d'atténuation des ondes de surface par utilisation d'un gel de couplage sur un cylindre en acier de diamètre et de hauteur 20 mm possédant un défaut de type micro-scie.

Le point de détection est fixe en hauteur. Il se situe à environ 6 mm au dessus de la face inférieure du rouleau. Ce rouleau possède un défaut qui est positionné comme illustré sur la Figure IV-8. Cette figure décrit également la propagation théorique qui nous sert à déposer précisément le gel.

Les résultats obtenus sont compilés sur la Figure IV-9. Ils mettent clairement en évidence l'influence du gel sur les différents signaux d'amplitude. En effet, la différence d'amplitude entre le première signal a) et le dernier d) est marquée. Afin de faciliter la

comparaison entre les différents signaux, nous conservons la même échelle sur l'ensemble des graphiques.

Dans un premier temps, nous définissons un signal référence, c'est à dire sans gel, tel que l'on pourrait obtenir lors d'une mesure lambda.

Le deuxième graphique b) est obtenu après avoir déposé du gel uniquement sur les trajets empruntés par les ondes correspondant aux troisième et quatrième pics (R3 et R4), typiquement au niveau du défaut (Figure IV-8). Comme nous le pensions, le signal acquis se caractérise par une atténuation notable des pics R3 et R4.

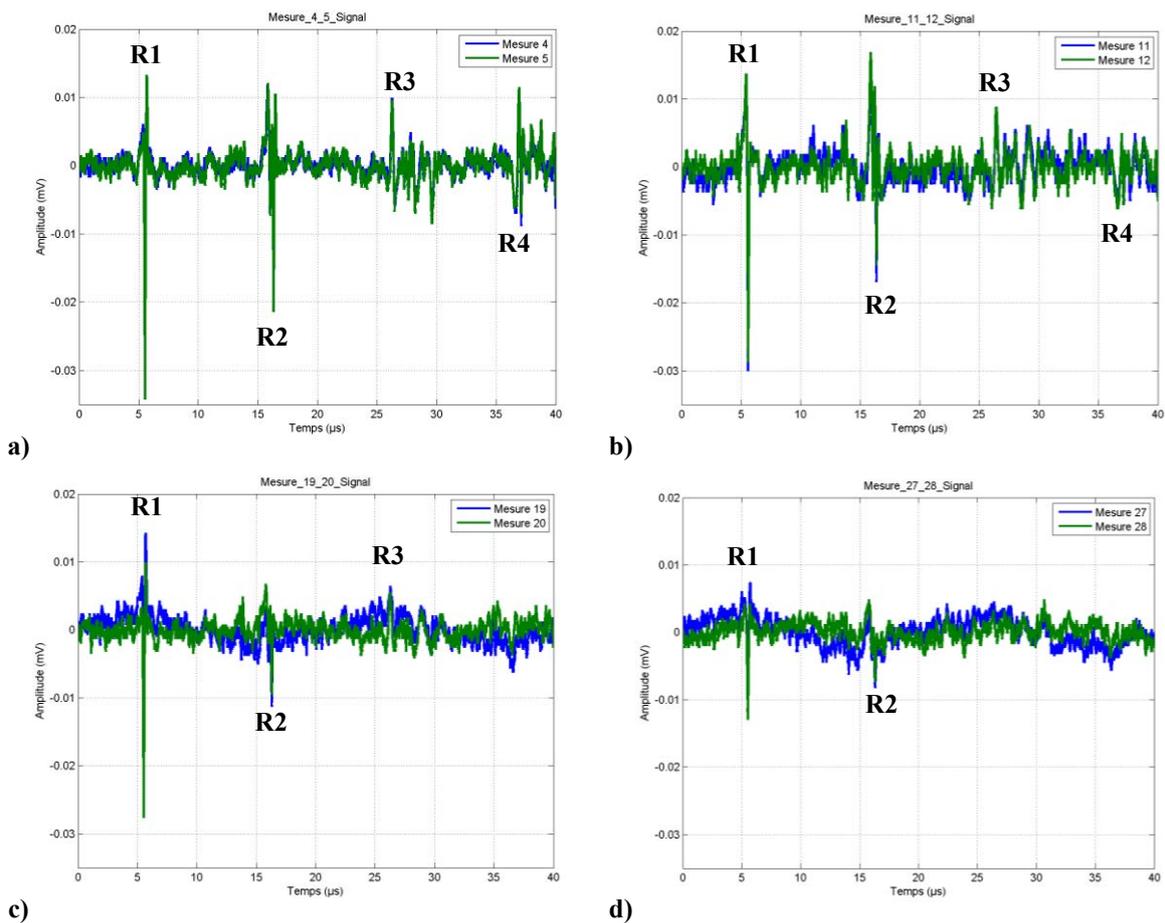


Figure IV-9. Résultats expérimentaux de l'essai d'atténuation des ondes de surface par gel de couplage sur un rouleau en acier de diamètre et de hauteur 20 mm. -a) sans gel, -b) avec gel sur R3 et R4, -c) avec gel sur R2, R3 et R4, -d) avec gel sur R1, R2, R3 et R4.

Sur le troisième graphique c), la quantité de gel sur le trajet de R3 et R4 est augmentée et nous ajoutons du gel au niveau du trajet de l'onde correspondant au deuxième signal (R2). Visuellement le gel couvre une large bande présente sur toute la hauteur sur rouleau et située à droite de la source ligne. Nous observons une très forte atténuation de R3 et R4, voir

une disparition compte tenu du rapport signal sur bruit et une atténuation conséquente du signal R2.

Pour la dernière mesure représentée sur le quatrième graphique d), le rouleau possède du gel sur la quasi-totalité de sa circonférence, y compris sur le trajet de l'onde provoquant le signal R1. Les ondes de surface sont donc toutes affectées avec d'autant plus d'intensité que la distance parcourue est grande. R1 parcourt une distance faible, l'atténuation est donc moins marquée que sur R2 qui se propage sur une distance plus longue.

La mesure de l'amplitude du déplacement sur toute la hauteur du rouleau et l'essai avec le gel absorbant prouvent que les ondes générées sont bien des ondes de surface hélicoïdales décrites dans le chapitre II. Cette confirmation permet de passer à l'étape suivante, la détection de défauts.

III. Détection de défauts

III.1. Défaut naturel de type "repli de laminage"

a) Description des essais et définition de la référence

Les échantillons utilisés pour cette campagne d'essais sont caractérisés par un diamètre de 6 mm, une hauteur de 7,5 mm et une matière d'acier particulière, le 100C6, utilisée pour la fabrication de certains rouleaux. Nous sélectionnons quatre rouleaux, deux sains sur lesquels aucun défaut n'a été détecté par les moyens de contrôle conventionnels et deux rouleaux sur lesquels des replis de laminage (fissures) ont été identifiés et mis en évidence par magnétoscopie.

La Figure IV-10 présente le trajet principal théorique des ondes de surface hélicoïdales pour une source ligne inclinée de 15° dont le centre se situe 3 mm au-dessus de la face inférieure (base du cylindre). La source ligne mesure entre 3 et 4 mm en longueur.

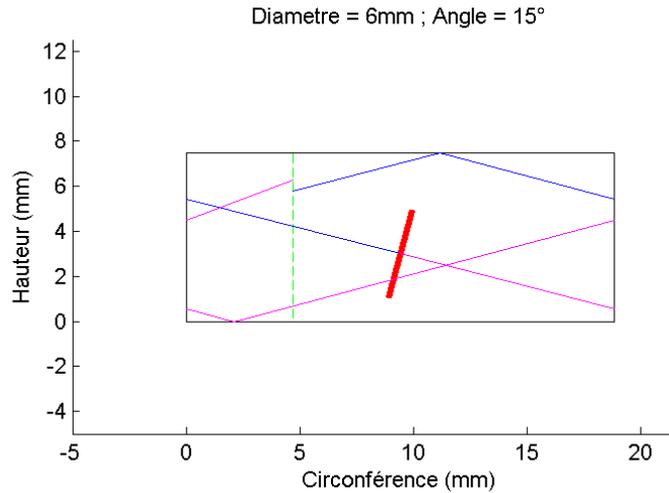


Figure IV-10. Trajet principal des ondes de surface hélicoïdales obtenu pour un angle d'inclinaison de la source ligne de 15° sur un rouleau en acier possédant un diamètre de 6 mm et une hauteur de 7,5 mm.

La mesure des déplacements induits par le passage des ondes s'effectue à quatre hauteurs différentes, la hauteur 0 qui nous sert de référence et représente le point le plus bas que l'on puisse mesurer techniquement à cause de la géométrie des rouleaux et des conditions de réflexion du faisceau laser de l'interféromètre. Les hauteurs de mesure sont exprimées en fonction de cette hauteur de référence. La hauteur + 2 mm correspond à une position de mesure située 2 mm au-dessus de la référence. Nous avons donc quatre hauteurs différentes : hauteur 0, hauteur + 2 mm, hauteur + 4 mm et hauteur + 6 mm. La taille du rouleau (7,5 mm) ne nous permet pas d'effectuer une mesure supplémentaire.

La génération des ondes est assurée par une source ligne inclinée d'environ 15° par rapport à l'axe du rouleau. Dans cette configuration, nous obtenons une vitesse théorique des ondes de surface possédant une fréquence de 2,5 MHz de 3270 m.s^{-1} .

La Figure IV-11 présente les signaux obtenus pour un rouleau sain en fonction de la hauteur de détection. On remarque immédiatement d'importantes variations pour chaque hauteur. Le signal d'amplitude situé autour des 2 μs est imperceptible à la hauteur 0 mais clairement visible sur les autres, avec un maximum d'amplitude pour la hauteur + 4 mm.

Nous observons également que l'effet dispersif est très marqué pour ce rouleau, ce qui était prévu par notre approche théorique étant donné la faible taille du diamètre par rapport aux longueurs d'onde acoustiques pour les fréquences considérées.

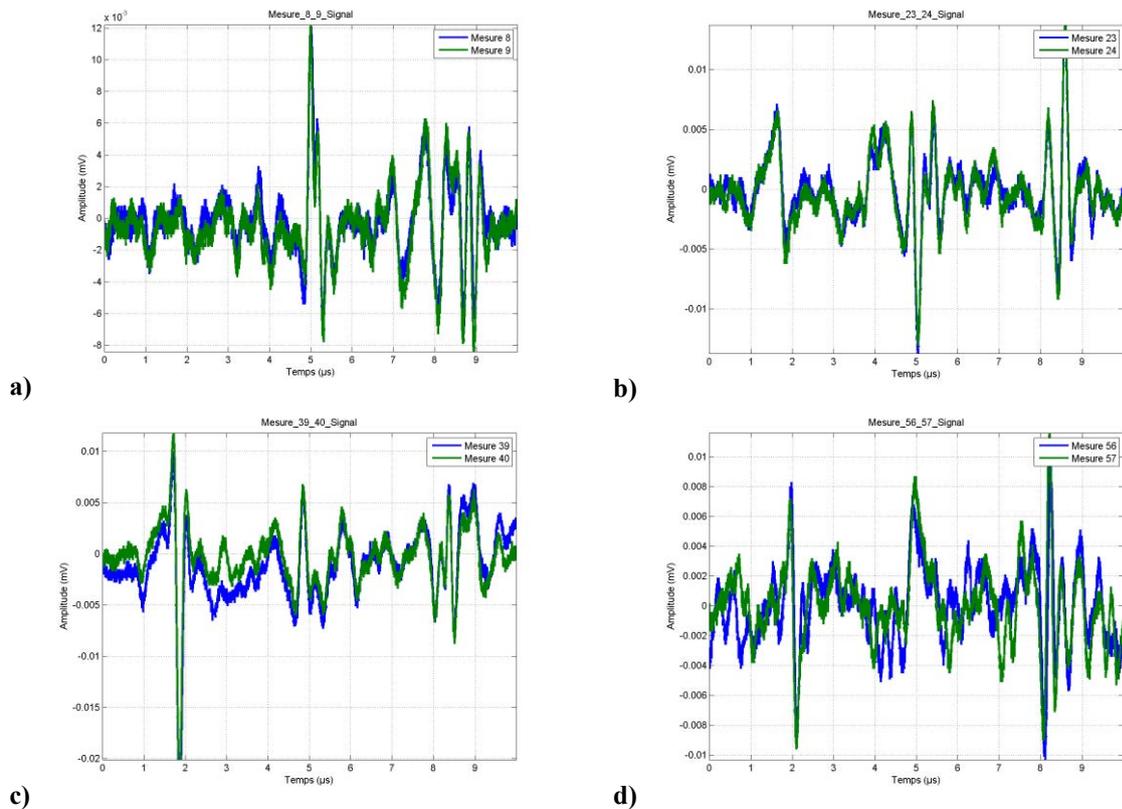


Figure IV-11. Détection des ondes hélicoïdales se propageant sur un rouleau sain en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5 mm à différentes hauteurs. -a) hauteur 0, -b) hauteur + 2 mm, -c) hauteur + 4 mm, -d) hauteur + 6 mm.

Les figures suivantes regroupent des signaux provenant de quatre configurations différentes avec quatre rouleaux différents. Les rouleaux A et B sont des rouleaux sains et sans défaut. Ils ont été contrôlés par des équipements validés pour la production de rouleaux de qualité aéronautique. Les rouleaux C et D ont été rejetés par une méthode de contrôle non destructif conventionnelle (magnétoscopie) à cause de la présence d'une fissure de laminage. Pour rappel, ce type de défauts traverse le rouleau sur toute sa hauteur, est très fin et, bien qu'étant débouchant, ne se voit pas à l'œil nu.

b) Analyse du défaut à la hauteur 0

Les rouleaux à défaut sont placés aléatoirement sur le banc d'essai. Nous ne connaissons donc pas la position du défaut par rapport à la génération ou à la détection. L'enjeu est alors de prouver qu'il est possible de détecter un défaut naturel important sans maîtriser la position de celui-ci, comme on le ferait pour un rouleau classique lors d'un contrôle en usine.

En connaissant approximativement le trajet de cette onde particulière, il est possible d'estimer approximativement la position du défaut. En analysant le graphique basé sur les lois

de Snell-Descartes, nous savons que dans ce cas précis le défaut se situe au niveau de la zone 2 sur la figure ci-dessus (Figure IV-12).

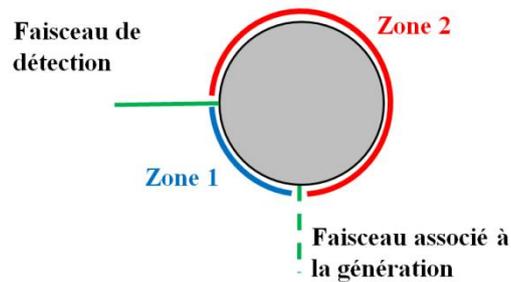


Figure IV-12. Identification des zones de présence du défaut (Vue de dessus du rouleau).

La Figure IV-13 regroupe les signaux acquis à la hauteur de référence, hauteur 0. Nous constatons immédiatement que le signal situé autour de 5 μ s du rouleau C ne possède pas la même fréquence que les signaux localisés également autour de 5 μ s des rouleaux A et B. Le défaut a interagi avec l'onde de surface et l'a modifiée [10] [11] [12]. Dans les prochains essais, nous nous intéresserons plus en détail à la variation fréquentielle entre différents signaux.

Les signaux acquis sur le rouleau D nous poussent à penser que le défaut se situe dans la zone 1, pour deux raisons. Premièrement, le signal à 5 μ s n'est pas ou peu modifié. Deuxièmement, le signal entre 7 et 10 μ s est fortement atténué, ce qui pourrait traduire la présence du défaut. En observant le graphique basé sur les lois de Snell-Descartes et en considérant l'absence de modification du signal à 5 μ s et la variation du signal localisé entre 7 et 10 μ s par rapport aux signaux de référence, nous concluons que le défaut se situe au niveau de la zone 1 sur la Figure IV-12.

Sans analyse fréquentielle, il est déjà possible d'identifier clairement des variations dans les signaux relevés entre les différents rouleaux.

L'analyse de signaux provenant de divers rouleaux à une seule hauteur nous permet déjà de détecter un défaut de type fissure de laminage et même de connaître approximativement sa position. Pour le rouleau C le repli se situe au niveau de la zone 2 de la Figure IV-12. Alors que dans le cas du rouleau D, le défaut est localisé dans la zone 1 de cette même figure.

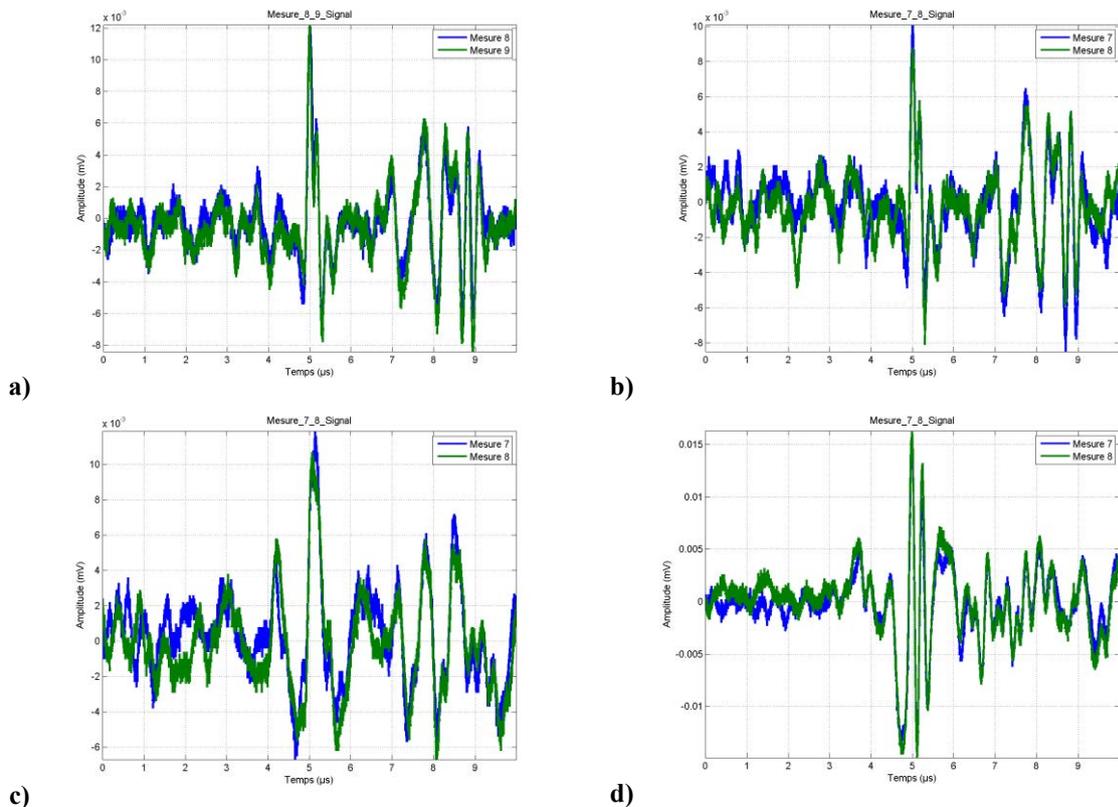


Figure IV-13. Comparatif des signaux détectés à une hauteur 0 sur des rouleaux avec et sans défaut. -a) Rouleau A (Sans défaut), -b) Rouleau B (Sans défaut), -c) Rouleau C (Avec défaut), -d) Rouleau D (Avec défaut). Les échantillons sont des rouleaux en acier possédant un diamètre de 6 mm et une hauteur égale à 7,5mm.

Entre chaque hauteur, les rouleaux ne sont pas déplacés. Le défaut est exactement au même endroit pour les hauteurs 0, + 2, + 4 et + 6. Le défaut du rouleau C sera toujours en zone 2 et le défaut du rouleau D en zone 1.

c) Analyse du défaut à la hauteur + 2 mm

L'analyse des signaux acquis à la hauteur + 2 mm (Figure IV-14) est sensiblement la même que pour la hauteur 0, à ceci près que l'on note l'apparition d'un signal d'amplitude autour de 2 µs sur tous les rouleaux à l'exception du rouleau D, sur lequel cette présence n'est pas claire. Les signaux observés sur les graphiques de la Figure IV-13 sont également présents sur les graphiques de la Figure IV-14, mais nous constatons que les rapports d'amplitude changent.

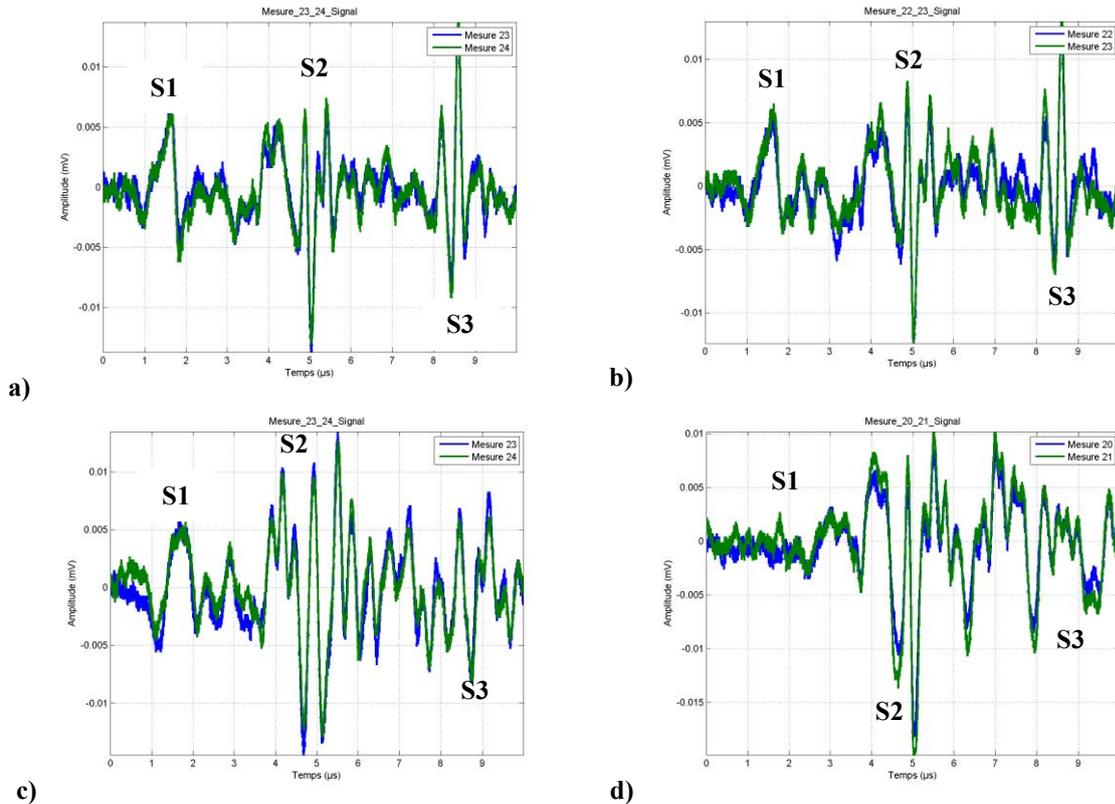


Figure IV-14. Comparatif des signaux détectés à une hauteur + 2 mm sur des rouleaux avec et sans défaut. -a) Rouleau A (Sans défaut), -b) Rouleau B (Sans défaut), -c) Rouleau C (Avec défaut), -d) Rouleau D (Avec défaut). L'échantillon est un rouleau en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5 mm.

L'absence de signal S1 à 2 μs sur le rouleau D pourrait confirmer la présence du défaut en zone 1. Ce signal S1 correspond, d'après la distance parcourue, à l'onde de surface générée à la droite de la source ligne.

d) Analyse du défaut à la hauteur + 4 mm

La Figure IV-15 présente les signaux acquis à la hauteur de détection, hauteur + 4 mm. Cette hauteur de détection permet d'obtenir des signaux de bonne qualité avec des amplitudes maximales bien localisées. Elle est à cet égard idéale pour la détection de défauts. Les deux signaux de référence sont extrêmement proches, alors que les deux signaux venant des rouleaux avec défaut sont strictement différents.

On note un signal S1 de grande intensité, à l'exception du rouleau D. Cette observation confirme la présence du défaut dans la zone 1 de la Figure IV-12. A l'inverse le rouleau C nous donne un signal S1 d'amplitude importante et non modifiée par rapport aux rouleaux A et B, bien que son amplitude crête à crête soit plus basse. Cette non-affectation du signal à 2 μs (S1) valide notre scénario du défaut présent dans la zone 2 de la Figure IV-12.

A la hauteur + 2 mm, nous observons que les signaux d'amplitude S2 autour de 5 μs sont plus importants que ceux localisés entre 1 et 2 μs (S1). A la hauteur + 4 mm, cette observation est inversée. Les signaux S1 situés sont bien plus importants que les pics localisés autour de 5 μs (S2) pour les rouleaux sans défaut, la présence d'un défaut complexifie cette constatation. Cette variation des amplitudes s'expliquent par la directivité des ondes et la propagation de type hélicoïdale. En modifiant la hauteur de mesure, nous rapprochons ou éloignons le point de détection du chemin principal estimé par le script basé sur les lois de Snell-Descartes (Figure IV-8) des ondes de surface.

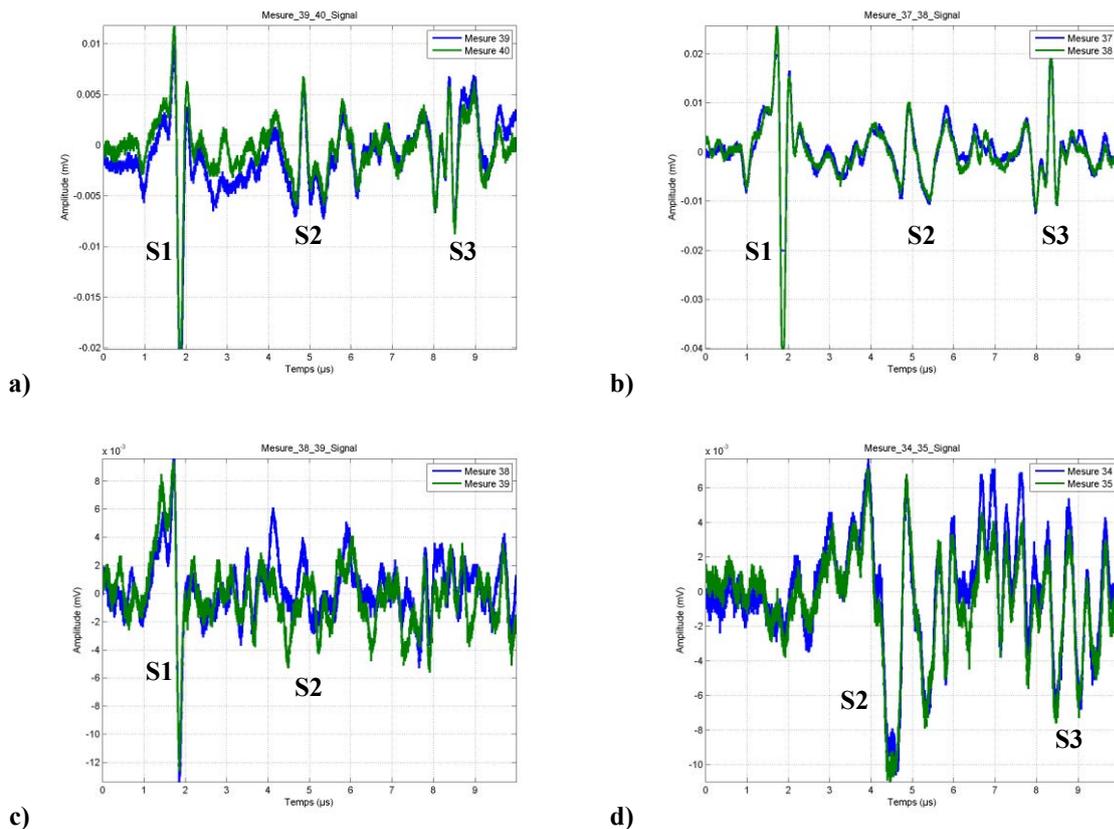


Figure IV-15. Comparatif des signaux détectés à une hauteur + 4 mm sur des rouleaux avec et sans défaut. -a) Rouleau A (Sans défaut), -b) Rouleau B (Sans défaut), -c) Rouleau C (Avec défaut), -d) Rouleau D (Avec défaut). L'échantillon est un rouleau en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5 mm.

Dans le cadre de l'étude d'une nouvelle méthode de contrôle non destructif dédié aux rouleaux, la hauteur + 4 mm peut suffire pour détecter le type de défaut utilisé de manière fiable. Les amplitudes des pics sont marqués et la position de détection permet la détection de plusieurs ondes et donc de défauts [13].

e) Analyse du défaut à la hauteur + 6 mm

Les signaux de la Figure IV-16 sont les plus difficiles à exploiter pour des raisons de géométrie du rouleau. La détection s'effectue près de la face du dessus. Cette proximité ne permet pas une réflexion optimale du faisceau laser de l'interféromètre et peut modifier les ondes de surface. Comme nous le constatons, le rapport signal sur bruit de ces mesures est mauvais.

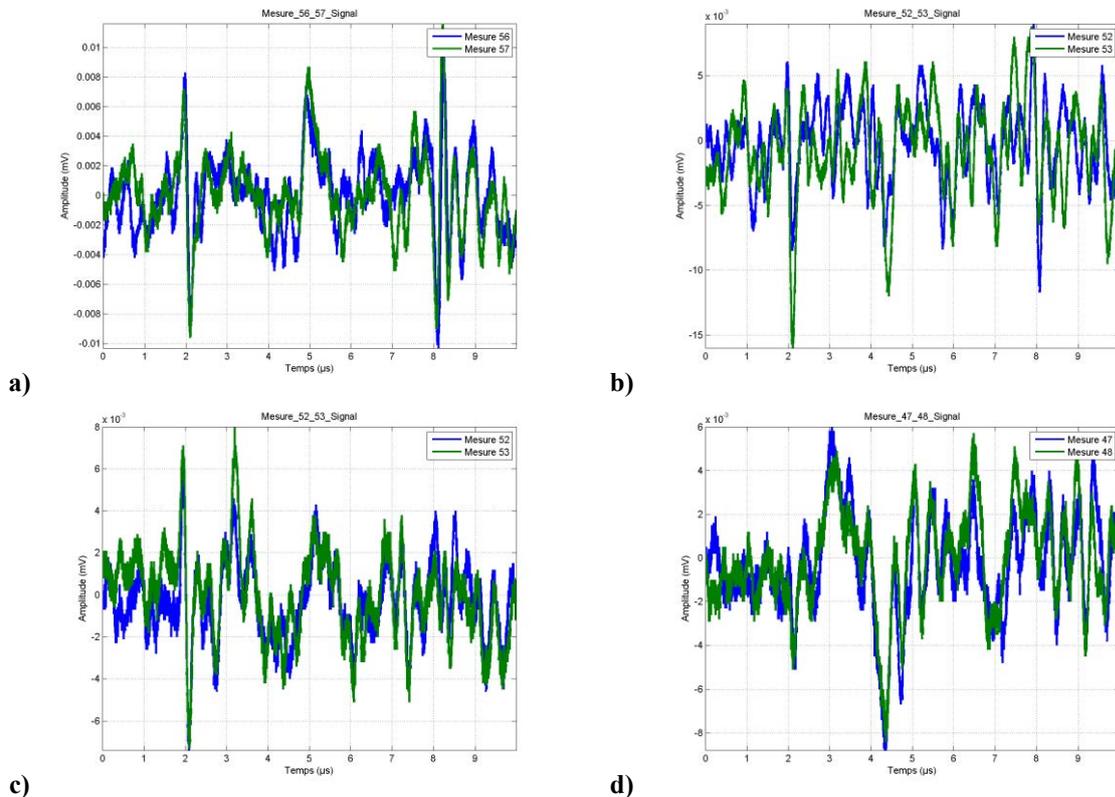


Figure IV-16. Comparatif des signaux détectés à une hauteur + 6 mm sur des rouleaux avec et sans défaut. -a) Rouleau A (sans défaut), -b) Rouleau B (sans défaut), -c) Rouleau C (avec défaut), -d) Rouleau D (avec défaut). L'échantillon est un rouleau en acier de diamètre 6 mm et de hauteur 7,5 mm.

Ces essais ont permis de montrer que la détection d'un défaut naturel de type "repli de laminage" avec une seule mesure, en se servant de la propagation de type hélicoïdale, était possible et ce, sans analyse fréquentielle.

III.2. Défaut artificiel créé à l'aide d'une micro-scie

a) Description

L'avantage de la propagation d'ondes hélicoïdales doit être mis en évidence à l'aide de défaut de plus petites dimensions, ne traversant pas la totalité du rouleau.

Le défaut considéré dans ce paragraphe est artificiel et important. Il a été produit à l'aide d'une micro-scie. Ses dimensions sont de l'ordre de 9 mm en longueur, 300 μm en largeur et 250 μm en profondeur. Dans nos essais, deux configurations sont utilisées avec un positionnement du défaut par rapport à la génération différent, comme représenté sur la Figure IV-17. Contrairement aux essais précédents, la hauteur de détection est fixe.

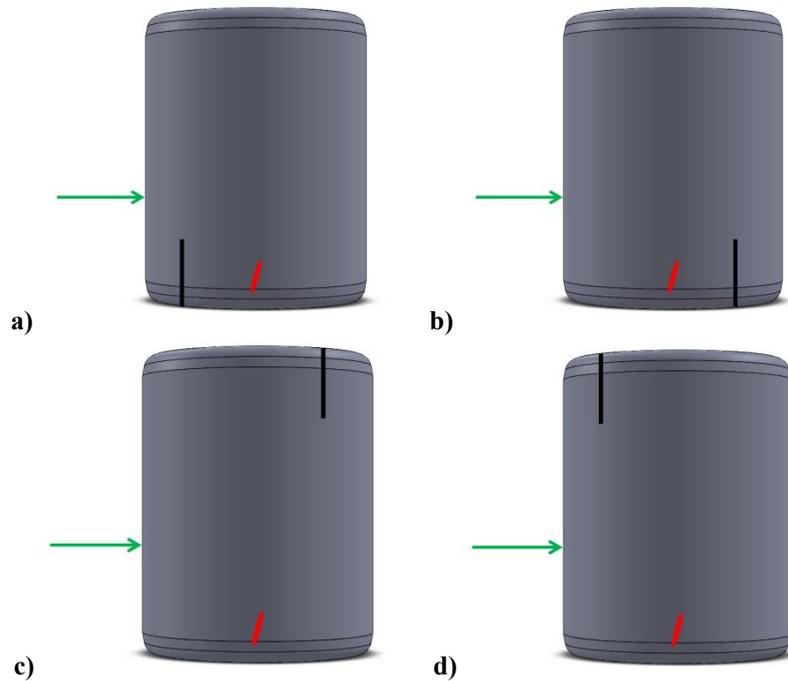


Figure IV-17. Propagation hélicoïdale avec détection de défaut à différentes positions. -a) Défaut en position 1, -b) Défaut en position 2, -c) Défaut en position 3, -d) Défaut en position 4. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

L'échantillon retenu pour cette expérimentation vise à prouver la détectabilité d'un défaut limité pour différentes positions sur un rouleau de 20 mm de haut et de 20 mm de diamètre. Les rayons de raccordement sont de petites dimensions et sont considérés comme négligeables.

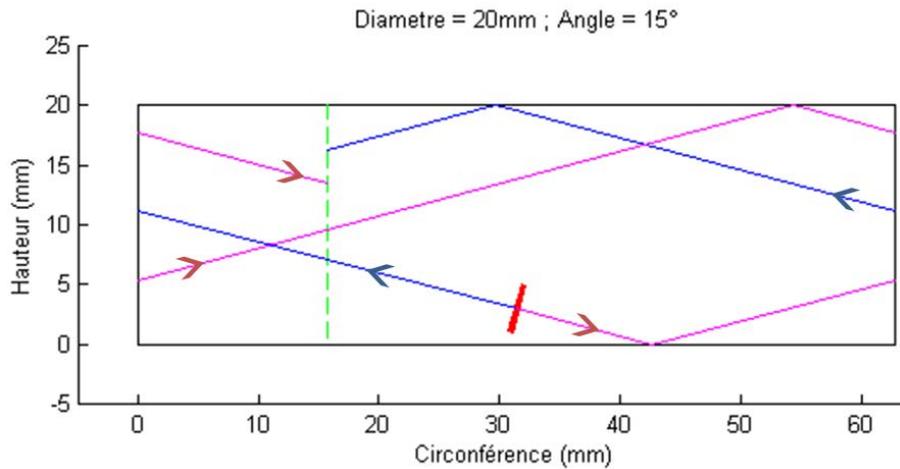


Figure IV-18. Trajets théoriques des ondes de surface générée par une source ligne estimés à partir des lois de Snell-Descartes pour cylindre ayant un diamètre et une hauteur de 20 mm. La source ligne est inclinée de 15° par rapport à l'axe de révolution du cylindre.

L'estimation des trajets théoriques basée sur les lois Snell-Descartes est donnée par la figure ci-dessus (Figure IV-18).

b) Détection d'un défaut en position 1

La Figure IV-19 synthétise les résultats importants de la campagne d'essais menée. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'analyse fréquentielle des signaux détectés afin d'observer les modifications spectrales provoquées par un défaut sur les ondes de surface. Le signal temporel subit deux modifications majeures, par rapport à un signal temporel acquis sur un rouleau sans défaut. Le signal situé autour de 6 μ s voit sa période modifiée. En effet, le défaut a un effet de filtrage sur l'onde de surface le traversant. Les composantes basse fréquence de cette onde pénètrent plus profondément dans le matériau et sont peu sensibles au défaut, elles sont transmises. En revanche, les composantes haute fréquence de l'onde, qui pénètrent moins profondément dans le solide, sont perturbées plus fortement dans leur propagation. De leur point de vue, le défaut représente une rupture brutale d'impédance acoustique, ce qui provoque non pas une transmission mais une réflexion. Le signal détecté à 6 μ s correspond au passage des composantes basse fréquence de l'onde de surface (Figure IV-19-c), ce qui explique que son analyse fréquentielle soit différente de l'analyse fréquentielle de la même onde ne passant pas par le défaut [14].

Les composantes basse fréquence et haute fréquence ne suivent pas le même chemin après la rencontre avec le défaut, il est normal que les composantes haute fréquence ne soient pas acquises au même instant sur le signal temporel. On retrouve les composantes haute

fréquence sur le signal bien plus loin autour de 23 μ s. Ces pics détectés à cet instant n'existent bien évidemment pas sur un signal provenant d'un rouleau sans défaut. Leur présence permet d'identifier facilement et rapidement la présence d'un défaut sur le cylindre, même sans aucune analyse fréquentielle.

Lorsque nous analysons fréquemment ces signaux, nous confirmons bien qu'il ne s'agit que des composantes haute fréquence de l'onde détectée à 6 μ s.

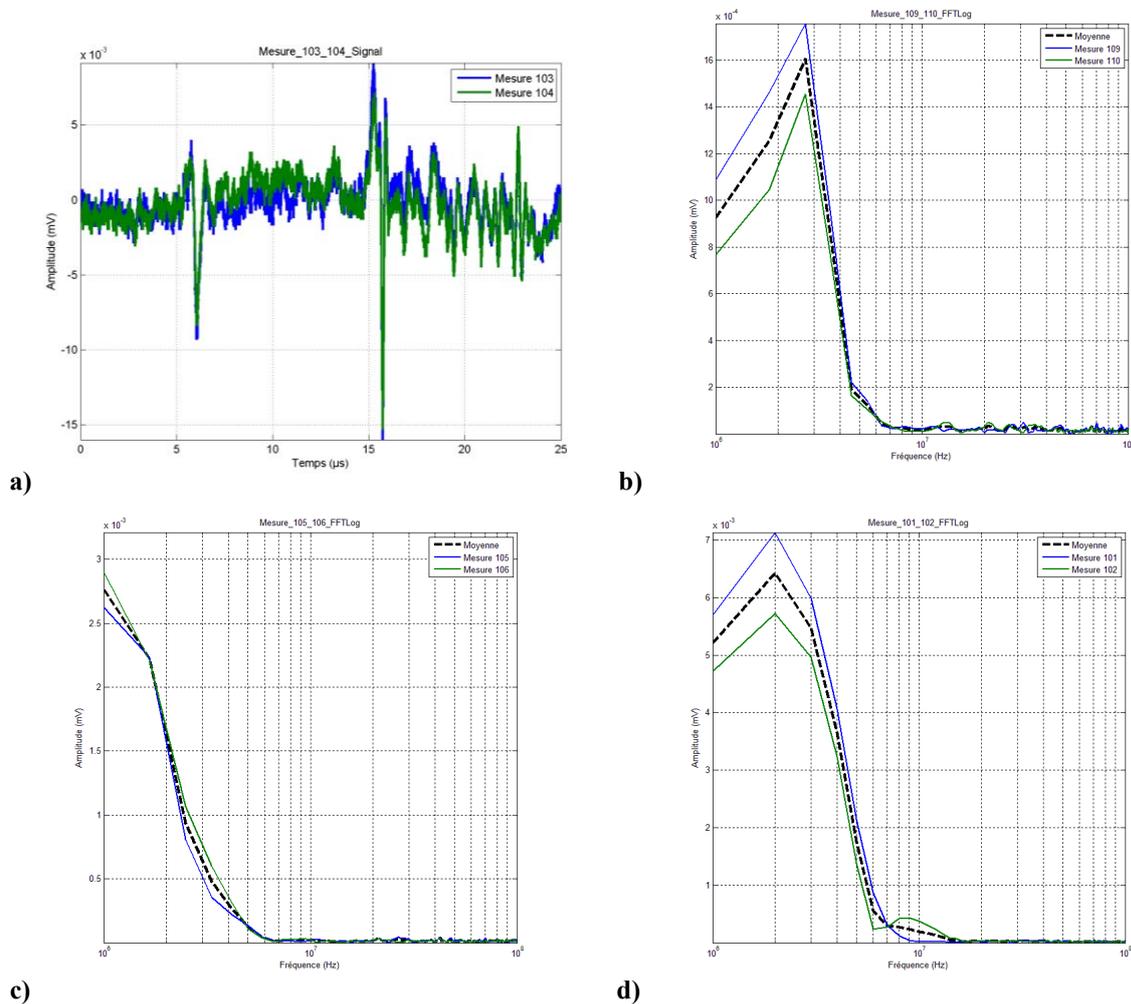


Figure IV-19. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut en position 1. -a) Signal temporel du rouleau avec défaut, -b) Analyse fréquentielle du signal avec défaut sur une plage temporelle allant de 22,5 à 23,5 μ s, -c) Analyse fréquentielle du signal avec défaut sur une plage temporelle allant de 5,5 à 6,7 μ s, -d) Analyse fréquentielle du signal sans défaut sur une plage temporelle allant de 5,5 à 6,5 μ s. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

Cet essai nous montre qu'il est possible de détecter la présence d'un défaut important situé à un endroit connu avec une seule mesure grâce à l'utilisation d'une onde de surface hélicoïdale directe (sans réflexion sur une face).

c) Détection d'un défaut en position 2

La Figure IV-20 met en regard un signal provenant d'un rouleau sain avec un rouleau sur lequel un défaut est présent en position (Figure IV-17). Pour cette position du défaut, nous utilisons l'onde provenant de la ligne source et se propageant vers la droite (droite magenta de la Figure IV-18). Nous constatons par ailleurs que d'après le tracé des chemins de propagation, cette onde se réfléchit sur la face inférieure du rouleau. Nous immédiatement constatons l'apparition d'un signal haute fréquence sur le rouleau à défaut.

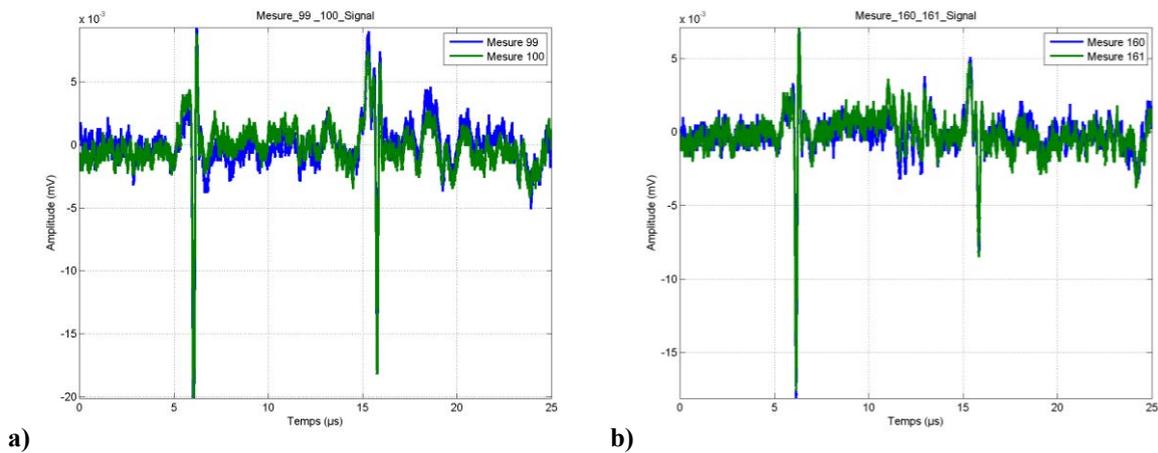


Figure IV-20. Apparition d'un signal haute fréquence et modification du signal principal. -a) Rouleau sain, -b) Rouleau avec défaut. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

La figure ci-dessous (Figure IV-21) présente les analyses spectrales obtenus pour les différents signaux capables de mettre en évidence la présence du défaut.

Pour cette position du défaut, nous utilisons l'onde provenant de la ligne source et se propageant vers la droite (droite magenta de la Figure IV-18). Nous constatons par ailleurs que d'après le tracé des chemins de propagation, cette onde se réfléchit sur la face inférieure du rouleau. La disposition du défaut par rapport à la génération et la détection fait que les composantes fréquentielles réfléchies par le défaut arrivent avant les composantes fréquentielles transmises. Nous observons que les composantes haute fréquence réfléchies par le défaut se localisent autour de 13 µs alors que les composantes basse fréquence transmises par le défaut et se réfléchissant sur la face inférieure arrivent peu après 15 µs.

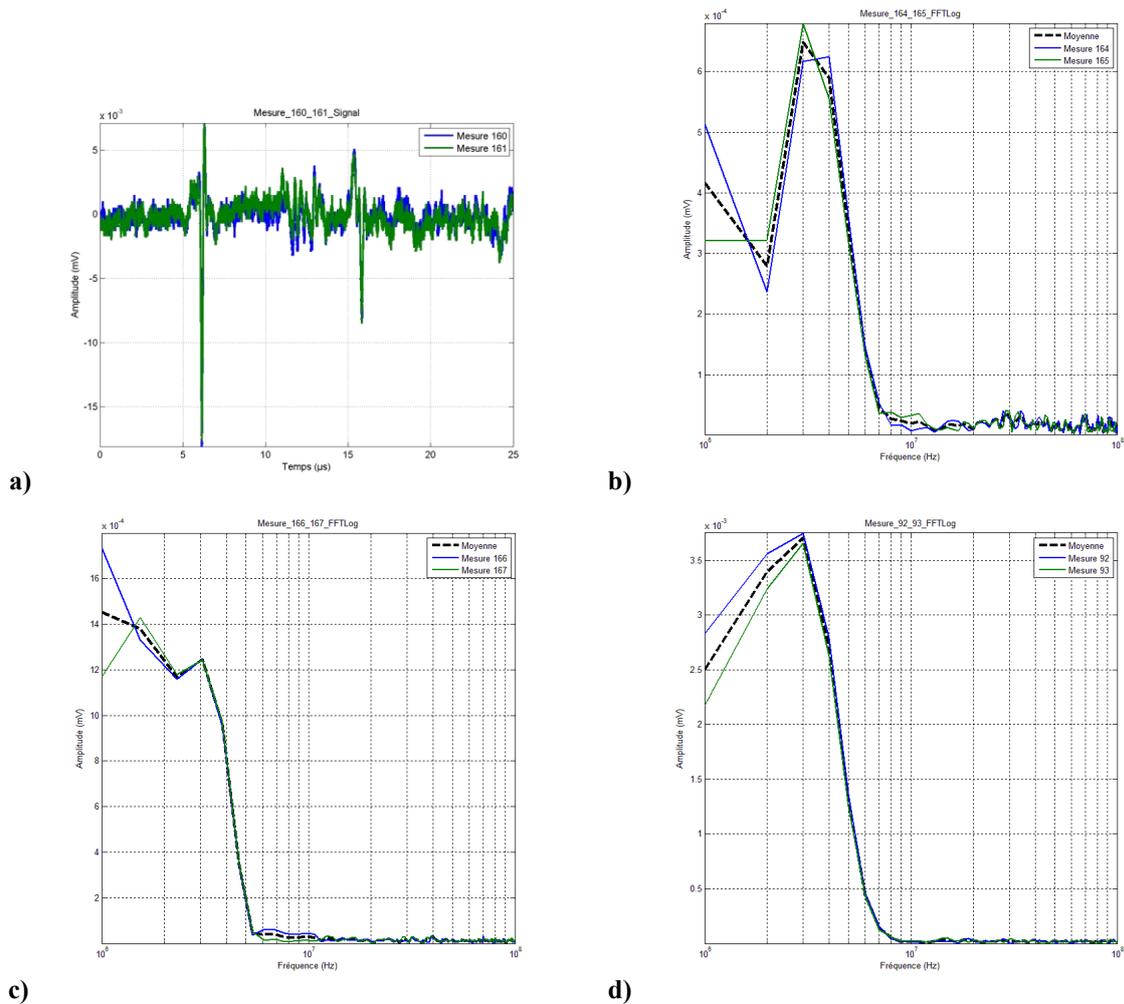


Figure IV-21. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut en position 2. -a) Signal temporel du rouleau avec défaut, -b) Analyse fréquentielle du signal avec défaut sur une plage temporelle allant de 12,5 à 13,5 μ s, -c) Analyse fréquentielle du signal avec défaut sur une plage temporelle allant de 15,2 à 16,2 μ s, -d) Analyse fréquentielle du signal sans défaut sur une plage temporelle allant de 15,3 à 16,3 μ s. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

d) Détection d'un défaut en position 3

La position 3 du défaut (Figure IV-17) est éloignée des points de détection et de génération. Si nous utilisons une propagation de type circonférentielle configurée pour la détection des défauts en position 1 et 2, un défaut situé en position 3 ne pourrait pas être détecté sans modification de la configuration. Nous devrions déplacer l'échantillon par rapport à la source de génération et au point de détection et donc effectuer une nouvelle mesure.

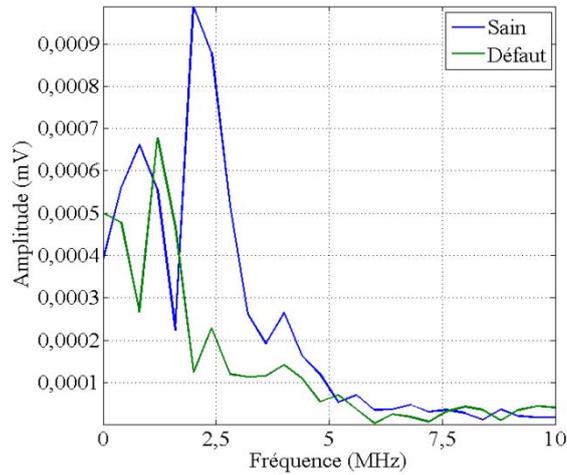


Figure IV-22. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut en position 3, à partir d'un signal détecté entre 37,5 et 40 μ s. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

Les pics d'amplitude étudiés précédemment pour la détection du défaut en position 1 et en position 2 ne sont pas affectés par le défaut en position 3. Il est nécessaire de récupérer cette information sur un autre signal correspondant à une onde dont le trajet passe par le défaut. Ce pic se trouve entre 37,5 et 40 μ s dans notre essai. Le spectre fréquentiel de la "Mesure 86" de la Figure IV-22 sur l'intervalle [37,5 μ s ; 40 μ s] est acquis sur un rouleau sain. Celui de la "Mesure 127" est relevé sur le rouleau avec défaut en position 3. Nous constatons que l'effet du défaut est clairement identifiable.

e) Détection d'un défaut en position 4

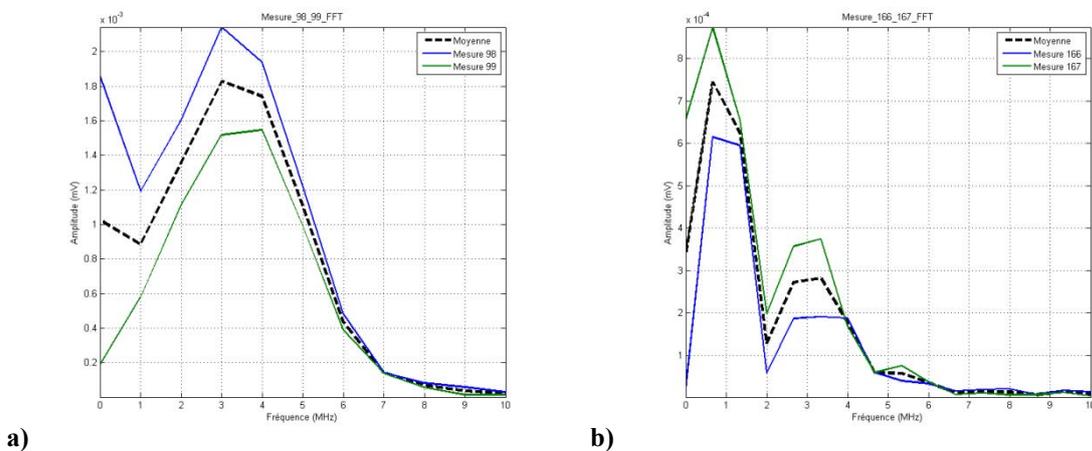


Figure IV-23. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut en position 4, à partir d'un pic détecté entre 49 et 51 μ s. -a) FFT du signal sans défaut, -b) FFT du signal avec défaut. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'une micro-scie.

La dernière position du défaut définie sur la Figure IV-17 est étudiée également. Les résultats sont tout autant concluant (Figure IV-23). Sur l'intervalle temporel [49 μ s ; 51 μ s], nous détectons une onde ayant interagit avec le défaut.

III.3. Défaut artificiel créé par ablation avec un laser de marquage

Comme nous l'avons vu, nous possédons des échantillons présentant des défauts de plus petites dimensions créés à l'aide d'un laser de marquage. Nous utilisons ce type de défaut afin d'évaluer les limites de la méthode proposée.

a) Défaut créé sur un rouleau en acier

Dans un premier temps, nous considérons un rouleau en acier de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel a été créé un défaut possédant une profondeur de 40 μ m.

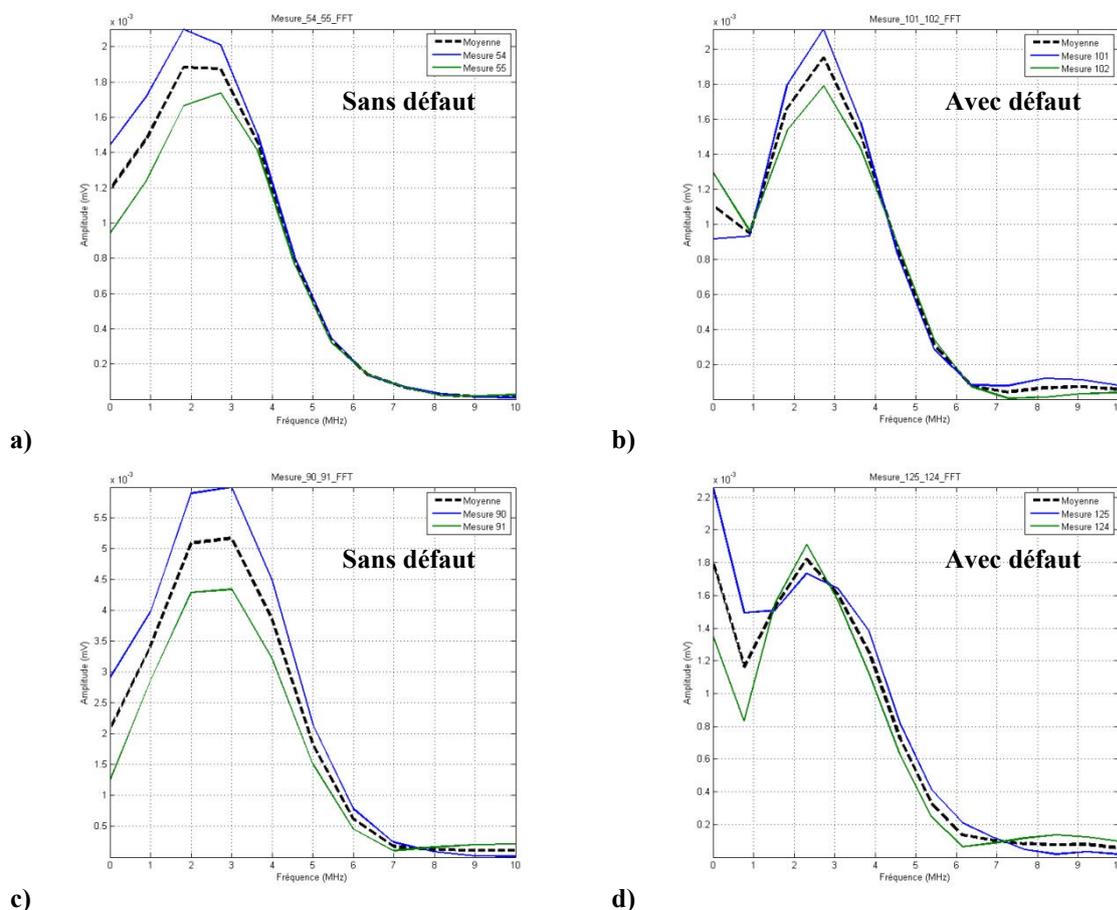


Figure IV-24. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut laser, à partir d'un pic détecté entre 5,5 et 7 μ s. -a) FFT du signal sans défaut à une hauteur + 5 mm, -b) FFT du signal avec défaut à une hauteur + 5 mm, -c) FFT du signal sans défaut à une hauteur + 6 mm, -d) FFT du signal avec défaut à une hauteur + 6 mm. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 20 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'un laser de marquage dont la profondeur est de l'ordre de 40 μ m.

La Figure IV-24 présente les spectres des signaux temporels acquis pour différentes hauteurs avec et sans défaut. Le défaut est placé de façon idéale pour la détection, sur le trajet génération / détection. Nous constatons un effet sur les spectres bien moins marqué que précédemment lorsque nous utilisons un défaut de type "micro-scie".

Lorsque le défaut est situé dans une autre position moins idéale, par exemple derrière le point de focalisation du faisceau de l'interféromètre, la détection est impossible. Le rapport signal sur bruit n'est pas suffisamment bon pour détecter les composantes haute fréquence réfléchies par le défaut.

a) Défaut créé sur un rouleau en céramique

Dans un second temps, nous nous intéressons au cas des rouleaux cylindriques en céramique sur l'un desquels nous avons généré un défaut par laser. Les synthèses des résultats sont présentés sur la figure ci-dessous (Figure IV-25).

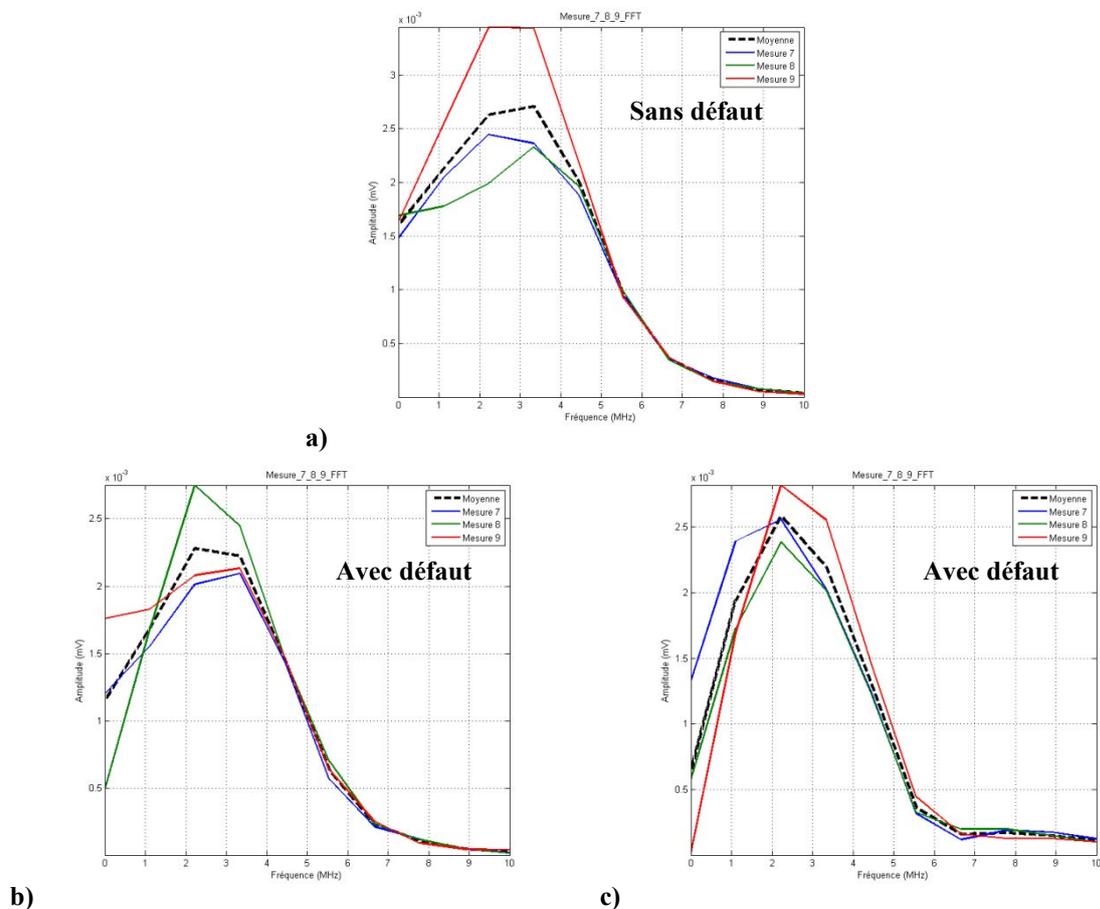


Figure IV-25. Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour un défaut laser, à partir du premier pic détecté avec un point de mesure situé à + 6 mm. -a) FFT du signal sans défaut, -b) FFT du signal avec défaut, -c) FFT du signal avec défaut. L'échantillon est un rouleau cylindrique en céramique de diamètre et de hauteur 12 mm sur lequel un défaut a été créé à l'aide d'un laser de marquage.

Comme pour l'analyse précédente sur un défaut de type laser sur un rouleau acier, la détection d'un défaut de petites dimensions par notre méthode sur la céramique est délicate pour la plage de fréquences générée.

La seule différence entre les essais sur défaut de type "micro-scie" et les essais sur défaut de type "laser" se situe au niveau de la dimension des défauts. L'onde de Rayleigh générée possède un spectre fréquentiel limité en haute fréquence. Cette caractéristique nous limite en termes de détection. Un défaut trop petit ne pourra pas être physiquement détecté [15]. Elargir la bande passante pourrait théoriquement nous permettre de détecter plus facilement les défauts de petites dimensions [16]. Une autre amélioration possible consisterait à améliorer le rapport signal sur bruit, en augmentant la densité de puissance du laser, en moyennant sur un nombre de tirs important ou en améliorant la détection.

III.4. Défaut naturel de type "brûlure"

Une brûlure est fondamentalement différente des défauts que nous avons analysés jusqu'ici. Une brûlure ne provoque pas une rupture de continuité dans la matière. La matière est modifiée en elle-même. La brûlure est engendrée par une élévation de température qui modifie la structure du matériau et ses propriétés mécaniques [17].

Les ondes utilisant le matériau comme support, nous souhaitons étudier l'effet d'une brûlure sur le déplacement normal à la surface induit par le passage des ondes ultrasonores.

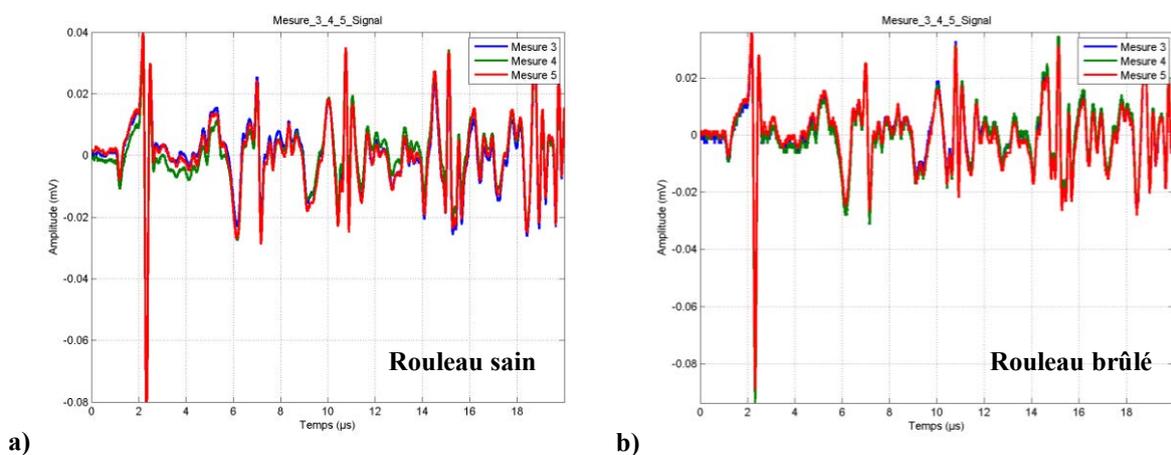


Figure IV-26. Signaux temporels acquis à une hauteur + 6 mm avec positionnement aléatoire. -a) Sans défaut, -b) Avec défaut. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 8 mm sur lequel une brûlure a été détectée.

La Figure IV-26 rassemble deux signaux différents, dont un correspond à un rouleau sans défaut et l'autre à un rouleau sur lequel des brûlures sont présentes. Ces deux rouleaux sont positionnés de manière aléatoire sans tenir compte du défaut. La brûlure est importante et répartie sur une large surface du rouleau.

Nous ne notons pas de différences importantes au niveau des temps d'apparition des signaux. Ils sont a priori identiques. Afin de nous en assurer, nous analysons fréquemment différents pics majeurs.

Sur la Figure IV-27, les spectres du premier pic détecté, propagation directe entre la génération et la détection suivant une trajectoire hélicoïdale, sont tracés pour le rouleau sans défaut et celui avec la brûlure.

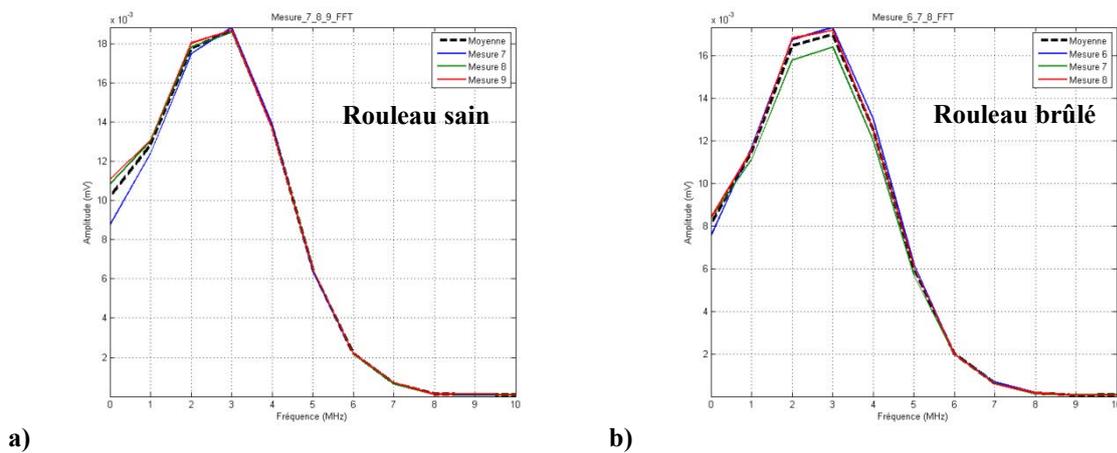


Figure IV-27. Spectres du pic situé à 2,3 μ s à une hauteur 0 avec positionnement aléatoire. -a) Sans défaut 1, -b) Avec défaut. L'échantillon est un rouleau de diamètre et de hauteur 8 mm sur lequel une brûlure a été détectée.

Les spectres obtenus ne montrent aucune variation des composantes fréquentielles de l'onde de surface. Etant donné que nous avons placé le rouleau aléatoirement et que l'onde sélectionnée est une onde directe, il est possible que l'onde ne traverse pas de zone brûlée. Toutefois, la répartition de la brûlure sur le rouleau rend peu probable cette option. Enfin pour confirmer notre conclusion sur la non détection d'une brûlure, nous analysons de manière analogue un autre signal localisé plus loin dans le temps, et qui a donc parcouru une portion plus importante du rouleau. D'après nos modèles, l'onde provoquant le pic situé autour de 15 μ s a effectué plus d'un tour et a parcouru le rouleau sur toute sa hauteur. Les spectres obtenus sont présentés ci-dessous (Figure IV-28).

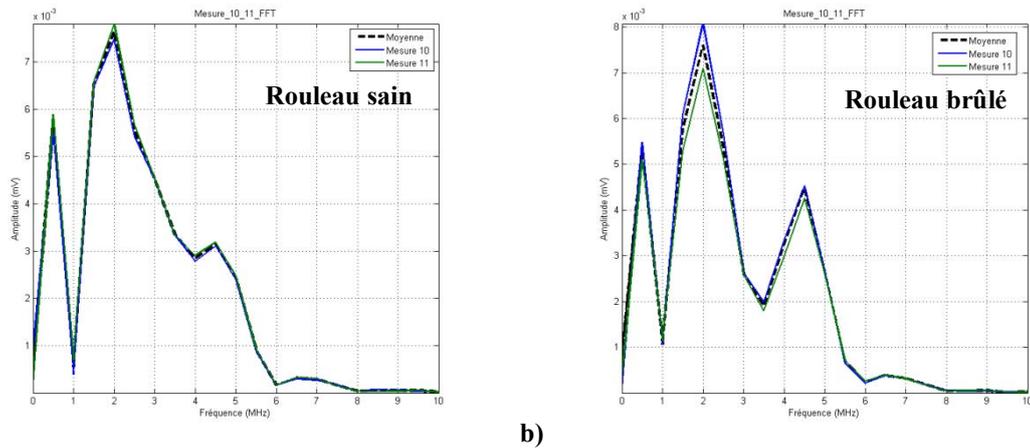


Figure IV-28. Spectres du pic situé autour de 15 μ s avec positionnement aléatoire. -a) Sans défaut, -b) Avec défaut. L'échantillon est un rouleau cylindrique de diamètre et de hauteur 8 mm sur lequel une brûlure a été détectée.

A l'image des spectres précédents, les deux spectres tracés sont extrêmement proches et ne permettent pas de mettre en évidence de façon claire l'influence d'une brûlure sur un rouleau en acier.

La modification structurale de l'acier ayant subi une brûlure ne semble pas affecter les ondes considérées ou insuffisamment pour une détection fiable et sans équivoque.

IV. Etude de l'influence d'une légère variation géométrique et de la nuance de l'acier sur les signaux

IV.1. Influence d'une variation de diamètre

L'influence du diamètre est évidente de façon générale dans nos essais. La vitesse étant constante pour une fréquence donnée et la distance pouvant être connue, à configuration expérimentale identique, les temps d'arrivée des ondes de surface au point de détection doivent être identiques entre plusieurs rouleaux similaires.

Nous nous sommes procurés deux paires de rouleaux géométriquement très proches mais avec une légère variation de diamètre. La première paire sera désignée A (rouleaux A1 et A2) et la seconde B (rouleaux B1 et B2). L'évaluation de leurs diamètres est effectuée sur dix mesures à l'aide d'un palpeur en prenant soin de tourner les rouleaux sur eux mêmes afin d'obtenir une moyenne représentative de l'ensemble du rouleau. Les moyennes de ces mesures nous donnent pour les rouleaux A1 et A2 un diamètre de 8,02 mm et de 8,07 mm pour les

rouleaux B1 et B2. La Figure IV-29 illustre les signaux obtenus à configuration identique pour ces différents rouleaux.

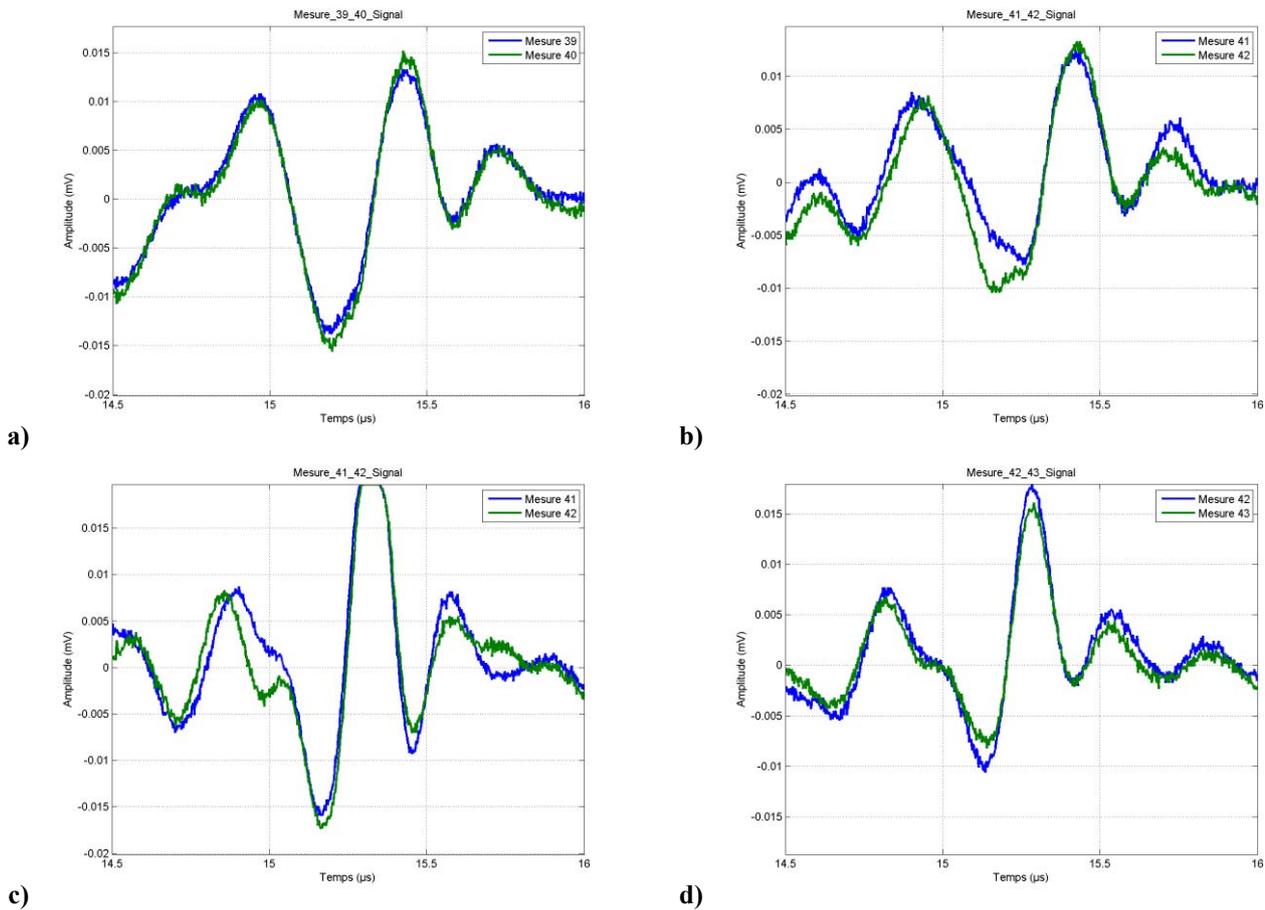


Figure IV-29. Signaux temporels acquis à une hauteur + 6 mm. -a) Rouleau A1, -b) Rouleau A2, -c) Rouleau B1, -d) Rouleau B2. *Rouleaux Acier 8x8*. Les échantillons sont des rouleaux cylindriques de diamètre et de hauteur 8 mm.

Nous nous intéressons à la position des signaux, afin d'évaluer une variation de vitesse de propagation entre les rouleaux.

Référence Rouleau	Temps
Rouleau A1	15,33 μs
Rouleau A2	15,32 μs
Rouleau B1	15,24 μs
Rouleau B2	15,20 μs

Tableau IV-1. Temps relevés sur les signaux des rouleaux A1, A2, B1 et B2.

Nous relevons le premier passage en zéro du signal principal sur l'intervalle [14,5 μs ; 16 μs] et nous comparons les valeurs ainsi obtenues pour les différents rouleaux. Nous relevons les temps rapportés dans le Tableau IV-1.

Nous notons que les temps sont extrêmement proches pour les deux rouleaux A. La deuxième observation importante concerne la variation de vitesse, faible mais claire, entre les rouleaux A et les rouleaux B. La difficulté de ce type d'analyse vient de l'aspect dispersif de la géométrie qui provoque un étalement temporel de l'onde.

Ces essais nous permettent de prouver qu'il est possible avec ce type de contrôle d'obtenir, en plus de la détection de défauts, une information sur la dimension précise d'un rouleau. Nous pouvons donc envisager un double contrôle avec la méthode étudiée, d'une part la détection de défaut et d'autre part la validation, voir même la mesure, du diamètre.

IV.2. Influence de la nuance d'acier

Le dernier essai présenté dans ce chapitre concerne la matière. Nous l'avons vu dans le chapitre I, dans le cadre du développement d'une méthode de contrôle non destructif par Ultrasons-Laser dédiée aux rouleaux aéronautiques, nous nous intéressons principalement à deux nuances d'acier différentes, le M50 et le 100C6. Les caractéristiques de ces deux matériaux sont très proches, mais différentes comme expliqué dans le chapitre I. Nous cherchons donc à étudier les variations observables à travers les signaux entre ces deux nuances [17] [18]. Nous acquérons ces signaux à une hauteur fixe pour deux rouleaux de dimensions identiques, l'un en M50 et l'autre en 100C6 (Figure IV-30).

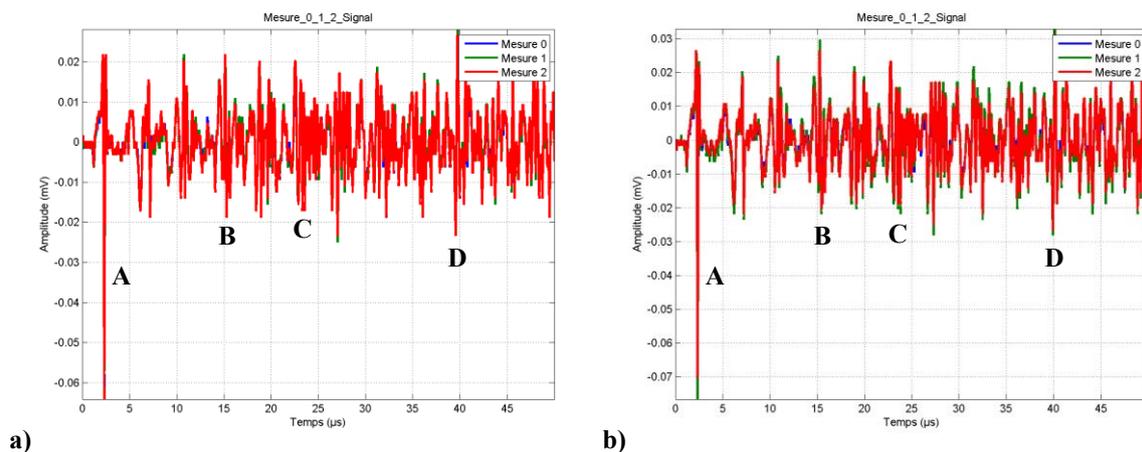


Figure IV-30. Signaux acquis sur des rouleaux géométriquement identiques mais composés de nuances d'acier différentes. -a) Nuance M50, -b) Nuance 100C6. Les échantillons sont des rouleaux cylindriques de diamètre et de hauteur 8 mm.

Sur ces signaux, nous relevons les temps caractéristiques des pics détectés pour les deux signaux différents (Figure IV-30). Pour plus de précision, nous localisons ces temps lors du passage par zéro du signal principal.

Nuance d'acier	Temps			
	Pic A	Pic B	Pic C	Pic D
M50	2,24 μ s	15,03 μ s	22,38 μ s	39,63 μ s
100C6	2,25 μ s	15,18 μ s	22,58 μ s	40,03 μ s

Tableau IV-2. Temps relevés sur les signaux de la Figure IV-30 pour différents signaux d'amplitudes.

Les données du Tableau IV-2 montrent une différence de positions des pics d'amplitude qui augmente avec le temps. La configuration expérimentale étant strictement identique, cette différence de position des pics dans le temps provient donc d'une variation de vitesse de propagation de l'onde imputable à la nuance de l'acier.

En connaissant précisément les dimensions des rouleaux et de la configuration du CND, il est théoriquement possible d'identifier la nuance d'acier utilisée pour la fabrication du rouleau. En pratique, la variation de vitesse est tellement faible que la maîtrise des autres paramètres (dimensions du rouleau, position et forme de la source et position du point de détection) devra être très importante.

V. Conclusion

La propagation de type hélicoïdale des ondes de surface générée par une source ligne permet théoriquement d'augmenter de façon significative la surface contrôlée. En maîtrisant l'angle et la hauteur de la génération, ainsi que la hauteur de détection, nous pouvons détecter efficacement certains défauts plus rapidement qu'avec une propagation plus classique (circonférentielle ou axiale). La géométrie des échantillons et le type de propagation implique l'utilisation de modèles théoriques spécifiques tant au niveau de l'estimation de la vitesse des ondes qu'au niveau de la prédiction des chemins de propagation (lois de Snell-Descartes). Nous avons, dans ce chapitre, validé notre approche à l'aide de l'étude de la variation d'amplitude du déplacement normal à la surface induit par le passage des ondes sur toute la hauteur du rouleau et avec l'utilisation de gel de couplage pour atténuer les ondes ultrasonores de surface. Nous avons pu confirmer que nous générons bien des ondes de surfaces hélicoïdales.

Ensuite nous avons tenté de détecter des défauts de divers types et localisés à différentes positions sur le rouleau. Nous avons alors pu prouver la détectabilité de certains

défauts et surtout mettre en évidence l'avantage de la propagation de type hélicoïdale pour la détection de défauts sans déplacement de l'échantillon. L'utilisation d'une onde de surface hélicoïdale permet de réduire le nombre de mesure, donc le temps de contrôle et également d'éviter le déplacement de l'échantillon ou de l'interféromètre.

Ce chapitre nous a également permis d'identifier les limites de la méthode. Premièrement, les défauts de type "brûlures" n'ont pas pu être mis en évidence dans nos essais. Deuxièmement, la détectabilité dépend de la validité du diagramme de directivité et des fréquences utilisées. Un défaut de petites dimensions peut être invisible pour les ondes dont la longueur d'onde est grande devant la profondeur du défaut.

Les autres résultats importants des essais menés sur la propagation de type hélicoïdale concernent les influences d'une légère variation du diamètre et de la nuance de l'acier. Nous avons montré que la propagation de type hélicoïdale pouvait nous permettre d'identifier une variation de diamètre de l'ordre de 50 μm . La seconde influence sur la vitesse mesurée est constatée pour le changement de nuance d'acier. La légère variation de vitesse des ondes ultrasonores entre les deux nuances d'acier testées, le M50 et le 100C6, a été observée. Ce constat pourrait permettre de faire en plus de la détection de défauts du tri de matière.

En conclusion de ce chapitre, nous pouvons dire que l'utilisation de la propagation de type hélicoïdale est plus que pertinente pour optimiser le contrôle des rouleaux en acier et en céramique, d'autant plus lorsqu'elle est associée la réflexion des ondes de surface au niveau des faces. La méthode Ultrasons-Laser et en particulier d'une source ligne est particulièrement adaptée à la génération de ce type de propagation. En effet, il aurait été très difficile d'obtenir les mêmes résultats avec une autre méthode de contrôle non destructif. Etant donnés les résultats obtenus et l'aspect novateur de l'approche, il a été choisi de valoriser ces travaux à travers le dépôt d'un brevet.

VI. Bibliographie

- [1] J. Bernstein et J. Spicer, «Line source representation for laser-generated ultrasound in aluminum,» *Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 13, pp. 1352-1357, 2000.
- [2] X. Bao, «Echoes and helical surface waves on a finite elastic cylinder excited by sound pulses in water,» *Acoustical Society of America*, vol. 94, n° 13, pp. 1461-1466, 1993.
- [3] A. Nagl et H. Uberall, «Refraction effects in the generation of helical surface waves on a cylindrical obstacle,» *Wave Motion*, vol. 5, pp. 235-247, 1983.
- [4] F. Honarvar, E. Enjilela et A. Sinclair, «Correlation between helical surface waves and guided modes of an infinite immersed elastic cylinder,» *Ultrasonics*, vol. 51, pp. 238-244, 2011.
- [5] J. Conoir, P. Rembert, O. Lenoir et J. Izbicki, «Relation between surface helical waves and elastic cylinder resonances,» *Acoustical Society of America*, vol. 93, n° 13, pp. 1300-1307, 1993.
- [6] J. Conoir et P. Rembert, «Etude théorique et expérimentale de l'onde de Rayleigh héliçoïdale,» *Journal de physique IV*, vol. 4, n° 1C5, pp. 837-840, 1994.
- [7] K. Leonard et M. Hinders, «Guided wave helical ultrasonic tomography of pipes,» *Acoustical Society of America*, vol. 114, n° 12, pp. 767-774, 2003.
- [8] M. Perton, B. Audoin et Y. Pan, «Bulk conical and surface helical acoustic waves in transversely isotropic cylinders; Application to the stiffness tensor measurement,» *Acoustical Society of America*, vol. 119, n° 16, pp. 3752-3759, 2006.
- [9] X. Bao, H. Cao et H. Überall, «Resonances and surface waves in the scattering of an obliquely incident acoustic field by an infinite elastic cylinder,» *Acoustical Society of America*, vol. 87, n° 11, pp. 106-110, 1990.
- [10] A. Lomonosov, P. Grigoriev et P. Hess, «Sizing of partially closed surface-breaking

- microcracks with broadband Rayleigh waves,» *Applied Physics*, vol. 105, 2009.
- [11] J. Li, H. Zhang, C. Ni et Z. Shen, «Analysis of laser generated ultrasonic wave frequency characteristics induced by a partially closed surface-breaking crack,» *Optical Society of America*, vol. 52, n° 118, pp. 4179-4185, 2013.
- [12] P. Hess et A. Lomonosov, «Noncontact, nondestructive evaluation of realistic cracks with surface acoustic waves by scanning excitation and detection lasers,» *International Journal of Thermophysics*, vol. 34, pp. 1367-1375, 2013.
- [13] G. Hévin, O. Abraham, H. Pedersen et M. Campillo, «Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model,» *NDT & E International*, vol. 31, n° 14, pp. 289-297, 1998.
- [14] F. Faëse, F. Jenot, M. Ouafouh, M. Duquennoy et M. Ourak, «Fast slot characterization using laser ultrasonics and mode conversion,» *Measurement Science and Technology*, vol. 24, n° 19, 2013.
- [15] D. Aggelis, T. Shiotani et D. Polyzos, «Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves,» *Cement & Concrete Composite*, vol. 31, pp. 77-83, 2009.
- [16] F. Faëse, «Génération d'ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers - Applications à la caractérisation sans contact de défauts,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2013.
- [17] L. Ganjehi, V. Dorval, F. Jenson, G. Corneloup et J. Moysan, «Etude théorique et expérimentale de l'effet de la structure des métaux sur la propagation d'une onde acoustique,» chez *10 eme Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, 2010.
- [18] A. Badidi, A. Mebtouche, S. Djili et W. Djerir, «Caractérisation de la taille des grains par ultrasons,» chez *10eme Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, 2010.
- [19] S. Davies, C. Edwards, G. Taylor et S. Palmer, «Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications,» *Applied Physics*, vol. 26, pp. 329-348, 1993.

- [20] I. Arias et J. Achenbach, «Thermoelastic Generation of Ultrasound by Line-Focused Laser Irradiation,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 40, n° 125, pp. 6917-6935, 2003.

CHAPITRE V. ESSAIS COMPLEMENTAIRES ET PERSPECTIVES

I. Comparaison entre les méthodes de contrôle non destructif industrielles et la méthode Ultrasons-Laser.....	171
I.1. Contrôle des rouleaux par la méthode des courants de Foucault	172
I.2. Visualisation des défauts grâce à la magnétoscopie.....	174
I.3. Caractérisation des défauts au microscope optique.....	175
II. Extension de la méthode aux rouleaux "tonneau" en céramique.....	177
II.1. Configuration expérimentale pour le contrôle d'un rouleau "tonneau".....	177
II.2. Génération et détection d'ondes de surface hélicoïdales	178
II.3. Détection d'un défaut créé par ablation à l'aide d'un laser	180
a) Description et caractérisation du défaut.....	180
b) Acquisition des signaux temporels et analyse fréquentielle	181
III. Pistes d'amélioration de la méthode développée.....	183
III.1. Augmentation de la bande fréquentielle de l'onde de surface	183
III.2. Amélioration du script prédictif du type de propagation.....	184
a) Intégration du calcul de directivité d'une onde de surface	184
b) Optimisation par modification des paramètres expérimentaux	185
III.3. Analyse théorique de la propagation des ondes de surface sur une géométrie de type tonneau.....	186
III.4. Système de mise en inclinaison des rouleaux "tonneau"	187
IV. Conclusion.....	188
V. Bibliographie.....	190

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une méthode de contrôle non destructif dédiée aux rouleaux cylindriques utilisant la propagation d'une onde de surface hélicoïdale. Grâce à des expérimentations nous avons pu valider l'intérêt de la méthode pour améliorer le temps de contrôle et nous avons montré qu'il était possible de détecter des défauts sur les différents matériaux utilisés dans nos travaux, l'acier et la céramique (Si_3N_4).

Dans ce cinquième et dernier chapitre, nous nous intéressons aux perspectives de la méthode et souhaitons placer la méthode Ultrasons-Laser dans un contexte industriel.

Cette remise en contexte débutera dans un premier temps par une comparaison entre les résultats obtenus à partir de la méthode développée et ceux acquis pour deux méthodes différentes mises en place dans les processus de fabrication de notre partenaire SKF Aeroengine. Nous examinerons deux rouleaux particuliers sur lesquels nous avons caractérisé un défaut, grâce à un équipement basé sur les courants de Foucault et au procédé de magnétoscopie, qui ont pour atout commun d'être automatisables.

Dans une deuxième partie, nous nous intéresserons à la seconde géométrie décrite dans le chapitre I, le rouleau "tonneau". Ce type de rouleaux bien qu'assez similaire à un rouleau cylindrique provoque des modifications fondamentales dans l'approche théorique proposée au chapitre II. La variation diamètre du rouleau en fonction de la hauteur ne nous permet pas d'utiliser les différents modèles prédictifs présentés. Nous nous baserons sur notre retour d'expérience acquis sur les rouleaux cylindriques pour expérimenter sommairement la propagation d'ondes acoustiques de surface et la détection de défauts sur un rouleau "tonneau".

Enfin dans un troisième et dernier sous-chapitre, nous tenterons d'identifier quelques pistes d'améliorations théoriques et pratiques pour la poursuite du développement de la méthode de contrôle non destructif des rouleaux.

A partir des éléments développés dans ce chapitre, nous proposerons un bilan de la méthode développée, ses limites et ses atouts.

I. Comparaison entre les méthodes de contrôle non destructif industrielles et la méthode Ultrasons-Laser

Une comparaison entre la méthode présentée dans ce manuscrit et les équipements disponibles dans l'industrie n'est possible que dans le cas d'un rouleau en acier. En effet, comme nous l'avons déjà expliqué, il y a encore quelques années, les éléments roulants d'un roulement étaient systématiquement en acier. Les méthodes développées pour le contrôle de ces pièces pouvaient s'appuyer sur les propriétés ferromagnétiques de la matière. L'apparition de la céramique dans les roulements nous oblige à revoir ce postulat de départ et d'envisager l'utilisation de nouvelles méthodes de contrôle non destructif. La méthode de contrôle non destructif de rouleaux par Ultrasons-Laser permet l'utilisation d'ondes acoustiques, qui se propagent dans les deux matériaux utilisés pour nos travaux.

En conséquence, nous ne pouvons pas considérer dans ce sous-chapitre un rouleau en céramique. Nous utilisons donc deux rouleaux en acier de dimensions différentes déjà étudiés dans le cadre de nos travaux (chapitre IV, III.1 et III.3). L'échantillon A que nous avons sélectionné possède une hauteur et un diamètre valant 20 mm. Sur cet échantillon, nous avons créé un défaut grâce à la méthode du laser de marquage. Ce défaut a été caractérisé dimensionnellement. Les mesures nous donnent une profondeur d'environ 40 μm , une largeur de 170 μm et une longueur de 5 mm.

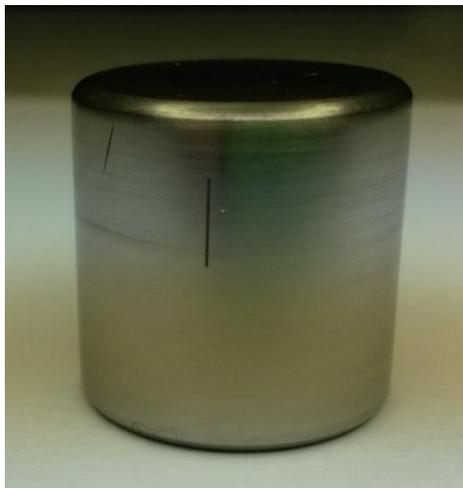


Figure V-1. Photographie du rouleau A dont la hauteur et le diamètre valent 20 mm et sur lequel un défaut a été créé grâce à un laser de marquage.

L'échantillon B que nous avons retenu est un rouleau de diamètre 6,5 mm et de hauteur 7 mm. Il présente un défaut de type "repli de laminage" qui a déjà été décrit dans le chapitre

III. Ce défaut s'étend sur toute la hauteur du rouleau cylindrique. Il possède une profondeur d'environ 2 mm et une largeur réduite d'environ 70 μm .

Les différentes méthodes utilisées dans le milieu industriel pour détecter des défauts ont été présentées dans le chapitre I, nous ne nous étendrons pas plus sur leurs aspects techniques [1]. Deux méthodes de contrôle non destructif ont été sélectionnées les courants de Foucault et la magnétoscopie. Ces deux méthodes utilisent toutes deux les propriétés conductrices et ferromagnétiques de l'acier.

I.1. Contrôle des rouleaux par la méthode des courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est utilisé dans la métallurgie car il est très efficace pour la détection de défauts en surface ou en sous-surface proche. Il fait partie des méthodes de contrôle non destructif les plus récurrentes dans le processus industriel de fabrication de notre partenaire SKF. Nous avons utilisé cette méthode pour vérifier la détection des défauts considérés.

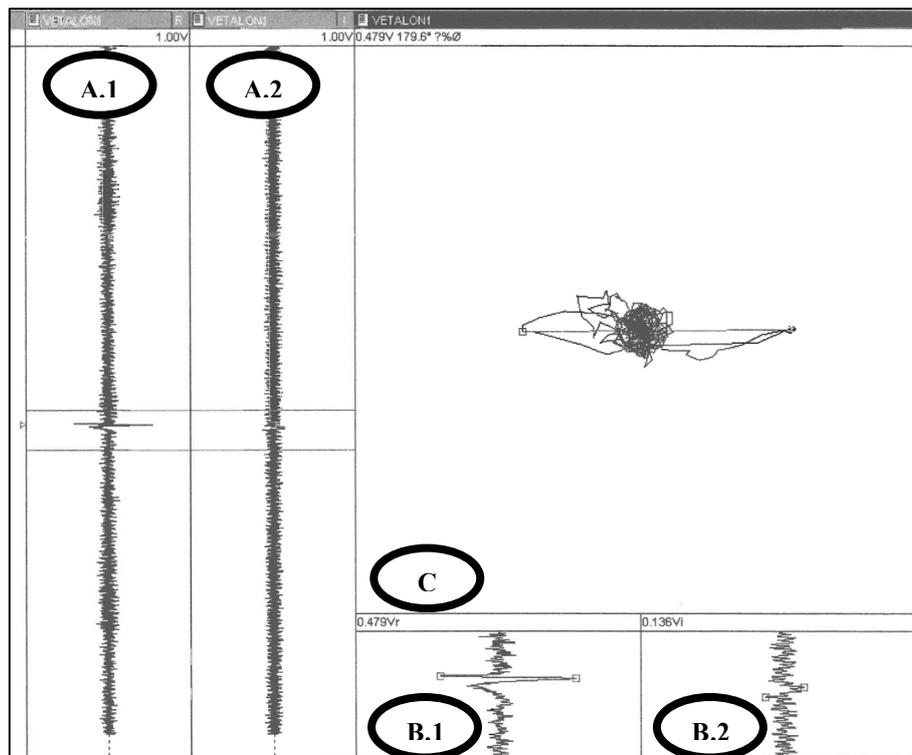


Figure V-2. Signaux obtenus par la méthode de contrôle par courants de Foucault pour l'échantillon A.

La Figure V-2 est une impression d'écran du logiciel utilisé pour piloter l'équipement et pour présenter l'ensemble des résultats obtenus sur l'échantillon A. Le passage de la sonde

sur le défaut provoque une variation d'impédance dans les bobines. Le signal provenant des bobines possède une partie réelle et une partie imaginaire pour l'interprétation des résultats ces deux parties sont tracées séparément. Le graphique A.1 correspond à la partie réelle de l'impédance de la bobine. Le défaut a provoqué l'apparition d'un signal de forte amplitude, qui se démarque du reste du relevé. Le graphique A.2 représente la partie imaginaire de l'impédance électrique, nous constatons une très légère variation de celle-ci au niveau du défaut. Cette variation reste bien moins marquée que pour le signal correspondant à la partie réelle.

Les graphiques B.1 et B.2 sont respectivement des agrandissements des graphiques A.1 et A.2 au niveau des signaux provoqués par le défaut.

Le graphique C correspond à une représentation souvent utilisée dans le cadre du contrôle non destructif par la méthode des courants de Foucault. Elle est appelée "Courbe de Lissajous". Pour l'obtenir, il faut tracer l'extrémité du vecteur d'impédance dans le plan d'impédance (partie réelle de l'impédance mesurée sur l'axe des abscisses et la partie imaginaire sur celui des ordonnées). Cette représentation ne permet plus de localiser la position du défaut, mais elle permet de tracer sur un même graphique le module et la phase.

Lors du contrôle par la méthode des courants de Foucault, le rouleau est caractérisé sur toute sa hauteur par une mise en rotation de celui-ci et par un déplacement suivant l'axe de révolution du rouleau de la sonde. La Figure V-2 présente les résultats obtenus pour le rouleau A possédant un défaut. Nous pouvons dire que la détection de ce défaut ne pose pas de problème pour la méthode des courants de Foucault.

Les sondes utilisées doivent être adaptées en fonction de la forme de la pièce, dans notre cas le paramètre important est le diamètre. L'équipement doit être réglé pour chaque type de pièces. La sonde ne détecte un défaut que seulement s'il se trouve sur son trajet. Il faut donc couvrir toute la surface à contrôler. La méthode de contrôle développée ne peut également détecter un défaut seulement si l'onde interagit avec celui-ci, mais dans notre cas, c'est l'onde qui se déplace et non la sonde.

Nous avons souhaité utiliser l'équipement des courants de Foucault afin de vérifier la détectabilité du défaut "repli de laminage" mais les dimensions du rouleau ne permettent pas de le maintenir dans le montage. Le contrôle de ce rouleau par une méthode basée sur le bruit Barkhausen ne peut pas non plus être effectuée pour les mêmes raisons. Dans un contexte

industriel, SKF met en place deux méthodes différentes pour le contrôle de ce type de rouleur, la magnétoscopie et l'attaque Niteau. L'attaque Niteau est un traitement chimique analogue à l'attaque Nital, mais pour lequel le processus a été modifié pour éviter l'utilisation d'alcool éthylique lors de l'étape du rinçage.

I.2. Visualisation des défauts grâce à la magnétoscopie

La magnétoscopie est utilisée afin de mettre en évidence des défauts débouchants présents sur une pièce. Elle nécessite l'aimantation de celle-ci et demande une analyse visuelle. Bien que des projets de développement existent pour automatiser l'analyse visuelle à l'aide de caméras, le processus industriel classique repose sur un contrôle humain. L'interprétation peut varier en fonction de l'état physique ou psychologique de l'opérateur et entre plusieurs agents de contrôle. L'utilisation de méthode automatisée permet d'éviter ce facteur humain.



Figure V-3. Photographie prise suite à une magnétoscopie d'un défaut créé par ablation de matière à l'aide d'un laser de marquage.

La Figure V-3 est une photographie de l'échantillon A prise suite à un procédé de magnétoscopie. Nous constatons que l'identification du défaut n'est pas évidente. En tenant compte du champ d'application de la méthode, nous comprenons pourquoi. Cette méthode est plus adaptée aux fines discontinuités de type fissure. A titre de comparaison, la Figure V-4 illustre une photographie du défaut présent sur l'échantillon B mis en évidence par magnétoscopie.

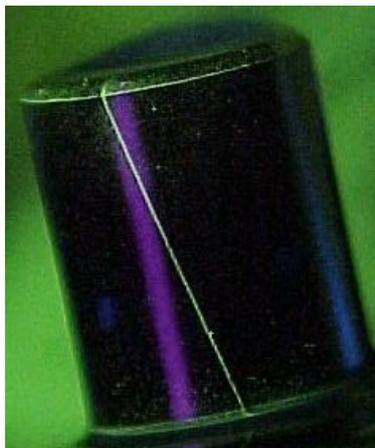


Figure V-4. Photographie prise suite à une magnétoscopie d'un défaut naturel de type repli de laminage.

La détection de défauts par la méthode de la magnétoscopie a des limites en termes de détection de défaut et n'est applicable que pour les matériaux conducteurs.

I.3. Caractérisation des défauts au microscope optique

Cette dernière analyse des défauts n'est pas une méthode non destructive. Il s'agit d'une découpe de l'échantillon effectuée au niveau des défauts afin de les caractériser.

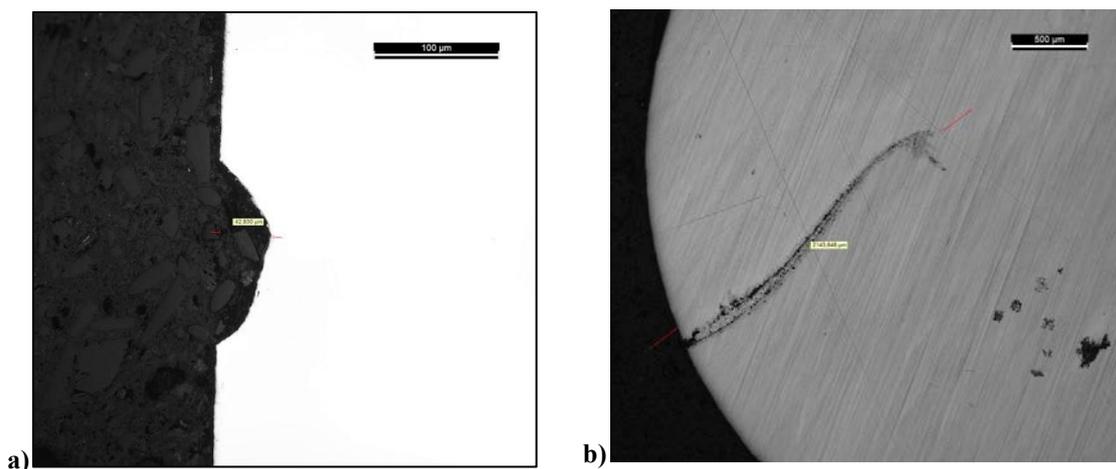


Figure V-5 Photographies des défauts après découpe à l'aide d'un microscope optique. - a) Echantillon A, -b) Echantillon B.

Cette méthode est souvent mise en œuvre sur des pièces qui ont été rejetées par les équipements de contrôle non destructif utilisés en production. Elle sert à définir les dimensions des défauts et tenter d'identifier leurs origines. Dans notre cas, elle nous permet de

vérifier les dimensions des défauts mesurées et d'observer directement leurs profils sans effet d'échelle, comme nous pouvons les avoir sur les profils relevés par les palpeurs.

La découpe et l'analyse des échantillons au microscope optique nous confirment la largeur et la profondeur des défauts. La Figure V-5 présente deux photographies prises au microscope après la préparation des échantillons A et B. Les zones sombres de ces images correspondent à la résine d'enrobage et les parties claires aux rouleaux.

Nous retenons de ces essais que même les méthodes industrielles automatisables ont leurs limites. A l'exception de la méthode d'analyse du défaut au microscope optique, qui est destructive pour l'échantillon, les deux autres méthodes présentées se basent sur les propriétés conductrices et ferromagnétiques de l'acier. Ces essais auraient été impossibles avec un rouleau en céramique.

Les échantillons A et B présentés dans ce sous-chapitre ont été analysés par la méthode Ultrasons-Laser dans le chapitre IV, les conclusions ont été les suivantes. Nous avons montré que pour l'échantillon B, la détection du défaut ne pose aucun problème et que les résultats étaient clairs. L'interprétation des signaux pour l'échantillon A était elle plus délicate, nous devons nous situer à la limite de détection étant donné les fréquences acoustiques et la dimension du défaut considérées.

En conclusion, l'équipement basé sur les courants de Foucault est efficace pour la détection de défauts mais il possède des limites notamment en termes de matériaux contrôlables. Le procédé de magnétoscopie permet de révéler les défauts débouchants dans la limite de leurs dimensions mais reste une méthode demandant une inspection humaine sujette aux erreurs. Ces deux méthodes ont comme inconvénient majeur de n'être utilisables que dans le cas d'un métal. Cette caractéristique est incompatible avec l'objectif de nos travaux. Enfin la méthode de contrôle basée sur la propagation d'ondes de surface hélicoïdales permet de détecter le défaut le plus profond (Echantillon B) mais difficilement le défaut de faible profondeur (Echantillon A). Cette limite est due aux longueurs d'onde acoustiques trop grandes pour interagir avec ce type de défaut.

II. Extension de la méthode aux rouleaux "tonneau" en céramique

Nous avons vu dans le chapitre I que dans le cadre de la fabrication de roulements, il est possible, voir souhaitable, d'adapter les géométries des éléments roulants en fonction des contraintes environnementales et mécaniques.

Dans un souci de simplification, nous avons évalué la méthode sur des rouleaux assimilables à des cylindres. Dans cette sous-partie, nous nous intéressons aux rouleaux "tonneau". L'aspect théorique des phénomènes de propagation n'est pas étudié, nous souhaitons simplement vérifier expérimentalement que la méthode développée est applicable à ces géométries plus complexes.

II.1. Configuration expérimentale pour le contrôle d'un rouleau "tonneau"

Nous conservons la configuration définie dans le chapitre III, en particulier la position du faisceau laser impulsionnel et du faisceau laser de l'interféromètre par rapport à l'échantillon.

Nous utilisons toujours une lentille cylindrique convergente qui nous permet d'obtenir une source de génération d'ondes ultrasonores linéique. Nous modifions l'inclinaison de cette lentille afin d'obtenir une source inclinée d'environ 15° par rapport à l'axe de révolution du rouleau. Nos retours d'expérience sur les rouleaux cylindriques tendent à nous montrer que pour cet angle, une mesure dont le rapport signal sur bruit et l'amplitude des signaux peut être effectuée pour les différents signaux et pour différentes dimensions de rouleaux.

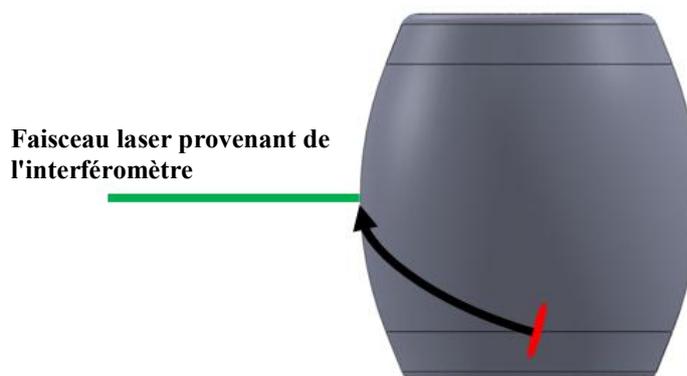


Figure V-6. Configuration expérimentale du contrôle d'un rouleau "tonneau". L'ellipse rouge correspond à la tâche de focalisation du faisceau du laser impulsionnel, la flèche noire au chemin de propagation principale et le segment vert au faisceau de l'interféromètre avec le faisceau sortant colinéaire au faisceau entrant.

La position en hauteur du faisceau de l'interféromètre est définie par la géométrie du rouleau "tonneau" afin d'obtenir une réflexion optimale du faisceau au niveau de la surface du rouleau. Nous devons donc respecter les conditions de réflexion. Nous configurons le banc afin que la normale à la surface soit horizontale. Cette condition n'est possible qu'à la mi-hauteur du rouleau "tonneau".

Dans le cas des rouleaux cylindriques, nous pouvions prédire le trajet principal de l'onde de surface hélicoïdale en fonction des dimensions du rouleau et de la position de la source ligne. La géométrie d'un rouleau "tonneau" étant plus complexe, la courbure selon l'axe de révolution de la pièce ne permet pas de dérouler le rouleau sur un plan et empêche l'utilisation de la formulation de X.L. Bao pour le calcul des courbes de dispersion.

II.2. Génération et détection d'ondes de surface hélicoïdales

La première étape de notre validation expérimentale consiste à vérifier que nous obtenons un rapport signal sur bruit correct et de comparer les signaux à ceux obtenus pour des rouleaux cylindriques. La Figure V-7 présente les résultats de cette première vérification.

Le rouleau "tonneau" utilisé dans ce sous-chapitre est en céramique et possède une hauteur de 26 mm, un diamètre maximal au niveau de la mi-hauteur de 18 mm et un diamètre minimal au niveau des faces de 15,5 mm. La comparaison des signaux est faite avec un premier rouleau de diamètre et de hauteur 12 mm et un second de diamètre 25 mm et de hauteur 40 mm. Tous deux sont en céramique, les vitesses de propagation des ondes de surface seront donc du même ordre.

Le premier constat que nous pouvons faire sur les signaux présentés à la Figure V-7 est que la génération et la détection des ondes de surface ne posent pas de problème sur un rouleau "tonneau". La présence de deux signaux consécutifs d'amplitude élevée à des temps courts et en considérant la position de la source ligne montrent que la réflexion de l'onde de surface au niveau des faces est toujours effective.

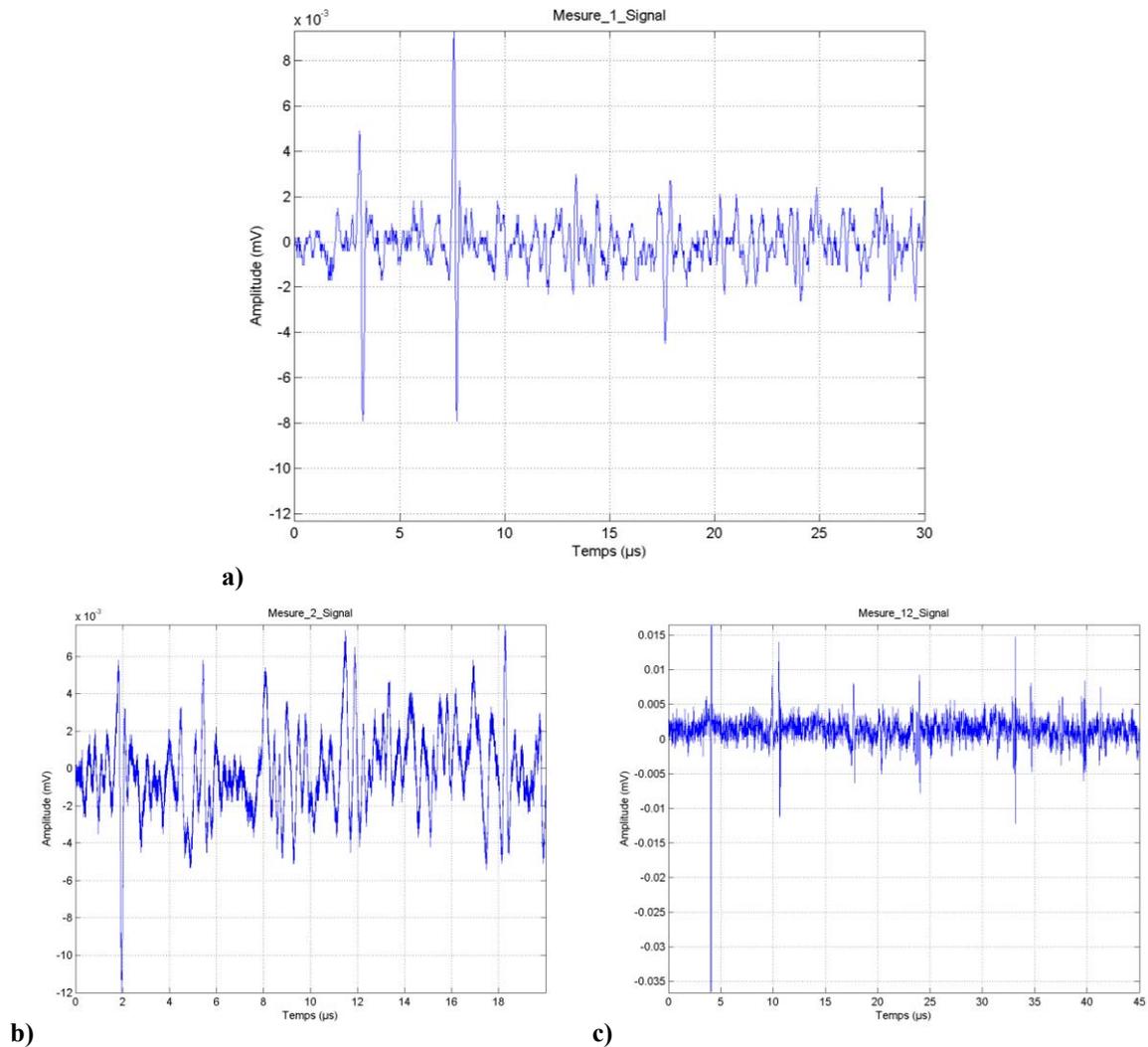


Figure V-7. Signaux temporels acquis sur des rouleaux de géométries différentes. -a) Rouleau "tonneau", -b) Rouleau cylindrique de hauteur et de diamètre 12 mm, -c) Rouleau cylindrique de diamètre 25 mm et de hauteur 40 mm.

Lorsque nous comparons le signal obtenu pour le rouleau "tonneau" et les deux signaux acquis pour les rouleaux cylindriques, nous constatons une bonne correspondance bien que les signaux détectés sur le rouleau "tonneau" semblent plus rapidement atténués. Il faudrait valider cette observation sur d'autres essais afin de confirmer ce constat.

Nous allons maintenant passer à l'étude de la détection d'un défaut sur ce type de rouleau possédant une géométrie particulière.

II.3. Détection d'un défaut créé par ablation à l'aide d'un laser

a) Description et caractérisation du défaut

Lorsque nous avons créé des défauts avec le laser de marquage sur les rouleaux cylindriques (chapitre II), nous en avons également profité pour graver de la même manière des rouleaux "tonneau".

La Figure V-8 présente le profil du défaut créé à l'aide d'un palpeur. Cet équipement permet de mesurer le profil dimensionnel d'une pièce, en l'occurrence nous avons utilisé ce palpeur afin de caractériser le défaut créé par laser.

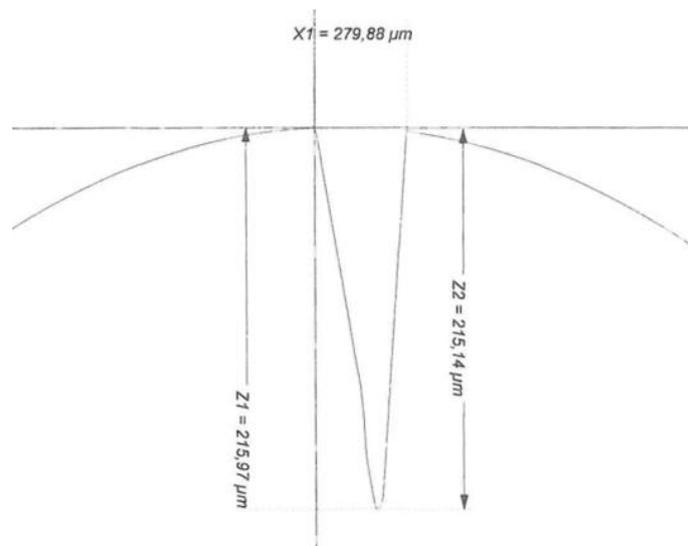


Figure V-8. Profil du défaut créé à l'aide d'un laser de marquage le long de l'axe de révolution du rouleau "tonneau".

Ce défaut est localisé au niveau du tiers de la hauteur du rouleau avec une inclinaison parallèle à l'axe de révolution de l'échantillon. En termes de dimensions, le défaut possède une longueur de 3 mm. Cette longueur a été définie directement dans le logiciel de pilotage du laser de marquage.

Les autres dimensions sont visibles sur le profil de la Figure V-8, nous constatons une largeur d'environ 280 µm et une profondeur de 215 µm. L'utilisation du laser de marquage sur la céramique permet d'obtenir une profondeur de défaut importante comparée à l'acier et un défaut aux contours nets. D'après les calculs et notre retour d'expérience, ce défaut devrait pouvoir être détecté aux fréquences acoustiques considérées.

b) Acquisition des signaux temporels et analyse fréquentielle

En prenant en compte le constat fait sur les deux premiers signaux de forte amplitude dans le paragraphe II.2, nous nous concentrons sur ces deux signaux pour la détection du défaut. Le premier signal doit correspondre à l'onde directe générée vers la gauche de la ligne source sans réflexion sur une face. Le deuxième signal devrait quand à lui correspondre à une onde générée vers la droite de la ligne source avec réflexion sur la face inférieure du rouleau.

La Figure V-9 présente les signaux temporels acquis sur des rouleaux "tonneau" avec et sans défaut sur l'intervalle de temps [2,7 ; 3,7] μs et l'analyse fréquentielle associée [2] [3] [4].

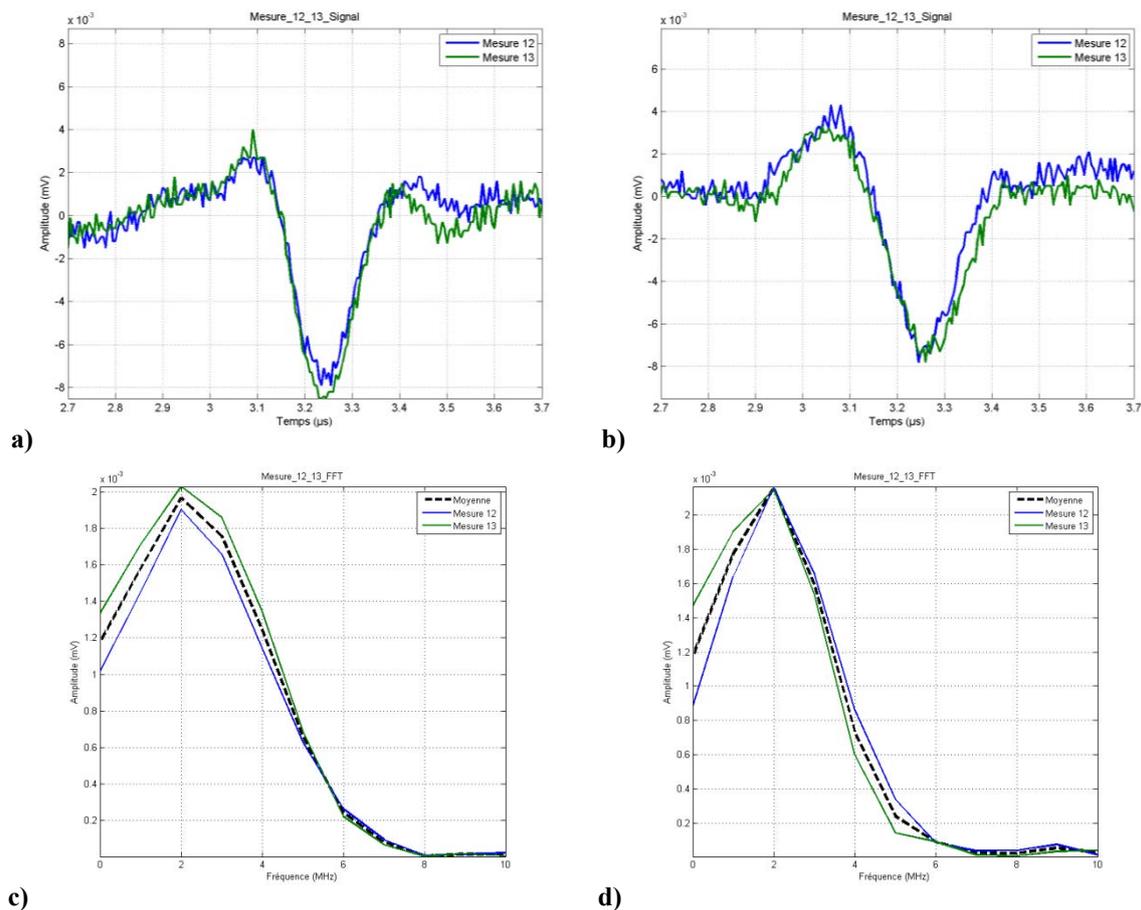


Figure V-9. Signaux acquis sur un rouleau "tonneau" en céramique. -a) Signal temporel sans défaut, -b) Signal temporel avec défaut, -c) FFT sans défaut, -d) FFT avec défaut.

Le défaut est placé entre la zone de génération et le point de détection de telle sorte que le trajet direct entre ces deux zones traverse le défaut. Nous constatons que le défaut a eu un effet de filtrage sur le spectre de l'onde ultrasonore de surface. Les composantes basse fréquence ont bien été transmises alors que les composantes haute fréquence ont du être

réfléchies par le défaut. Le rapport signal sur bruit et la faible énergie de l'onde réfléchie ne nous permettent pas de détecter le déplacement induit par le passage de cette onde de surface.

La Figure V-10 présente les résultats obtenus pour un signal acquis sur un intervalle de temps de 7 à 8,5 μs . Ce signal possède une amplitude plus importante, il doit correspondre à l'onde de surface générée vers la droite de la source ligne. Le trajet principal de cette onde ne traverse pas le défaut. L'analyse fréquentielle du signal provenant du rouleau avec le défaut ne montre pas de modification par rapport au signal obtenu sur un rouleau sain.

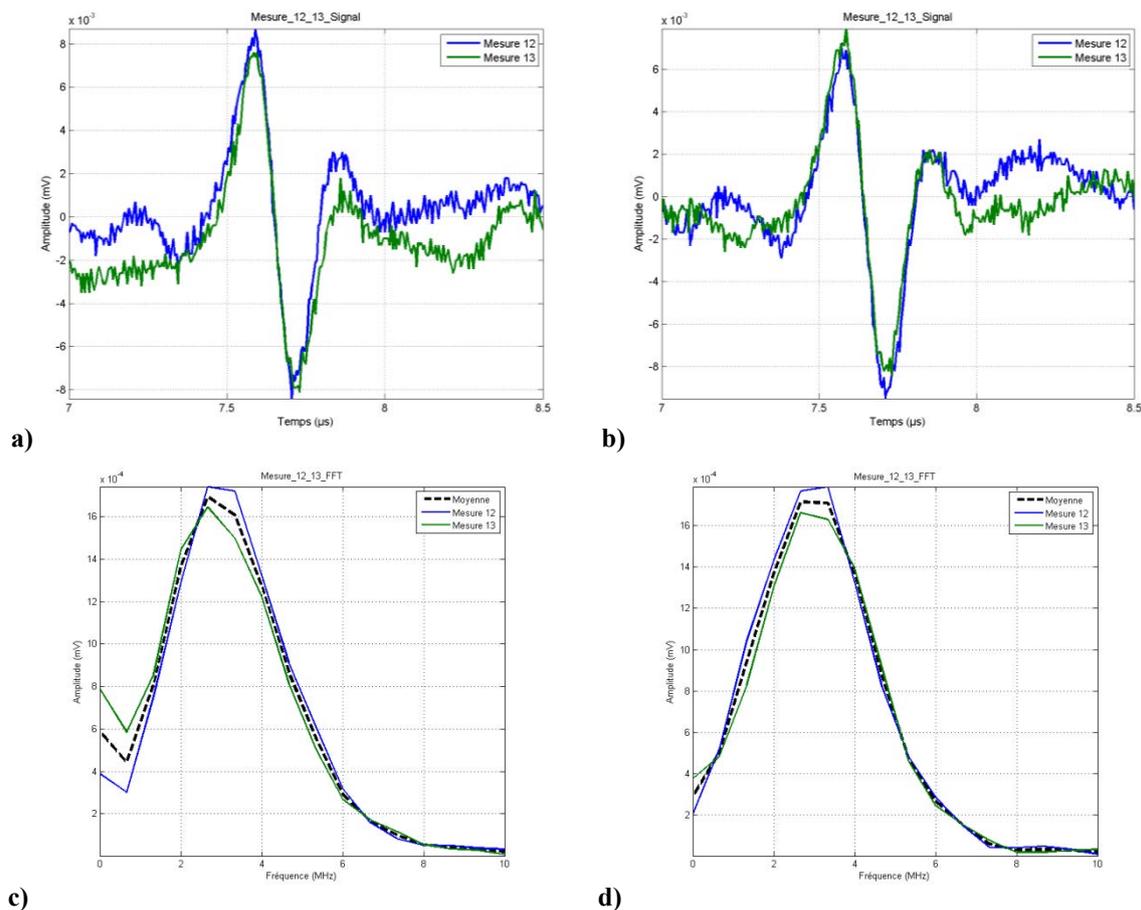


Figure V-10. Signaux acquis sur un rouleau "tonneau". -a) Signal temporel sans défaut, -b) Signal temporel avec défaut, -c) FFT sans défaut, -d) FFT avec défaut.

Sans utilisation d'équipements mécaniques ou optiques dédiés, il est délicat de mesurer le déplacement normal induit par le passage d'une onde si le faisceau de l'interféromètre ne se focalise pas au niveau de la mi-hauteur du rouleau "tonneau". Nous pourrions positionner la source ligne à mi-hauteur du cylindre avec un angle entre cette ligne et l'axe de révolution du rouleau nul afin d'obtenir un chemin de propagation de type circonférentiel. Toutefois cette

méthode ne permet de détecter le déplacement du aux ondes ultrasonores qu'à cette unique hauteur, ce qui dans le cadre de nos travaux n'est pas optimal.

La génération d'ondes de surface hélicoïdales sur ce type de structure permet par déplacement de la position et de l'inclinaison de la source ligne de couvrir une surface de contrôle bien plus importante. Toutefois la difficulté de représenter le chemin de propagation d'une onde hélicoïdale sur un tonneau et de calculer des courbes de dispersion liées à ce type d'ondes sont pour le moment des obstacles à une expérimentation plus poussée. La méthode de détection de défauts sur un rouleau "tonneau" est identique à celle mise en place pour les rouleaux cylindriques, mais les modèles développés pour décrire la propagation d'une onde de surface hélicoïdale sur un rouleau cylindrique ne peuvent pas être utilisés pour un rouleau "tonneau".

III. Pistes d'amélioration de la méthode développée

III.1. Augmentation de la bande fréquentielle de l'onde de surface

L'un des constats importants des expériences concerne la largeur de spectre de l'onde de surface utilisée. Nous avons constaté que nous étions capables de détecter des défauts de grandes profondeurs mais que nous étions incapables d'identifier des défauts de petites dimensions pour les fréquences acoustiques considérées.

La limite de détection dépend directement des dimensions du défaut et de la longueur d'onde acoustique. De façon générale, nous considérons qu'il est possible de détecter un défaut donc la profondeur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde acoustique.

Nous posons comme hypothèse que la vitesse de l'onde de surface est égale à la vitesse de l'onde de Rayleigh se propageant sur une surface plane. Comme nous l'avons vu cette hypothèse n'est pas exacte pour la géométrie cylindrique, mais permet une première approximation générale. Nous prenons donc comme vitesse de l'onde dans l'acier la valeur de 2985 m.s^{-1} et 5655 m.s^{-1} dans le cas de la céramique. Ces valeurs nous permettent de calculer les longueurs d'onde acoustiques théoriques à différentes fréquences (Tableau V-1).

Fréquence acoustique (MHz)	Longueur d'onde théorique (mm)	
	Acier	Céramique
2,5	1,2	2,3
4	0,7	1,4
6	0,5	0,9
8	0,4	0,7
10	0,3	0,6
15	0,2	0,4
30	0,1	0,2

Tableau V-1. Estimation des longueurs d'onde acoustiques d'une onde de Rayleigh en fonction du matériau et de la fréquence acoustique.

Nous constatons un facteur de deux entre les dimensions des longueurs d'onde calculées pour une onde de surface se propageant dans l'acier et pour une onde de même fréquence se propageant dans un matériau céramique. A fréquence acoustique équivalente, il est possible que nous détectons un défaut de petites dimensions sur un rouleau acier et non sur un rouleau en céramique.

Les essais précédents sur la détection d'un défaut sur un rouleau "tonneau" en céramique nous montrent que pour une fréquence acoustique d'environ 4 MHz, nous sommes parvenus à détecter un défaut dont la profondeur vaut 215 μm et la largeur 280 μm . Le calcul des longueurs d'onde théorique nous donne une longueur égale à 1,4 mm. Dans ce cas précis, nous pouvons dire que la détection est possible pour un défaut dont la profondeur est un peu plus de six fois inférieure à la longueur d'onde estimée à partir de la vitesse théorique de l'onde de Rayleigh se propageant sur une surface plane. A noter que l'augmentation ou le décalage de la largeur de spectre de l'onde de surface pourrait modifier la condition de réflexion au niveau des faces à cause d'un rayon de raccordement trop grand devant la longueur d'onde acoustique. L'augmentation de la fréquence de l'onde ne devrait pas être influencée par la microstructure du matériau céramique pour les fréquences inférieures à 45 MHz [5] [6].

III.2. Amélioration du script prédictif du type de propagation

a) Intégration du calcul de directivité d'une onde de surface

Lorsque nous avons présenté le script que nous avons développé pour tracer le trajet principal des ondes de surface se propageant sur un cylindre au chapitre II, nous avons

simplifié le diagramme de directivité [7] [8] [9] à l'extrême en ne considérant qu'un chemin de propagation de l'onde de chaque côté de la source ligne.

Une piste d'amélioration serait d'intégrer le calcul du diagramme de directivité dans ce script. Un modèle intégrant cette directivité théorique des ondes ultrasonores de surface permettrait une meilleure prédiction des ondes détectables à un endroit précis (point de mesure). Dans nos travaux, le modèle unidirectionnel nous a aidé à comprendre la propagation des ondes de surface et à interpréter les signaux temporels acquis. Un modèle plus complet pourrait prédire précisément les trajets et les temps de vol théoriques des ondes ultrasonores de surface.

b) Optimisation par modification des paramètres expérimentaux

Lors du calcul du trajet principal de l'onde ultrasonore de surface sur un rouleau cylindrique nous utilisons des paramètres liés à l'échantillon et d'autres dépendant de la source ligne. Ces différents paramètres sont pour le rouleau, le diamètre et la hauteur et pour la source ligne, la hauteur par rapport à la face inférieure du rouleau et l'inclinaison de la source ligne. Dans ce modèle nous considérons que le faisceau de l'interféromètre se situe à 90° du faisceau provenant du laser impulsif, et que l'interféromètre peut être monté ou descendu afin de couvrir toute la hauteur du rouleau. Dans l'optique d'augmenter l'efficacité du contrôle d'un rouleau, l'un des principaux enjeux est de réduire le nombre de mesures. Une amélioration notable consisterait à créer un programme capable de définir les hauteurs optimales de détection qui permettraient de contrôler une surface maximale du rouleau avec une position et une inclinaison de la source ligne fixe en fonction des dimensions de celui-ci.

Une piste d'amélioration supplémentaire serait de ne plus considérer la position et l'inclinaison de la source ligne comme étant fixes mais variables. Il est possible et assez simple de modifier les paramètres expérimentaux de la source ligne. En prenant en compte cette possibilité de modification, nous augmentons fortement le nombre de configurations différentes et de directions de propagation particulières. Ce type de modification peut être effectuée automatiquement à l'aide d'une table de translation et d'un système de mise en rotation de la lentille cylindrique convergente utilisée pour focaliser le faisceau du laser impulsif sous la forme d'une ligne.

III.3. Analyse théorique de la propagation des ondes de surface sur une géométrie de type tonneau

Faute d'une approche théorique complète nous n'avons pu qu'expérimenter sommairement la propagation des ondes de surfaces sur une structure de type tonneau. Ce manque engendre une incertitude sur l'interprétation des résultats expérimentaux. Parvenir à prévoir le trajet théorique des ondes ultrasonores de surface sur ce type de structure est bien plus complexe que pour les cylindres.

La particularité des rouleaux "tonneau" réside dans le fait leur rayon n'est pas constant et qu'il dépend directement de la hauteur. Cette caractéristique interdit la représentation sous forme de plan comme nous l'avons fait pour le cas des cylindres. Une nouvelle représentation doit être développée pour correspondre à la réalité.

Les bases mathématiques utilisées pour l'établissement de l'équation de dispersion des ondes ultrasonores sur un cylindre ne sont pas adaptées à la géométrie du tonneau, pas plus d'ailleurs que la formulation basée sur des coordonnées sphériques. Il est donc nécessaire de développer l'ensemble des calculs en prenant en compte un rayon non constant et décrit par une fonction. De plus, cette fonction n'est exacte que sur la dimension de la pièce, elle n'est définie que sur un intervalle particulier. Nous ne pouvons pas considérer une structure de longueur infinie.

L'approche analytique étant complexe, une alternative pourrait être d'étudier cette géométrie à l'aide de la méthode des éléments finis. Des logiciels multi-physiques basés sur la méthode des éléments finis, comme COMSOL, peuvent décrire les phénomènes de génération et de propagation d'ondes acoustiques de surface dans tout type de structures [10] [11] [12]. Toutefois, la limite de cette méthode concerne le temps de calcul et la ressource matérielle à lui allouer. Les pièces possédant des dimensions grandes comparées aux phénomènes étudiés, la discrétisation spatiale d'un rouleau dans les trois dimensions de l'espace donne un maillage d'une grande finesse, ce qui alourdit les calculs. De plus, les vitesses de propagation étant élevées, le pas temporel devra lui aussi être petit. Ces contraintes provoquent un temps de calcul très élevé, même s'ils sont effectués sur des serveurs de calcul dédiés.

III.4. Système de mise en inclinaison des rouleaux "tonneau"

Les contraintes expérimentales ne nous ont pas permis d'étudier plus en détail la propagation d'une onde ultrasonore de surface sur une structure de type tonneau. Le déplacement de la partie optique de l'interféromètre selon la courbure du rouleau "tonneau" est exclue pour des raisons évidentes de positionnement, de réglages, d'encombrement et de fragilité du matériel.

L'utilisation d'équipements optiques comme des miroirs ou des fibres optiques réglés finement pourrait permettre d'envisager une campagne d'essais plus large sur des rouleaux "tonneau" dans un environnement de type laboratoire. Toutefois cette solution semble délicate à mettre en œuvre dans le cadre d'un équipement de contrôle non destructif destiné à l'industrie et ayant pour objectif d'analyser toutes sortes de rouleaux possédant des dimensions différentes.

Une autre solution plus simple à mettre en place serait d'utiliser un élément mécanique permettant d'incliner les rouleaux "tonneau". Notre réflexion a abouti à la conception d'un système purement mécanique. Ce prototype est présenté sur la Figure V-11.

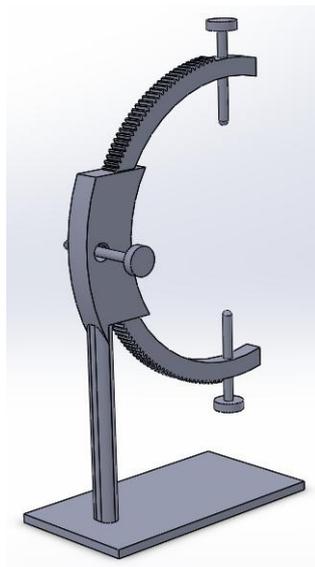


Figure V-11. Dispositif de mise en inclinaison des rouleaux "tonneau".

Ce mécanisme simple permet une rotation centrée sur le centre de gravité du rouleau "tonneau". L'utilisation de vis pour maintenir le rouleau permet de s'adapter à différentes dimensions. L'intervention humaine de manipulation des vis peut très facilement être automatisée dans le cadre d'un équipement industriel.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre dédié aux perspectives, nous avons confronté la méthode développée durant nos travaux aux méthodes industrielles utilisées quotidiennement par notre partenaire SKF et par l'industrie de fabrication aéronautique de façon générale, les courants de Foucault et la magnétoscopie. Nous avons mis en avant que même les méthodes actuellement utilisées ont leurs limites. De plus, cette étude des résultats obtenus pour des échantillons sur lesquels nous avons créé des défauts n'est possible que pour des rouleaux en acier car il n'existe pas encore de méthode de contrôle non destructif industrielle pour le contrôle de la céramique. La seule méthode de contrôle utilisable est le ressuage qui est assez semblable à la magnétoscopie avec ses limites de détection et son interprétation humaine. La méthode de contrôle non destructif par Ultrasons-Laser permet des résultats similaires aux méthodes industrielles pour peu que l'onde générée possède une largeur de spectre qui soit adaptée aux dimensions du défaut à détecter.

Dans une deuxième partie, nous avons utilisé la méthode développée pour le contrôle d'un rouleau "tonneau", bien que les bases théoriques des rouleaux cylindriques ne puissent s'appliquer au cas des rouleaux "tonneau". Nous avons donc effectué une expérimentation sommaire sans utiliser de modèle théorique pour prédire et interpréter les signaux obtenus. Malgré cela, nous sommes parvenus à montrer que dans une configuration expérimentale particulière nous parvenons à détecter la présence d'un défaut et que nous obtenons des signaux similaires de ceux obtenus pour le cas de rouleaux cylindriques.

Enfin dans un troisième et dernier sous-chapitre, nous avons proposé des pistes de réflexion pour l'amélioration de la méthode de contrôle non destructif des rouleaux. Durant l'ensemble de nos travaux, nous avons constaté que la largeur de spectre de l'onde de surface utilisée avait une importance primordiale dans la détection de défauts. Si l'on souhaite détecter des défauts de petites dimensions, il est nécessaire d'adapter, augmenter ou décaler, le spectre fréquentiel de l'onde émise. Cette adaptation devra se faire sous certaines conditions.

Des améliorations au niveau des scripts de calcul pourraient se révéler intéressantes comme l'intégration des diagrammes de directivité théoriques dans le calcul des trajets de propagation des ondes de surface ou encore la création d'un programme d'optimisation en fonction des paramètres expérimentaux modifiables afin de contrôler la surface la plus importante possible en un nombre réduit de mesures.

Une des problématiques clairement identifiées dans ce chapitre concerne l'absence de bases théoriques pouvant décrire la propagation des ondes de surface hélicoïdales dans une géométrie de type tonneau. Cette géométrie ne respecte pas les hypothèses utilisées pour la construction du modèle cylindrique. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle approche théorique.

Enfin et pour conclure sur les pistes d'amélioration liées au contrôle des rouleaux "tonneau", les essais sur ces rouleaux nous ont montré à quel point la configuration expérimentale se complexifiait pour ce type de structure. En posant un rouleau sur l'une de ses faces comme nous le faisons pour un rouleau cylindrique, nous ne pouvons qu'effectuer une mesure à la mi-hauteur du rouleau pour des raisons de contraintes optiques liées à la détection par interférométrie. Pour remédier à cela, nous avons imaginé un système mécanique de mise en inclinaison du rouleau "tonneau". Après étude, la fabrication de ce système ne semble pas poser de problèmes particuliers et pourrait s'avérer pertinent pour l'extension de l'étude de la méthode aux rouleaux "tonneau".

V. Bibliographie

- [1] J. Dumont-Fillon, «Contrôle non destructif (CND),» Techniques de l'ingénieur.
- [2] Y. Sohn et S. Krishnaswamy, «Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic line source with a surface-breaking flaw,» *Acoustical Society of America*, vol. 115, n°11, pp. 172-181, 2004.
- [3] V. Tournat, C. Ni, N. Chigarev, N. Delorme, Z. Shen et V. Gusev, «Probing of crack breathing by pulsed laser-generated acoustic waves,» chez *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Montréal, 2013.
- [4] P. Yang, S. Liu et J. Sung, «Transient response of SH waves in a layered half-space with sub-surface and interface cracks,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32, n°14, pp. 595-609, 2008.
- [5] F. Deneuille, «Contribution au contrôle non-destructif de billes en céramique par spectroscopie ultrasonore de résonances de modes sphéroïdaux,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
- [6] S. Petit, «Spectroscopie de résonance ultrasonore des ondes de surface - Application au contrôle non destructif de billes en céramique,» Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2003.
- [7] A. Lord, «Geometric diffraction loss in longitudinal and shear wave attenuation measurements in an isotropic half-space,» *Acoustical Society of America*, vol. 39, n°14, p. 650, 1966.
- [8] G. Miller et H. Pursey, «The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of semi-infinite isotropic solid,» *The Royal Society*, vol. 223, n°11155, 1954.
- [9] L. Rose, «Point-source representation for laser-generated ultrasound,» *Acoustical Society of America*, vol. 75, n°113, pp. 723-732, 1984.

- [10] F. Faëse, F. Jenot, M. Ouafrouh, M. Duquennoy et M. Ourak, «Fast slot characterization using laser ultrasonics and mode conversion,» *Measurement Science and Technology*, vol. 24, n°19, 2013.
- [11] J. Wang, Z. Shen, B. Xu, X. Ni, J. Guan et J. Lu, «Simulation on thermoelastic stress field and laser ultrasound waveform in non-metallic materials by using FEM,» *Applied Physics A*, vol. 84, pp. 301-307, 2006.
- [12] J. Wang, Z. Shen, B. Xu, X. Ni, J. Guan et J. Lu, «Numerical simulation of laser-generated ultrasound in non-metallic material by the finite element method,» *Optics & Laser Technology*, vol. 39, n°14, pp. 806-813, 2007.
- [13] R. Edwards, S. Dixon et X. Jian, «Depth gauging of defects using low frequency wideband Rayleigh waves,» *Ultrasonics*, vol. 44, pp. 93-98, 2006.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ces travaux était d'étudier la propagation d'ondes ultrasonores générées et détectées sans contact à l'aide de la méthode Ultrasons-Laser sur des rouleaux en acier et en céramique utilisés dans la fabrication de roulements de haute précision destinés à l'industrie aéronautique afin de développer une nouvelle méthode de contrôle non destructif.

Pour répondre à cet objectif, nous avons dans un premier chapitre présenté le contexte de l'étude et les différentes méthodes de contrôle non destructif existantes. Nous avons vu que l'utilisation de nouveaux matériaux comme la céramique posait la problématique de son contrôle. Historiquement les roulements sont fabriqués en acier et les manufacturiers comme SKF possèdent en conséquence des connaissances et une maîtrise poussées dans le domaine de la métallurgie. Cette caractéristique fait que l'essentiel des méthodes non destructives utilisées reposent sur les propriétés électriques et magnétiques des métaux. La céramique étant électriquement isolante et non magnétique, ces méthodes ne sont pas exploitables.

Nous avons vu dans le chapitre I que le terme "rouleaux" englobait deux géométries distinctes, le rouleau cylindrique, assimilable à un cylindre et le rouleau "tonneau", comparable à un tonneau. Compte tenu de la contrainte géométrique, des matériaux, du temps de contrôle et des types de défauts à détecter, nous avons choisi d'utiliser les ondes ultrasonores de surface. Nous avons alors vu qu'il existait plusieurs méthodes de génération et de détection d'ondes ultrasonores dans un matériau. La nécessité de répondre le mieux possible à la problématique initiale définie par SKF Aeroengine France, nous a poussé à faire le choix de la méthode Ultrasons-Laser qui permet la génération et la détection d'ondes acoustiques sans contact. Nous avons alors étudié l'interaction d'une onde électromagnétique avec la matière dans le cas du régime thermoélastique pour les deux matériaux considérés dans nos travaux en se basant sur l'hypothèse de solides homogènes et isotropes.

Ayant défini la méthode utilisée et les phénomènes physiques mis en jeu, le chapitre II a été consacré à la présentation de l'aspect théorique des travaux. Nous avons tout d'abord décrit les déplacements engendrés par une onde acoustique dans un matériau homogène, isotrope et non piézoélectrique grâce à la loi de Hooke. Nous nous sommes ensuite intéressés aux deux types d'ondes de volume, l'onde longitudinale et l'onde transversale. Ces ondes de

volume se propagent dans tout type de solide et leurs caractéristiques dépendent du matériau considéré et de la géométrie du solide. Nous avons ensuite décrit les ondes guidées, utilisant la forme cylindrique du solide comme guide. Nous nous sommes intéressés aux modes de Pochhammer-Chree et, plus particulièrement, l'onde de Rayleigh. Nous avons vu qu'elle correspondait à une onde de surface dont la profondeur de pénétration dans le matériau est de l'ordre de la longueur d'onde acoustique.

Nous avons ensuite calculé les diagrammes de directivité de différentes ondes acoustiques pour les différentes formes de source les plus utilisées, une source ponctuelle dont la tâche focale est très petite devant la longueur d'onde acoustique considérée, une source point pour laquelle le diamètre de la tâche focale possède une dimension finie et enfin une source linéique, dont la largeur est considérée comme négligeable. Nous avons ainsi vérifié que les formes des sources modifiaient ces diagrammes de directivité. En particulier, les diagrammes de directivité des ondes de surface calculés pour une source ligne ont montré qu'il était possible d'obtenir un déplacement maximal suivant deux directions de propagation de chaque côté de cette ligne. Cette particularité nous a permis de générer des ondes suivant une direction bien définie. L'objectif étant de détecter un défaut débouchant, nous avons déterminé trois configurations possibles en fonction l'inclinaison de la source linéique par rapport à l'axe de révolution du cylindre. Pour un angle de 90° , nous générions une onde de surface possédant un maximum d'énergie pour une direction axiale. Pour un angle de 0° , nous obtenions une direction de propagation essentiellement circonférentielle et enfin si cet angle avait une valeur comprise entre 0° et 90° , nous donnions naissance à une onde de surface hélicoïdale. La direction de propagation d'une onde de surface doit être prise en compte pour l'approche théorique. Nous avons donc pour chaque cas étudié, développé un modèle afin de calculer les vitesses de propagation des ondes et prévoir les trajets de celles-ci. Ces éléments nous seront utiles pour l'interprétation des signaux relevés durant nos expérimentations.

En nous basant sur ces travaux théoriques, nous avons présenté dans le chapitre III une partie des expérimentations et détaillé la configuration mise en œuvre pour ces essais. Dans un premier temps, nous avons décrit le montage expérimental utilisé, en présentant les différents instruments nécessaires à la génération et la détection des ondes de surface. Dans un deuxième temps, nous nous sommes attardés sur les échantillons et avons souhaité valider expérimentalement l'absence de détérioration de l'échantillon en acier suite à l'élévation thermique provoquée par l'utilisation du laser impulsif. Cette vérification nous assure que dans la configuration sélectionnée, nous pouvons travailler en régime thermoélastique lors de

la génération des ondes ultrasonores et donc qu'elle est adaptée au développement d'une méthode de contrôle non destructif.

Nous avons incliné la source ligne à un angle de 90° par rapport à l'axe de révolution du rouleau afin de privilégier une direction axiale des ondes de surface. Cette configuration nous permet d'estimer la vitesse des ondes de surface et de vérifier la détectabilité d'un défaut important.

Suite à ces résultats, nous avons modifié la configuration expérimentale afin d'étudier les ondes de surface décrivant un trajet circonférentiel autour du rouleau. L'étude théorique nous a montré que pour ce type d'onde, un effet dispersif apparaissait à cause de la géométrie cylindrique. Le calcul de courbes de dispersion nous a permis de calculer les vitesses de propagation et d'estimer la variation de vitesse en fonction du diamètre du rouleau et de la fréquence acoustique de l'onde de surface. Nous avons donc observé cet effet dispersif expérimentalement sur un rouleau en acier et sur un rouleau en céramique. Comme pour une onde de surface axiale, nous avons observé l'effet de l'interaction entre l'onde de surface et un défaut et nous avons montré que l'analyse du signal permettait de détecter un défaut situé sur le trajet de l'onde ultrasonore.

Le chapitre IV a été consacré à la partie expérimentale de notre approche innovante pour le contrôle de géométries cylindriques pleines et bornées à l'aide de la propagation des ondes de surface hélicoïdales et de leurs réflexions au niveau des faces. Le modèle analytique présenté au chapitre II nous a permis de montrer qu'en fonction de la fréquence acoustique, du diamètre du rouleau et de l'angle d'inclinaison de la source ligne par rapport à l'axe de révolution du rouleau, la vitesse de l'onde de surface variait. La représentation plane du rouleau développée également au chapitre II nous a permis de prédire et d'interpréter le déplacement mesuré par interférométrie. Dans un premier temps, nous avons effectué divers essais afin de valider la nature hélicoïdale et surfacique des ondes générées. Cette confirmation nous a permis d'étudier la détection de défauts en nous basant sur les modèles mathématiques. Nous avons alors montré qu'un défaut pouvait être détecté par identification des composantes fréquentielles réfléchies par celui-ci ou par analyse fréquentielle des signaux relevés. La détection a été possible aussi bien pour des défauts naturels que pour des défauts artificiels avec pour limite le rapport entre la longueur d'onde acoustique de l'onde de surface et les dimensions du défaut. Seules les brûlures n'ont pas pu être mises en évidence. Pour finir, nous nous sommes intéressés à l'influence du diamètre du cylindre et de la nuance du

matériau. Nous avons alors constaté une différence dans les temps de vol. L'analyse de ce paramètre pourrait être exploitée pour vérifier les dimensions des rouleaux et d'effectuer un tri des nuances d'acier. La méthode consistant à exciter des ondes de surface hélicoïdales est capable, en une seule mesure, de mettre en évidence la présence d'un défaut s'il est sur le trajet d'une des ondes même s'il est éloigné des zones de génération et de détection, de déterminer les dimensions du rouleau et de vérifier la nature du matériau utilisé. Nous retenons de ce chapitre que l'utilisation d'ondes de surface hélicoïdales avec réflexion de celles-ci au niveau des faces permet de contrôler une zone bien plus étendue que dans le cas d'ondes de surface se propageant soit axialement, soit circonférentiellement. Cette méthode permet donc de réduire significativement le nombre de mesures et en conséquence le temps de contrôle.

Le dernier chapitre a été consacré à une présentation d'essais complémentaires et aux perspectives de la méthode Ultrasons-Laser. Dans un premier temps, nous avons comparé cette méthode aux méthodes de contrôle non destructif utilisées dans le cadre de la fabrication de rouleaux en acier. En effet, les méthodes industrielles disponibles sont majoritairement basées sur les propriétés électriques et magnétiques des métaux. Pour ces essais, nous avons utilisé un équipement basé sur les courants de Foucault et sur la magnétoscopie. Nous en avons conclu que la méthode développée dans nos travaux apportent une méthode automatisable pour contrôler des rouleaux en acier et en céramique. Dans un second temps, nous avons expérimenté sommairement la propagation d'ondes hélicoïdales sur un rouleau "tonneau". Il s'agit d'un autre type de géométrie utilisé comme élément roulant à la place des rouleaux cylindriques. Cette géométrie complexifie la mise en œuvre de systèmes de contrôle non destructif classiques, mais l'utilisation d'une méthode sans contact nous permet de nous affranchir des problèmes de génération et de détection des ondes ultrasonores. La forme en tonneau modifie l'approche théorique, nous ne pouvons donc plus utiliser les modèles précédents. L'expérimentation nous a permis de montrer que la propagation d'une onde de surface hélicoïdale sur un rouleau sphérique étant proche de celle observée sur un rouleau cylindrique. La détection d'un défaut reste identique aux autres cas.

Dans un dernier temps, nous avons proposé des perspectives d'amélioration sur différents points identifiés durant nos travaux, comme définir une largeur de bande acoustique adaptée aux dimensions du défaut que l'on souhaite détecter, intégrer les diagrammes de directivité des ondes de surface dans la représentation plane des trajectoires des ondes, développer une approche théorique complète pour prédire les phénomènes de propagation des ondes ultrasonores de surface dans une géométrie de type "tonneau", interpréter les signaux

acquis pour un rouleau "tonneau" et enfin proposer une réflexion sur la conception d'un système optique ou mécanique permettant de contrôler plus efficacement ces rouleaux.

Etant donné notre partenariat avec l'entreprise SKF, nous avons choisi de valoriser les travaux prioritairement par un brevet, afin de protéger les aspects innovants de la méthode de contrôle non destructif par Ultrasons-Laser dédiée aux rouleaux. Ce brevet permettra à SKF de protéger de cette méthode de contrôle vis-à-vis de ses concurrents.

Résumé

L'arrivée de nouveaux matériaux dans les industries manufacturières engendre de nouvelles problématiques de contrôle. C'est notamment le cas pour l'entreprise SKF qui introduit dans ses roulements des rouleaux en céramique. Ces rouleaux peuvent avoir deux géométries différentes, en forme de cylindre ou de tonneau. La plupart des méthodes de Contrôle Non Destructif dédiées aux rouleaux en acier ne sont pas exploitables pour ceux en céramique, c'est pourquoi il est nécessaire de développer une nouvelle approche.

Dans ces travaux, nous nous sommes intéressés à la méthode Ultrasons-Laser. L'utilisation de lasers permet de générer et de détecter des ondes ultrasonores sans contact sur des structures en acier ou en céramique. Une étude des diagrammes de directivité pour les sources les plus communes et le calcul des courbes de dispersion liées à la géométrie cylindrique ont été effectués. Ces éléments nous ont permis d'interpréter les signaux acquis expérimentalement. Nous avons alors pu montrer que la méthode était efficace pour la détection de défauts de différentes natures sur des rouleaux de forme cylindrique en acier et en céramique. Une méthode originale a été proposée et étudiée théoriquement et expérimentalement afin de réduire significativement le temps de contrôle d'un rouleau et ainsi optimiser la méthode. Cette méthode a été étendue avec succès aux rouleaux de forme "tonneau".

Mots-clés : ultrasons-laser, onde de surface, détection de défauts, cylindre, roulements.

Abstract

The development of new materials in industries creates new issues about their control. It is the case for SKF introduces ceramic rollers in its bearings. These rollers can have two different geometries, cylinder or barrel. Most methods of Non Destructive Testing developed for steel rollers analysis are not adapted for ceramic rollers. In fact, these equipments use electrical of metal materials properties to control a solid. In consequence, it is necessary to develop a new approach for ceramic structures.

In this report, we are studying Ultrasonics Laser method. The use of lasers allows to generate and to detect ultrasound waves without contact on steel or ceramic media. A study of directivity patterns for the most common thermoelastic sources and calculation of dispersive curves due to cylindrical geometry have been done. The results of these studies allow us to interpret different signals obtained during ours experimentations. We have shown that the method was efficient for the detection of different types of defects present on ceramic and steel rollers. An original approach has been proposed and studied, theoretically and experimentally, to reduce significantly the time of control for a cylindrical roller. This approach have been extended to a ceramic barrel roller with success.

Keywords : laser ultrasonics, defects detection, surface wave, cylinder, bearings