

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE AÉROSPATIAL
M. Ing.

PAR
Atousa POURFARD

ÉVALUATION DE MÉTHODES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIVES (CND)
ALTERNATIVES POUR REMPLACER L'ATTAQUE ANODIQUE
DES SUPERALLIAGES DE NICKEL

MONTREAL, LE 18 NOVEMBRE 2014

©Tous droits réservés, Atousa Pourfard, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Martin Viens, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Philippe Bocher, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Pierre Bélanger, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 FÉVRIER 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

DÉDICACE

Adressée à
Messieurs Martin Viens et Jean Carpentier

AVANT-PROPOS

La mémoire des expériences difficiles de mon cheminement éducatif est, aujourd'hui, une anecdote de ma vie. J'avais quatre ans et demi dans le temps où je pleurais et insistais pour aller à l'école. À l'époque, nous habitions dans un complexe de base militaire. Tous les enfants allaient à l'école à l'exception de moi, parce que j'étais la plus petite. La direction de l'école ne m'a pas considérée comme une étudiante officielle et, par conséquent, l'enseignante m'a donné juste une chaise, non pas un bureau. Je devais m'accroupir et écrire sur la chaise. J'ai détesté ma première enseignante et, deux fois, je me suis évadée de l'école. Ma mère a été inquiète de cette situation ; elle a décidé de m'enseigner à la maison et j'ai passé mes examens finaux dans une école privée avec des enfants juifs.

La dernière année de l'école primaire, j'ai été souffletée au visage par l'enseignante, car j'ai donné une réponse correcte à une question de mathématique d'une méthode différente de celle qu'elle nous avait enseignée. Malgré elle, à l'examen final, j'ai obtenu le troisième prix parmi tous les étudiants des écoles de la ville. En septième année scolaire, j'ai écrit un essai sur le fait que je souhaitais devenir une personne scientifique pour les stations spatiales. À l'époque, j'avais quelques informations de base sur la NASA et sur la conquête spatiale. L'enseignante a noté en bas de page : « Imagine-toi une personne qui sera utile pour ton pays ». Cette femme avait peut-être une physionomie douce, mais je l'ai considérée comme une géante qui ne comprenait pas ses élèves.

Ma première année d'école secondaire coïncidait avec le commencement de huit ans de guerre entre deux pays. À l'époque, nous habitions dans une ville assez près de la frontière. Toutes les écoles de la ville ont été fermées pour un temps indéterminé. Encore autre fois, nous habitions sur une base militaire dans laquelle un petit groupe d'étudiants s'est formé, mais il n'y avait pas d'autres étudiants de mon niveau. Mon frère et une amie m'ont aidée en physique et en mathématique ; ma mère pour la littérature ; quelques fois j'ai obtenu du soutien de mon père à distance. À la fin de l'année scolaire, les écoles ont été rouvertes pendant trois semaines pour ceux qui voulaient passer les examens finaux.

VIII

Les années subséquentes, je n'ai pas pu étudier au programme de physique et de mathématique à l'école secondaire. Dans la ville où nous habitions, il y avait justement quatre autres filles et moi, candidates au programme de physique et de mathématique. Le bureau d'éducation de la ville n'a pas accepté d'organiser les cours du programme de physique et de mathématique pour cinq filles, en considérant que les écoles de garçons et filles étaient séparées. J'ai continué le programme de science et alors, même si j'ai fini l'école secondaire avec une note de 95.6, à l'université, je n'ai pas pu choisir le programme de génie, qui était mon rêve. J'ai choisi le baccalauréat en chimie pour ses vastes possibilités dans les industries. Deux fois, je me suis efforcée de continuer mes études à la maîtrise en chimie physique, mais la vie m'a obligée à délaisser mes études.

Au Canada, j'ai résidé quelques années sans avoir le droit de fréquenter l'école. Mais la vie m'a finalement offert un cadeau de la Providence pour mieux comprendre toutes mes expériences pratiques des longues années de travail ; l'ingénierie inverse de ma vie. Dans le temps difficile du recommencement de mes études après 22 ans, Dr Louis Rivest, le professeur, m'a écoutée avec une grande patience et il a essayé de trouver une solution pour les obstacles de ma première session. Malgré ses efforts remarquables, mes formations étaient très loin du génie de la production automatisée. On croit que lorsque toutes les portes sont fermées, la meilleure porte est ouverte. Au moment où je me suis sentie abandonnée par les professeurs, mon directeur de recherche, Dr Martin Viens, m'a acceptée pour un projet de recherche prometteur qui correspondait à mes informations précédentes. Dr Viens est celui qui est le plus important dans ma vie éducative. Il est plutôt un ami qu'un directeur de recherche. Sans avoir ses conseils techniques, son important soutien, sa direction professionnelle et sans son entière humanité, mon rêve ne se serait jamais réalisé.

« C'est justement la possibilité de réaliser un rêve qui rend la vie intéressante. » (Coelho, 1947, p. 33) Je souhaite que mes études en génie aérospatial soient au service de mon pays, le Canada.

REMERCIEMENTS

Je témoigne de ma reconnaissance à toutes les personnes et les organismes qui m'ont soutenue dans mes études.

J'exprime mes sincères remerciements et mon profond respect à mon directeur de recherche, Dr Martin Viens. Il m'a laissé une grande autonomie dans l'accomplissement de ce mémoire, mais sans avoir ses conseils techniques, son important soutien et sa direction professionnelle, ce projet ne se serait jamais réalisé.

Je suis reconnaissante aux membres du jury pour leur participation et leurs suggestions critiques et pertinentes qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Je manifeste ma sincère gratitude à Dr Hany Moustapha, directeur d'AéroÉTS, à Dr Philippe Bocher ainsi qu'à tous mes professeurs de l'ÉTS. Également, mes remerciements éternels au personnel de l'ÉTS pour leur soutien.

Je tiens à remercier Dr Peter B. Nagy¹ pour ses précieux conseils et ses opinions scientifiques puis pour avoir eu l'occasion de communiquer avec lui par courriel. Je souligne ses sources documentaires qui donnent une orientation privilégiée au procédé de revue de la littérature.

J'apprécie la collaboration et la patience remarquable de Monsieur Éric Marcoux, assistant de recherche du laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes du département de génie mécanique, pendant les tests d'ultrason en immersion. Aussi, je remercie l'assistance de Messieurs Michel Orsini et Mario Corbin, les techniciens de l'application technologique et informatique du département de génie mécanique. Mes remerciements sont également

¹ Dr Peter B. Nagy, professeur de *Aerospace Engineering & Engineering Mechanics*, peter.nagy@uc.edu, département de *Aerospace Engineering and Engineering Mechanics*, université de Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0070, USA

adressés à mes camarades, Messieurs Albert Nubiola, Martin Cardonne et David Dubois, pour résoudre mes problèmes de mathématique.

Je remercie Messieurs Louis Poitras, Patrick Desrosiers et Brian Girard de la compagnie Bombardier Aerospace, pour la permission de me familiariser avec l'appareil d'imagerie magnéto-optique. Je suis aussi reconnaissante envers Madame Diane Troy¹ pour m'avoir fourni les informations par courriel sur la technique d'imagerie magnéto-optique.

J'exprime ma gratitude à la compagnie Pratt & Whitney pour une bourse d'études, au gouvernement du Québec pour l'aide financière, ainsi qu'à Madame Sylvie Gagnon, associée de la Banque Royale du Canada, pour son action rapide et pour le soutien financier.

Je suis reconnaissante envers mes amis québécois, Mesdames Valérie Soledad Legendre et Hélène Gingras ainsi que Monsieur Denis Barrette, pour leurs encouragements.

J'éprouve de la gratitude envers Madame Josée Madore, ma formatrice-tutrice en langue française, pour avoir effectué la lecture et la révision linguistique finale du texte en français.

Mes remerciements sont adressés à Madame Francine Verrier, directrice des relations avec la collectivité de l'ÉTS, pour avoir le plaisir d'une expérience artistique parascolaire durant mes études.

Je prie Monsieur Jean Carpentier, vice-président de Pétrumont, de me permettre d'exprimer ma profonde reconnaissance et mon respect pour avoir eu la chance de retourner aux études.

Sûrement, je ne pourrai jamais exprimer toute ma gratitude par des mots et des phrases.

¹ Diane Troy, Customer Relations Rep, QUEST Integrated, Inc., 19823 58th Place S, Suite 200, Kent, WA 98032, 253-872-9500, Tel: 253-480-2010 ext. Fax : 1234, 253-872-8967, www.qi2.com

ÉVALUATION DE MÉTHODES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIVES (CND) ALTERNATIVES POUR REMPLACER L'ATTAQUE ANODIQUE DES SUPERALLIAGES DE NICKEL

Atousa POURFARD

RÉSUMÉ

Les superalliages de nickel, comme le Waspaloy, ont trouvé leur place dans différentes industries grâce à leurs caractéristiques particulières, notamment la bonne résistance à la corrosion à haute température. Ce mémoire porte sur l'identification d'une méthode d'inspection non destructive à sec, pour révéler les défauts microstructuraux sur un échantillon usiné de disque de turbine de superalliage de nickel : le Waspaloy. Les précipités intermétalliques augmentent la résistance à la traction, la résistance au fluage, la limite d'élasticité et la limite de rupture du superalliage. Cependant, les défauts microstructuraux, les *freckles* et les *white spots*, ont des effets négatifs sur les propriétés mécaniques des superalliages de nickel. Ce document présente une étude approfondie de l'origine et de la nature des *freckles* et des *white spots*. Les travaux expérimentaux sont principalement concentrés sur les mesures de conductivité électrique par courants de Foucault et sur les mesures ultrasonores par ondes acoustiques de surface (les ondes de Rayleigh). Pour enrichir la capacité d'analyse, une étude sur la technique de l'imagerie magnéto-optique est également présentée dans ce document. Le contrôle des paramètres de mesure confirme l'efficacité de chaque technique. Ce rapport rend compte des résultats satisfaisants qui pourront servir pour les recherches et les travaux à venir.

Mots clés

Waspaloy, White spots, Ségrégation, Freckles, Contrôle non destructif

ÉVALUATION DE MÉTHODES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIVES (CND) ALTERNATIVES POUR REMPLACER L'ATTAQUE ANODIQUE DES SUPERALLIAGES DE NICKEL

Atousa POURFARD

ABSTRACT

Nickel-based superalloys, such as Waspaloy, have found their places in different industries because of their special characteristics, particularly their good resistance to corrosion at high temperature. This thesis focuses on research to identify a dry, non-destructive method of inspection to reveal microstructural defects on a turbine disk sample machined from Waspaloy, a nickel-based superalloy. Intermetallic precipitates increase tensile strength, creep resistance, limit of elasticity and ultimate tensile strength of superalloy. However, microstructural anomalies such as freckles and white spots have negative effects on mechanical properties of nickel-based superalloys. This document presents a detailed study about the origin and the nature of freckles and white spots. Experimental works are mainly concentrated on the measurement of electrical conductivities by eddy-current and on ultrasonic measurements by surface acoustic waves (Rayleigh surface waves). To enrich the capacity of analysis, a study on Magneto-optic Imaging is also presented in this document. By controlling measurement parameters, the effectiveness of each technique is confirmed. This report gives satisfactory results that can be used as references for further researches.

Key words

Waspaloy, White spots, Segregation, Freckles, Non-destructive Testing

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ORIGINE ET NATURE DES SÉGRÉGATIONS MÉTALLURGIQUES	5
1.1 Superalliage de nickel	5
1.2 Éléments d'alliage	5
1.2.1 Phase gamma	7
1.2.2 Phase gamma prime	7
1.2.3 Précipités de carbures	8
1.3 Composition et caractéristiques	8
1.4 Ségrégation	10
1.4.1 Freckles	11
1.4.2 White spots	15
1.4.2.1 White spots discrets	16
1.4.2.2 White spots dendritiques	18
1.4.2.3 White spots de la solidification	19
1.5 Attaque métallographique	19
1.6 Propriétés mécaniques des superalliages	23
1.7 Discussion	24
CHAPITRE 2 MESURE DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE PAR COURANTS DE FOUCAULT	25
2.1 Principe des courants de Foucault	25
2.2 Paramètres de mesure	26
2.2.1 Impédance et réactance	26
2.2.2 Conductivité et fréquence	27
2.2.3 Distance de retrait	28
2.2.4 Effet pelliculaire	29
2.2.5 Caractéristiques de la pièce inspectée et de la sonde	30
2.3 Contraintes résiduelles près de la surface des superalliages grenailés	31
2.4 Discussion	35
CHAPITRE 3 MESURE DE LA VITESSE DE L'ONDE ACOUSTIQUE DE SURFACE (SAW)	37
3.1 Ondes de Rayleigh	37
3.2 Paramètres de mesure	38
3.3 Théorie du ratio de Poisson et du module de Young	39
3.4 Vitesse des ondes de Rayleigh	40
3.5 Évaluation des microstructures par les ondes de Rayleigh	42
3.6 Générer les ondes acoustiques de surface	43

3.6.1	Transducteur ultrasonore	43
3.6.2	Transducteur à sabot	44
3.7	Études préparatoires d'inspection par ondes de Rayleigh	48
3.7.1	Acoustique non linéaire	50
3.8	Discussion	51
CHAPITRE 4 IMAGERIE MAGNÉTO-OPTIQUE.....		53
4.1	Principe de l'imagerie magnéto-optique	53
4.2	Composantes de l'appareil magnéto-optique.....	53
4.2.1	Capteur magnéto-optique.....	54
4.2.2	Feuille d'inductance et excitation des courants de Foucault	57
4.2.3	Caméra CCD et vidéo	60
4.3	Traitement d'image	62
4.4	Développement et performance	62
4.4.1	Appareil d'imagerie MOI 308/37/TDF	63
4.5	Imagerie magnéto-optique et l'image de courants de Foucault	66
4.6	Microscopie magnéto-optique de Kerr	66
4.7	Imagerie magnéto-optique et propriétés physico-chimiques du Waspaloy	68
4.8	Discussion	69
CHAPITRE 5 RECHERCHES EXPÉRIMENTALES		71
5.1	Disque de turbine soumis à l'inspection	71
5.2	Documentation photographique.....	72
5.3	Essai de courants de Foucault	73
5.4	Masse volumique du Waspaloy	79
5.5	Essai ultrasonore	80
5.5.1	Transducteurs et couplant acoustique	80
5.5.2	Vitesse d'onde longitudinale.....	82
5.5.3	Vitesse de l'onde transversale.....	88
5.5.4	Calcul de la vitesse d'onde de surface	93
5.6	Mesure en immersion.....	94
5.7	Discussion	99
CONCLUSION		101
RECOMMANDATIONS		103
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		105

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Composition chimique de Waspaloy6
Tableau 1.2	Agents de l'attaque chimique.....22
Tableau 1.3	Agents de l'attaque chimique pour le Waspaloy22
Tableau 5.1	Propriétés acoustiques de l'Inconel80
Tableau 5.2	Configuration de l'appareil de mesure ultrasonore longitudinale.....82
Tableau 5.3	Données de mesure de la vitesse de l'onde longitudinale.....85
Tableau 5.4	Configuration de l'appareil de mesure ultrasonore transversale.....88
Tableau 5.5	Données de la mesure de la vitesse de l'onde transversale.....91
Tableau 5.6	Configuration de l'appareil de mesure ultrasonore.....96

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagrammes de phase ternaire Ni-Ti-Al.....8
Figure 1.2	Phase gamma prime de Waspaloy10
Figure 1.3	Vues de coupe longitudinale et radiale d'un lingot de Waspaloy.....13
Figure 1.4	«Représentation schématique du procédé <i>VAR</i> ».....14
Figure 1.5	Schéma longitudinal de la structure de lingot.....16
Figure 1.6	<i>White spot</i> discret et la fissure associée.....21
Figure 1.7	<i>Freckle</i> dans le <i>Gatorizable</i> Waspaloy21
Figure 2.1	Schéma des courants de Foucault25
Figure 2.2	Composantes d'impédance27
Figure 2.3	Effet de la conductivité (a) et la fréquence (b) sur l'impédance de bobine.....28
Figure 2.4	Pénétration standard.....30
Figure 2.5	Conductivité électrique au cours de la recuisson.....32
Figure 2.6	Images de conductivité des échantillons de Waspaloy33
Figure 2.7	Imagerie (a) courants de Foucault (b) microscopie acoustique34
Figure 3.1	Déplacement mécanique près de la surface37
Figure 3.2	Déplacements relatifs des ondes de Rayleigh.....38
Figure 3.3	Transducteur ultrasonore44
Figure 3.4	Générer les ondes de surface.....44
Figure 3.5	Réfraction de l'onde incidente45
Figure 3.6	Conversion de mode des ondes ultrasonores46
Figure 3.7	Angle d'incidence et les ondes réfractées47

Figure 3.8	Générer les ondes de surface par un médiateur	48
Figure 3.9	Propagation linéaire et non linéaire d'onde	50
Figure 4.1	Rotation de Faraday doublée	56
Figure 4.2	Couche cristalline du capteur.....	56
Figure 4.3	Détection des fissures par rotation de Faraday	57
Figure 4.4	Ensemble des transformateurs orthogonaux	58
Figure 4.5	Excitation multidirectionnelle.....	59
Figure 4.6	Configuration du câble connecteur	59
Figure 4.7	Ajustement de la fréquence.....	60
Figure 4.8	Effet de mode d'excitation.....	61
Figure 4.9	Appareil MOI 308/37/TDF, unité de contrôle	63
Figure 4.10	Capteur magnéto-optique.....	64
Figure 4.11	Visiocasque de l'appareil magnéto-optique.....	65
Figure 4.12	Deux fissures sur plaque d'étalonnage	65
Figure 4.13	Effet magnéto-optique de Kerr	67
Figure 5.1	Disque de turbine de superalliage de nickel, le Waspaloy.....	71
Figure 5.2	Image captée par l'appareil photo AmScope	72
Figure 5.3	Image captée par l'appareil photo Clemex Firewire1	73
Figure 5.4	Courbes de la distance de retrait, <i>lift-off</i> , l'étalonnage	74
Figure 5.5	Courbes de <i>lift-off</i> , la normalisation d'impédance.....	75
Figure 5.6	Courbes de <i>lift-off</i> , différents endroits de l'échantillon	76
Figure 5.7	Distribution des conductivités sur la surface horizontale	77
Figure 5.8	Distribution des conductivités sur la surface conique.....	78
Figure 5.9	Sondes ultrasonores V103-RM (a) Gamma HP (b) V156-RM (c)	81

Figure 5.10	Disque de Waspaloy avec la sonde V153	81
Figure 5.11	Mesure d'onde longitudinale sur le point 66, la sonde Gamma HP	83
Figure 5.12	Vitesse de l'onde longitudinale sur la surface horizontale	84
Figure 5.13	Échos et bruits de l'onde longitudinale sur la surface conique.....	84
Figure 5.14	Mesure d'onde longitudinale, la sonde V103	86
Figure 5.15	Échos et bruits de l'onde longitudinale sur la surface conique.....	87
Figure 5.16	Onde longitudinale sur la surface conique en immersion.....	87
Figure 5.17	Mesure de la vitesse transversale sur l'étendue 64.68 μ s	89
Figure 5.18	Signaux importants indiqués par les curseurs.....	89
Figure 5.19	Mesure de la vitesse transversale sur le point 24.....	90
Figure 5.20	Vitesse de l'onde transversale sur la surface horizontale	90
Figure 5.21	Échos et bruits d'onde transversale sur la surface conique.....	92
Figure 5.22	Onde transversale sur la surface conique en immersion.....	92
Figure 5.23	Disque de Waspaloy dans le bassin d'eau	94
Figure 5.24	Disque de Waspaloy dans le bassin d'eau	95
Figure 5.25	Sonde travers le défaut de ségrégation.....	95
Figure 5.26	Échos ultrasonores sur la surface conique, la sonde A315S-SU	97
Figure 5.27	Échos ultrasonores sur la surface conique, la sonde A308S-SU	97
Figure 5.28	Schéma simplifié du profil du disque de Waspaloy.....	98
Figure 5.29	Principe de la micro-interférométrie	99

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CCD	Caméra à dispositif de couplage de charge
Écran ACL	Affichage à cristaux liquides
ESR	Electroslag remelting ou Refining
IACS	International Annealed Copper Standard
MOI	Magneto-Optic Imaging
MUSIC	Multiple Signal Characterization Algorithm
PZT	Piezoelectric lead zirconate titanate film
SAW	Surface Acoustic Wave
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
VAR	Vacuum Arc Remelting ou Refining
VIM	Vacuum-Induction Melting

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

<u>Symbole</u>	<u>Description</u>
C	Capacitance (F)
λ	Coefficient de Lamé (Pa)
σ	Conductivité électrique (S/m)
d	Densité (g/cm ³)
f	Fréquence (Hz)
L	Inductance (H)
G	Module de cisaillement, constante de Lamé (Pa)
E	Module de Young (Pa)
μ	Perméabilité magnétique (H/m)
μ_r	Perméabilité magnétique relative (Sans dimension)
δ	Profondeur de pénétration (m)
ν	Ratio de Poisson (Sans dimension)
X_C	Réactance capacitive (Ω)
X_L	Réactance inductive (Ω)
ρ	Résistivité électrique ($\mu\Omega\text{-cm}$ / $\Omega\text{-m}$)
T	Température : Celsius (°C) Kelvin (°K) Fahrenheit (°F)
V	Vélocité des ondes ultrasonores (m/s)

INTRODUCTION

Ce mémoire de maîtrise porte sur l'étude de méthodes d'inspection non destructive à sec pour révéler les anomalies telles que des *white spots* et des marques de brûlure¹ sur des composants usinés en superalliage de nickel. La faisabilité des méthodes par courants de Foucault et par ondes acoustiques de surface (SAW) est évaluée pour ce propos. La sensibilité, la facilité d'application et la rapidité de l'inspection sont quelques éléments critiques fondamentaux dans cette étude.

Il est pertinent d'étudier une méthode non destructive à sec puisque la technique des attaques chimiques² est actuellement la seule façon de détecter ces défauts métallurgiques. Cette technique échoue si les inclusions ne s'étendent pas sur la surface.

Les superalliages de nickel sont naturellement hétérogènes et, par conséquent, il est normal d'y observer des variations de conductivité. En supposant que des *white spots* (des ségrégations³ négatives) et des *freckles* (des ségrégations positives) perturbent la conductivité électrique d'un tel matériau, comment les différencier de celles dues à l'hétérogénéité naturelle du matériau ?

Paul D. Genereux (2000) affirme qu'en utilisant l'onde longitudinale ou l'onde de cisaillement (l'onde transversale) aucune différence significative de l'écho ou de l'atténuation ultrasonore associée à l'indication des *freckles* n'a été observée. En considérant cette affirmation, dans l'hypothèse que la présence des *white spots* et des *freckles* affecte la

¹ Marque de polissage ; imperfection de surface (apparence givrée) causée par une température excessive lors du polissage. (Dictionnaire TERMIUM Plus)

² L'attaque métallographique

³ Dans certaines références et pour certains alliages comme alliage du cuivre Cu-Ni, le phénomène de ségrégation est nommé *Coring* : 1- Beddoes, Jonathan, et M.J. Bibby. 1999. *Principles of metal manufacturing processes*. En ligne. < <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780340731628> >. Consulté le 12 août 2013. 2-Tottle, Charles Ronald. 1984. *An encyclopaedia of metallurgy and materials*. Plymouth, UK: Macdonald and Evans, 380 p.

rigidité locale du superalliage de nickel, est-ce que les ondes acoustiques de surface (SAW) permettront de distinguer ces discontinuités microstructurales ?

Afin de respecter les exigences du plan de gestion du projet, ce travail de recherche est globalement basé sur trois parties : la revue de la littérature, l'étude préliminaire des techniques relatives et les travaux expérimentaux.

La première partie de ce travail comporte la revue de la littérature. Elle est constituée des trois premiers chapitres afin d'atteindre les objectifs suivants :

- I. Identifier l'origine des ségrégations dans les superalliages de nickel et étudier la microstructure de ces défauts en ce qui concerne la taille des grains, la concentration des précipités et l'impact de tels défauts sur les propriétés mécaniques des superalliages;
- II. Définir les mesures de conductivité électrique de surface basées sur les courants de Foucault et évaluer les paramètres qui caractérisent la qualité et la fiabilité de telles mesures;
- III. Définir les mesures par les ondes ultrasonores de surface (SAW) et les moyens pour générer et détecter de telles ondes. Ainsi, maîtriser les autres techniques ultrasonores et les paramètres qui définissent la qualité et la fiabilité d'une telle mesure.

Au cours de la deuxième partie, deux techniques complémentaires, rapides et reliées au sujet de cette recherche sont l'objet d'études préliminaires :

1. L'imagerie magnéto-optique (MOI) : technique de visualisation du champ magnétique, basée sur les courants de Foucault et l'effet de rotation de Faraday. La fiabilité de l'inspection est un des avantages de la technique d'imagerie magnéto-optique. Cette technique est actuellement accessible pour l'inspection de grandes surfaces de fuselage d'avions. Une description plus précise de cette technique est fournie dans le quatrième chapitre de ce mémoire.
2. Magnétomètre de type SQUID : méthode thermoélectrique de mesure du champ magnétique. Tavrín et Hinken (1999) confirment que cette méthode est un choix

efficace pour détecter des inhomogénéités et des inclusions non ferromagnétiques et métalliques dans des superalliages de nickel, notamment le Waspaloy. Au contraire, selon le savoir empirique de Dr Nagy, la technique SQUID n'est plus applicable, car elle est trop coûteuse, difficile à exploiter et sensible aux bruits magnétiques. Pour cette raison, la description du système n'est pas présentée dans ce document.

La troisième partie, le chapitre cinq, contient la méthodologie utilisée, la description des étapes d'évaluation empirique ainsi que la présentation et l'interprétation des résultats. Les résultats et les données de mesure par courants de Foucault sont interprétés en termes de propriété microstructurale et de conductivité de l'échantillon. Simultanément, les résultats de mesure par ondes ultrasonores sont expliqués en considérant les propriétés mécaniques et la forme de l'échantillon. Des limites inévitables empêchent la continuité des travaux expérimentaux : les limites d'accès aux laboratoires, l'insuffisance des accessoires des appareils de mesure, comme la sonde des courants de Foucault et le sabot des ondes ultrasonores de surface, l'achat d'un transducteur qui dure plus longtemps que prévu, la taille limitée de la ségrégation et sa position sur la surface de l'échantillon. Tout en acceptant ces limites, les actions nécessaires sont dirigées et modifiées au fur et à mesure et le projet est ingénieusement adapté en conséquence des moyens accessibles sous la direction du directeur de recherche.

CHAPITRE 1

ORIGINE ET NATURE DES SÉGRÉGATIONS MÉTALLURGIQUES

1.1 Superalliage de nickel

Un superalliage est un alliage métallique réfractaire qui résiste aux hautes températures et le nickel est un métal particulièrement apprécié pour sa bonne résistance à certaines corrosions, notamment à la corrosion à chaud. Les superalliages de nickel sont utilisés dans l'aéronautique, l'aérospatiale, les installations chimiques et pétrochimiques, les structures marines et les centrales électriques. Le choix de ces matériaux est basé sur une bonne combinaison de caractéristiques particulières : la limite d'élasticité, la résistance à la traction, la résistance au fluage, l'usinabilité et la soudabilité ainsi que la bonne résistance à la corrosion à haute température.

Le Waspaloy, numéro d'UNS¹ N07001, est une marque de commerce de la *United Technology Corporation*. Dans ce travail, les données de référence sont principalement tirées des sources documentaires et des fiches techniques de *Carpenter Technology Corporation* et *The Special Metals Corporation*.

1.2 Éléments d'alliage

Le traitement thermique et les processus de production optimisent les propriétés mécaniques des superalliages. En parallèle, la composition chimique du superalliage est très importante pour fournir les propriétés souhaitées. Les superalliages contiennent une variété d'éléments combinés en accord avec le processus de vieillissement, d'usinage et l'utilisation finale de la pièce. Le tableau 1.1 montre la composition nominale du Waspaloy durci par précipitation et résistant à la corrosion à haute température (871°C) (*Carpenter Technology Corporation*, 2012).

¹ Le système de la numérotation unifié, géré par *ASTM International* et *SAE International*

Tableau 1.1 Composition chimique de Waspaloy
Tiré de (Carpenter Technology Corporation, 1989)

La composition chimique, pourcentage massique			
Carbone	0,02 à 0,10	Manganèse	0,50 (Maximum)
Sulfure	0,020 (Maximum)	Silicium	0,75 (Maximum)
Chrome	18,00 à 21,00	Fer	2,00 (Maximum)
Molybdène	3,50 à 5,00	Cuivre	0,10 (Maximum)
Cobalt	12,00 à 15,00	Titane	2,75 à 3,25
Aluminium	1,20 à 1,50	Bore	0,003 à 0,008
Zirconium	0,02 à 0,12	Nickel	Balance

Les superalliages de nickel contiennent généralement des précipités intermétalliques et des carbures qui se produisent au cours du traitement de vieillissement. Ces précipités intermétalliques déterminent les propriétés mécaniques du superalliage. Les résultats des études de Kumar et coll. (2006) expliquent l'influence de la précipitation sur la vitesse ultrasonore. Ainsi, ils montrent la corrélation entre trois éléments : la vitesse ultrasonore, les propriétés mécaniques et la limite d'élasticité apparente ou la dureté, en considérant la taille des grains et le type de précipités. Les propriétés physiques, la conductivité électrique, la conductivité thermique et la densité des superalliages sont influencées par les éléments d'alliage et par les processus de traitement de vieillissement qui contrôlent les propriétés polycristallines et l'orientation des grains.

La connaissance théorique des caractéristiques des phases et des précipités, dans le superalliage polycristallin de Waspaloy, permet de mieux expliquer les phénomènes physiques observés pendant les travaux pratiques de ce projet. De ce fait, un extrait de la nature et des propriétés des phases, tiré du manuel de l'ASM International (Vander Voort, 2004), est présenté dans les prochains paragraphes.

1.2.1 Phase gamma

La phase gamma, γ , est l'élément principal de tous les superalliages et la phase austénitique de la matrice. Cette phase est durcie par solution solide et par les précipités de la phase gamma prime (γ') et du carbure. La phase gamma est cubique à faces centrées¹ et la maille cubique comporte une distribution aléatoire de différents atomes (Bhadeshia, 2012).

1.2.2 Phase gamma prime

La phase gamma prime (γ') est cubique à faces centrées d'une structure cristalline géométriquement compacte² et très stable de Ni_3Al , de Ni_3Ti ou de Ni_3 (Al, Ti). La maille cubique contient des atomes de nickel aux centres des faces et des atomes d'aluminium ou de titane aux coins du cube. Parfois, par substitution des éléments, le nickel est remplacé par le cobalt, le chrome ou le fer et l'aluminium est remplacé par le fer.

Le réseau cristallin de la phase gamma prime est très similaire à celui de la matrice et donc, deux phases gamma et gamma prime sont cohérentes. La variation de teneur en molybdène et le rapport quantitatif entre l'aluminium et le titane changent la morphologie de la phase gamma prime et affectent la cohérence entre les deux phases gamma et gamma prime (Vander Voort, 2004, p. 835). Dans le Waspaloy, la teneur en molybdène et le ratio d'aluminium par rapport au titane sont élevés. Dans certains superalliages le facteur d'inégalité³ des réseaux cristallins est trop élevé et, par conséquent, l'exposition de matériaux à haute température finira par la transformation de la phase gamma prime en phases indésirables η (Ni_3Ti), ou δ (Ni_3Nb) (Vander Voort, 2004, p. 835).

La fraction volumique, la taille et la distribution de la phase gamma prime sont les paramètres les plus importants pour contrôler les propriétés des superalliages. La phase

¹ CFC

² *Close-packed*

³ *Mismatch*

gamma prime est principalement responsable de la résistance du matériau à la température élevée et à la déformation microstructurale par fluage. Illustrée dans les diagrammes de phase ternaire¹ de la figure 1.1, la quantité de la phase gamma prime dépend de la composition chimique et de la température de traitement du vieillissement.

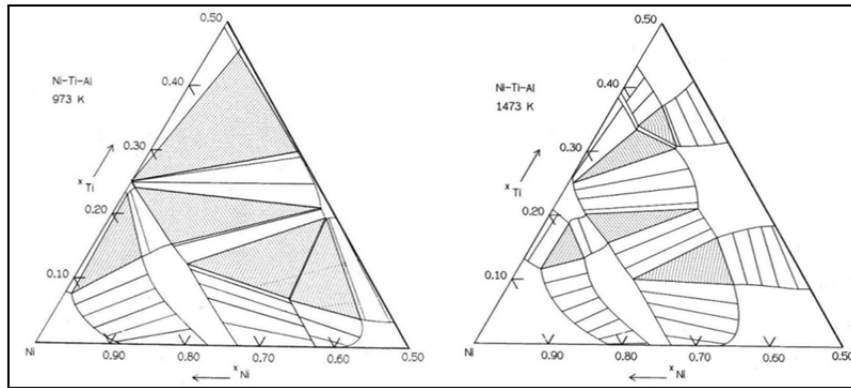


Figure 1.1 Diagrammes de phase ternaire Ni-Ti-Al
Tiré de (Bhadeshia, 2012)

1.2.3 Précipités de carbures

La précipitation de carbure en différentes formes, $M_{23}C_6$, M_6C et MC , se présente avec l'augmentation de la température entre 760°C et 980°C ². Également, les précipités de carbure se forment comme une couche continue sur les joints de grains à une température d'un peu moins de 600°C ³.

1.3 Composition et caractéristiques

Geddes et coll. (2010) explique que les phases du superalliage ont un certain degré de solubilité pour d'autres éléments et que le coefficient de partage⁴ des éléments d'alliage entre

¹ Diagramme de phases à trois pseudocomposants. (Dictionnaire TERMIUM Plus)

² $760^\circ\text{C} \approx 1033^\circ\text{K}$ et $980^\circ\text{C} \approx 1253^\circ\text{K}$

³ $600^\circ\text{C} \approx 873^\circ\text{K}$

⁴ Partitioning coefficient

la phase gamma et la phase gamma prime contrôle la résistance des superalliages. Le titane et l'aluminium sont les solutés¹ essentiels du superalliage de nickel qui produisent une microstructure équilibrée entre deux phases gamma et gamma prime. Le Waspaloy contient un pourcentage relativement élevé de ces éléments de durcissement. Dans certains types de Waspaloy, *Gatorizable Waspaloy*², la teneur en titane est 4,6% (Paul D. Genereux, 2000, p. 20). Or, plus la proportion de titane et d'aluminium est élevée, plus il y a de ségrégations générées pendant la solidification (Donachie, 2002a, p. 10).

Le Waspaloy contient d'autres éléments de durcissement de solution solide dans les deux phases gamma et gamma prime, comme le bore, le zirconium, le molybdène et le chrome (Donachie, 2002a, p. 22). L'aluminium et le chrome sont essentiels pour la résistance à l'oxydation. L'addition du carbone, du titane et du zirconium permet de précipiter des carbures de type MC, pour améliorer les performances mécaniques du Waspaloy à haute température (Murry, 2010). Par contre, la dispersion discontinue des précipités de carbures globulaires aux joints de grains augmente la superficie de carbures et réduit la durée de vie à la rupture du Waspaloy Forgé (Donachie, 2002a, p. 21 et 28). Cette précipitation diminue l'énergie de cohésion des joints de grains et détermine la résistance au fluage et la ductilité du superalliage. En général, il existe des limites de concentration des éléments d'alliage pour contrôler la précipitation. Les éléments d'alliage produisent souvent des effets différents dans un superalliage. Par exemple, le carbone et le bore sont ajoutés afin d'obtenir des carbures et des borures pour contrôler les éléments de trace³. Même si les éléments de trace comme le silicium et le soufre sont souvent en petites quantités (quelques parties par million), ils influencent les propriétés du superalliage. Le fer est un élément d'alliage qui permet simplement de réduire le coût (Geddes, Leon et Huang, 2010, p. 60), mais la teneur du fer est très faible pour classer le Waspaloy dans la catégorie des superalliages de fer-nickel (Donachie, 2002a).

¹Constituant mineur d'une solution qu'on peut considérer comme étant dissous par le solvant. (Dictionnaire TERMIUM Plus)

² *Gatorizable Waspaloy* est une marque de commerce de la *United Technology Corporation*.

³ « [L'élément de trace est] habituellement non dosé, mais susceptible d'exercer une influence sensible sur certaines propriétés du métal. (<http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>) »

La fraction volumique, V_f , optimisée de la phase gamma prime permet d'atteindre des propriétés mécaniques satisfaisantes. Plus la fraction volumique de la phase gamma prime est grande, plus la ductilité du superalliage diminue (Robin M. Forbes Jones, 1999, p. 29). La fonction linéaire du module de Young et de la fraction volumique de la phase gamma prime par rapport à module de matrice explique la diminution de la ductilité (Kumar, Jayakumar et Raj, 2006, p. 583). Le cobalt, le molybdène et le chrome sont les éléments volumineux qui modifient la fraction volumique de la phase gamma prime du superalliage (Geddes, Leon et Huang, 2010, p. 62). La fraction volumique de la phase gamma prime du Waspaloy est relativement basse à cause de la proportion élevée de titane et de l'aluminium ; en conséquence, la phase gamma prime du Waspaloy est plutôt sphéroïde que cuboïde (Donachie, 2002a, p. 21).

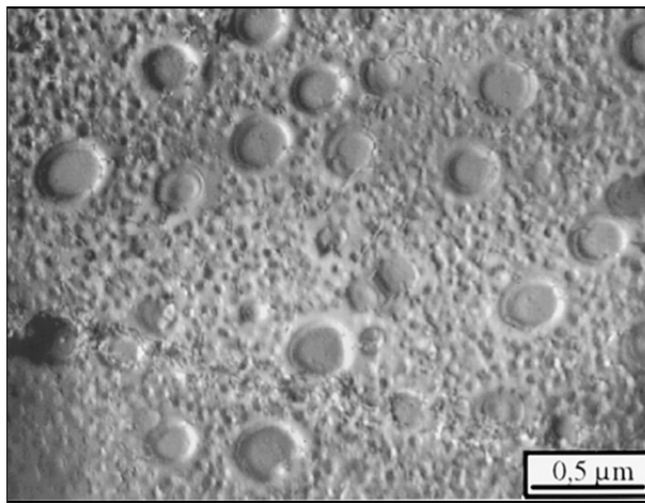


Figure 1.2 Phase gamma prime de Waspaloy
Tirée de (Wosik et al., 2001, p. 120)

1.4 Ségrégation

La ségrégation, à l'échelle microscopique, se produit pendant le lent processus de solidification des superalliages. La région de solidification est une zone où le métal est partiellement solide et partiellement liquide. Les premiers germes de solidification se présentent sous une forme dendritique à faible teneur en éléments de précipitation, dont le titane, l'aluminium et le carbone. C'est ce qui explique que les zones interdendritiques sont

riches en termes d'éléments en solution. Lorsque la taille de la pièce coulée est grande, la vitesse de refroidissement est lente et les dendrites primaires et les zones interdendritiques deviennent plus grandes. Dans certains cas, les zones interdendritiques sont suffisamment grandes pour s'interconnecter et former des défauts à l'échelle macroscopique, des *freckles* et des *white spots* (Donachie, 2002a, p. 11).

Plusieurs articles scientifiques décrivent l'effet de la présence de ces défauts sur la rupture par fatigue dans les superalliages de nickel, les superalliages de corroyage¹ ou les superalliages coulés². Les superalliages de corroyage se comportent différemment des superalliages coulés et leurs traitements thermiques diffèrent selon leurs utilisations. Les superalliages de corroyage sont plus homogènes, leurs grains sont plus fins et les éléments de durcissement sont plus intégrés dans la phase de solution (Donachie, 2002d, pp. 222-227). Cette information confirme la distribution inégale des *freckles* et des *white spots* dans les deux différents superalliages.

Il est probable que les disques de turbine en Waspaloy, incluant l'échantillon inspecté dans ce projet, soient fabriqués uniquement à partir de superalliage de corroyage, mais certains documents énoncent le développement d'utilisation simultanée du superalliage de corroyage et du superalliage coulé pour fabriquer des disques résistants à haute température (Alexander Devaux et al., 2011). Alors, cette section du chapitre est une étude sur tous les types de Waspaloy.

1.4.1 Freckles

Selon le livre *Superalloys* (Donachie, 2002c), les superalliages se solidifient éminemment différemment des alliages moins complexes à cause de leur haute teneur en solutés. Pour la plupart des superalliages, il est nécessaire de contrôler les conditions de solidification.

¹ *Wrought Alloy* (Dictionnaire TERMIUM Plus)

² *Cast alloy* (Dictionnaire TERMIUM Plus)

Lorsque la vitesse de solidification est très basse, par la différence entre la densité des zones interdendritiques et la masse de superalliage fondue, ces zones interdendritiques se développent continuellement. Ces zones riches en solutés, rejetés par les dendrites, croissent sous la forme de canaux et dans la direction normale ou parallèle par rapport au front de solidification de façon à aboutir aux défauts nommés *freckles*. La phase Laves¹, les carbures et le niobium sont les particules dures qui se trouvent dans les *freckles* (Donachie, 2002c, p. 41). Ces particules sont plus importantes dans les autres superalliages que dans le Waspaloy.

Étant donné la teneur trop élevée en éléments de durcissement, la dureté des *freckles* (aussi nommés ségrégations positives) est plus élevée que celle de la matrice. Dans les superalliages qui sont durcis principalement avec l'aluminium et le titane, la densité du liquide interdendritique est plus faible que celle du liquide de la matrice. Dans ce cas, les *freckles* forment des canaux dans une direction ayant un faible angle par rapport à l'axe longitudinal de lingot. Dans les superalliages qui sont durcis avec le niobium, la densité du liquide interdendritique est plus grande que celle du liquide de la matrice. Par conséquent, les *freckles* se forment dans une direction plus ou moins radiale (Donachie, 2002c, p. 43). De plus, les *freckles* à l'extérieur du lingot contiennent les éléments plus volumineux, comme l'aluminium et le chrome tandis que les *freckles* à l'intérieur du lingot contiennent les éléments plus denses, comme le niobium (Donachie, 2002c, p. 41. Fig. 4.1).

La figure 1.3 montre les vues de coupe longitudinale et transversale d'un lingot de Waspaloy. Dans la direction longitudinale, les *freckles* sont visibles en forme des canaux. Dans la direction radiale, les *freckles* sont visibles en forme des taches foncées et circulaires (Donachie, 2002c, p. 44). Selon le livre *Superalloys* (Donachie, 2002c, p. 44), la plupart des superalliages commerciaux contiennent des *freckles*. En conséquence, pour améliorer la qualité du superalliage, les lingots sont fusionnés dans un processus de recuisson avec des

¹ Une phase hexagonale en quantité infime. À haute température, la phase Laves est fragile. Cette phase est plus observée dans les superalliages de fer et de cobalt. Elle devient importante dans les superalliages de nickel, si sa quantité augmente (Donachie, 2002a).

conditions contrôlées. Autrement dit, les premiers lingots sont les électrodes consommées dans un processus de recuisson pour produire des superalliages de haute qualité.

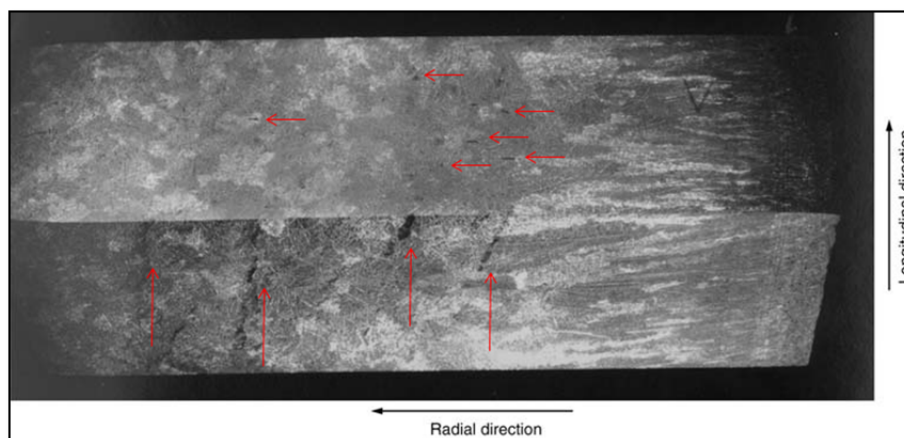


Figure 1.3 Vues de coupe longitudinale et radiale d'un lingot de Waspaloy
Tirée de (Donachie, 2002c, p. 44)

Les processus de recuisson¹ les plus communs pour les superalliages de nickel sont la refusion à l'arc sous vide (VAR) et la refusion sous laitier (ESR). Le processus de recuisson suit une fusion initiale qui est spécifiée selon des critères économiques, le taux de ségrégation et le contrôle chimique nécessaires. Dans certains cas, le processus de traitement thermique comporte trois étapes² : une fusion par induction sous vide (VIM) suivie d'une refusion sous laitier (ESR) et, enfin, une refusion à l'arc sous vide (VAR) (Robin M. Forbes Jones, 1999, p. 28). Le processus de refusion à l'arc sous vide (VAR) est illustré à la figure 1.4 (Sollar, 2006, p. 9). Selon le site Web de Corner (2013), le bain de fusion est entouré d'un inducteur solénoïdal pour brassage. Cette configuration produit un champ magnétique axial, H , un courant induit circonférentiel, I , et des forces radiales, F , orientées vers le centre du bain. Ces forces, lorsqu'elles sont suffisamment importantes, permettent de décoller le métal liquide des parois du creuset par lévitation magnétique.

¹ *Annealing*

² *Triple fusion*

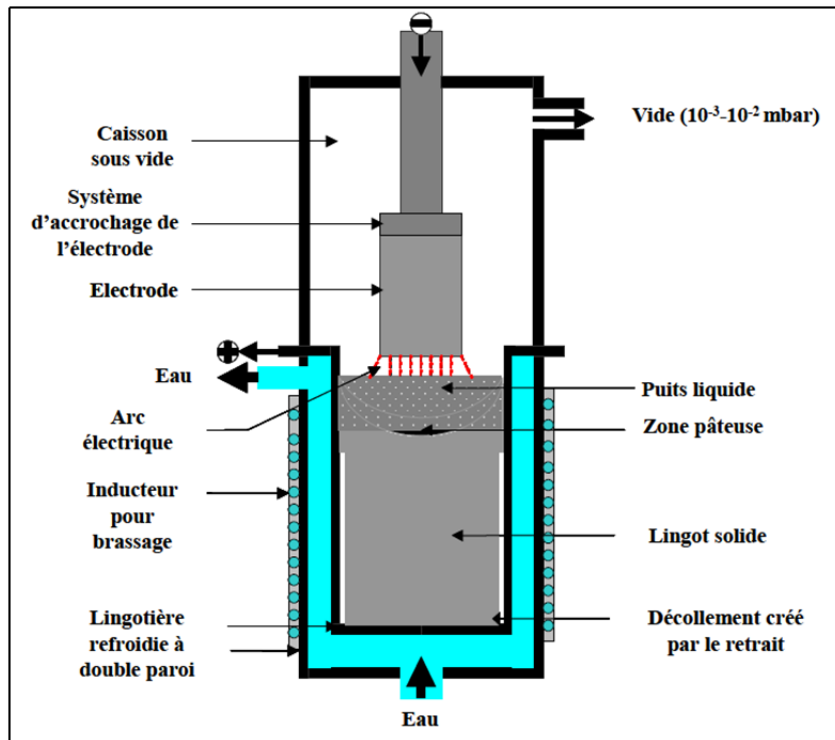


Figure 1.4 «Représentation schématique du procédé *VAR*»
Tirée de (Sollar, 2006)

Le courant électrique qui traverse l'électrode génère un champ magnétique. Sous l'influence de ce champ magnétique, la fluidité du liquide interdendritique n'est pas uniforme et, dans ces conditions, le contrôle et la prédiction de régénération des *freckles* sont compliqués (Robin M. Forbes Jones, 1999, p. 28).

Pendant les deux processus de recuisson, l'électrode est située dans un creuset refroidi à l'eau. La taille active¹ de l'électrode est chauffée jusqu'au point de fusion (Donachie, 2002c, p. 56). Dans le cas du Waspaloy, la température de solubilité² de la phase gamma prime est de $1\ 032^{\circ}\text{C}$ à $1\ 043^{\circ}\text{C}$ ³ (Carpenter Technology Corporation, 1989). Les gouttes de métal liquide, qui tombent de l'électrode, s'amassent dans le creuset et se solidifient rapidement.

¹ The working face

² The solution temperature

³ $1890/1910^{\circ}\text{F}$

Robin M. Forbes Jones (1999, p. 28) explique le processus de *VAR* qui comporte une refusion continue de l'électrode en utilisant le courant continu et qui est établie sous vide pour réduire les éléments volatils. Par contre, dans le processus d'*ESR*, c'est le courant alternatif qui traverse l'électrode. Le bout de l'électrode est immergé dans le laitier fondu qui raffine le lingot et élimine les inclusions d'oxydes.

Donachie (2002a, p. 5) mentionne que le laitier se compose principalement de CaF_2 . Les oxydes de CaO , MgO et Al_2O_3 sont utilisés comme additifs pour améliorer la résistance et la température de la fusion du laitier. Les laitiers commerciaux contiennent de SiO_2 et, alors, les échanges ioniques de la silice avec le titane, l'aluminium et le zirconium de l'électrode changent la quantité des éléments d'alliage dans le superalliage (Donachie, 2002c, p. 58). Pour minimiser ces échanges ioniques, les laitiers commerciaux sont souvent tamponnés avec l'additif du TiO_2 (Donachie, 2002a, p. 5).

En comparaison avec *VAR*, le processus d'*ESR* produit des superalliages qui retiennent les éléments volatils, comme le magnésium, qui peuvent avoir des effets favorables sur la ductilité du superalliage. Ainsi, l'élimination des éléments de trace, comme le soufre, est un avantage du processus d'*ESR*. Inversement, le processus d'*ESR* n'élimine pas quelques éléments volatils nuisibles à la ductilité, comme le plomb et le bismuth. Le traitement thermique en triple fusion, *VIM + ESR + VAR*, comporte les avantages des deux processus de refusion (Robin M. Forbes Jones, 1999, p. 28).

1.4.2 White spots

Le freckle n'est pas le seul défaut produit dans le superalliage refondu. Les défauts à faible teneur en solutés se produisent dans les lingots finaux. Ces défauts sont les ségrégations négatives, nommées les *white spots* (Donachie, 2002c, p. 56). Afin de respecter le but précis de ce projet de recherche, cette section présente les caractéristiques des *white spots* dans l'ensemble des superalliages de nickel incluant le Waspaloy.

1.4.2.1 White spots discrets

Le schéma longitudinal de la structure de lingot, la figure 1.5, est utile pour illustrer les origines possibles des *white spots* dans un four de VAR.

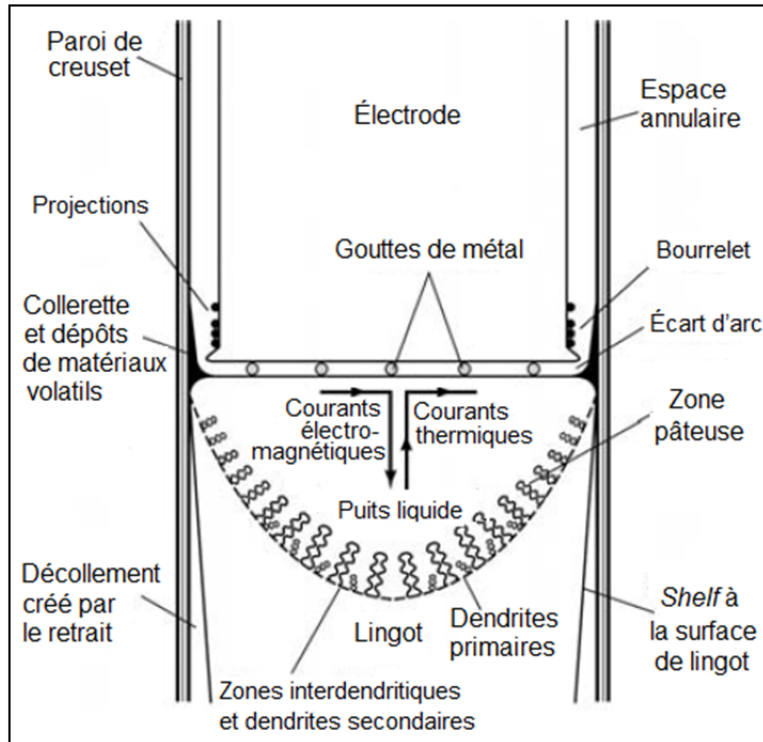


Figure 1.5 Schéma longitudinal de la structure de lingot
Adapté de (Hauck et al., 2003)

D'abord, il est nécessaire d'expliquer les quatre éléments principaux dans le four. « La zone de peau, à la surface du [sic] lingot, est constituée par les cristaux qui se sont formés au contact ou au voisinage de la paroi de la lingotière » (Lesoult, 1989). Cette partie, nommée *shelf*, se durcit plus rapidement. La collerette¹ est un anneau de la construction du creuset et, en général, « [réalisée] avec les mêmes matériaux que le creuset » (Gauché, 2012).

¹ *Crown*

Les dépôts sur la collerette proviennent d'éclaboussures des matériaux volatils ou des bulles de gaz (Sollar, 2006, p. 21). D'après Sollar et ses références (2006), les projections du métal en fusion¹ sont des gouttelettes sphériques dont les compositions chimiques sont celles du superalliage. Ainsi, les bourrelets² sont partis de l'électrode partiellement refondue à porosité élevée. (Sollar, 2006, p. 128).

Donachie (2002c, p. 64) explique que, dans les conditions idéales, la distribution de l'arc électrique à la surface du bain de fusion est uniforme. Mais en réalité, l'arc se focalise à cause de la conductivité de particules ioniques introduites dans le bain de fusion et de la résistivité électrique de l'écart entre l'électrode et le métal fondu³. Cet arc focalisé, nommé l'arc confiné⁴, se déplace à la surface du bain de fusion ; lorsqu'il traverse sous la collerette ou sous le *shelf*, les petites particules du métal solidifié tombent dans le puits liquide. Ces particules descendent en bas du puits liquide par leur gravité ; elles ne se refondent pas, car leurs points de fusion sont plus hauts que la température de masse liquide dans le puits.

Ces particules, qui sont les précipités à faible teneur en solutés⁵ et qui contiennent des oxydes, des nitrures et du carbonitride, s'incorporent dans le lingot (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 157) et (Donachie, 2002c, p. 64). Pendant le processus de l'inspection et de l'attaque métallographique⁶ de la pièce finale, ces particules se présentent comme les défauts (filonnets blancs et clairs), les défauts distincts et isolés dans la structure de lingot, nommés les *dirty white spots* ou les *white spots* discrets (Donachie, 2002c, p. 64). A priori, les particules qui proviennent du *shelf* ne contiennent pas d'impuretés d'oxydes ou de nitrures et, alors, elles forment les *white spots* discrets qui ne font nécessairement pas partie des *dirty*

¹ *Bullet splash, Splash BBs*

² *Torus*

³ *Arc gap*

⁴ *Constricted arc* (le grand dictionnaire terminologique)

⁵ *Solute-Lean*

⁶ « [L'attaque métallographique] consiste en une attaque préférentielle par voie chimique ou électrolytique de certains constituants de la microstructure, et peut être réalisé soit en vue d'une observation macroscopique [...] (ségrégations, fissures, porosités, morphologie des grains), soit en vue d'une analyse microscopique [...] (détails de la microstructure [...]). Avner, Sidney H. 1987. *Introduction à la métallurgie physique*. Trois-Rivières, Québec: CÉGEP de Trois-Rivières, 696 p. »

white spots. Confirmé par Donachie (2002c, p. 65), il faut faire une inspection critique de la présence des *white spots* discrets, car ils sont les défauts inévitables du processus de refusion à l'arc sous vide, VAR.

De plus, Donachie (2002c, p. 65) souligne que jusqu'à ce jour, il n'y a pas de méthodes de détection des défauts sous-cutanés avant l'apparition de fissure. Ainsi, la méthode de l'attaque métallographique, l'attaque chimique, est la technique commune de détection des *white spots* discrets à la surface. Cette affirmation démontre l'importance de ce présent projet de recherche.

La technique de l'attaque métallographique fait ressortir les défauts par un effet de contraste entre les *white spots* et la matrice. Les *white spots* discrets apparaissent brillants avec la bordure distincte, grâce à leur haute teneur de nickel, de chrome et de fer. Dans la plupart des cas, ils sont localisés du mi- rayon au centre de la coupe transversale de billette. Selon le processus de traitement thermomécanique, la taille des grains du *white spot* discret est équivalente ou supérieure à la taille des grains de la matrice (Jackman, Maurer et Widge, 1994, pp. 154-155).

1.4.2.2 White spots dendritiques

Si l'électrode est fissurée, les grands morceaux poreux de celle-ci tombent dans le puits liquide et les défauts dendritiques se forment. Ces défauts, nommés les *white spots* dendritiques, sont souvent plus larges que les *white spots* discrets (Donachie, 2002a, p. 3) et l'interface entre eux et la matrice n'est pas nettement délimitée (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 157) . Dans la majorité des cas, les *white spots* dendritiques sont nets, non associés aux inclusions¹; ils sont souvent localisés proches du centre de la coupe transversale de billette ainsi que ces défauts qui sont rarement observés dans le Waspaloy (Jackman, Maurer et Widge, 1994).

¹ Impuretés visibles

1.4.2.3 White spots de la solidification

Les *white spots* de la solidification sont également nommés les *white spots* annulaires¹ à cause de leur apparence linéaire courbée. Ces défauts sont plus prévalant dans la partie inférieure du lingot; ils sont localisés entre la surface et le mi- rayon de la coupe transversale de billette; ils sont concaves vers le centre du lingot ainsi que de l'interface entre eux et la matrice n'est pas discrète (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 158).

Les *white spots* de la solidification sont les résultats des perturbations thermiques à l'interface entre le puits liquide et le lingot solidifié. Lorsque la vitesse de solidification est basse, les dendrites primaires grossissent et quelque part, les fluides interdendritiques s'écartent de la matrice. Le résultat est l'apparition de zones interdendritiques à faible teneur en solutés (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 161). Les *white spots* de solidification ne proviennent pas de *shelf* ou de l'électrode et, alors, ils ne contiennent pas d'oxydes ou de nitrures (Donachie, 2002a).

1.5 Attaque métallographique

L'évaluation microstructurale est une méthode régulière pour analyser des caractéristiques des superalliages et pour qualifier les produits finaux. Pour ce faire, l'attaque métallographique est la technique qui permet d'examiner les microstructures des superalliages. Les agents de l'attaque métallographique² sont les solutions chimiques ou les acides sélectionnés pour attaquer les surfaces parfaitement polies. Les superalliages résistent aux agents de l'attaque chimique de la même manière qu'ils résistent à la corrosion en service. Alors, la sélection des agents de l'attaque chimique appropriés dépend de la composition chimique du superalliage, du processus de traitement thermique et de la méthode de l'évaluation microstructurale (Katharine B. Small et al., 2008). Les méthodes de l'attaque métallographique sont convenables pour les superalliages de corroyage ou les

¹ Ring white spots

² Solution utilisée pour l'attaque chimique

superalliages coulés et les résultats des microstructures dévoilées sont similaires à l'exception des homogénéités et des porosités (Vander Voort, 2004, p. 820).

Après l'attaque chimique, les détails caractéristiques, les grains de structure, les dendrites de la solidification, les ségrégations, les retassures¹ et les porosités sont visibles. Ainsi, les *freckles* et les *white spots* à la surface sont possibles à localiser par le contraste (Vander Voort, 2004, p. 821). Parfois, la différence de la composition chimique entre le *white spot* et la matrice n'est pas suffisamment grande pour rehausser la présence du *white spot*.

Si le Waspaloy est traité par le processus de recuisson complète², la phase gamma prime, à faible teneur en solutés, devient fine et homogène et s'éclaircit par l'agent d'attaque chimique. Dans ce cas, les *white spots* à teneur modérée des éléments soluté sont difficiles à détecter (Donachie, 2002b, p. 139). Dans la majorité des cas, les *white spots* sont facilement localisés par la différence de volume et de distribution des phases de précipité (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 165).

La figure 1.6 montre un *white spot* discret et la fissure associée sur la coupe longitudinale dans un échantillon du superalliage de nickel, l'Inconel IN-718 (Donachie, 2002c, p. 65) et la figure 1.7 montre un *freckle* à faible densité dans un échantillon du *Gatorizable*³ Waspaloy (Paul D. Genereux, 2000, p. 20). Le tableau 1.2 résume quatre agents d'attaque chimique appropriés pour mettre en évidence les *white spots* à la surface (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 165) et le tableau 1.3 liste quatre agents d'attaque chimique appropriés pour l'attaque chimique du Waspaloy (Katharine B. Small et al., 2008, pp. 6-8).

¹ « Défaut constitué par une cavité se formant dans la partie massive d'une pièce coulée et due à la contraction du métal lors de sa solidification. » (Grand dictionnaire encyclopédique Larousse).

² Une recuisson complète signifie une recristallisation complète, une homogénéisation et une dissolution complète de toutes les phases du superalliage. La recuisson complète nécessite des températures élevées de l'ordre de 982°C à 1232°C ou même 1316°C. Les températures au-dessus de 1204°C deviennent de plus en plus difficiles à atteindre pour une production rentable.

³ *Gatorizable* Waspaloy est un produit d'United Technology Corporation, un superalliage de corroyage dans lequel la fraction volumique de la phase gamma prime est importante.

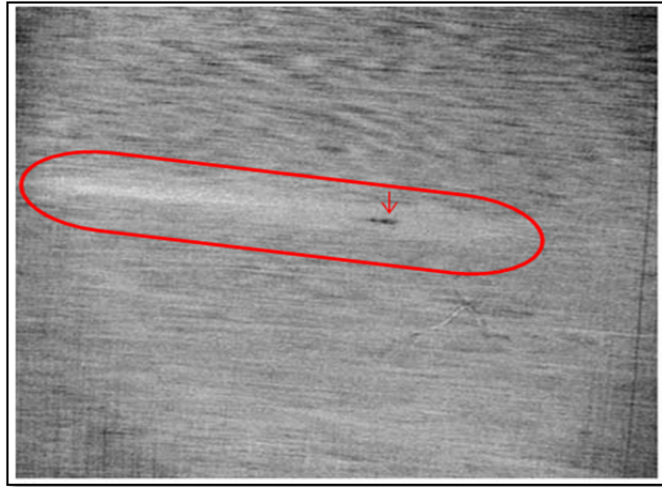


Figure 1.6 *White spot* discret et la fissure associée
Tirée de (Donachie, 2002c, p. 65)

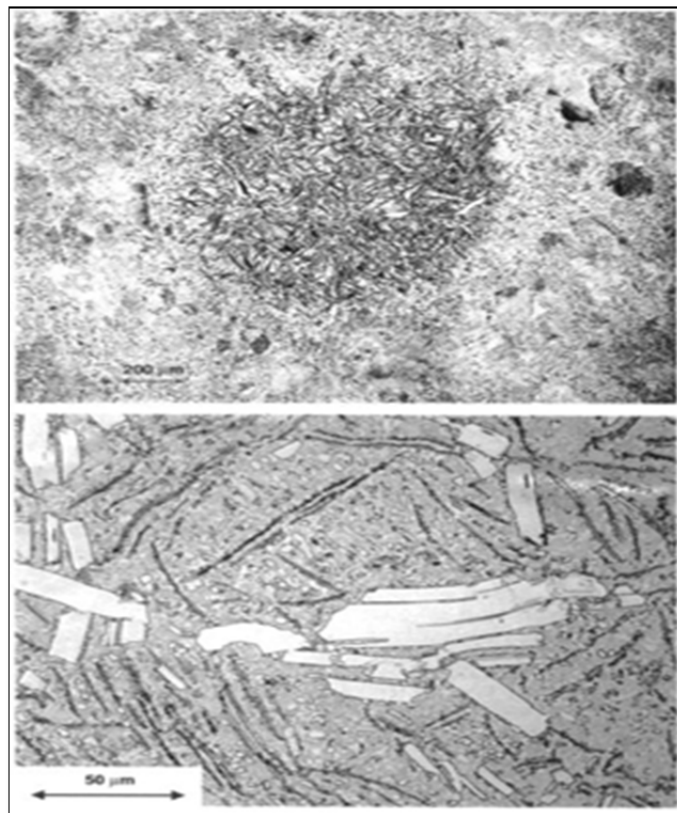


Figure 1.7 *Freckle* dans le *Gatorizable* Waspaloy
Tirée de (Paul D. Genereux, 2000, p. 20)

Tableau 1.2 Agents de l'attaque chimique
Adapté de (Jackman, Maurer et Widge, 1994, p. 165)

Nom	Composition chimique	
Chlorure ferrique	FeCl ₃ solution	230 ml
	HCl	750 ml
	HNO ₃	20 ml
Canada	HF	200 ml
	HNO ₃	100 ml
	H ₂ SO ₄	200 ml
	H ₂ O	pour produire 1 litre
<i>Dark etch</i>	FeCl ₃	489 g
	HCl	37 ml
	H ₂ O	pour produire 1 litre
Anodique	H ₂ SO ₄	484 ml
	H ₂ O	pour produire 1 litre

Tableau 1.3 Agents de l'attaque chimique pour le Waspaloy
Adapté de (Katharine B. Small et al., 2008)

#	Nom	Composition chimique		Note
13	2% H ₂ SO ₄	H ₂ SO ₄	2 ml	Précipités de la phase gamma prime
		H ₂ O	89 ml	
15	G	H ₃ PO ₄	12 ml	Structure générale, la taille et les joints des grains
		HNO ₃	41 ml	
		H ₂ SO ₄	47 ml	
19	<i>Waterless Kalling's</i> ¹	CuCl ₂	5 g	
		HCl	100 ml	
		alcool éthylique	100 ml	
26	<i>Glyceregia</i> ²	HCl	15 ml	
		Glycérol	10 ml	
		HNO ₃	5 ml	

¹ Désignation par ASTM E407 : 95 Kalling's 2

² Désignation par ASTM E407 : 87 Glyceregia

Les méthodes simples d'application des agents de l'attaque chimique sur la surface sont les suivantes: par immersion, par procédé électrolytique ou à l'aide du pinceau ou du tampon (Katharine B. Small et al., 2008). Le contraste d'ombre et de lumière entre les zones sombres et les zones claires sur la surface est le résultat d'utilisation de ces agents chimiques. Certaines techniques de coloration¹ produisent le contraste de couleurs pour analyser la surface par microscopie optique (Katharine B. Small et al., 2008).

1.6 Propriétés mécaniques des superalliages

Les résultats des évaluations scientifiques, dans plusieurs références, affirment que la résistance à la traction, la résistance au fluage, la limite d'élasticité et la limite de rupture du Waspaloy augmentent par la présence de phase gamma prime de Ni_3Al , Ni_3Ti et $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ et par la présence des précipités intermétalliques.

Gabb et coll. (2008) et Mannan et coll. (2013) remarquent que par le rapport quantitatif entre l'aluminium et le titane ainsi que la taille des grains et le grossissement des précipités affectent les résistances et les propriétés mécaniques du Waspaloy. Ainsi, le processus de traitement thermique et de vieillissement contrôle la taille des grains et le grossissement des précipités.

L'influence des *white spots* sur les propriétés de traction du superalliage 718 a été évaluée par Jackman (1984, p. 163). Par rapport à la matrice, la résistance à la traction et la limite d'élasticité des échantillons qui contiennent des *white spots* discrets et des *white spots* de solidification sont plus faibles et leur ductilité est plus élevée. Les *white spots* de solidification font une différence minime dans la résistance à la traction, car la composition chimique des *white spots* de solidification est presque similaire à celle de la matrice. La résistance à la traction des *white spots* dendritiques est comparable à celle de la matrice.

¹ *Tint etch*

La ductilité des échantillons qui contiennent des *dirty white spots* est significativement faible et leur durée de fatigue oligocyclique¹ est diminuée.

L'utilisation de mesure de la dureté pour caractériser des *freckles* est énoncée dans l'article de Paul D. Genereux (2000, p. 22). La dureté a été mesurée aux trois échelles, macro, micro et nano, dans diverses zones de *freckles* ainsi que dans le métal de base. La dureté à l'échelle macroscopique, ou la dureté de la masse d'un échantillon ne montre pas de différence significative. La dureté à l'échelle microscopique expose une différence significative. La dureté à l'échelle nano exploite deux phases des précipités dans la zone des *freckles*, une en forme de ruban et l'autre les petits précipités sphéroïdaux. Les deux phases de précipités montrent les grandes duretés similaires.

1.7 Discussion

Proposé par Donachie (2002c, p. 71) et par R. J. Smith (2001, p. 139), le processus de refusion sous laitier est suffisant pour éliminer les ségrégations positives du Waspaloy qui, par sa nature, ne génère pas de *freckle*. Selon R. J. Smith (2001, p. 139) et L. A. Bertram et coll. (1998), le système de refusion sous laitier contrôlé par ordinateur est performant pour éliminer les *white spots* et pour produire une distribution plus homogène du carbure dans le Waspaloy. Cette assertion est à prendre avec grande prudence, car les *white spots* sont toujours observés dans les pièces du Waspaloy et la conséquence d'un seul défaut dans les disques de turbine sera catastrophique.

En considérant la forte acidité des solutions chimiques, l'atmosphère corrosive des laboratoires de l'attaque chimique est facilement imaginable. Cela force la nécessité d'identifier une méthode non destructive à sec pour révéler les *white spots* et les *freckles*.

¹ « Fatigue d'une éprouvette métallique soumise à des efforts alternés assez importants pour que la rupture se produise au bout d'un petit nombre de cycles. » (Dictionnaire de termes nouveaux des sciences et des techniques -1983).

CHAPITRE 2

MESURE DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE PAR COURANTS DE FOUCAULT

2.1 Principe des courants de Foucault

La méthode de contrôle par courants de Foucault permet la mesure de conductivité électrique des matériaux par le champ magnétique induit, basé sur le concept d'électromagnétique. La sonde est un solénoïde, une bobine parcourue par le courant alternatif. Le passage du courant électrique produit un flux magnétique alternatif dans et autour du solénoïde (Viens, 2011a, p. 5). Lorsque la sonde est placée à proximité d'un matériau conducteur, le champ magnétique alternatif induit des courants à la surface du matériau. Ces courants, nommés les courants de Foucault, s'enferment dans les cercles concentriques, « dans un plan perpendiculaire à l'axe principal de la bobine » (Viens, 2011a, p. 21), et pénètrent plus ou moins profondément dans le matériau selon la conductivité, σ , et la perméabilité, μ , du matériau. Les courants de Foucault produisent le flux secondaire et « selon la loi de Lenz, le flux secondaire s'oppose au flux primaire » (Viens, 2011a, p. 15), la figure 2.1 (Viens, 2011a, p. 16).

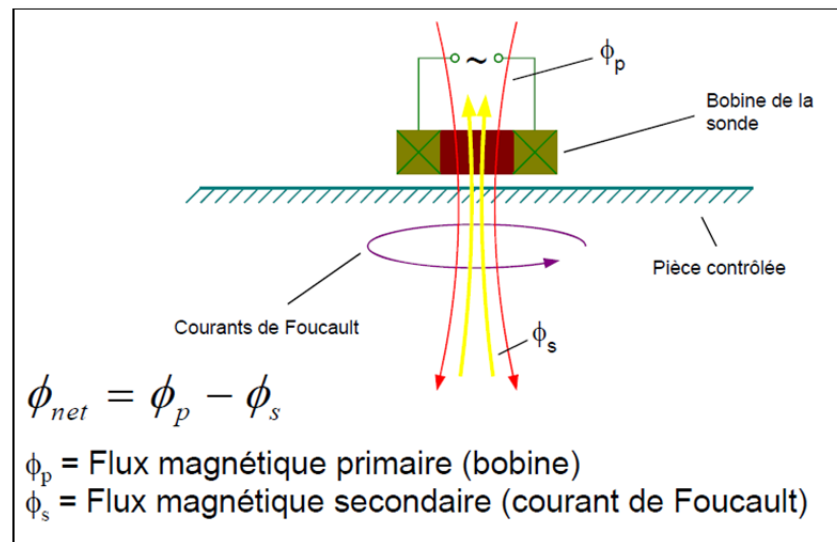


Figure 2.1 Schéma des courants de Foucault
Tirée de (Viens, 2011a, p. 16)

2.2 Paramètres de mesure

Le flux secondaire réduit l'intensité du flux primaire et la bobine de sonde est sensible à cette variation. Autrement dit, l'impédance de la sonde diminue lorsque les courants de Foucault sont créés dans le matériau conducteur. Selon Mix (2005, pp. 66-67), les variations des propriétés physiques du matériau, la conductivité et la perméabilité ainsi que les discontinuités déforment le flux des courants de Foucault, allongent les cercles parcourus par les courants de Foucault, réduisent le flux secondaire et augmentent l'impédance de la sonde. L'appareil détecteur de courants de Foucault détecte ce changement momentané de l'impédance de bobine, l'amplifie et le convertit en signaux (Viens, 2011a, p. 36) et (Mix, 2005, pp. 66-67).

2.2.1 Impédance et réactance

L'impédance, Z , est la mesure de l'opposition d'une bobine au flux de courant alternatif, en ohms, Ω (Viens, 2011a, p. 23). L'impédance est constituée de la résistance, R , et de la réactance, X . La résistance et la réactance sont aussi mesurées en ohms, Ω . La résistance est un élément invariable, indépendante de la fréquence dans laquelle les variations de tension et de courant sont en phase. La réactance varie selon la fréquence. Lorsqu'une tension est appliquée à la bobine d'induction, le courant qui la traverse met un certain temps avant de s'établir. De même, lorsque la tension est supprimée, le courant diminue avec un certain retard, ce qui correspond à un déphasage de 90 degrés.

Le site Web d'Hewes (2013) définit deux types de réactance : la réactance capacitive, X_C , et la réactance inductive, X_L , et la réactance totale est la différence entre les deux : $X = X_L - X_C$, les équations 2.1 et 2.2.

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.2)$$

X_L : Réactance inductive de la sonde (Ω) ;

X_C : Réactance capacitive de la sonde (Ω) ;

f : Fréquence (Hz) ;

L : Inductance (H) ;

C : Capacitance (F).

L'impédance est le produit vectoriel sur la somme de la résistance et la réactance par l'équation 2.3 et la figure 2.2 (Viens, 2011a, pp. 24-27).

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.3)$$

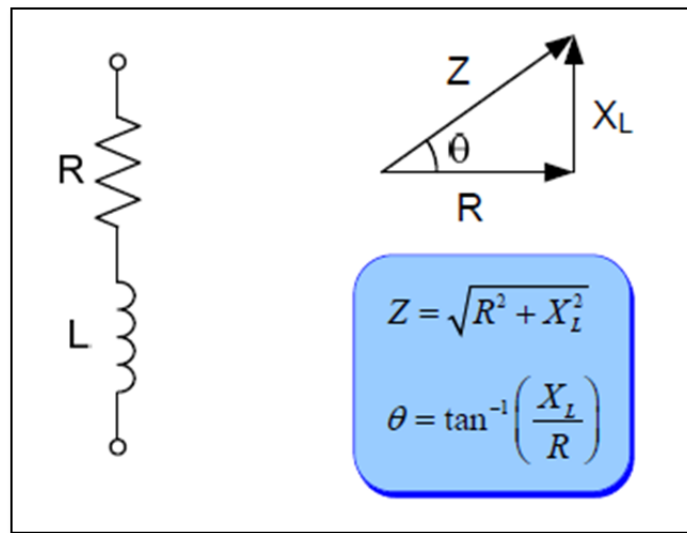


Figure 2.2 Composantes d'impédance
Tirée de (Viens, 2011a, p. 27)

2.2.2 Conductivité et fréquence

Les équations 2.1 et 2.2 montrent l'effet de la fréquence de mesure sur l'impédance de la sonde. Illustrées sur la figure 2.3, la conductivité et la fréquence ont le même effet sur l'impédance de la bobine. Pour un matériau à conductivité particulier, la fréquence de mesure doit être bien sélectionnée pour distinguer et indiquer des défauts (Mix, 2005, p. 71).

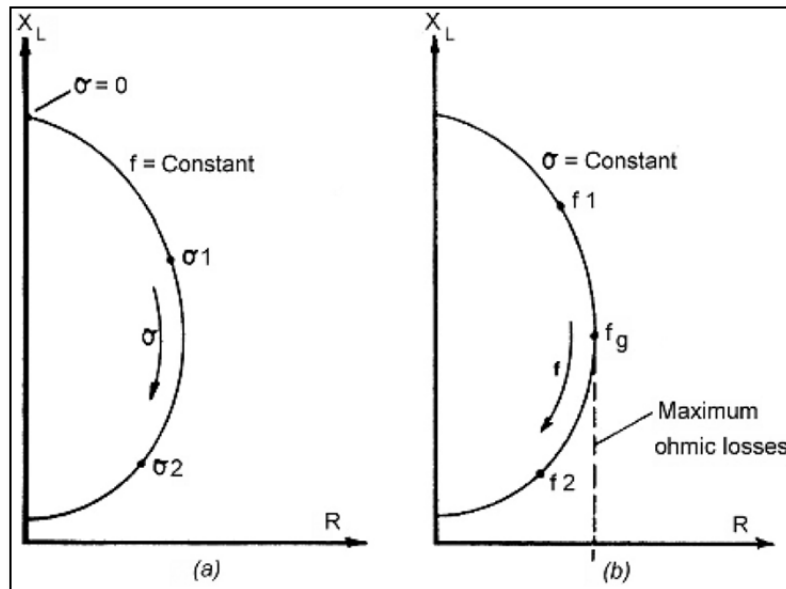


Figure 2.3 Effet de la conductivité (a) et la fréquence (b)
sur l'impédance de bobine
Tirée de (Mix, 2005, p. 71)

La valeur de la réactance capacitive est importante pour les basses fréquences. Par exemple, lorsque la fréquence augmente de 1kHz à 1Mhz, la réactance capacitive diminue approximativement de 723Ω à 0,7 Ω (Storr, 2013). Par conséquent, la réactance capacitive est moins importante pour le contrôle par courants de Foucault.

2.2.3 Distance de retrait

La distance entre la bobine et la surface du matériau conducteur, nommée la distance de retrait ou *lift-off*, influence l'impédance de la sonde (Mix, 2005, p. 68). Il est précisé par Mix (2005, p. 70) que dans les matériaux à faible conductivité, la distinction entre les indications des défauts et la distance de retrait est très difficile. L'essai expérimental à haute fréquence de 3 MHz sur l'échantillon de Waspaloy, présenté dans le chapitre cinq, est en accord avec cette affirmation.

2.2.4 Effet pelliculaire

L'énergie électrique des courants de Foucault se transforme en chaleur par l'effet Joule et se perd à la surface de la pièce. Étant donné l'effet de peau, « effet pelliculaire » (Viens, 2011a, p. 21), les courants de Foucault se concentrent à la surface de la pièce. « La profondeur de pénétration est déterminée par la fréquence du courant, de même que par la conductivité et la perméabilité du matériau » (Viens, 2011a, p. 21), par l'équation 2.4 (Mix, 2005, p. 73) et (Shull, 2002a, p. 18 et 26).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (2.4)$$

δ : Profondeur de pénétration (m) ;

σ : Conductivité électrique (S/m) ;

f : Fréquence (Hz) ;

μ : Perméabilité magnétique (H/m).

La résistivité électrique ρ est égale à l'inverse de sa conductivité ($\rho = 1/\sigma$). La perméabilité magnétique est égale à $(\mu_0\mu_r)$ où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) et μ_r est la perméabilité magnétique relative (sans dimension) du matériau. Les matériaux sont généralement classifiés en diamagnétique ($\mu_r < 1$), paramagnétique ($\mu_r > 1$) ou ferromagnétique ($\mu_r \gg 1$) (Nagy, 2011)¹. En utilisant ces informations, la profondeur de pénétration est réécrite comme l'équation 2.5 (Viens, 2011a, p. 17) ,

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad (2.5)$$

Dans l'équation 2.5, l'unité de la profondeur de pénétration est en (mm) et celle de la résistivité électrique est ($\mu\Omega\text{-cm}$).

¹ Electromagnetic NDE lecture notes (Chapter 3) by Dr Nagy

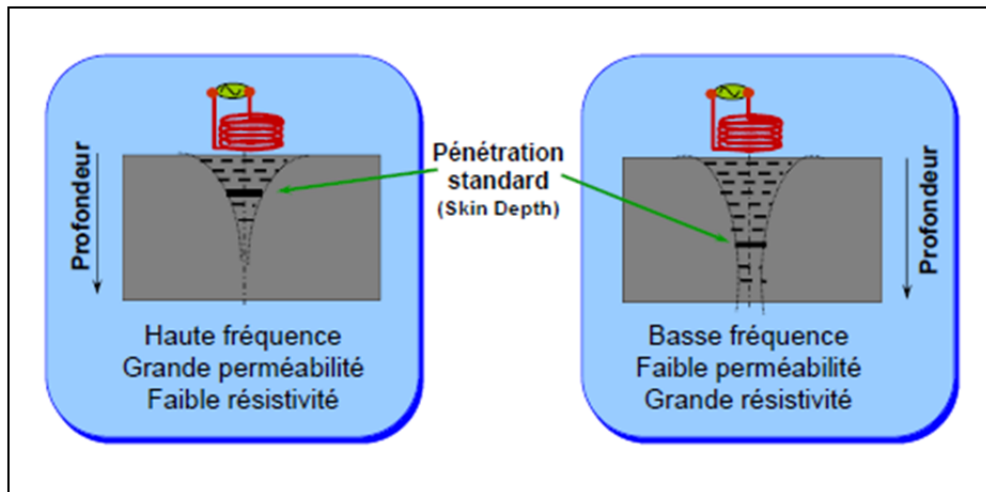


Figure 2.4 Pénétration standard
Tirée de (Viens, 2011a, p. 18)

2.2.5 Caractéristiques de la pièce inspectée et de la sonde

Mix (2005, pp. 73-82-86) souligne que la géométrie de la pièce inspectée affecte la magnitude des courants de Foucault et la sensibilité de la sonde. Ainsi, le type, la géométrie, la profondeur, l'emplacement et l'orientation des discontinuités sont les facteurs importants pour choisir la sonde appropriée et pour savoir manier efficacement la sonde sur la surface.

Blodgett (2004, p. 110) affirme que dans les alliages qui se solidifient en symétrie cristalline cubique, tels que les superalliages de nickel, la non-homogénéité du matériau, comme la texture cristallographique, n'affecte pas la conductivité apparente des courants de Foucault. Cependant, l'effet des propriétés paramagnétiques des superalliages de nickel est considérable dans les mesures de conductivité électrique (Blodgett et Nagy, 2004, p. 107). Dr Nagy explique le terme « apparente » : la mesure de conductivité par courants de Foucault ne présente pas la conductivité réelle de la pièce, car la perméabilité magnétique de la pièce et les fréquences de mesure affectent la précision de mesure par courants de Foucault. Pour mesurer la conductivité électrique réelle, la méthode la plus précise se base sur l'injection d'un courant connu dans la pièce en utilisant un contact galvanique et la mesure de la chute de tension.

De plus, les paramètres de bobine, le diamètre et la longueur du solénoïde, le nombre de spires, la perméabilité du matériau de noyau et l'orientation du solénoïde affectent la sensibilité de sonde. Enfin, la conception du solénoïde est une considération importante pour maximiser le rapport entre le signal et le bruit.

2.3 Contraintes résiduelles près de la surface des superalliages grenailés

Blodgett et Nagy (2004) précisent que l'augmentation de la conductivité électrique due à la présence des contraintes résiduelles près de la surface dans les matériaux paramagnétiques est approximativement 1%. Ainsi, Yu et coll. (2006, p. 17) explique l'hétérogénéité microstructurale de certains superalliages de nickel forgés et durcis par précipitation, comme le Waspaloy, qui produit des variations de conductivité électrique jusqu'à 4-6%. La méthode expérimentée par Yu et coll. (2006) affirme que plusieurs facteurs, comme la composition chimique et la microstructure du superalliage, affectent la mesure de conductivité par courants de Foucault.

La figure 2.5 montre l'évolution de la conductivité électrique et l'inhomogénéité correspondante dans les échantillons de Waspaloy au cours d'une recuisson graduelle. L'opinion de Dr Nagy ainsi que Yu et coll. (2006, p. 21) expliquent cette évolution : lorsque la température de la recuisson augmente autour de 350°C à 450°C, les valeurs de conductivité diminuent. La plus grosse chute de conductivité se produit autour de 500°C à 550°C, puis les valeurs de conductivité croissent à nouveau jusqu'à atteindre un maximum à environ 750°C. Selon le Dr Nagy, ces variations de conductivité sont dues à des variations dans la microstructure du Waspaloy. En fait, la formation et la croissance de précipités augmente la conductivité du matériau alors qu'une solution solide a toujours une conductivité plus faible que la moyenne pondérée de ces constituants. Ainsi, le minimum de conductivité observé aux environs de 650°C peut être interprété comme étant due à une homogénéisation complète du matériau. La baisse de conductivité après 850°C est probablement due à une corrosion excessive.

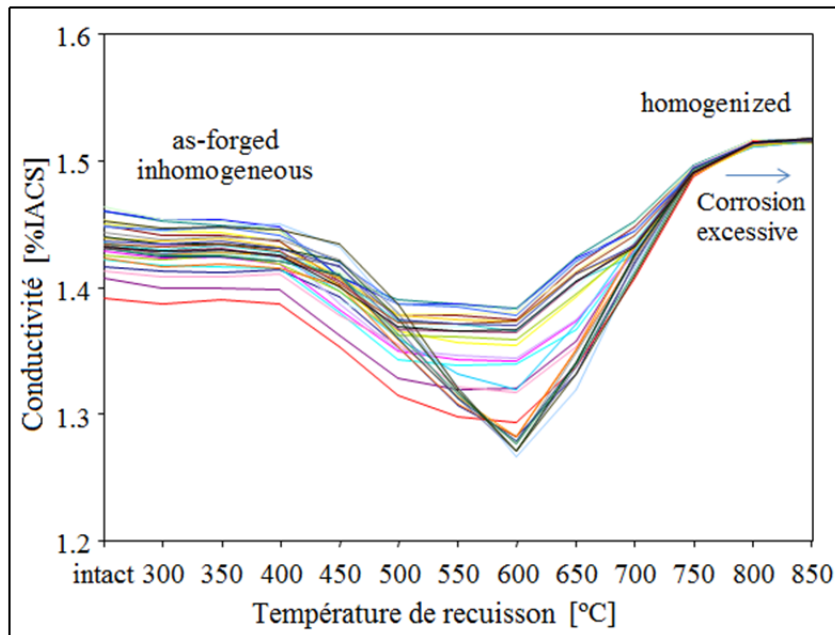


Figure 2.5 Conductivité électrique au cours de la recuisson
Tirée de (Nagy, 2008, p. 14)

La technique d'imagerie de courants de Foucault permet à Blodgett (2004, p. 114) de démontrer l'augmentation de la perméabilité magnétique du Waspaloy par la présence d'une couche ferromagnétique mince sur la surface, due à l'oxydation de surface après traitements mécaniques ou chimiques, comme le décapage à l'acide. Toutefois, cela n'est pas une transition de paramagnétique à ferromagnétique (Yu et Nagy, 2004).

Yu, Blodgett et Nagy (2006, p. 22) ont également examiné la possibilité de la technique des courants de Foucault pour détecter les inhomogénéités microstructurales. Pour ce faire, ils ont utilisé la technique d'imagerie de courants de Foucault. Selon l'opinion de Dr Nagy, il est fort possible d'attribuer des inhomogénéités à des variations de taille des grains, à des ségrégations du carbure, à des précipités de la phase gamma prime, γ' et à des précipités de la phase gamma double-prime, γ'' ¹. Les inhomogénéités de la phase gamma prime de la microstructure du superalliage, telles que les précipités intermétalliques Ni_3 (Al, Ti) et

¹ Phase gamma double-prime dans le superalliage d'Inconel 718, par exemple.

les phases de carbure aux joints de grains, pourraient conduire à des anomalies de conductivité des courants de Foucault. Les résultats obtenus (Yu, Blodgett et Nagy, 2006, p. 18 et 23) démontrent que la variation de conductivité est en accord avec la présence des inhomogénéités volumétriques dans les superalliages. Ainsi, ces variations sont indépendantes de la fréquence. La figure 2.6 montre des exemples d'images typiques des courants de Foucault de neuf palettes grenillées du Waspaloy. Le test est effectué sur des échantillons de 51mm x 102mm, dans une gamme de fréquences de 250 kHz à 10 MHz.

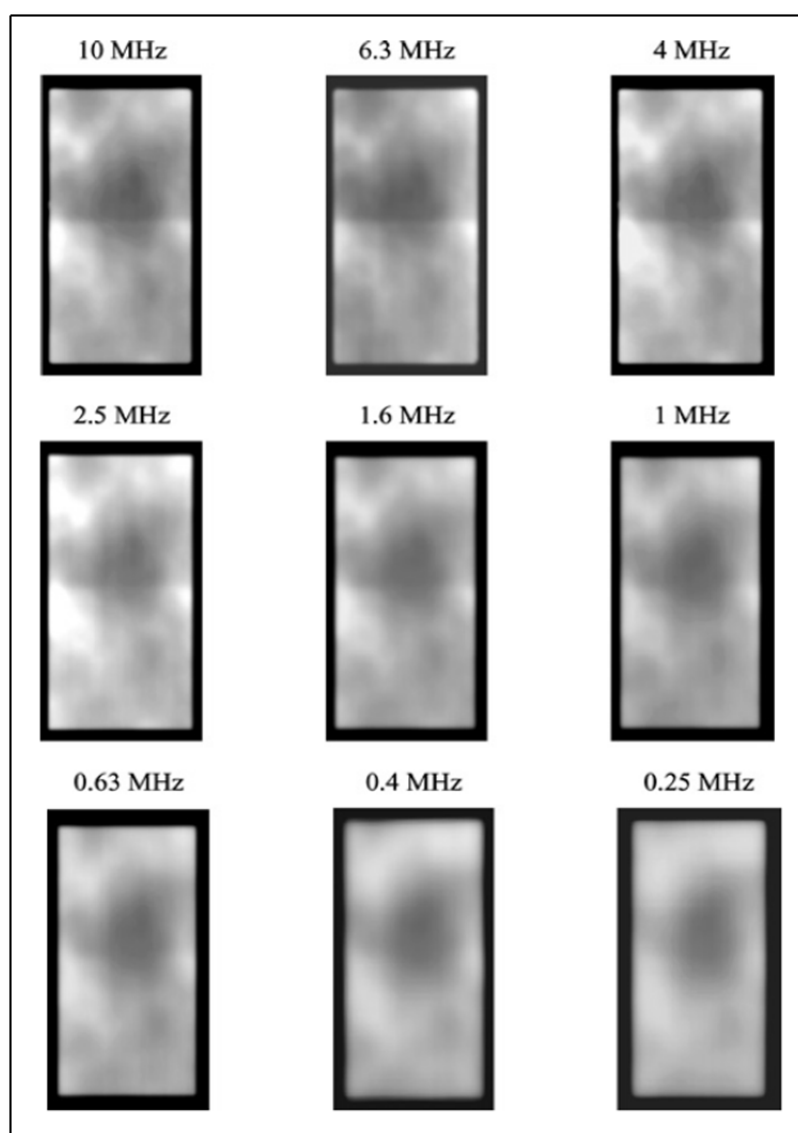


Figure 2.6 Images de conductivité des échantillons de Waspaloy
Tirée de (Yu, Blodgett et Nagy, 2006, p. 23)

La moitié inférieure de chaque image est la partie grenailée et l'autre moitié est la partie non traitée, étant prise comme référence. Lorsque la fréquence d'inspection est plus élevée, la moitié inférieure grenailée est plus éclairée, car la conductivité électrique de cette partie est plus grande (de l'ordre de 0.5-1%) par rapport à celle de la moitié supérieure. Le résultat de ce test de Yu, Blodgett et Nagy (2006, p. 22) confirment également que les inhomogénéités microstructurales affectent la conductivité électrique dans l'échantillon de Waspaloy et que cette variation est plus importante (de l'ordre de 3-4%) que celle du grenailage. L'analyse de Yu, Blodgett et Nagy (2006, p. 23) présente une variation entre la plus haute conductivité et la plus faible conductivité des domaines¹ magnétiques (aussi grands que 25 mm) dans un superalliage de Waspaloy forgé et durci par les précipités. Dans certain cas, l'inhomogénéité microstructurale peuvent augmenter significativement les variations de conductivité électrique jusqu'au 4-6% (Yu, Blodgett et Nagy, 2006, p. 17). Dans le même ordre d'idée, la comparaison d'observation des inhomogénéités microstructurales par courants de Foucault, 5 MHz, et par microscopie acoustique, 40MHz, met en évidence l'efficacité de la technique de l'imagerie de courants de Foucault (Nagy, 2011, p. 79), la figure 2.7².

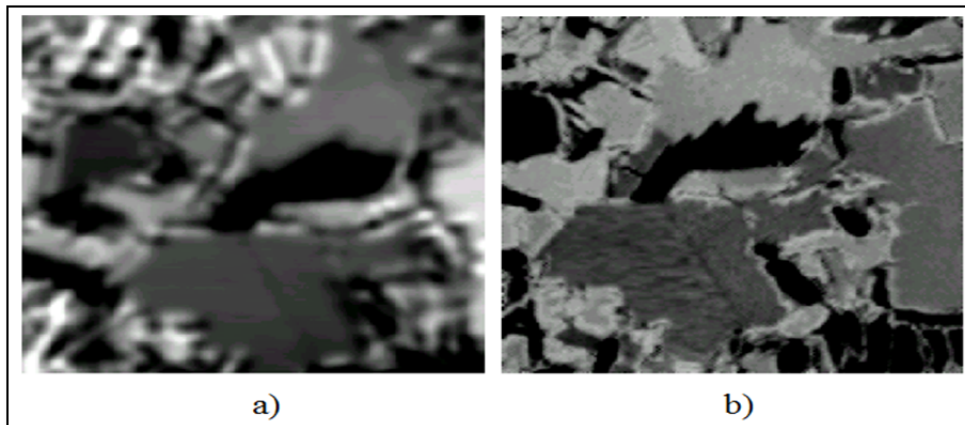


Figure 2.7 Imagerie (a) courants de Foucault (b) microscopie acoustique
Tirée de (Nagy, 2011, p. 79)

¹Un domaine magnétique signifie un arrangement atomique à l'intérieur duquel tous les atomes d'un matériau sont orientés de sorte à ce que leur moment magnétique individuel soit aligné dans une même direction.

² Images captées d'un échantillon de Ti-6Al-4V

Le résultat de ce test est une affirmation sur l'éventuelle possibilité de révéler les défauts microstructuraux par courants de Foucault.

2.4 Discussion

La méthode de contrôle par courants de Foucault permet de mesurer la variation de conductivité électrique pour définir les défauts et les inhomogénéités microstructurales des matériaux. Tous les paramètres de mesure sont essentiels et considérables pendant les travaux pratiques. Cependant, les nombreuses limites sont des obstacles à ce projet, qui retardent la réalisation des résultats : la géométrie de l'échantillon de Waspaloy, la position et la taille de la ségrégation sur la pièce, ainsi que la qualité des sondes disponibles dans le laboratoire.

Les expériences et les résultats obtenus des tests du disque de turbine du Waspaloy, présentés dans le chapitre cinq, sont en accord avec les opinions du Dr Nagy et les travaux de son équipe. Ces expériences permettent d'accomplir l'objectif principal de ce projet : relever la marque de polissage sur les composants usinés de turbine de superalliage de nickel. Par conséquent, l'idée de la détection des ségrégations par les variations de la conductivité des courants de Foucault demeure une hypothèse vraisemblable, sujette à vérification.

CHAPITRE 3

MESURE DE LA VITESSE DE L'ONDE ACOUSTIQUE DE SURFACE (SAW)

3.1 Ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh sont un type d'ondes ultrasonores qui se propagent sur la surface et en suivent les courbures, sans avoir les échos de courbe (Mix, 2005, p. 493). Donc ils sont idéals pour trouver les défauts de surface ou sous-cutanés près de la surface dans les objets courbés. Cette caractéristique permet possiblement une meilleure évaluation de ségrégation dans le disque de turbine. Les ondes de Rayleigh ont des propriétés uniques de la combinaison de l'onde longitudinale et de l'onde de cisaillement (Shull, 2002b, p. 52). Selon le principe défini par Cheeke (2002, p. 2) et par Shull (2002b, p. 113), si la surface du matériau est sur le plan x-y et la profondeur du matériau est sur le plan z, les ondes de Rayleigh se propagent dans le plan vertical x-z. La normale à la surface du matériau pointe vers la direction négative de l'axe des $-z$, dans le matériau, et la propagation des ondes est dans la direction positive de l'axe des x. Alors, les composantes du déplacement et de la vitesse sont dans la direction des axes des x et z et il n'y a pas de déplacement dans la direction de l'axe des y.

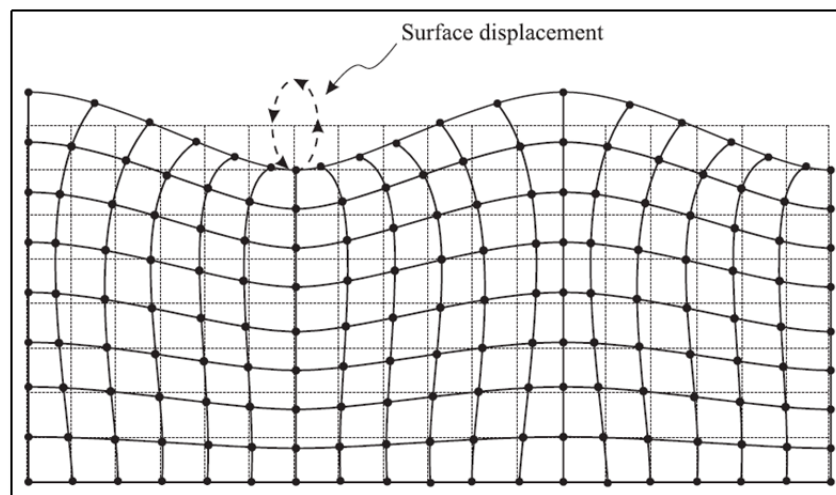


Figure 3.1 Déplacement mécanique près de la surface
Tirée de (Cheeke, 2002, p. 2)

3.2 Paramètres de mesure

Comme cela est énoncé dans le paragraphe précédent et selon la norme ASTM¹ E587-10, les ondes de Rayleigh se propagent à 90° de normale à la surface de la pièce inspectée. Dans le matériau plus épais que deux longueurs d'onde, l'énergie des ondes de Rayleigh pénètre approximativement dans une profondeur égale à une longueur d'onde. Étant donné l'atténuation exponentielle de l'énergie, une moitié de l'énergie des ondes de Rayleigh diminue dans une profondeur égale à un quart de longueur d'onde. L'énergie des ondes ultrasonores génère une pression qui cause le déplacement ou la déformation dans la microstructure du matériau.

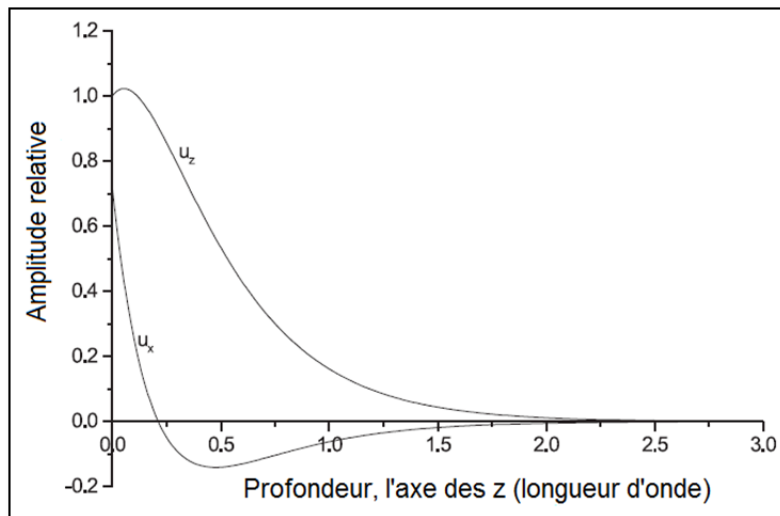


Figure 3.2 Déplacements relatifs des ondes de Rayleigh
Tirée de (Cheeke, 2002, p. 6)

La figure 3.2 montre le déplacement relatif des ondes de Rayleigh par rapport à la profondeur d'un échantillon de quartz fondu². Les paramètres u_x et u_z sont les composants de déplacement des ondes de Rayleigh sur les axes des x et des z . Mix (2005, p. 493) mentionne que les défauts près de la surface ont une influence sur les ondes de Rayleigh et, par conséquent, la propreté de la surface est très importante pour effectuer une inspection fiable.

¹ ASTM International, anciennement connu sous le nom de *the American Society for Testing and Materials*

² Cette figure est justement choisie pour mieux visualiser le contenu du texte

Les saletés atténuent l'énergie d'ondes et produisent des bruits sur l'écran de l'appareil de contrôle. La température de l'inspection est un paramètre à considérer pour les contrôles par ondes acoustiques de surface; car la vitesse d'onde ultrasonore varie avec la température (Viens et Cheeke, 1990, p. 209). L'influence de la température sur l'élasticité du métal et sur le module de Young justifie ce phénomène: lorsque la température augmente, le module de Young du métal diminue. Dans le cas de ce projet, les mesures sont effectuées à la température ambiante. Vary (1986, p. 97) énonce les paramètres qui affectent la propagation des ondes de surface. La vitesse des ondes Rayleigh sur la surface est indépendante de la fréquence, mais la profondeur de pénétration des ondes de Rayleigh dans le matériau dépend de la fréquence. Également, la variété de la taille des grains et l'anisotropie du matériau polycristallin influencent la propagation des ondes ultrasonores. L'atténuation des ondes ultrasonores y est plus élevée et leur vitesse n'est pas linéairement définissable par le ratio de Poisson et le module de Young. Ces faits ont un impact considérable sur la mesure des ondes de Rayleigh sur l'échantillon polycristallin de Waspaloy.

3.3 Théorie du ratio de Poisson et du module de Young

Les vitesses des ondes ultrasonores dans les matériaux isotropes¹ sont définies par les paramètres de densité, d , module de Young, E , et le ratio de Poisson, ν . Le module d'élasticité ou module de Young est le rapport entre contrainte et déformation, exprimé par les coefficients de Lamé, les équations 3.1 (Shull, 2002b, p. 21) :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad , \quad G = \frac{1}{2} \frac{E}{1 + \nu} \quad (3.1)$$

λ : Coefficient de Lamé (Pa) ;

G : Module de cisaillement, constante de Lamé (Pa);

ν : Ratio de Poisson (sans dimension) ;

E : Module de Young (Pa).

¹ Dont les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions

En considérant la théorie de l'ultrason, l'augmentation de la vitesse ultrasonore est linéairement reliée à la diminution du ratio de Poisson, selon les équations 3.2 et 3.3 (Viens, 2011b, p. 7) et (Shull, 2002b, pp. 18-21) :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{d}} \approx \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{d(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (3.2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{d}} \approx \sqrt{\frac{E}{2d(1 + \nu)}} \quad (3.3)$$

d : Densité (g/cm³);

V_L : Vitesse de l'onde longitudinale (m/s) ;

V_S : Vitesse de l'onde transversale (m/s).

3.4 Vitesse des ondes de Rayleigh

Shull (2002b, pp. 18-21) explique la théorie de la propagation des ondes ultrasonores en trois dimensions dans la masse du matériau. Étant donné l'effet de Poisson, lorsque la masse du matériau est comprimée dans la direction de l'axe des x , elle se développe en volume dans les autres directions, les axes des y et des z . La déformation et le déplacement dans la masse du matériau sont comparables à un accident de voiture qui cause la déformation plastique, permanente, la déformation élastique, temporaire, le déplacement linéaire de la masse et le déplacement rotationnel. Dans les domaines de l'inspection non destructive par ultrason conventionnel, la déformation élastique linéaire et le déplacement rotationnel local sont importants. L'effet accouplé de la déformation élastique non-linéaire est moins grand mais aussi important (Shull, 2002b, p. 14). L'utilisation de l'acoustique non linéaire est présentée dans la partie 3.7.1. Ainsi, les expériences scientifiques de Kumar et coll. (2006) confirment que l'influence du changement microstructural sur la vitesse de l'onde de cisaillement est plus importante que sur la vitesse de l'onde longitudinale. Une fois de plus, l'effet de Poisson justifie ce résultat. Dans le cas de l'onde longitudinale, le déplacement ou la

déformation, la compression et la raréfaction sont dans la même direction de la propagation de l'onde. Donc, il n'y a pas de rotation locale dans la masse du matériau. Bien au contraire, l'onde de cisaillement produit des contraintes de cisaillement linéaires et des déplacements perpendiculaires à la direction de la propagation de l'onde. Cela signifie une déformation de cisaillement et une rotation locale. Autrement dit, les particules se déforment et tournent (Shull, 2002b, pp. 17-27). Par conséquent, la grandeur scalaire du déplacement des particules, u , devient une quantité vectorielle, selon l'équation 3.4 (Shull, 2002b, p. 12):

$$\vec{u} = \vec{u}_x \hat{x} + \vec{u}_y \hat{y} + \vec{u}_z \hat{z} \quad (3.4)$$

\hat{x} , \hat{y} et \hat{z} sont les vecteurs directeurs unitaires. Les ondes acoustiques sont descriptibles par une fonction vectorielle, $\vec{u}_{(x, y, z, t)}$, définie par les déplacements des particules \vec{u} est fonction de l'onde longitudinale et de l'onde de cisaillement, selon l'équation 3.5 (Shull, 2002b, p. 111) :

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_S \quad (3.5)$$

Le mouvement des particules par la propagation des ondes de Rayleigh est un déplacement, avec une vitesse sur l'axe des x , et une rotation elliptique (Viens, 2011b) et (Shull, 2002b, pp. 113-114). Dans les cas des ondes de Rayleigh, la partie réelle du vecteur de déplacement est représentée par l'équation 3.6 (Shull, 2002b, p. 114):

$$\vec{u}(x, z, t) = A \cos(kx - \omega t) \hat{i} + B \sin(kx - \omega t) \hat{k} \quad (3.6)$$

$\hat{i} \approx \hat{x}$ et $\hat{k} \approx \hat{z}$ sont les vecteurs directeurs unitaires sur les axes des x et des z , respectivement. L'argument de $kx - \omega t$ présente la phase d'onde où $dx/dt = \omega/k^1$ présente la vitesse de phase (Shull, 2002b, p. 12). L'équation 3.6 est la somme des équations mathématiques (Shull, 2002b, pp. 113-114) qui définit le déplacement elliptique des particules, en utilisant l'équation de Helmholtz qui est dépendante du temps, t . A et B sont les constantes liées au

¹ $\omega \equiv$ fréquence temporelle angulaire ; $k \equiv$ fréquence spatiale angulaire

ratio de Poisson du matériau. L'équation 3.7 (Viens, 2011b, p. 8), dérivée de l'équation de Rayleigh (Cheeke, 2012, p. 128), montre la relation existant entre la vitesse des ondes de Rayleigh, V_R , et le ratio de poisson :

$$V_R \cong V_S \cdot \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (3.7)$$

3.5 Évaluation des microstructures par les ondes de Rayleigh

Dans l'hypothèse que la densité des précipités microstructuraux du Waspaloy soit différente de celle de la matrice, la vitesse des ondes ultrasonores change avec la présence de *freckles* et de *white spots*. De même, les propriétés élastiques des *freckles* et des *white spots* sont différentes de celles de la matrice et, par la suite, le changement des coefficients de Lamé, λ et G , change la vitesse des ondes ultrasonores.

Sposito et coll. (2010, p. 558) présente que la vitesse d'onde longitudinale parallèle aux défauts diminue plus rapidement que la vitesse d'onde longitudinale perpendiculaire aux défauts. Cela présume que la diminution de la vitesse des ondes de Rayleigh parallèle aux *white spots* et aux *freckles* est considérable. Constatée par Ensminger et Bond (2011, p. 309) et ses références, la microstructure des matériaux est un paramètre à l'échelle microscopique qui affecte la propagation de l'énergie ultrasonore. Ainsi, la trace des impuretés du métal est détectable par les techniques ultrasonores. Le nombre total des atomes de l'impureté détermine le degré d'absorption de l'énergie ultrasonore et la fréquence maximale de l'absorption. Autrement dit, l'atténuation acoustique et la variation de la vitesse ultrasonore indiquent le changement des propriétés mécaniques du matériau ou la présence des précipités et des impuretés dans le matériau. Les contraintes mécaniques localisées dans les coins, les arrêts et les angles des pièces changent la vitesse des ondes de Rayleigh.

3.6 Générer les ondes acoustiques de surface

La norme ASTM E1774-96 (2007) fournit la description directive de génération des ondes de Rayleigh en utilisant le transducteur électromagnétique acoustique, EMATs. En résumé, pour générer les ondes de Rayleigh, un champ magnétique statique est appliqué de façon perpendiculaire à la surface. La fréquence, la géométrie et le type de la bobine sont les paramètres qui contrôlent la génération des ondes de Rayleigh. Xing et coll. (1996) propose l'utilisation d'une couche mince de titanate zirconate de plomb, PZT, qui possède des caractéristiques piézoélectriques, pour conduire les ondes acoustiques sur la surface courbe d'un tube. La technique laser-ultrason est une méthode optique de contrôle sans contact. L'impact de l'impulsion puissante du laser génère des ondes de surface à haute fréquence. Au retour, le balayage laser ou un interféromètre détecte les déplacements des ondes acoustiques.

3.6.1 Transducteur ultrasonore

Un transducteur est un appareil qui convertit une forme d'énergie en une autre. Le transducteur ultrasonore convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, sous forme de son, et vice-versa. L'élément alimenté¹, la couche anti-réfléchissante² et la plaque d'usure³ sont les composants principaux du transducteur ultrasonore, la figure 3.3, (Olympus NDT, 2011). La plaque d'usure protège l'élément alimenté du transducteur de l'environnement d'essai. Dans le cas de transducteurs de contact, la plaque d'usure doit être fabriquée d'un matériau durable et résistant à la corrosion. Pour les sondes d'angle et pour le test en immersion, la plaque d'usure comporte le but supplémentaire de servir de transformateur acoustique ou d'une couche correspondante entre l'élément alimenté à haute impédance

¹ *Active element*

² *Backing* (Dictionnaire TERMIUM Plus)

³ *Wear plate*

acoustique¹ et le sabot à impédance acoustique plus basse ou entre l'élément alimenté et l'eau (Olympus NDT, 2011).

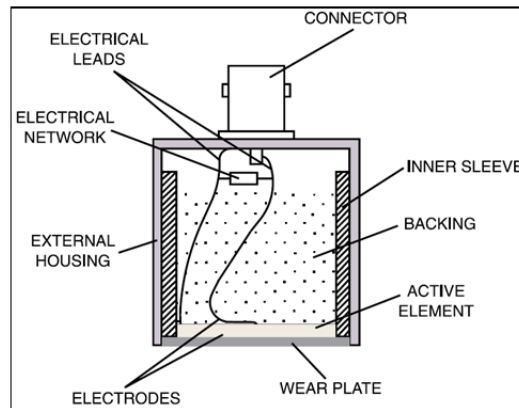


Figure 3.3 Transducteur ultrasonore
Tirée de (Olympus NDT, 2011)

3.6.2 Transducteur à sabot

Shull (2002b, p. 89) explique la méthode la plus simple pour générer les ondes acoustiques de surface : l'utilisation d'un sabot, par lequel une onde longitudinale est transmise à la surface, la figure 3.4.

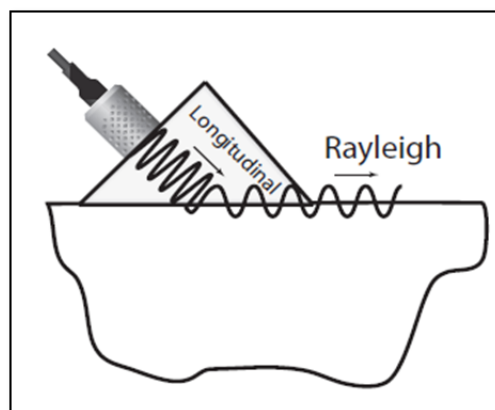


Figure 3.4 Générer les ondes de surface
Tirée de (Shull, 2002b, p. 89)

¹ L'impédance acoustique caractérise la résistance d'un milieu au passage du son.

Lorsqu'une onde ultrasonore traverse l'interface de deux matériaux qui ont différents indices de réfraction, sous un angle oblique, la réfraction de l'onde incidente se produit en respectant la loi de Snell, l'équation 3.8, illustrée sur la figure 3.5 (Viens, 2011b, pp. 13-14) et (NDT ressource center, 2013).

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L2}} \quad (3.8)$$

V_{L1} : Vitesse de l'onde longitudinale dans le matériau 1 (m/s) ;

V_{L2} : Vitesse de l'onde longitudinale dans le matériau 2 (m/s).

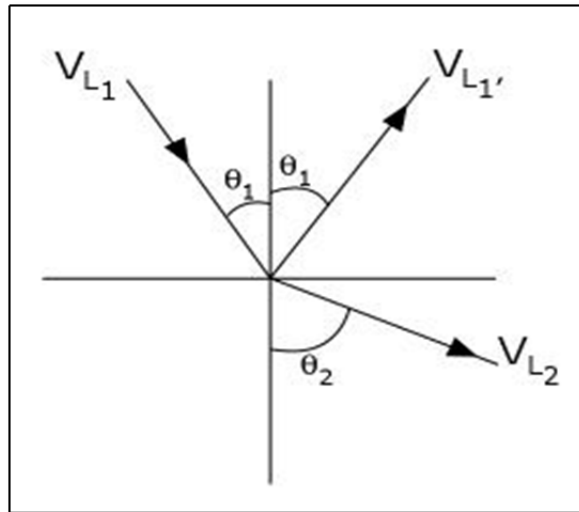


Figure 3.5 Réfraction de l'onde incidente
Tirée de (NDT ressource center, 2013)

Selon la théorie (NDT ressource center, 2013), lorsque l'onde longitudinale traverse l'interface liquide-solide sous un angle oblique, d'un matériau dans lequel la vitesse d'onde ultrasonore est plus lente à un matériau dans lequel la vitesse d'onde ultrasonore est plus rapide, angle d'incidence, Θ_1 , qui fait l'angle de réfraction par rapport à la direction verticale, Θ_2 , est nommé le premier angle critique. De plus, il y a une conversion de mode à l'interface liquide-solide. C'est-à-dire qu'une forme d'énergie se transforme en une autre, une partie de l'onde longitudinale se convertit en onde transversale, en accord avec l'équation 3.9, illustrée sur la figure 3.6 (NDT ressource center, 2013).

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{L_1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{L_2}} = \frac{\sin \theta_3}{V_{S_1}} = \frac{\sin \theta_4}{V_{S_2}} \quad (3.9)$$

V_{S_1} : Vélodité de l'onde de cisaillement dans le matériau 1 (m/s) ;

V_{S_2} : Vélodité de l'onde de cisaillement dans le matériau 2 (m/s).

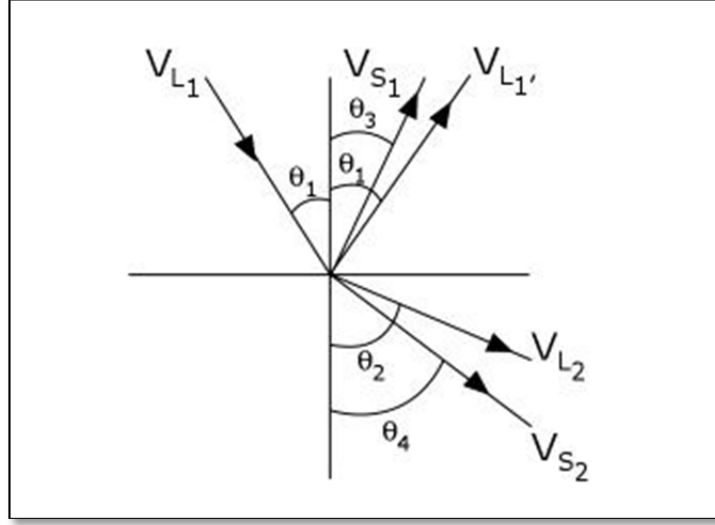


Figure 3.6 Conversion de mode des ondes ultrasonores
Tirée de (NDT resource center, 2013)

Au-delà du premier angle critique, seulement l'onde de cisaillement se propage dans le matériau. Il y a aussi un angle d'incidence, nommé le deuxième angle critique, qui fait l'angle de réfraction de l'onde de cisaillement de 90 degrés. À ce point, toute l'énergie de l'onde ultrasonore est reflétée ou est réfractée sur la surface (NDT resource center, 2013). Le changement de la direction de l'onde est en fonction des caractéristiques du sabot et du matériau, en respectant la loi de Snell en équations 3.10 et 3.11 Shull (2002b, p. 89) :

$$\frac{1}{V_R} \sin 90^\circ = \frac{1}{V_w} \sin(\theta_{critique}) \quad (3.10)$$

$$\theta_{critique} = \sinh^{-1} \left(\frac{V_w}{V_R} \right) \quad (3.11)$$

V_w : Vélodité de l'onde dans le sabot (m/s) ;

V_R : Vélodité des ondes de Rayleigh sur la surface du matériau (m/s).

La vitesse des ondes de Rayleigh est très proche de celle des ondes de cisaillement, et par conséquent, l'angle critique pour générer les ondes de Rayleigh est très proche du deuxième angle critique (Shull, 2002b, p. 89).

La figure 3.7 (Olympus NDT, 2011, p. 45) montre la relation entre l'angle d'incidence et les amplitudes relatives des ondes réfractées ou des ondes converties de longitudinale, de cisaillement et les ondes de surface dans l'acier¹.

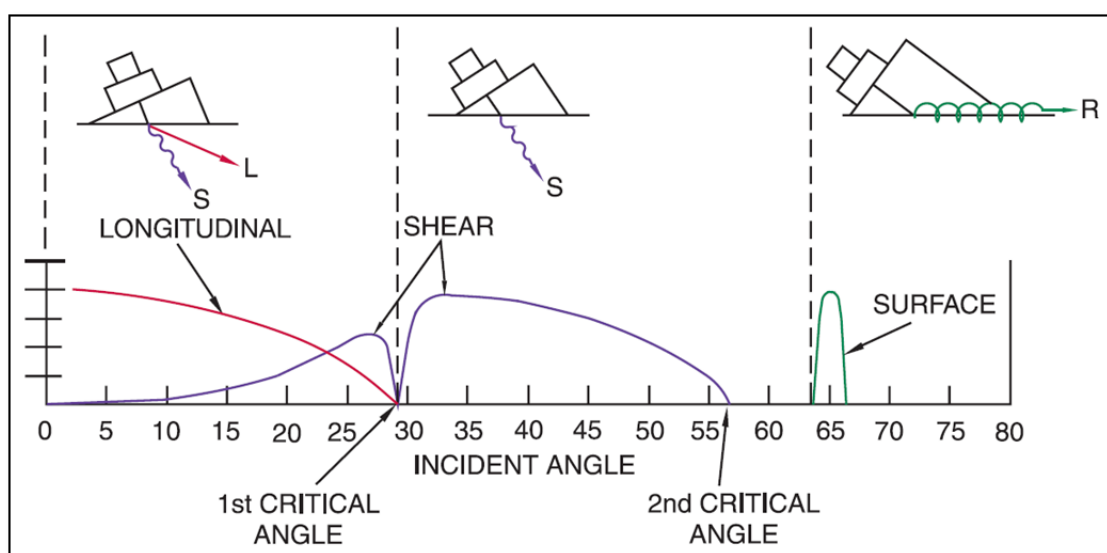


Figure 3.7 Angle d'incidence et les ondes réfractées
Tirée de (Olympus NDT, 2011)

Shull (2002b, p. 90) explique que si la vitesse des ondes de Rayleigh dans le matériau soumis à l'inspection est moindre que la vitesse de l'onde longitudinale dans le sabot, l'onde réfractée ne se retourne pas vers la surface et aucun angle critique n'existe. Dans ce cas, l'usage d'un médiateur peut être avantageux. Un médiateur est un sabot de métal avec une pointe saillante dans lequel la vitesse des ondes de Rayleigh est plus grande que dans le sabot.

¹ Cette figure est justement choisie pour mieux visualiser le contenu du texte

L'onde longitudinale dans le sabot crée les ondes de surface sur la surface du médiateur. Par la suite, la pointe du médiateur est placée sur la surface de l'échantillon et les ondes de Rayleigh sont transmises sur cette surface. La figure 3.8 illustre l'utilisation du médiateur pour générer les ondes de surface (Shull, 2002b, p. 89).

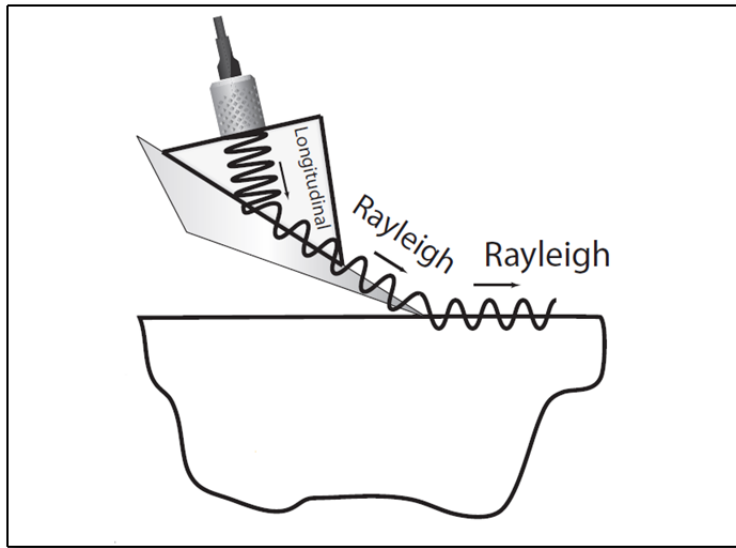


Figure 3.8 Générer les ondes de surface par un médiateur
Tirée de (Shull, 2002b, p. 89)

3.7 Études préparatoires d'inspection par ondes de Rayleigh

Souligné par Shull (2002b, p. 53) et ses références, si le ratio entre le rayon de la courbure de surface et la longueur d'onde est grand, les ondes de Rayleigh se propagent comme sur la surface d'une plaque plane. Si ce ratio devient petit, la vitesse des ondes de Rayleigh augmente. Par exemple, si le rapport entre le rayon de la courbure et la longueur d'onde est 3,5, la vitesse des ondes de Rayleigh devient approximativement égale à la vitesse de l'onde de cisaillement. Dans le cas de la pièce de ce projet, la longueur d'onde est 0,576 mm ($\lambda = V_R / f$, si $f = 5\text{MHz}$) et le rayon de courbure de la surface intérieure est 46,55 mm (4,655 cm). La limite des dimensions et la forme géométrique de la pièce inspectée imposent des contraintes importantes sur la précision de mesure. Ainsi, la dispersion d'onde avec petite longueur d'onde dans la masse de la pièce est un effet considérablement important (Rulf, 1969).

Afin de respecter la proposition de ce projet de recherche sur l'étude des ondes ultrasonores en immersion, les ondes de Scholte¹ sont aussi étudiées lors de la revue de la littérature. Selon la définition de l'ASM², (2011) et de Shull (2002b, pp. 53-54), les ondes de Rayleigh se propagent dans une interface « semi-infinie » limitée d'un côté par les fortes forces élastiques du solide et de l'autre côté par les forces élastiques pratiquement négligeables du gaz, de l'air. L'énergie des ondes de Rayleigh fuit dans les liquides ou dans les milieux de couplage. Lorsqu'un solide est immergé dans un liquide, comme dans le bassin d'eau, les ondes de Rayleigh ne se propagent pas sur de grandes distances, à moins que le liquide couvre la surface du solide seulement en couche très mince.

Suivant les définitions précédentes, Shull (2002b, pp. 53-54) explique que dans le cas de l'évaluation dans les bassins d'immersion, les ondes de Scholte se propagent sur l'interface eau-solide. La vitesse des ondes de Scholte est presque identique à la vitesse des ondes de Rayleigh. En effet, pour une propriété donnée d'un solide, la vitesse des ondes ultrasonores apporte un changement de 0,1% en ajoutant de l'eau. La différence entre les ondes de Rayleigh et les ondes de Scholte réside dans leur atténuation. En général, l'atténuation des ondes de Rayleigh est très faible, ce qui le rend plus efficace pour l'inspection de la surface. Bien au contraire, l'atténuation des ondes de Scholte est très élevée. Pour donner une valeur caractéristique, l'amplitude des ondes de Scholte diminue d'un tiers de l'amplitude originale lorsque l'onde se propage seulement 10 fois sur la longueur d'onde. L'énergie des ondes de Scholte se perd dans la surface. En conséquence, si la couche d'eau est très mince et si l'épaisseur de la couche est constante et uniforme, l'onde qui est atténuée dans l'eau se reflète de nouveau sur la surface et produit une autre onde de surface sur interface. Une des utilisations des ondes de Scholte est pour contrôler la présence de l'eau sur la surface des matériaux.

¹ Les ondes de Scholte sont aussi nommées *leaky surface waves*

² ASM International, anciennement connu sous le nom *the American Society for Metals*

3.7.1 Acoustique non linéaire

L'acoustique non linéaire s'appuie sur la génération des ondes ultrasonores secondes harmoniques, des paramètres et des équations différentielles non linéaires. Ce phénomène est explicable par la théorie de la distorsion d'une onde sinusoïdale ultrasonore en traversant un matériau en raison des numéros de sources de non linéarité dans le matériau (Cantrell Jr, 2008). La figure 3.9 illustre la différence de propagation des ondes dans un milieu linéaire¹ et un milieu non linéaire (Herrmann, 2005, p. 12).

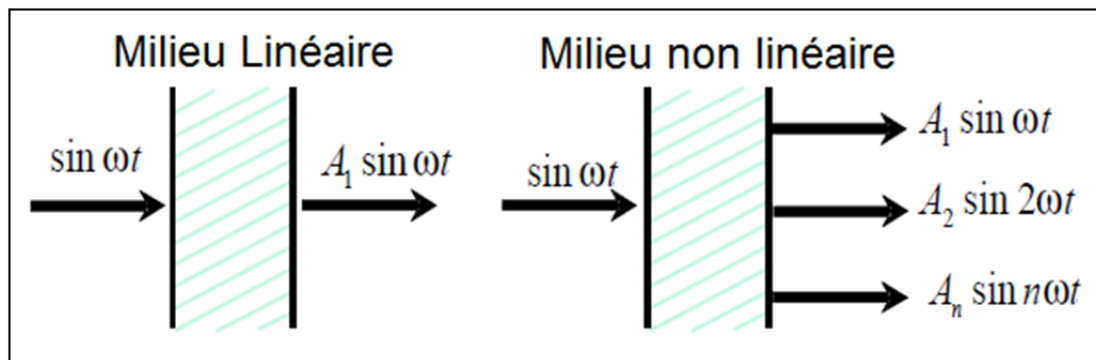


Figure 3.9 Propagation linéaire et non linéaire d'onde
Tirée de (Herrmann, 2005, p. 12)

La transformée de Fourier rapide, liée à la théorie des séries de Fourier, est « un outil mathématique » (Benoît Rittaud, 2013) qui permet « la décomposition de signal » (Benoît Rittaud, 2013) et (Viens, 2012, p. 28). La transformée de Fourier convertit des données spatiotemporelles de compression-dilatation du milieu de propagation en données fréquentielles de « l'intensité associée à la fréquence fondamentale et à ses harmoniques » (Benoît Rittaud, 2013). Les propriétés d'anharmonicité du réseau cristallin et les déplacements non linéaires élastiques des atomes « au voisinage d'une transition de phase » (SAPRIEL, 1995) sont la source commune de la génération des ondes non linéaires dans le matériau (Cantrell Jr, 2008, p. 2).

¹ Les gaz dans l'atmosphère et l'eau sont les exemples du milieu linéaire

Herrmann et coll. (2006) utilise la caractéristique de non linéarité des ondes de Rayleigh pour l'évaluation des dommages dans les superalliages de nickel. Leur travail porte sur la mesure de l'amplitude d'harmonique de second ordre des ondes de Rayleigh avec la technique du laser ultrason, la détection interférométrie hétérodyne. Pour faire cette mesure, les ondes de Rayleigh ont l'avantage, car la plupart de l'énergie des ondes de Rayleigh est concentrée près de la surface libre de contrainte, ce qui produit des effets non linéaires plus forts, comparables aux ondes ultrasonores qui se propagent dans la masse du matériau. Leurs études sont particulièrement réalisées pour la détection des dislocations microstructurales par fatigue dans un superalliage. Herrmann et coll. (2006) affirme que les dislocations et la déformation micro plastique qui en résulte ne provoquent pas un grand changement dans les propriétés macroscopiques telles que modules d'élasticité, vitesse ultrasonore et atténuation. Les changements de ces valeurs ultrasonores linéaires ne sont pas suffisamment grands pour être mesurés avec des techniques conventionnelles.

Les résultats de Herrmann et coll. (Herrmann, 2005) peuvent être interprétés dans les analyses des travaux expérimentaux de ce projet. La surface usinée du disque du Waspaloy pourrait augmenter la génération de la seconde harmonique et, par conséquent, cet effet rend la mesure ultrasonore conventionnelle moins efficace (Herrmann, 2005, p. 70). De plus, l'endommagement microstructural localisé augmente la génération de la seconde harmonique (Herrmann, 2005, p. 70). La présence d'hétérogénéité microstructurale de ségrégation est potentiellement une source pour générer des ondes non linéaires de seconde harmonique.

3.8 Discussion

Les techniques de contrôle non destructif par ultrason, et particulièrement par ondes de Rayleigh sont les méthodes qui permettent d'identifier les inhomogénéités microstructurales. Cependant, produire les ondes de Rayleigh sur la surface conique du disque de l'échantillon de Waspaloy nécessite une grande précision. Dans le cas de l'échantillon de Waspaloy de ce projet, il est fort probable que fabriquer un sabot miniature pour générer les ondes de Rayleigh sur la surface de cet échantillon ne produit pas les résultats désirés. De plus, obtenir

une mince couche d'eau sur la surface conique du disque dans le grand bassin d'ultrason du laboratoire est une difficulté du test. Toutefois, cela est la proposition d'une méthode précise applicable plutôt dans les laboratoires scientifiques que dans les unités de production industrielle.

La technique de l'acoustique non linéaire est présentée dans ce chapitre pour souligner cet aspect important des ondes de Rayleigh dans le domaine du contrôle non destructif. L'éventuelle utilisation de la génération des ondes ultrasonores secondes harmoniques pour détecter les défauts microstructuraux de ségrégation n'est pas le sujet de ce projet.

CHAPITRE 4

IMAGERIE MAGNÉTO-OPTIQUE

4.1 Principe de l'imagerie magnéto-optique

La magnéto-optique est le phénomène de l'interaction entre la lumière et le matériau lorsque ce dernier est soumis à un champ magnétique. La méthode magnéto-optique est une combinaison des technologies optiques et magnétiques basée sur les principes des courants de Foucault et l'effet de rotation de Faraday qui permet de visualiser les défauts localisés des matériaux. La technique de l'imagerie magnéto-optique, *MOI*, est une méthode d'inspection rapide et largement utilisée pour la détection des défauts sous-cutanés et des défauts de surface, des fissures, sur les fuselages d'avions. Cette méthode n'est pas sensible aux variations de la distance de retrait, *lift-off*. L'interprétation des résultats est fiable et beaucoup plus facile que l'interprétation des signaux d'impédance complexes de l'inspection par courants de Foucault conventionnelle (Fan et al., 2006, p. 1).

4.2 Composantes de l'appareil magnéto-optique

La technique de l'imagerie magnéto-optique utilise une feuille d'induction pour induire des courants de Foucault dans la pièce ; une source du faisceau laser qui traverse le capteur magnéto-optique ; un capteur magnéto-optique qui est une couche mince de cristal magnéto-optique intégré dans la bobine d'excitation pour visualiser les variations du champ magnétique associées à l'interaction des courants de Foucault avec des défauts et une caméra CCD¹ pour enregistrer les images.

¹ Caméra à dispositif de couplage de charge.

4.2.1 Capteur magnéto-optique

Les champs magnétiques affectent les propriétés optiques de certains matériaux, de telle sorte que lorsqu'une lumière linéairement polarisée est transmise à travers le matériau dans la direction du champ magnétique appliqué, le plan de polarisation tourne. Cet effet est nommé l'effet magnéto-optique de Faraday ou la rotation de Faraday. La quantité de rotation est proportionnelle à l'intensité de champ magnétique, H et la distance parcourue par la lumière dans le matériau, l , (Shih W.C.L., 2002, p. 18). Les distorsions des domaines magnétiques du capteur magnéto-optique causées par le champ magnétique externe font apparaître l'image prise par la caméra. Ces distorsions sont relativement insensibles à l'intensité de champ magnétique (Shih W.C.L., 2002, p. 18). Le flux magnétique associé aux courants de Foucault est normalement tangentiel à la surface de la pièce inspectée. Des anomalies dans la pièce génèrent une composante d'induction magnétique normale à la surface. Le capteur magnéto-optique projette les images de cette composante vers la caméra (Shih W.C.L., 2002, p. 18).

Le capteur magnéto-optique se compose d'une mince couche, $\sim 3 \mu\text{m}$ (Hu, 2012, p. 4), du grenat de fer dopé¹ par le bismuth qui croît sur un substrat de grenat de gadolinium-gallium² (Saint-Gobain Crystals - Photonic Materials, 2013) et (Shih W.C.L., 2002, p. 18). Fitzpatrick (1998) et qui indique la couche de grenat de fer dopé, $(\text{Bi}, \text{Tm})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$, qui se développe sur un substrat de grenat de gallium gadolinium (GGG) de $7,62 \text{ cm}^3$ de diamètre et d'une épaisseur de $0,0508 \text{ cm}^4$. Cette couche mince présente trois propriétés physiques essentielles. Premièrement, elle présente la propriété anisotropie magnétique uniaxe. C'est-à-dire que la couche magnétique possède un axe facile normal à la surface du capteur, « sur laquelle l'aimantation [...] peut avoir deux positions d'équilibre stable en sens opposés » (Dictionnaire TERMIUM Plus, 2012), ainsi qu'un axe difficile dans le plan du capteur « et sur laquelle l'aimantation [...] est presque nulle » (Dictionnaire TERMIUM Plus, 2012) et

¹ Substitué par des atomes de bismuth pour en modifier les caractéristiques électriques ou optiques.

² $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$

³ 3 pouces

⁴ 0,020 pouce

(Shih W.C.L., 2002, p. 18). Deuxièmement, elle possède la mémoire magnétique. Cela signifie que si le champ magnétique extérieur sur l'axe facile est retiré, le film magnéto-optique conserve la majorité de la magnétisation déjà établie (Shih W.C.L., 2002, p. 18). Troisièmement, la couche du grenat possède une rotation de Faraday spécifique, θ_f , relativement élevée, allant jusqu'à 3 ou 4 degrés par micron (3×10^4 degrés par centimètre) d'épaisseur du matériau. Cela est la propriété qui permet de visualiser les images directes.

Si une lumière linéairement polarisée est incidente normale à la surface du capteur, la rotation du plan de la polarisation de la lumière est égale à l'angle θ , selon l'équation 4.1 (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 8) et (Shih W.C.L., 2002, p. 18) :

$$\theta \propto \theta_F \cdot \vec{K} \cdot \vec{M} \approx \theta_F (\vec{K} \cdot \vec{M}) l / (|\vec{K}| |\vec{M}|) \quad (4.1)$$

\vec{K} est le vecteur d'onde¹ et \vec{M} est la magnétisation locale du film de la région où la lumière est transmise, en fonction du temps. \vec{M} est toujours parallèle à l'axe facile dans la direction positive ou négative. Ainsi, l'équation 4.1 montre que la rotation de Faraday est indépendante de la direction de la lumière. Cela signifie que si la lumière est d'abord transmise à travers du capteur et, ensuite, elle se réfléchit dans ce capteur par un miroir, la rotation de Faraday sera doublée, la figure 4.1 (Johansen, 2007).

L'analyseur permet de visualiser cette lumière réfléchi et, par conséquent, l'état local de la magnétisation de toutes les régions du capteur est visible comme une zone de fort contraste clair-obscur qui n'est dépendant que de la direction de la magnétisation \vec{M} et du réglage de l'analyseur. Cela est la caractéristique principale qui permet au capteur de créer des images des composantes normale des champs magnétiques associés aux courants de Foucault dans la pièce (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 8) et (Shih W.C.L., 2002, p. 18).

¹ Vecteur spécifiant le nombre d'ondes et la direction de propagation d'une onde (Dictionnaire TERMIUM Plus)

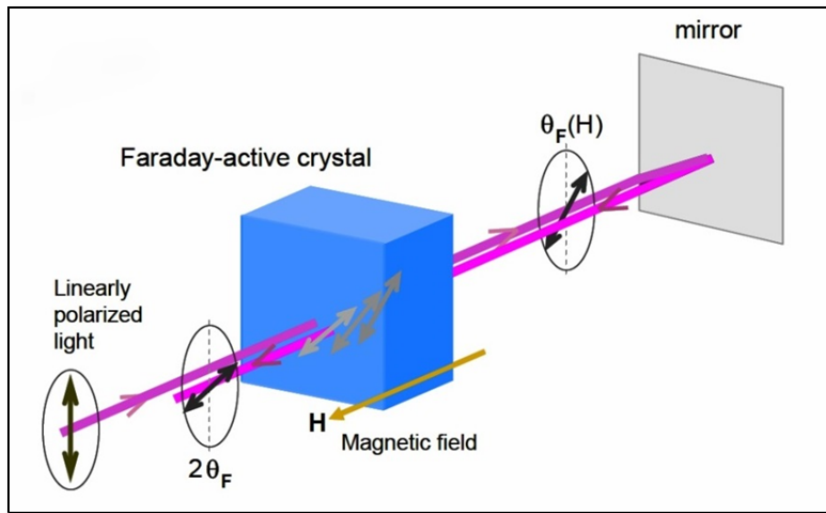


Figure 4.1 Rotation de Faraday doublée
Adapté de (Johansen, 2007)

Il est nécessaire de souligner l'utilisation des différents cristaux optiques sur le capteur qui présentent diverses propriétés magnéto-optiques et différentes rotation de Faraday spécifiques. Ainsi, plusieurs méthodes de la croissance de cristal paraissent dans les revues et les articles scientifiques. Innovent (2011) présente la technique de croissance des cristaux « épitaxie » en phase liquide pour déposer une couche mince de micromètre d'épaisseur avec une grande perfection cristalline. La figure 4.2 illustre la couche cristalline du capteur magnéto-optique. Pour optimiser la performance, le capteur magnéto-optique est recouvert d'une couche résistante aux rayures.

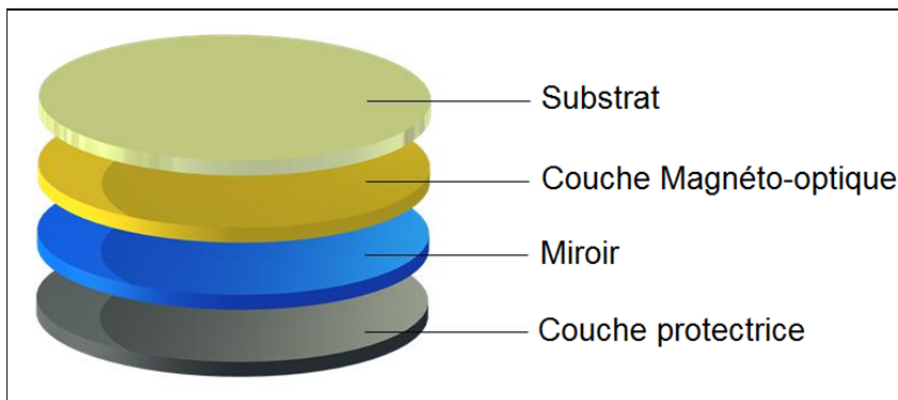


Figure 4.2 Couche cristalline du capteur
Tirée de (Innovent, 2011)

4.2.2 Feuille d'inductance et excitation des courants de Foucault

Dans l'appareil de l'imagerie magnéto-optique, une feuille d'inductance des courants est utilisée pour produire des courants de Foucault dans la pièce; une feuille de cuivre, excellent conducteur électrique, adjacente à la pièce (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 8). Cette feuille d'induction crée un champ magnétique parallèle à l'axe difficile de magnétisation du capteur magnéto-optique. Cela signifie qu'en absence de fissures ou de corrosion dans la pièce, les champs magnétiques excitants des courants de Foucault ont peu d'effet sur l'état de magnétisation du capteur magnéto-optique, et alors, ils ne sont pas détectables (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 9). Grâce à cette qualité, ce champ magnétique relativement élevé ne submerge pas le champ magnétique faible, hors du plan, parallèle à l'axe facile du capteur associé à des fissures ou de la corrosion (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 9). La relation entre l'angle de rotation de la polarisation et le champ magnétique est donnée par l'équation 4.2, (Radtke et al., 2001, p. 253) :

$$\theta = VBL \quad (4.2)$$

« B » est le composant du champ magnétique dans la direction de la propagation de la lumière. « L » est la longueur du trajet sur lequel la lumière polarisée interagit avec le champ magnétique. « V » est la constante de Verdet (Radtke et al., 2001, p. 253). La figure 4.3 est le schéma de la détection des fissures par l'effet de rotation de Faraday, (Hu, 2012, p. 5) .

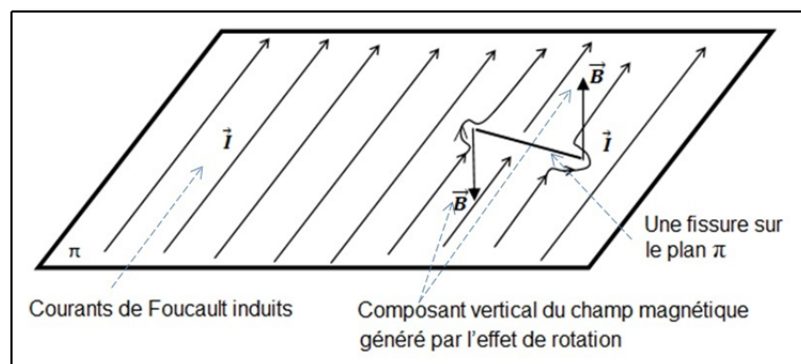


Figure 4.3 Détection des fissures par rotation de Faraday
Adapté de (Hu, 2012, p. 5)

Un autre élément important d'ensemble d'imagerie magnéto-optique est l'excitation des courants de Foucault, qui est « multidirectionnelle » (Thome, 1998, p. 3) et dont ces courants dans la feuille d'inductance sont rotatifs (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, p. 14). Pour ce faire, deux transformateurs abaisseurs de tension sont installés d'une manière orthogonale l'un avec l'autre, la figure 4.4. Les courants de Foucault sont appliqués dans la première direction et après avoir produit l'excitation initiale, ils sont appliqués dans la direction orthogonale. La mémoire du capteur stocke les informations de l'image générée par l'excitation initiale et consécutive aux excitations multidirectionnelles, il remplit les détails (Thome, 1998, p. 3).

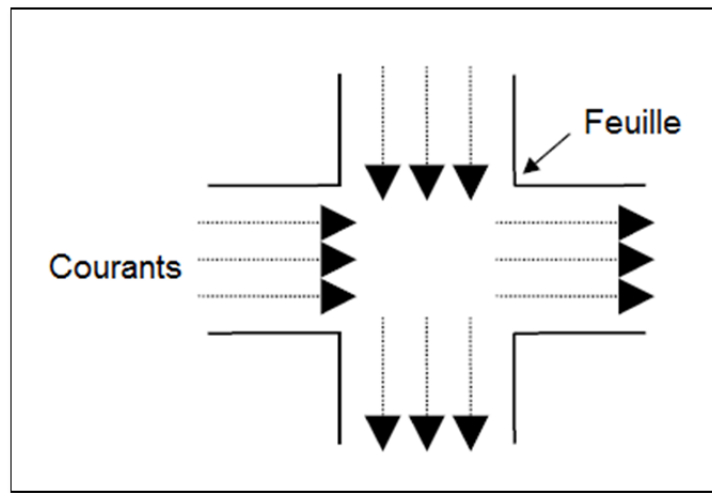


Figure 4.4 Ensemble des transformateurs orthogonaux
Tirée de (Thome, 1998, p. 4)

L'unité d'alimentation de courants génère des excitations de courants de Foucault simultanées dans les deux directions orthogonales d'une manière que les signaux dans la deuxième direction sont 90 degrés déphasés par rapport à la première direction. Cela signifie que le premier courant est appliqué dans une direction, la figure 4.5-a, puis avec un délai de $\frac{1}{4}$ de période, le deuxième courant est appliqué dans la direction orthogonale, la figure 4.5-b. Les courants séquentiels sont alimentés continuellement, les figures 4.5-c à 4.5-h, et le vecteur effectif du courant est rotatif dans le sens horaire, la figure 4.5-i, (Thome, 1998, p. 4). L'excitation multidirectionnelle des courants de Foucault permet de produire les images magnéto-optiques complètes de haute qualité.

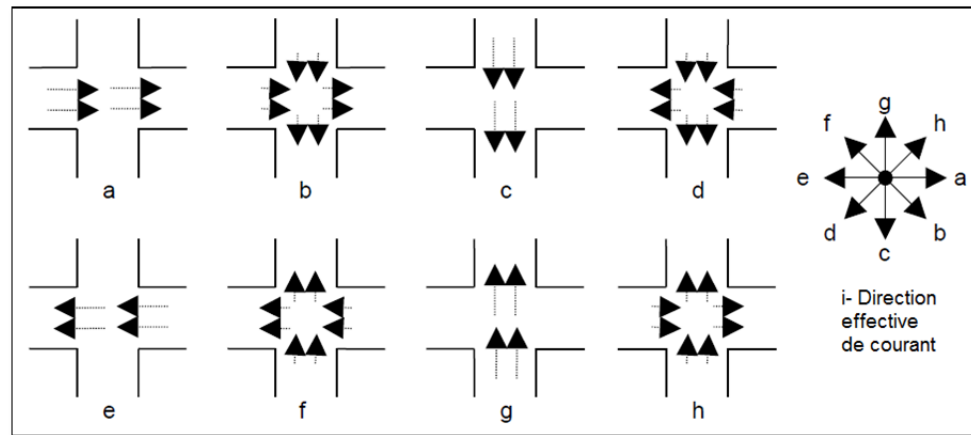


Figure 4.5 Excitation multidirectionnelle
Tirée de (Thome, 1998, p. 4)

Un ensemble d'excitation des courants de Foucault en quadrature qui consiste en quatre transformateurs permet d'optimiser le noyau d'excitation et de réduire les dimensions de l'appareil d'imagerie magnéto-optique (Fitzpatrick et Skaugset, 1998, pp. 10-11). Un capteur typique en dimension minimale pour l'inspection de fuselage d'avion possède un champ de vision de 35 x 28 mm (QUEST Integrated, 2011). Les circuits électriques des transformateurs sont alimentés par un seul câble connecteur sans interférence. Pour ce faire, le système est programmé par un module d'alimentation et les câbles de haute tension sont configurés d'une manière coaxiale pour minimiser l'induction des bruits et pour faciliter l'opération, la figure 4.6, (Thome, 1998, p. 8).

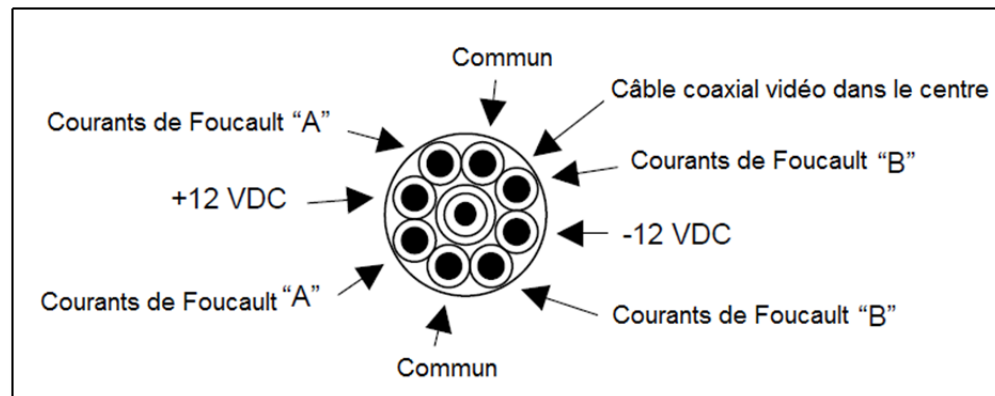


Figure 4.6 Configuration du câble connecteur
Tirée de (Thome, 1998, p. 8)

4.2.3 Caméra CCD et vidéo

Un système de caméra-affichage, CCD-TV, permet de surveiller des images en temps réel ou de les enregistrer pour les interprétations ultérieures (Thome, 1998, p. 13). Berger explique la caméra CCD-TV dans son brevet : « Dispositif d'analyse d'images en couleur utilisant le transfert de charges électriques, et caméra de télévision comportant un tel dispositif [...] pour fournir un signal électrique vidéo » (Berger et Descure, 1982). Le visiocasque est un dispositif d'affichage compact porté sur la tête, qui permet la visualisation à distance et l'inspection autonome de façon relativement facile (Thome, 1998, p. 14). La capacité de surveillance à distance et la disponibilité du téléviseur à écran ACL¹ permettent l'affichage des informations de configuration et la projection des images sur l'écran pour la facilité de l'inspection (Thome, 1998, p. 6). L'ajustement des paramètres de l'unité de contrôle permet d'améliorer la qualité de l'image affichée sur l'écran. Les figures 4.7-a et 4.7-b montrent l'effet du changement de fréquence, de 25 kHz à 50 kHz, et les images affichées d'une même région (Thome, 1998, p. 17).

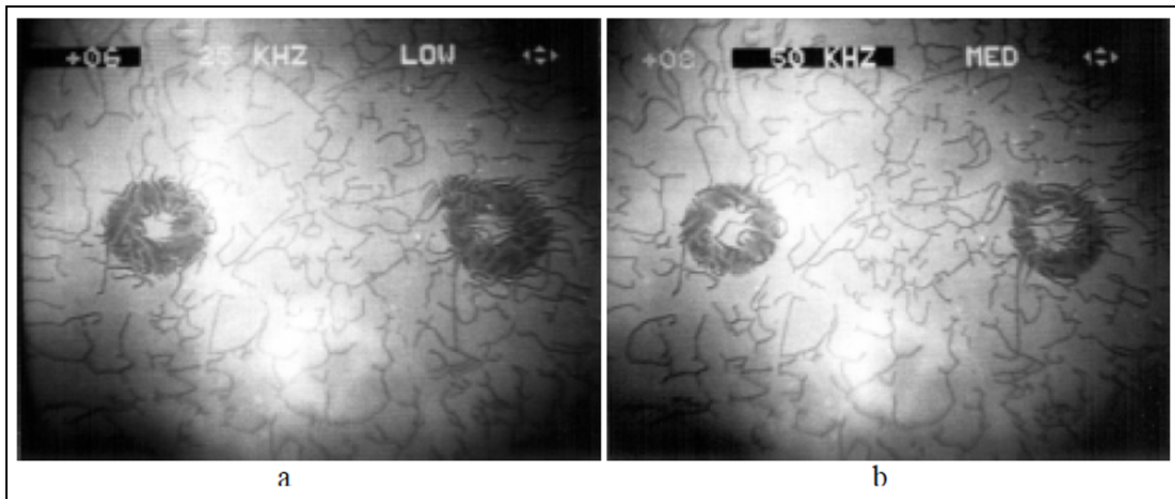


Figure 4.7 Ajustement de la fréquence
Tirée de (Thome, 1998, p. 17)

¹ Affichage à cristaux liquides

En considérant l'effet pelliculaire, la fréquence des courants de Foucault, couvrant une gamme de fréquences de 1,5 kHz à 200 kHz (QUEST Integrated, 2011), est un des importants paramètres qui détermine la profondeur de la pénétration. Par conséquent, à haute fréquence, le capteur magnéto-optique détecte les fissures près de la surface; à basse fréquence, il détecte des fissures sous-cutanées.

Le mode d'excitation des courants de Foucault est également un paramètre important pour contrôler la qualité des images. Le capteur magnéto-optique en quadrature fonctionne en quatre modes d'excitation: Multidirectionnel, arrêt, avant et arrière, d'un côté à l'autre. La figure 4.8 montre l'effet du changement du mode. Les deux images présentent la même région de joint riveté à recouvrement¹ avec deux rivets. Le rivet droit est sans fissure, mais il y a des fissures des deux côtés sous le rivet gauche. La fréquence d'excitation est 50 kHz pour les deux images. La figure 4.8-a est dans le mode unidirectionnel, les têtes des rivets sont partiellement visibles. La figure 4.8-b est dans le mode multidirectionnel, les têtes des rivets sont complètement visibles et les fissures sont plus apparentes.

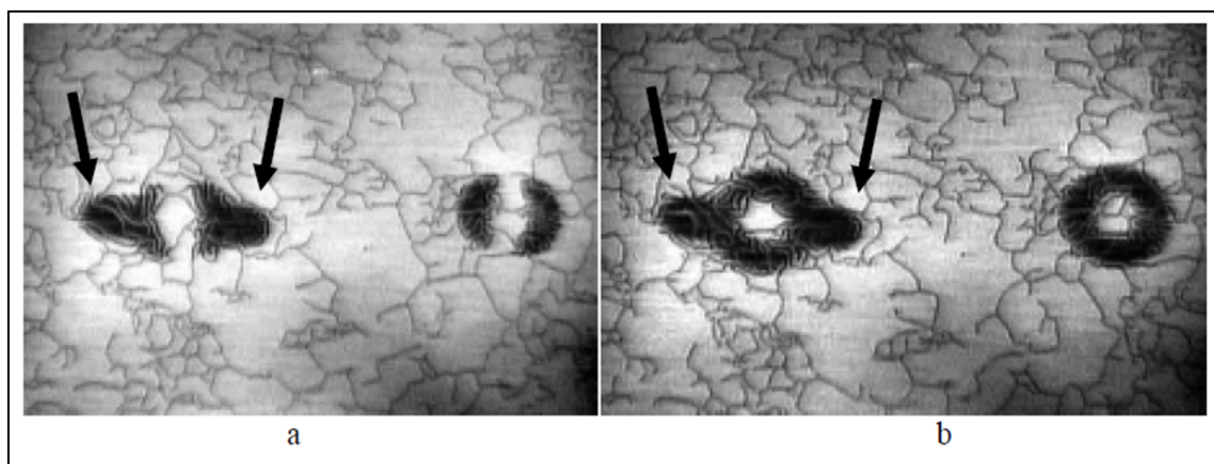


Figure 4.8 Effet de mode d'excitation
Tirée de (Thome, 1998, p. 24)

¹ Riveted lap-joint, Dictionnaire TERMIUM Plus, 2012

4.3 Traitement d'image

Pour augmenter la résolution de l'image magnéto-optique et améliorer la qualité de l'inspection, les articles publiés dans des revues scientifiques proposent différents algorithmes de traitement. Bosse et coll. (2010) présente l'algorithme MUSIC¹ par lequel l'image est traitée, pixel par pixel, et chacun de ces pixels est associé à un point à l'échelle micromètre sur le capteur magnéto-optique. Cet algorithme permet l'estimation de la profondeur des défauts dans la pièce. Ainsi, les logiciels commerciaux des éléments finis (ANSYS) sont accessibles pour préciser les résultats expérimentaux de l'imagerie magnéto-optique.

4.4 Développement et performance

La technique d'imagerie magnéto-optique présentée dans cet article est inventée pour l'inspection non destructive dans les domaines aéronautiques, mais l'utilisation de l'imagerie magnéto-optique n'est pas restreinte à ces secteurs d'activités. Le principe de base de cette technique d'inspection non destructive est respecté dans toute cette vaste gamme de produits, mais la conception des appareils est adaptée selon chaque utilisation. Cette technique est également performante pour l'inspection des matériaux ferromagnétiques utilisés dans la construction des navires et dans l'industrie pétrochimique. L'imagerie magnéto-optique permet la lecture des codes à barres à travers les revêtements (NASA's Marshall Space Flight Center, 2004). L'imagerie magnéto-optique permet d'étudier les propriétés des supraconducteurs et de vérifier leurs caractéristiques de fabrication (Johansen, 2007). L'imagerie magnéto-optique est aussi utilisée pour le contrôle des cartes magnétiques et des disques de stockages magnéto-optiques. Puisque l'imagerie magnéto-optique nous permet de voir les champs magnétiques, ceci nous permet de contrôler la distribution et la netteté des champs magnétiques inscrits sur le média (Yurchenko, 2009). L'appareil MOI 308/37/TDF, présenté dans la partie 4.3.1, est l'imageur magnéto-optique pour la détection des fissures

¹MUSIC: multiple signal characterization algorithm

sous les têtes des rivets de fuselage d'avion. La permission de la compagnie Bombardier Aéronautique est obtenue pour les informations techniques (Quest Integrated, 2006) et les photos prises lors d'une visite. Ces tests ne sont pas effectués sur la pièce d'échantillon de Waspaloy du projet de recherche et, par conséquent, la description de cet appareil n'est pas associée aux travaux expérimentaux du chapitre cinq.

4.4.1 Appareil d'imagerie MOI 308/37/TDF

L'appareil MOI 308/37/TDF est un dispositif manuel constitué d'une unité de contrôle, d'un capteur et d'un visiocasque. Cet appareil est optimisé pour l'inspection des joints rivetés des fuselages d'avions et des larges surfaces, la figure 4.9.



Figure 4.9 Appareil MOI 308/37/TDF, unité de contrôle

Le bouton de mode d'excitation sur l'unité de contrôle permet de choisir le mode d'excitation des courants de Foucault : mode linéaire (unidirectionnel) ou mode rotatif (multidirectionnel). Le bouton de niveau d'excitation permet de contrôler le niveau de puissance des courants à livrer. L'ajustement de la fréquence d'excitation des courants de Foucault est à basse fréquence, 1,5-50 kHz, ou à haute fréquence, 20-200 kHz. De façon empirique, la fréquence 20 kHz est plus efficace et donne des images de haute qualité. Les

indicateurs colorés en jaune, bleu et vert montrent les configurations de la lumière du système.

Le capteur magnéto-optique est un imageur manuel avec un champ de vision de 70 mm¹ de diamètre (QUEST Integrated, 2011), la figure 4.10. Une membrane de fibre de verre et une mince couche de plaque d'usure en plastique protègent le capteur contre les rayures causées par le déplacement de l'imageur sur les surfaces à inspecter. Les boutons de contrôle de biais sont situés sur l'imageur pour régler le seuil du champ magnétique, de manière empirique.



Figure 4.10 Capteur magnéto-optique

Le câble connecteur PVS est d'une longueur de 20 pieds, ce qui facilite l'utilisation de cet appareil sur le fuselage de l'avion. Le terme PVS signifie les câbles pour les systèmes de visionnement personnel. Ce câble est aussi recouvert d'une membrane de PVC et silicone résistant aux voltages élevés et ayant une bonne résistance à l'abrasion. L'appareil MOI 308/38/TDF est doté d'une option couramment appelée turbo. Cette option permet au système d'opérer à de hauts niveaux de puissances. Cette appellation vient du fait qu'il est nécessaire d'utiliser un puissant ventilateur pour dissiper toute la chaleur générée par ces niveaux de puissances élevées. À ces puissances, il est nécessaire de respecter des instructions supplémentaires de sécurité. Particulièrement, le capteur n'est pas adapté pour

¹ 2,8" dia. (70 mm) w/10 mm lens

être utilisé sur une surface mouillée, près de matières explosives, ni être immergé dans l'eau et il est absolument nécessaire d'avoir une bonne mise à la terre. Le système de casque de visionnement personnel, PVS, permet de visualiser des images en temps réel, la figure 4.11. Pour l'étalonnage, l'appareil est accompagné d'une plaque d'aluminium de 2024-T3. Une fissure de 0,762 mm¹ sous le rivet est visible avec l'appareil MOI, la figure 4.12.



Figure 4.11 Visiocasque de l'appareil magnéto-optique

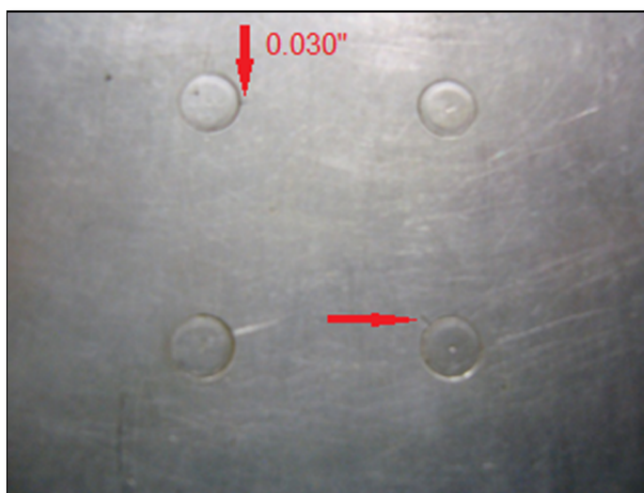


Figure 4.12 Deux fissures sur plaque d'étalonnage

¹ 0,003 inch

4.5 Imagerie magnéto-optique et l'image de courants de Foucault

La revue critique de la littérature révèle différents noms attribués à la technique magnéto-optique. Par conséquent, il est nécessaire de distinguer attentivement la différence entre la technique de l'imagerie magnéto-optique et l'image de courants de Foucault. Cette dernière comporte une variété de processus de traitement, de filtrage, de transformation et d'extraction des caractéristiques clés des signaux de courants de Foucault (Knopp, Aldrin et Jata, 2009, p. 8). Selon la description de McCary et coll. (1984), le système d'imagerie de courants de Foucault est l'assemblage d'une unité de balayage, une sonde et une unité d'enregistrement numérique. Le système est contrôlé par un microprocesseur qui transmet les images à un ordinateur pour le traitement de l'image. La réponse du système de courants de Foucault au défaut est un vecteur, une quantité qui est fonction de l'intensité, l'amplitude, et la direction de phase. L'image de courants de Foucault correspond à l'amplitude, au composant en phase et au composant déphasé. Carron (2009) explique une technique de balayage de la sonde de courants de Foucault dans le mode défini par trame, « *raster* ». Le changement d'impédance à chaque position de la sonde est une donnée utilisée pour créer une image appelée l'image de courants de Foucault. Par rapport aux signaux de plan d'impédance traditionnel, ce format d'image présente facilement les informations spatiales des défauts.

4.6 Microscopie magnéto-optique de Kerr

La microscopie magnéto-optique met en évidence un lien entre les propriétés physiques d'un matériau et la propriété magnétique et optique de la microstructure en utilisant l'effet de Kerr. L'anisotropie optique de substrats du matériau non-transparent se manifeste également dans la lumière réfléchie de sa surface. L'influence de la magnétisation du matériau sur la lumière réfléchie est appelé l'effet magnéto-optique de Kerr (A. K. Zvezdin et Kotov, 1997, p. 5). L'effet magnéto-optique de Faraday est similaire à l'effet magnéto-optique de Kerr. Le premier explique la rotation du plan de polarisation de la lumière transmise et le deuxième explique la rotation du plan de polarisation de la lumière réfléchie (McCord, 2005). McCord (2005) explique trois types de l'effet de Kerr: polaire, longitudinal et transversal. Le type de réflexion est en fonction de l'orientation du vecteur de magnétisation par rapport à la surface

réfléchissante et au plan d'incidence du faisceau lumineux. L'effet polaire se produit lorsque le domaine magnétique est positionné normal à la surface de la pièce inspectée (Juedes et Sánchez, 2012) et le vecteur de la magnétisation, M , est hors du plan, perpendiculaire à la surface réfléchissante et parallèle au plan de l'incidence, la figure 4.13-a. Lorsque le domaine magnétique est parallèle à la surface de la pièce (Juedes et Sánchez, 2012) et le plan de l'incidence est oblique à la surface et le vecteur de la magnétisation est dans le plan, parallèle à la surface réfléchissante et au plan d'incidence, l'effet longitudinal se produit, la figure 4.13-b. Par conséquent, la rotation du plan de polarisation de la lumière par l'effet polaire est plus importante et cet effet est aussi inclus dans l'effet longitudinal. Également, l'effet transversal se présente lorsque le domaine magnétique est parallèle à la surface de la pièce (Juedes et Sánchez, 2012) le vecteur de la magnétisation est dans le plan et perpendiculaire au plan de l'incidence, la figure 4.13-c. Cet effet ne résulte aucune rotation du plan de polarisation de la lumière. L'effet de Kerr permet d'observer des domaines magnétiques sur la surface de l'échantillon (A. K. Zvezdin et Kotov, 1997, pp. 5, 6). Pour utiliser la microscopie de Kerr, il est nécessaire que la surface de la pièce soit magnétique et plane optique.

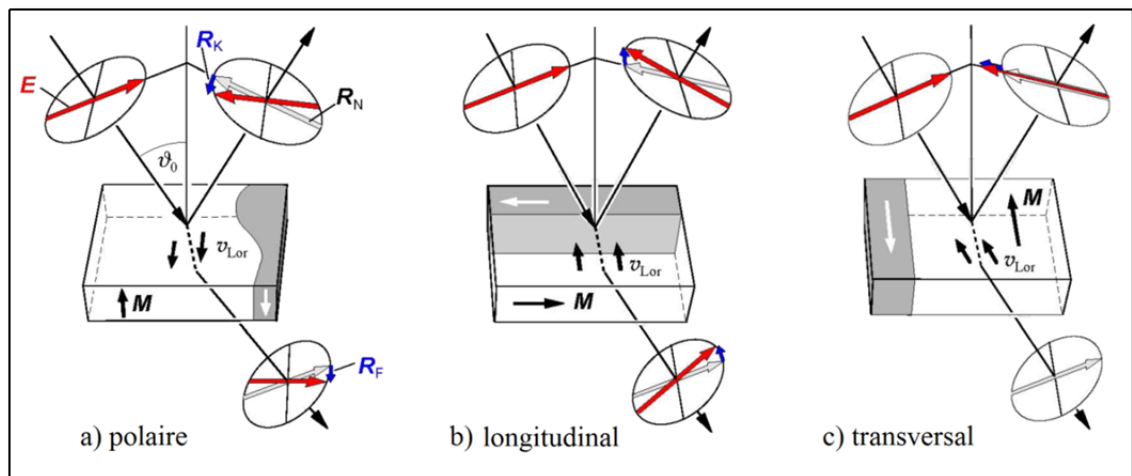


Figure 4.13 Effet magnéto-optique de Kerr
Tirée de (McCord, 2005)

4.7 Imagerie magnéto-optique et propriétés physico-chimiques du Waspaloy

La problématique de ce projet de recherche pose des défis sur l'utilisation de la technique de l'imagerie magnéto-optique afin de détecter des inhomogénéités microstructurales : des ségrégations. Pour ce faire, cette partie de la revue de la littérature porte attention aux propriétés physico-chimiques, aux variations de la perméabilité magnétique et à l'indice de réfraction de la microstructure du Waspaloy. L'expérience de Décamps et coll. (1991) et Bourda et coll. (1991) montre la possibilité d'observer le cisaillement des précipités gamma prime par faisceau laser à la température ambiante. Est-ce que le faisceau laser de la source lumière de l'appareil magnéto-optique est suffisamment puissant pour produire une déformation élastique dans les phases gamma et gamma prime du Waspaloy et pour distinguer différentes phases des précipités dans la microstructure du Waspaloy?

Le Waspaloy est un matériau paramagnétique durci avec une perméabilité relative constante de 1,004 dans un champ magnétique de $H = 200$ œersteds (Special Metals Corporation, 2004). La susceptibilité magnétique du Waspaloy est moins de 0,001, d'après Yu et Nagy (2004, p. 10) et ses références. Est-ce que la variation de la perméabilité magnétique des précipités est suffisamment grande pour désorienter le champ magnétique et pour produire le vecteur \vec{B} ? D'un autre point de vue, est-ce que le champ magnétique de l'appareil de magnéto-optique est suffisamment grand pour créer une transformation magnétique des ségrégations dans le Waspaloy?

La présence du champ magnétique conduit à l'apparition ou à la variation de l'anisotropie optique du matériau (A. K. Zvezdin et Kotov, 1997). La forme des précipités, la taille, la fraction volumique, la cohérence et le facteur d'inégalité¹ des réseaux cristallins sont les paramètres qui définissent l'anisotropie du matériau (Sobchenko et al., 2007, p. 2428). Ainsi, l'anisotropie de la déformation élastique du cristal est définie par l'anisotropie du module de Young dans la direction de contrainte (Kocks, Tomé et Wenk, 2000, pp. 42, 43). Sobchenko

¹ *Mismatch*

et coll. (2007, p. 2429) remarque que dans les superalliages du nickel, durcis par les précipités de phase gamma prime, le module de Young est moindre sur l'axe des z, en direction de [001]. Sobchenko et coll. (2007, pp. 2458, 2459) présente également la microscopie à force magnétique, MFM, pour l'étude de la phase gamma et de la phase gamma prime du superalliage de nickel. Le grand avantage de la microscopie à force magnétique est que l'attaque chimique pour le traitement de surface n'est pas nécessaire. Ainsi, Sobchenko et coll. (2007, pp. 2458, 2459) confirme que si les propriétés magnétiques des particules nanométriques sont suffisamment différentes de celles de la matrice, elles peuvent aussi être caractérisées par la microscopie à force magnétique.

4.8 Discussion

L'indisponibilité d'instruments ne permet pas d'expérimenter la technique de microscopie magnéto-optique pour ce projet de recherche, mais l'ensemble des informations obtenues sur la variation des phases, l'inhomogénéité des réseaux cristallins et des compositions chimiques des *freckle* et des *white spots* est la raison d'émettre cette hypothèse que la microscopie magnéto-optique est éventuellement une méthode efficace du contrôle non destructif à sec pour révéler les anomalies telles que des *white spots* dans les superalliages de nickel.

CHAPITRE 5

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

5.1 Disque de turbine soumis à l'inspection

Ces travaux portent sur la mesure de la conductivité électrique par courants de Foucault et la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores sur une seule pièce, un disque de turbine de superalliage de nickel, un échantillon de Waspaloy. Le défaut de la ségrégation se trouve sur la surface conique à l'intérieur de cette pièce, marqué par une flèche sur la figure 5.1. La position du défaut révèle la complexité du travail. Par exemple, en l'absence d'un sabot approprié pour générer les ondes de Rayleigh, la pièce est positionnée en biais dans le bassin d'immersion pour faire la mesure des ultrasons par la sonde focale en immersion et, par conséquent, les résultats obtenus sont moins précis.

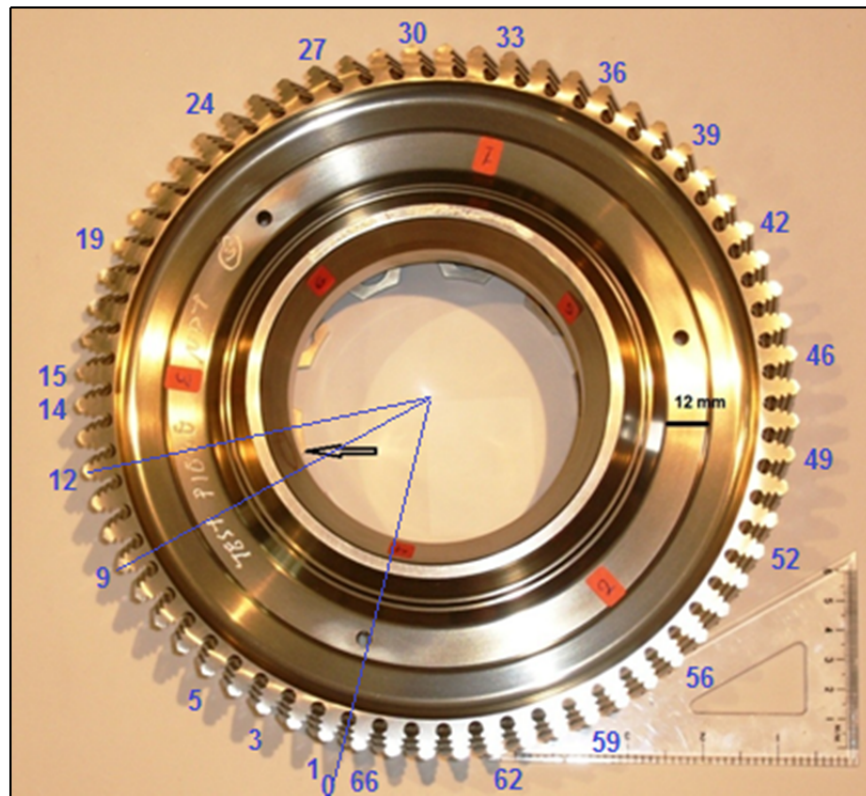


Figure 5.1 Disque de turbine de superalliage de nickel, le Waspaloy

De même, le profil de la pièce et les dimensions de la surface imposent les conditions au choix des transducteurs de mesure de la vitesse des ondes ultrasonores à haute fréquence. Les mesures de la surface verticale extérieure du disque sont prises sur une courbe dont la largeur est 12 mm, la figure 5.1. Obtenir un transducteur pour atteindre cet objectif, avec un diamètre nominal adéquat, prend un certain temps et ces conditions ralentissent la progression des travaux expérimentaux. Par ailleurs, pour dépasser les bornes, la majorité des mesures ont été réalisées à l'aide des équipements de mesure déjà accessibles dans le laboratoire de l'école et quelques simples équipements dans l'atelier de vitrail¹. La numération de la surface du disque, selon les aubes, facilite la présentation des données.

5.2 Documentation photographique

La figure 5.2 montre le défaut de ségrégation négative, *white spot*, sur le disque de Waspaloy. Cette figure est captée par l'appareil photo d'AmScope MA1000 avec le logiciel de l'AmScope MT, la version 3.0.0.5. Pour avoir la taille approximative du défaut, 6 mm, une règle graduée en millimètres a été utilisée, la partie en couleur verte visible en haut de la figure.

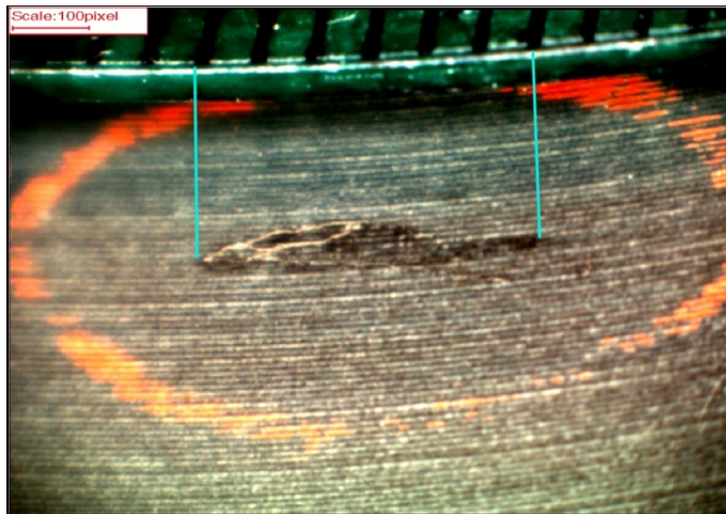


Figure 5.2 Image captée par l'appareil photo AmScope

¹ <http://ateliervitrailatousa.wordpress.com/>

La figure 5.3 a capté le même défaut de *white spot* en utilisant le microscope Bausch & Lomb et l'appareil photo Clemex Firewire1 avec la lentille de 0,5 et le zoom total de 5. La taille du défaut est approximativement évaluée selon la meilleure vision de l'image. Selon les conditions indiquées dans la contribution d'étude préliminaire du plan de travail proposé, le partenaire industriel de ce projet devrait fournir un échantillon avec un exemple du défaut de ségrégation d'au minimum 5 mm dans toutes les directions. La forme de ce défaut impose les limitations de mesure pendant les travaux empiriques.

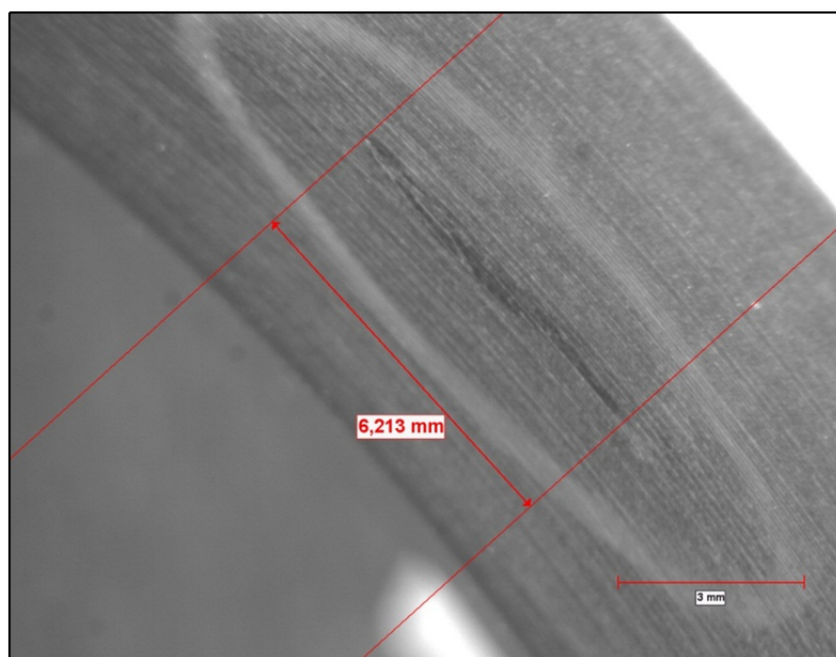


Figure 5.3 Image captée par l'appareil photo Clemex Firewire1

5.3 Essai de courants de Foucault

Cette partie est réalisée en utilisant l'appareil Nortec® 500S de la compagnie Olympus®, la sonde absolue en réflexion (SRL/2 kHz - 200 kHz/.25) et la sonde de conductivité Nortec PowerLink® (numéro de pièce : 9222361 - 480 kHz), (Olympus, 2011). L'essai de courants de Foucault sur l'échantillon de Waspaloy est réalisé en trois étapes. Premièrement, les propriétés électriques et magnétiques de la pièce de Waspaloy sont déterminées à l'aide de la

sonde absolue et des échantillons d'étalonnage. La figure 5.4 montre les courbes de *lift-off* du point 58 de la pièce, abrégée par WP¹, par rapport aux références.

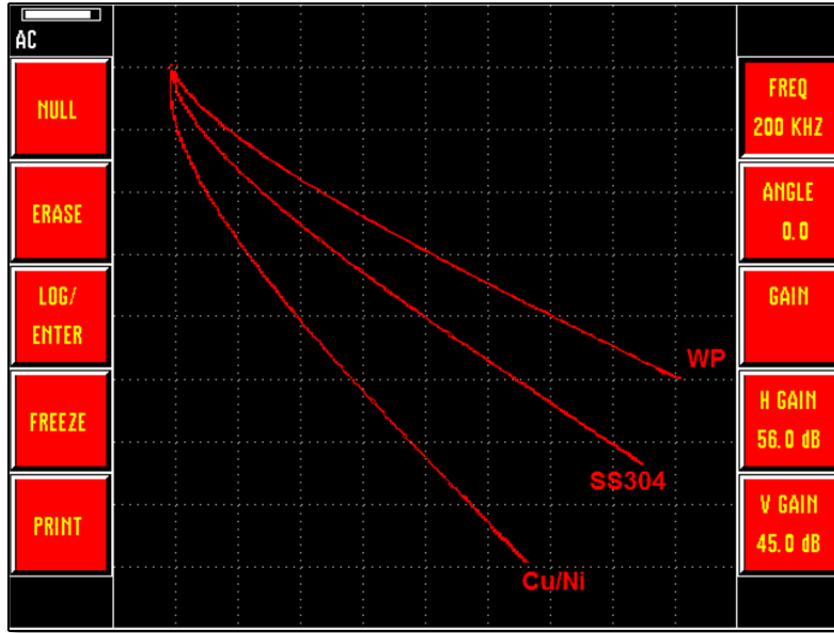


Figure 5.4 Courbes de la distance de retrait, *lift-off*, l'étalonnage

En considérant le rapport entre la fréquence et la profondeur de pénétration des courants de Foucault², la fréquence 200 kHz a été choisie pour prendre les mesures, c'est-à-dire le maximum limite de la sonde absolue. Le matériau SS304 avec une conductivité de $1,44 \times 10^6$ S/m est considéré comme la référence de la fréquence normalisée. En superposant sa courbe de la distance de retrait, *lift-off*, sur la valeur de 30 de l'abaque de l'impédance normalisée (Viens, 2011a- énoncés du laboratoire) et ces références, la fréquence normalisée, β^2 , de l'échantillon de Waspaloy est de l'ordre de 15, montré sur la figure 5.5. Le paramètre k et la conductivité de la pièce de Waspaloy sont calculés par les équations 5.1 à 5.3.

$$\beta_{Réf}^2 = k\sigma_{Réf} \quad (5.1)$$

¹ WP : Waspaloy

² La fréquence plus élevée, la pénétration de courants moins profonde

$$k = \frac{\beta_{Réf}^2}{\sigma_{Réf}} = \frac{30}{1,44 \times 10^6} \cong 20,83 \times 10^{-6} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{WP} = \frac{\beta_{WP1}^2}{k} = \frac{15}{20,83 \times 10^{-6}} = 0,720 \times 10^6 \text{ S/m} = 0,72 \text{ MS/m} \quad (5.3)$$

β^2 : Fréquence normalisée des courants de Foucault ;

σ : Conductivité électrique du matériau (S/m);

κ : Paramètre constant.

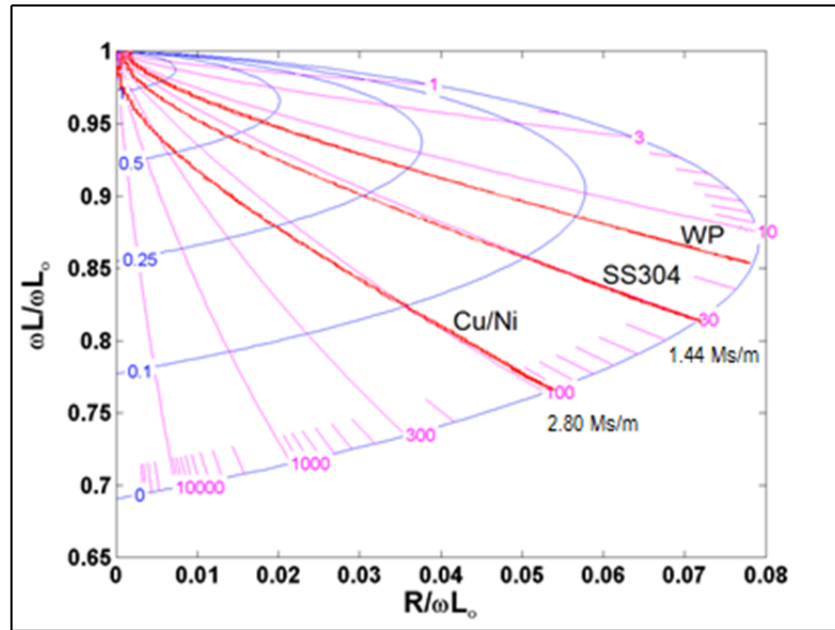


Figure 5.5 Courbes de *lift-off*, la normalisation d'impédance

Cette méthode de mesure de la conductivité est approximative et montre la faible conductivité du Waspaloy par rapport aux échantillons d'étalonnage.

Deuxièmement, pour augmenter la résolution des courbes de la distance de retrait, *lift-off*, le gain vertical et l'angle de plan d'impédance ont été augmentés. La mesure a été effectuée sur plusieurs points de la pièce, la figure 5.6.

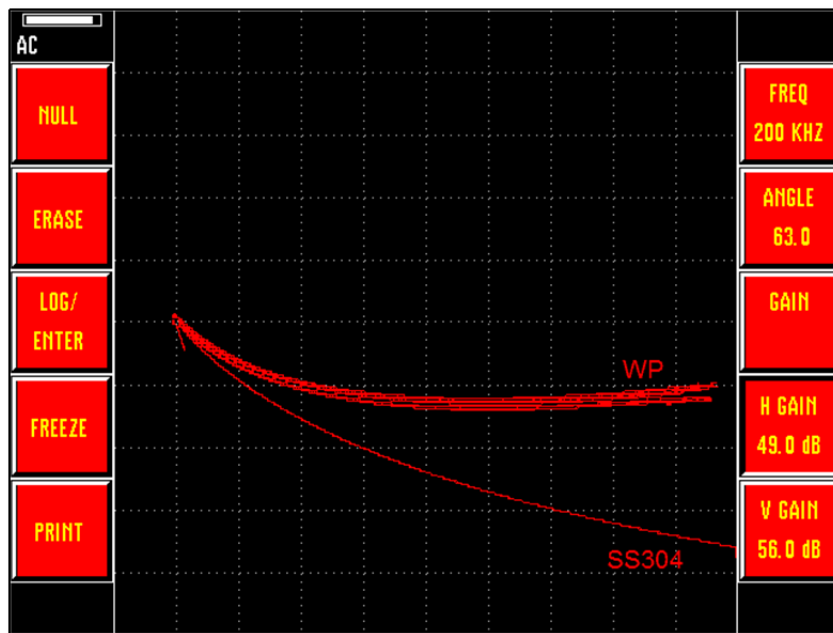


Figure 5.6 Courbes de *lift-off*, différents endroits de l'échantillon

Les résultats similaires obtenus par la répétition de ce test confirment les variations de conductivité des différents endroits sur le disque. Ces variations sont indépendantes de la sensibilité de la manipulation et de la fréquence. D'une part, ces variations peuvent être reliées à l'inhomogénéité structurale du superalliage de nickel ; de l'autre, étant donné l'efficacité limitée de la sonde qui est disponible et la fréquence relativement basse de la sonde, le taux de ces variations n'est pas mesurable, la courbe de conductivité au-dessus de la ségrégation ne présente pas de différence significative et l'origine de ces variations n'est pas discutable.

En troisième étape, la conductivité électrique est mesurée à l'aide de la sonde de conductivité sur tous les points numérotés de la pièce, visible sur la figure 5.1, pour déterminer une distribution statistique des conductivités. Afin d'avoir une mesure précise et de minimiser l'erreur de manipulation, toutes les conductivités sont obtenues à l'instant où la distance de retrait, *lift-off*, est mise à zéro. La performance de l'appareil de mesure est plus fiable

lorsqu'il est en mode d'unité %IACS¹. Mais, pour éviter l'ambiguïté du texte, les données sont converties à l'unité S/m selon l'équation 5.4, (NDT Resource Center, 2012) :

$$\sigma_{\%IACS} = \frac{\sigma_{S/m}}{5,8 \times 10^7 S/m} \times 100 = 172,41^2 \sigma_{\mu S/cm} \quad (5.4)$$

La figure 5.7 montre l'histogramme de la distribution des conductivités mesurées de la surface horizontale. La conductivité moyenne de la surface est $0,8357 \times 10^6$ S/m.

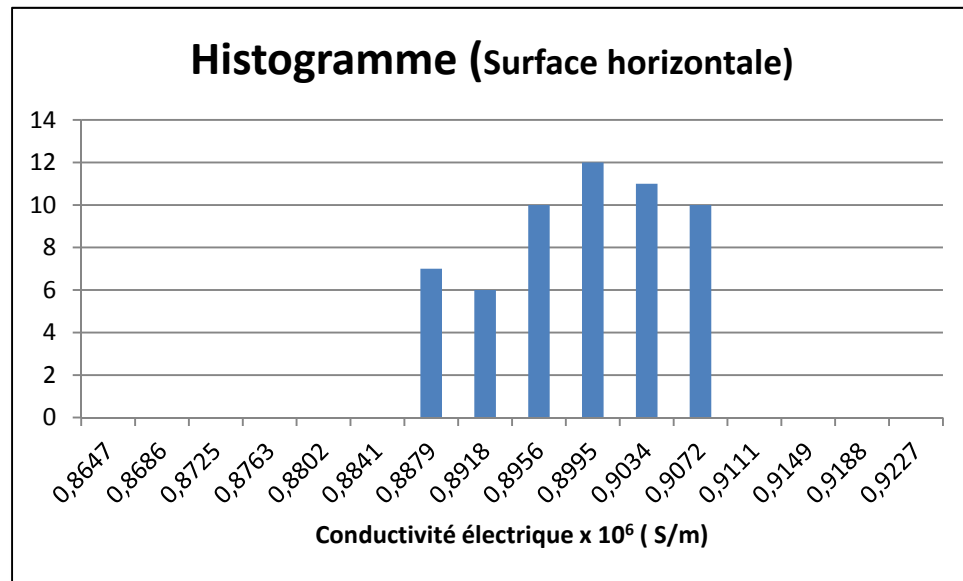


Figure 5.7 Distribution des conductivités sur la surface horizontale

La fiche technique du Waspaloy (Carpenter Technology Corporation, 1989) présente les résistivités électriques du Waspaloy, entre $1\,200^3$ microhm-mm et $1\,240^4$ microhm-mm, par rapport aux processus de traitement thermique et de vieillissement. Ces données sont converties⁵ à la conductivité : entre $0,8343 \times 10^6$ S/m et $0,8053 \times 10^6$ S/m.

¹ %IACS est le pourcentage de conductivité du matériau par rapport au cuivre, une conductrice à 100%

² 172,41 est le facteur de conversion

³ $721 \, \Omega \cdot \text{cir mil} / \text{ft}$

⁴ $747 \, \Omega \cdot \text{cir mil} / \text{ft}$

⁵ <http://www.cactus2000.de/fr/unit/masscnd.shtml>

De même, la mesure des points sur la surface conique montre une variation et une faible augmentation des conductivités. La figure 5.8 montre l'histogramme de la distribution des conductivités mesurées de la surface conique. La conductivité moyenne de la surface est 0.8787×10^6 S/m.

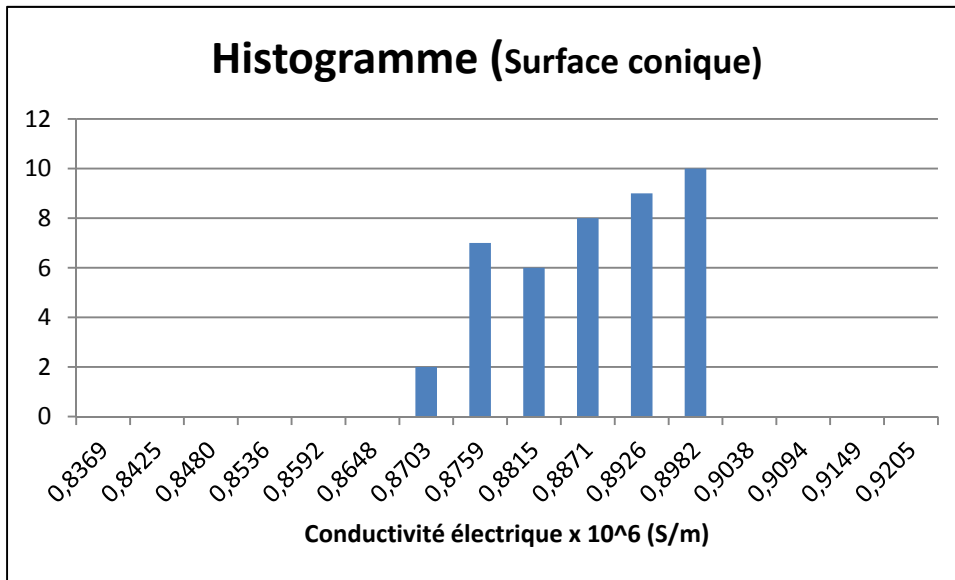


Figure 5.8 Distribution des conductivités sur la surface conique

Avec l'exactitude de $\pm 0,3$ Ms/m¹ de l'appareil Nortec® 500S, les conductivités obtenues ne peuvent pas être assez précises pour une recherche scientifique. Cependant, elles confirment tous les résultats obtenus précédemment. Ainsi, les variations des conductivités observées sur le disque de Waspaloy est en accord avec les travaux expérimentaux de Yu, Blodgett et Nagy (2006) qui est résumé dans la partie 2.3 du chapitre 2 de ce mémoire.

Supposée à priori, la conductivité des métaux descend lorsque la température augmente et vice-versa. En s'appuyant sur les propriétés mécaniques de ségrégation dans la microstructure du superalliage de nickel à haute température, il y a une question à se poser : est-ce que le changement de température augmente la visibilité des variations de conductivité et, particulièrement, l'observabilité d'une différence significative au-dessus de la

¹ $\pm 0,5$ % IACS

ségrégation ? Les tests précédents sont effectués à la température ambiante de 21°C en utilisant la sonde de conductivité Nortec PowerLink® qui est définie pour la température d'opération entre -10°C et 55°C. Pour répondre à cette question, quelques mesures de conductivité sont prises à différents endroits du disque de l'échantillon refroidi à -10°C, grâce au froid d'hiver. Dans ces conditions, la conductivité de la pièce est augmentée et la conductivité moyenne est 0.8937×10^6 . La conductivité est plus variable sur certains points et, sur certains autres points, la conductivité est uniforme. Aucune différence significative au-dessus de la ségrégation n'est observée. Pour étudier la microstructure de l'échantillon de Waspaloy au froid et pour observer les changements significatifs des propriétés physiques du superalloy, il est fort probable que la température doit être plus basse.

5.4 Masse volumique du Waspaloy

La mesure de la masse volumique du disque du Waspaloy est avantageuse pour les mesures des vitesses des ondes ultrasonores. Pour ce faire, la masse et le volume de la pièce sont mesurés selon l'équation 5.5. Le volume de la pièce est mesuré par la quantité d'eau qu'elle déplace lorsqu'on la plonge dans un récipient.

$$d = \frac{m}{v} = \frac{6\,375}{800} = 7,9687 \text{ g/cm}^3 \quad (5.5)$$

d : Masse volumique (g/cm^3) ;

m : Masse de la pièce (g) ;

v : Volume (cm^3).

Les propriétés physiques précises du disque de Waspaloy de ce projet ne sont pas accessibles. Selon la fiche technique de Carpenter Technology Corporation (1989), la masse volumique du Waspaloy est $8,1378^1 \text{ g/cm}^3$ ce qui confirme la fiabilité de cette mesure.

¹ Indiqué dans la référence : 0.2940 lb/in^3

5.5 Essai ultrasonore

Les propriétés acoustiques du Waspaloy ne se trouvent pas dans les références consultées. En considérant la différence microstructurale entre l’Inconel et le Waspaloy, les propriétés acoustiques de l’Inconel servent de référence pour ces travaux, le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Propriétés acoustiques de l’Inconel
Adapté de (NDT ressource center, 2012) et (Shull, 2002b, p. 19)

Les propriétés acoustiques du superalliage de nickel								
Alliage	Vélocité longitudinale		Vélocité Cisaillement		Vélocité de surface		Densité	Impédance acoustique
	cm/ μ s	in/ μ s	cm/ μ s	in/ μ s	cm/ μ s	in/ μ s	g/cm ³	g/cm ² -secx10 ⁵
Inconel	0,572 ¹	0,2252	0,3 ²	0,1181	0,279 ³	0,110	8,25	47,19 ⁴

5.5.1 Transducteurs et couplant acoustique

Les figures 5.9 et 5.10 montrent les sondes utilisées pour les mesures de vitesse ultrasonore. Étant donné la forme, la courbure oblique et le profil de disque, le choix des meilleures sondes est très limité ; cela est un obstacle rencontré durant le travail. Dans une partie du travail, la mesure de la vitesse de l’onde transversale est effectuée par la sonde V153 (1,00 MHz- 12,70 mm de diamètre d’élément) disponible au laboratoire, en utilisant la cire comme couplant. Étant donné la grandeur du diamètre de l’élément, le résultat n’est pas suffisamment fiable pour être interprété correctement. Dans ces conditions, pour expérimenter précisément la vitesse de l’onde transversale, un transducteur de contact V156-RM (5,00 MHz - 6,350 mm de diamètre d’élément) est procuré.

¹ NDT ressource center

² Shull

³ NDT ressource center

⁴ Mode longitudinal

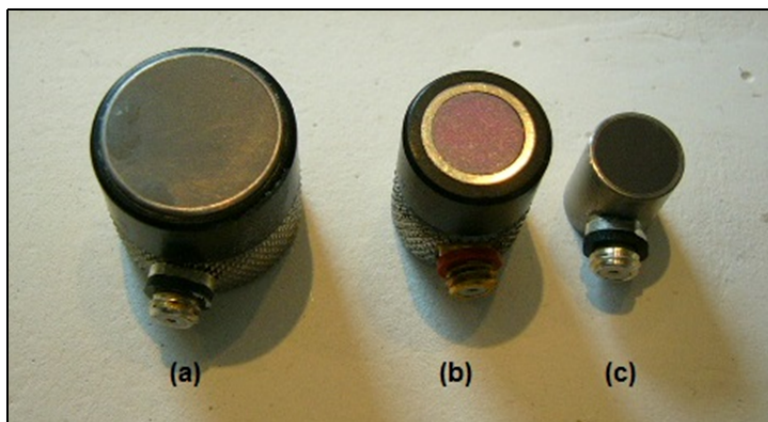


Figure 5.9 Sondes ultrasonores
V103-RM (a) Gamma HP (b) V156-RM (c)

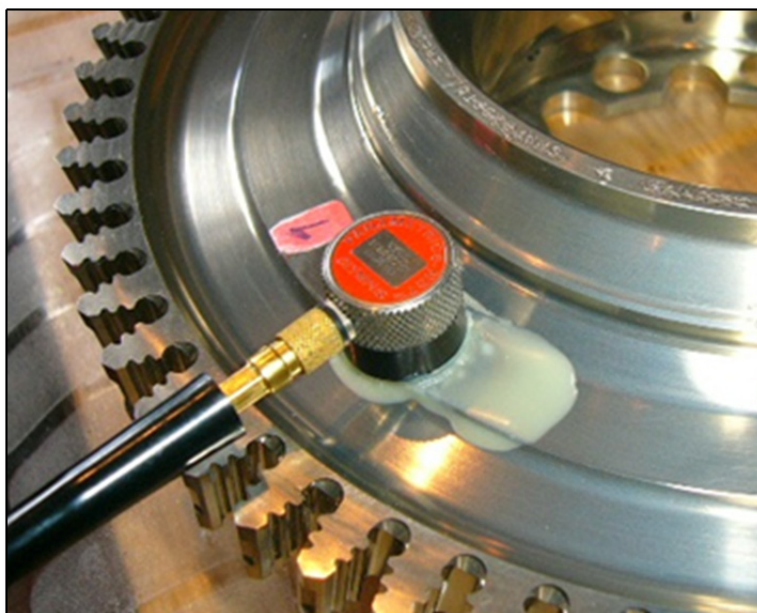


Figure 5.10 Disque de Waspaloy avec la sonde V153

Pour avoir un couplage ultrasonore constant entre le transducteur et la pièce de Waspaloy, divers moyens sont examinés : le gel couplant de l'accessoire de l'appareil OmniScan, le miel, le gel pour cheveux, la glycérine, la cire et l'eau. Même si les sondes de contact V103-RM et V156-RM ne sont pas définies pour le contrôle en immersion, une mince couche d'eau

sur la pièce de Waspaloy amplifie les signaux acoustiques sur la surface conique et augmente la visibilité des échos. Cette observation a conduit à l'expérience empirique de la section 5.6.

5.5.2 Vitesse d'onde longitudinale

Cette partie est réalisée en utilisant l'appareil OmniScan MX (16 :64M MXU-M – 2.2R2) d'Olympus®. Pour déterminer la vitesse de l'onde longitudinale avec certitude, deux étapes de mesure sont effectuées sur la pièce de Waspaloy. L'épaisseur d'une partie de la surface horizontale sur la pièce de Waspaloy est précisément mesurée : 15,45 mm. Puisque la vitesse des ondes ultrasonores dans le Waspaloy est inconnue, le matériau Inconel est sélectionné pour la configuration de mesure. Pour faire les premiers tests sur tous les points numérotés, la sonde contact Gamma HP (10 MHz - 6,350 mm de diamètre d'élément) d'Aerotech est choisie. Le tableau 5.2 montre le résumé de la configuration de l'appareil de mesure.

Tableau 5.2 Configuration de l'appareil de mesure ultrasonore longitudinale

Type	UT	Porte	A
Mode	Réflexion	Départ	2,57 us
Type d'onde	Longitudinale	Largeur	26,13 us
Vitesse du son	5 700,0 m/s	Seuil	17,00 %
Départ (parcours complet)	0,0 us	Matériau	Inconel
Étendue (parcours complet)	23,68 us	Forme	Plaque
Gain	13,00 dB	Épaisseur	15,45 mm
Tension	50V	Filtre	Bande passante 10,00 Mhz
Redressement	RF	Facteur d'échelle	4

La figure 5.11 est l'exemple de la capture de l'écran de l'appareil sur le point 66. Les réflexions nettes d'onde ultrasonore permettent facilement de mesurer la vitesse de l'onde longitudinale selon l'équation 5.6.

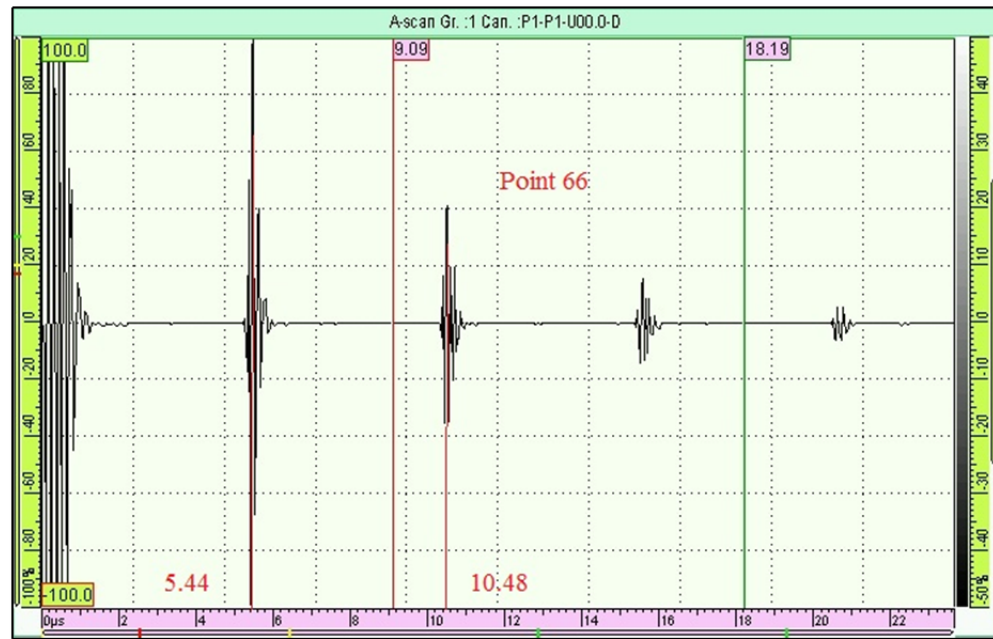


Figure 5.11 Mesure d'onde longitudinale sur le point 66, la sonde Gamma HP

$$\text{Vitesse d'onde ultrasonore} = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{délai entre les échos}} \quad (5.6)$$

$$V_L = \frac{(15,45 \times 2)}{(10,48 - 5,44)} = \frac{30,9}{5,04} = 6,1310 \text{ mm}/\mu\text{s} = 0,6131 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

La méthode de mesure et de calcul de la vitesse d'onde ultrasonore sur chaque point numéroté du disque de Waspaloy est le même. La moyenne de la vitesse mesurée est 0,6119 cm/μs. La figure 5.12 montre l'histogramme de la distribution de la vitesse mesurée sur la surface horizontale. Le tableau 5.3 montre les données mesurées sur les images des signaux captées de l'appareil d'ultrason. Ces données sont prises avec la plus grande précision possible pour minimiser l'erreur de manipulation. La validité et la précision de ce résultat est confirmée par la répétition du test.

Le test est répété sur la surface conique intérieure. Étant donné la faible amplitude d'écho et la grande intensité des bruits, le gain a été augmenté à 50,00 dB et étendue à 87,92 us. Ces données ne sont pas fiables pour l'interprétation des signaux, illustrées sur la figure 5.13.

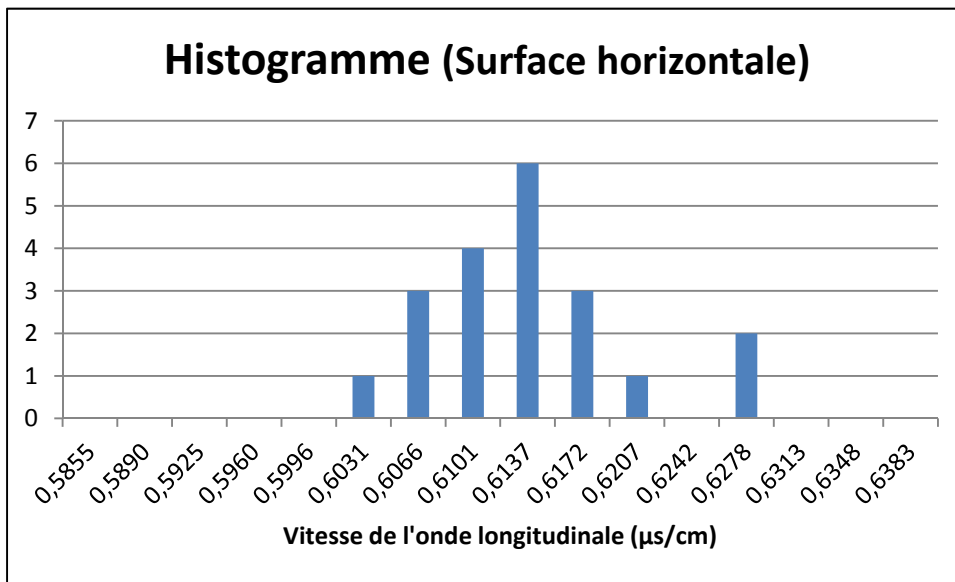


Figure 5.12 Vitesse de l'onde longitudinale sur la surface horizontale

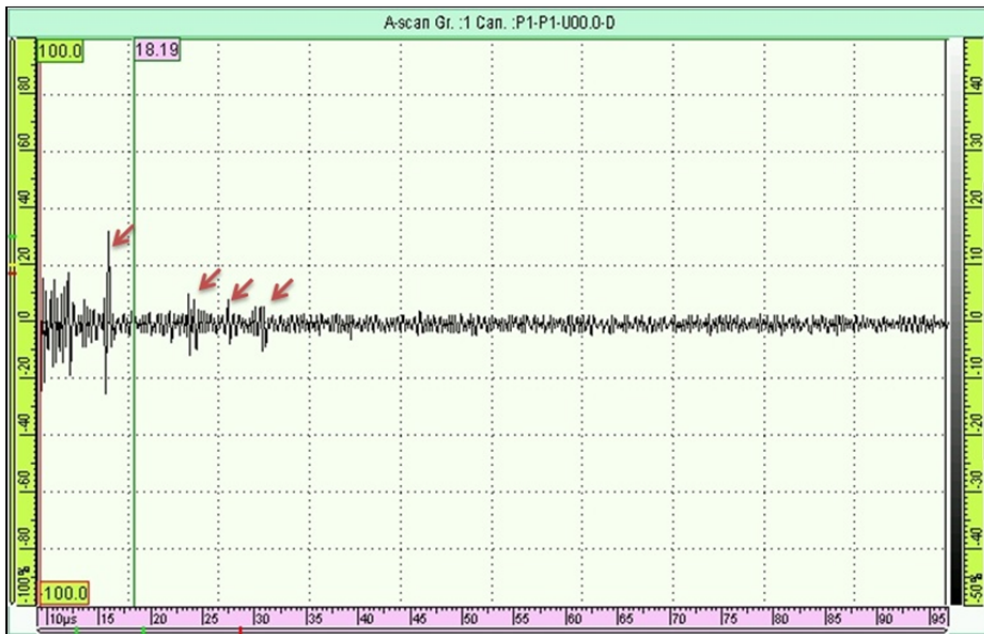


Figure 5.13 Échos et bruits de l'onde longitudinale sur la surface conique

Tableau 5.3 Données de mesure de la vitesse de l'onde longitudinale

Points	Distance parcourue (mm)	Premier délai (μ s)	Deuxième délai (μ s)	délai entre les échos (μ s)	V_L (mm/ μ s)	V_L (cm/ μ s)
1	30,9	5,45	10,49	5,04	6,1310	0,6131
5	30,9	5,5	10,45	4,95	6,2424	0,6242
14	30,9	5,5	10,48	4,98	6,2048	0,6205
15	30,9	5,42	10,5	5,08	6,0827	0,6083
19	30,9	5,45	10,48	5,03	6,1431	0,6143
24	30,9	5,4	10,49	5,09	6,0707	0,6071
27	30,9	5,4	10,51	5,11	6,0470	0,6047
30	30,9	5,43	10,5	5,07	6,0947	0,6095
33	30,9	5,49	10,5	5,01	6,1677	0,6168
36	30,9	5,45	10,5	5,05	6,1188	0,6119
39	30,9	5,44	10,5	5,06	6,1067	0,6107
42	30,9	5,4	10,5	5,10	6,0588	0,6059
46	30,9	5,43	10,58	5,15	6,0000	0,6000
49	30,9	5,48	10,49	5,01	6,1677	0,6168
52	30,9	5,45	10,49	5,04	6,1310	0,6131
56	30,9	5,43	10,52	5,09	6,0707	0,6071
58	30,9	5,4	10,46	5,06	6,1067	0,6107
61	30,9	5,52	10,45	4,93	6,2677	0,6268
63	30,9	5,44	10,56	5,12	6,0352	0,6035
66	30,9	5,44	10,48	5,04	6,1310	0,6131

Pour faire le deuxième test, l'appareil est configuré en utilisant la sonde de contact V103 (1,0 MHz-12,70 mm de diamètre d'élément). Le diamètre d'élément de cette sonde est plus grand que la courbe horizontale de 12 mm, mais les échos sont nets et le résultat de mesure confirme la vitesse obtenue de la première partie. La méthode de mesure et de calcul est la

même que pour les points de la première partie. Un exemple des images des signaux est illustré sur la figure 5.14.

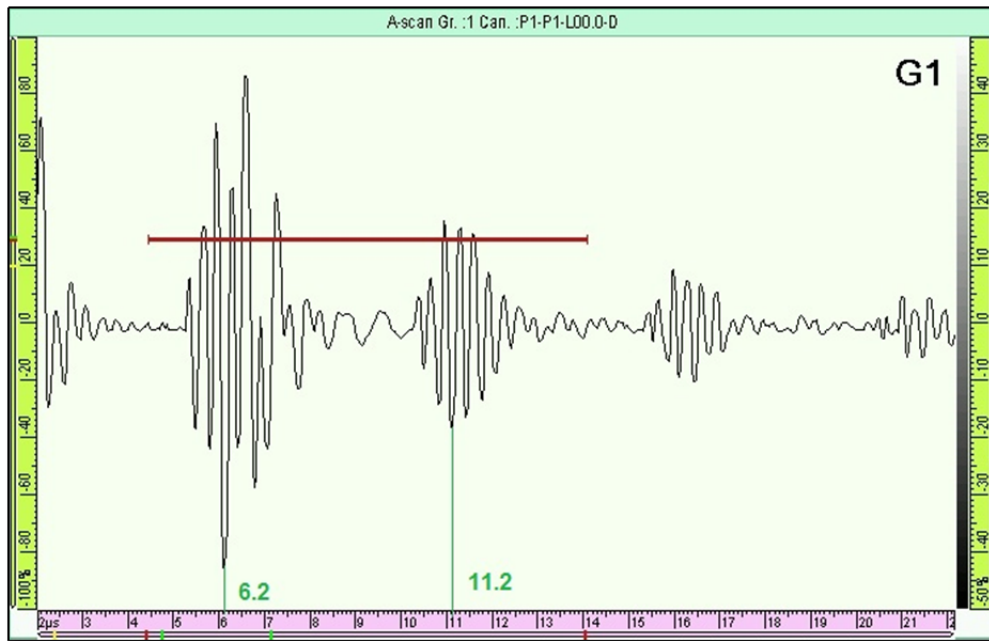


Figure 5.14 Mesure d'onde longitudinale, la sonde V103

$$V_L = \frac{(15,45 \times 2)}{(11,2 - 6,2)} = \frac{30,9}{5,00} = 6,18 \text{ mm}/\mu\text{s} = 0,6180 \text{ cm}/\mu\text{s} \quad (5.7)$$

La moyenne de la vitesse de l'onde longitudinale est calculée à l'ordre de 0,62 cm/μs. Le test est répété sur la surface conique intérieure. Étant donné la faible amplitude d'écho et la grande intensité des bruits, le gain est augmenté à 55,00 dB et les données ne sont pas fiables pour l'interprétation des signaux, montrées sur la figure 5.15. Une mince couche d'eau amplifie les signaux acoustiques sur la surface conique et permet d'observer les échos distingués. Cependant, ces données ne sont pas fiables pour l'interprétation des signaux, montrée sur la figure 5.16. Cet effet met en évidence la performance de mesure ultrasonore en immersion. La partie 5.6 de ce chapitre est la description d'essai de mesure en immersion.

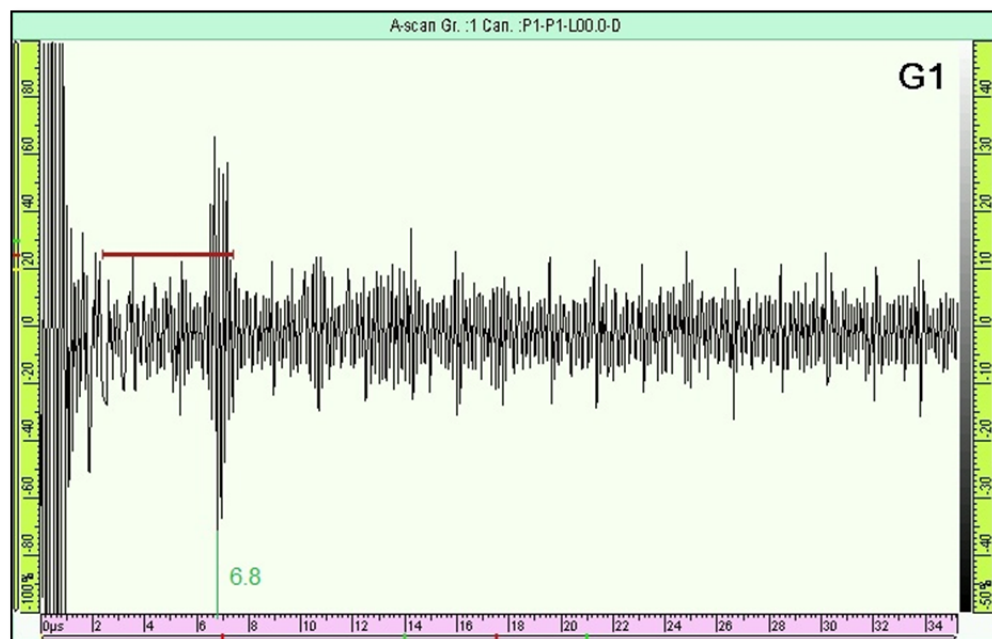


Figure 5.15 Échos et bruits de l'onde longitudinale sur la surface conique

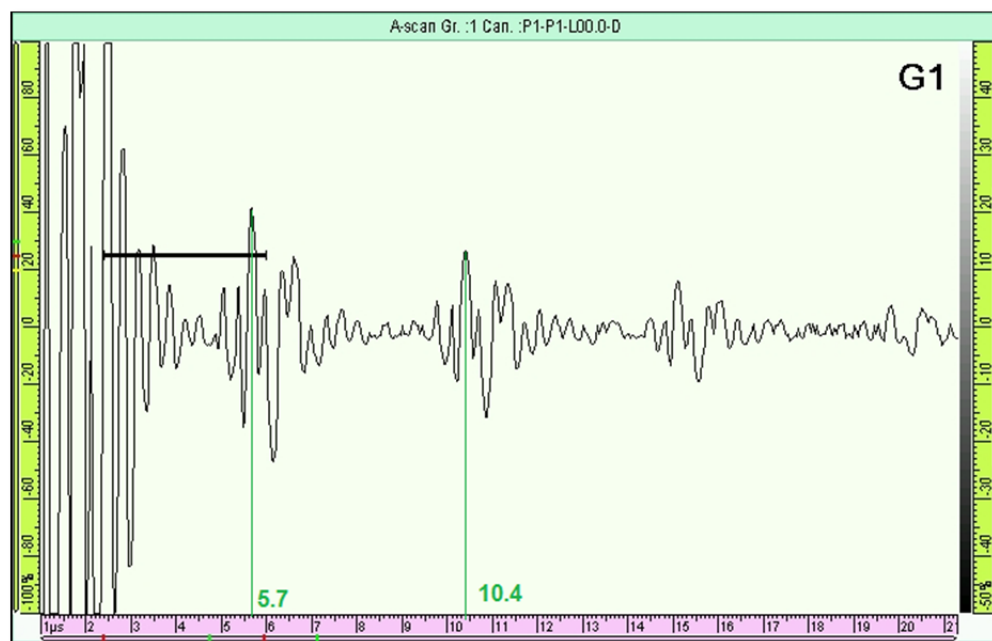


Figure 5.16 Onde longitudinale sur la surface conique en immersion

5.5.3 Vitesse de l'onde transversale

Shull (2002b, p. 21) constate que la vitesse de l'onde transversale est approximativement la moitié de la vitesse de l'onde longitudinale. Les résultats obtenus de mesure de la vitesse des ondes ultrasonores dans le Waspaloy confirment cette énonciation. Le tableau 5.4 montre le résumé de la configuration de l'appareil de mesure, à l'aide de la sonde V156-RM.

Tableau 5.4 Configuration de l'appareil de mesure ultrasonore transversale

Type	UT	Porte	A
Mode	Réflexion	Départ	2,57 us
Type d'onde	Transversale	Largeur	26,13 us
Vitesse du son	3 000,0 m/s	Seuil	17,00 %
Départ	2,0 us	Matériau	Inconel
Étendue (parcours complet)	22,72 us	Forme	Plaque
Gain	35,00 dB	Épaisseur	15,45 mm
Tension	50V	Filtre	Bande passante 10,00 Mhz
Redressement	RF	Facteur d'échelle	4

La méthode de mesure et de calcul de l'onde transversale est la même que pour l'onde longitudinale et la même précision est appliquée pour minimiser l'erreur de manipulation. Une série de mesures sur tous les points numérotés du disque est effectuée avec la configuration d'étendue 64.68 μ s. L'image des signaux du point 1, la figure 5.17, en est un exemple. Pour faciliter l'observation des signaux, une deuxième série de mesures est effectuée avec la configuration d'étendue 22,72 μ s. Deux signaux importants, le signal entre 5 et 6 (μ s) et le signal après le curseur 10 :36 sont toujours visibles sur le plan. Ils peuvent être les échos de surface. Or, lorsque la connexion entre la sonde et la surface de la pièce est bien établie, deux autres signaux apparaissent: le signal avant le curseur 10 :36 et le signal

après 19 :27. Les mesures des données sont effectuées sur les amplitudes et les délais de ces échos. La figure 5.18 est un exemple de mesure sur le point 66.

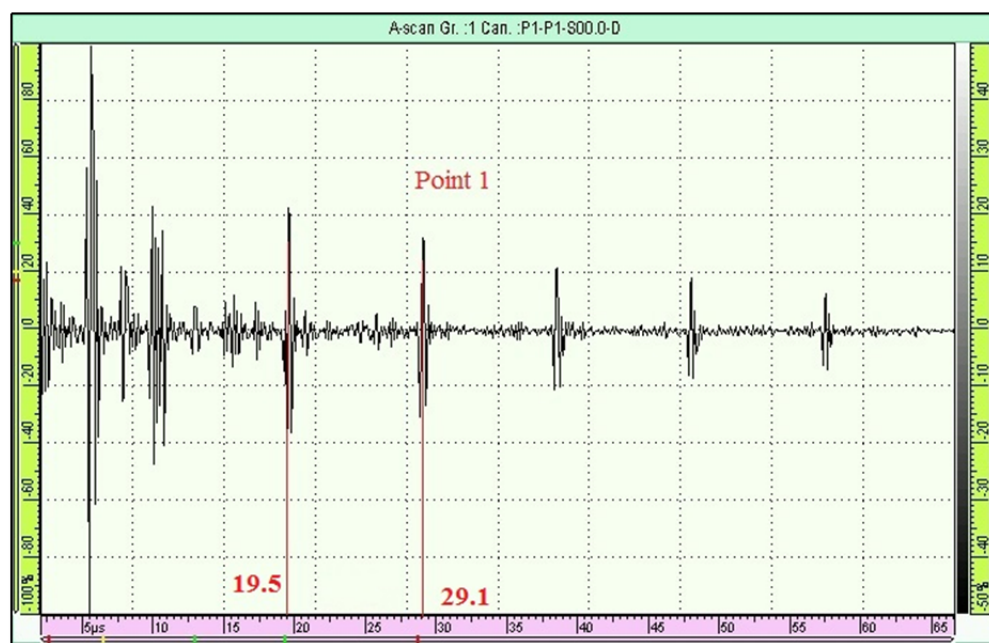


Figure 5.17 Mesure de la vitesse transversale sur l'étendue 64.68 μs

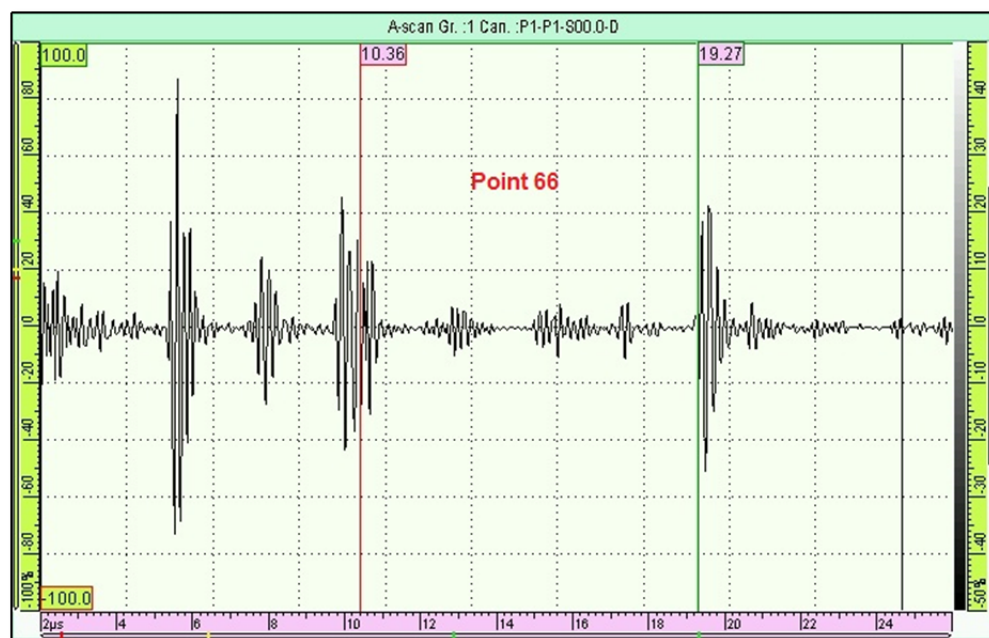


Figure 5.18 Signaux importants indiqués par les curseurs

La figure 5.19 est l'exemple de la capture de l'écran de l'appareil sur le point 24. La vitesse de l'onde transversale est calculée selon l'équation 5.8. La figure 5.20 montre l'histogramme de la distribution de la vitesse mesurée sur la surface horizontale. La moyenne de la vitesse mesurée est 0,3221 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

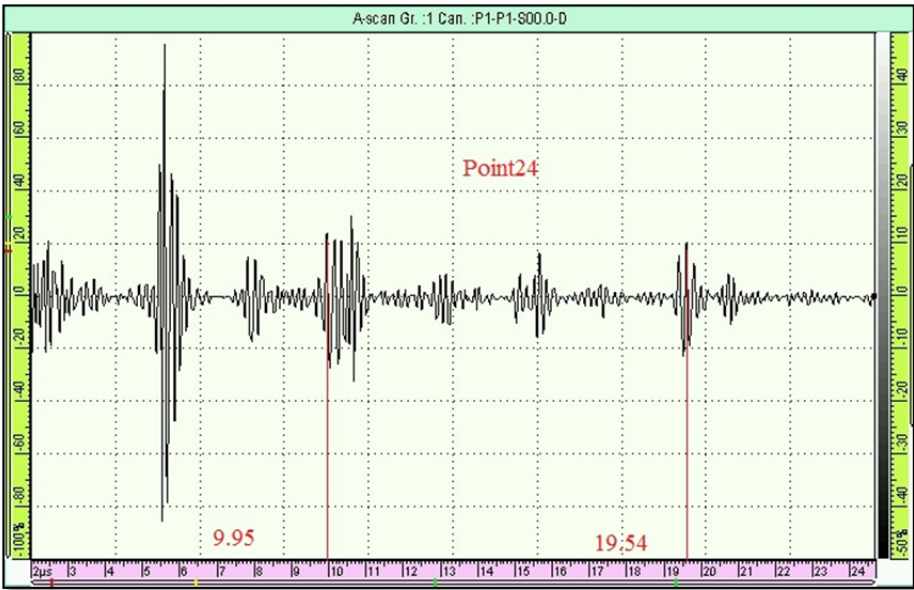


Figure 5.19 Mesure de la vitesse transversale sur le point 24

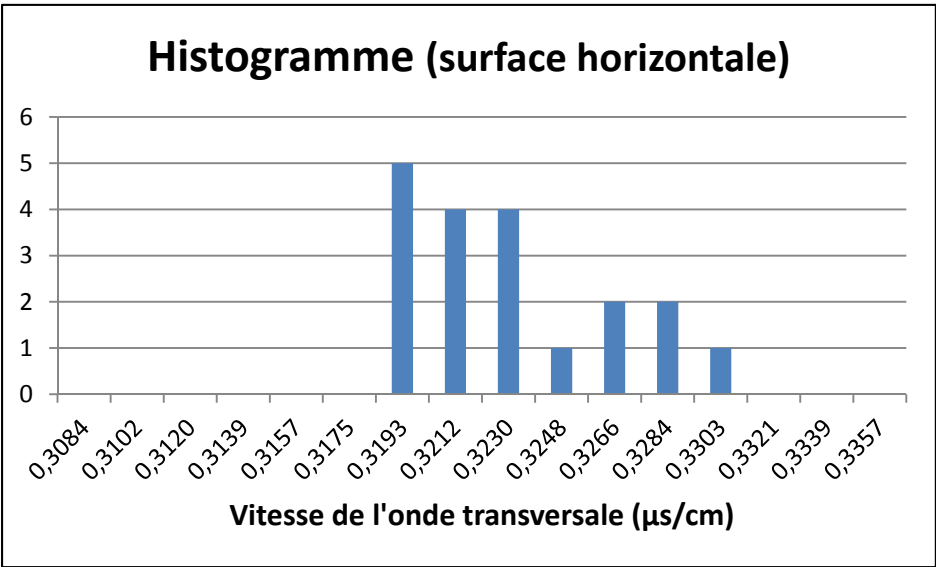


Figure 5.20 Vitesse de l'onde transversale sur la surface horizontale

$$V_s = \frac{(15,45 \times 2)}{(19,54 - 9,95)} = \frac{30,9}{9,59} = 3,2221 \text{ mm}/\mu\text{s} = 0,3222 \text{ cm}/\mu\text{s} \quad (5.8)$$

Le tableau 5.5 montre les données mesurées sur les images des signaux captées par l'appareil d'ultrason.

Tableau 5.5 Données de la mesure de la vitesse de l'onde transversale

Points	Distance parcourue (mm)	Premier délai (μs)	Deuxième délai (μs)	délai entre les échos (μs)	Vt (mm/ μs)	Vt (cm/ μs)
1	30,9	9,92	19,45	9,53	3,2424	0,3242
5	30,9	9,93	19,55	9,62	3,2121	0,3212
15	30,9	10,12	19,62	9,50	3,2526	0,3253
19	30,9	9,95	19,62	9,67	3,1954	0,3195
24	30,9	9,95	19,54	9,59	3,2221	0,3222
27	30,9	10,22	19,6	9,38	3,2942	0,3294
30	30,9	9,94	19,6	9,66	3,1988	0,3199
33	30,9	10,17	19,63	9,46	3,2664	0,3266
36	30,9	9,94	19,62	9,68	3,1921	0,3192
39	30,9	9,94	19,6	9,66	3,1988	0,3199
42	30,9	9,94	19,62	9,68	3,1921	0,3192
46	30,9	9,94	19,6	9,66	3,1988	0,3199
49	30,9	9,9	19,62	9,72	3,1790	0,3179
52	30,9	9,94	19,54	9,60	3,2188	0,3219
56	30,9	10,18	19,6	9,42	3,2803	0,3280
58	30,9	10,13	19,6	9,47	3,2629	0,3263
60	30,9	9,93	19,62	9,69	3,1889	0,3189
64	30,9	9,98	19,6	9,62	3,2121	0,3212
66	30,9	9,93	19,63	9,70	3,1856	0,3186

Le test est répété sur la surface conique intérieure. Même si le gain est 55 dB, l'amplitude d'écho est faible, l'intensité des bruits est grande et les données ne sont pas fiables pour l'interprétation des signaux, la figure 5.21. Une mince couche d'eau permet d'observer les échos distingués, montrée sur la figure 5.22.

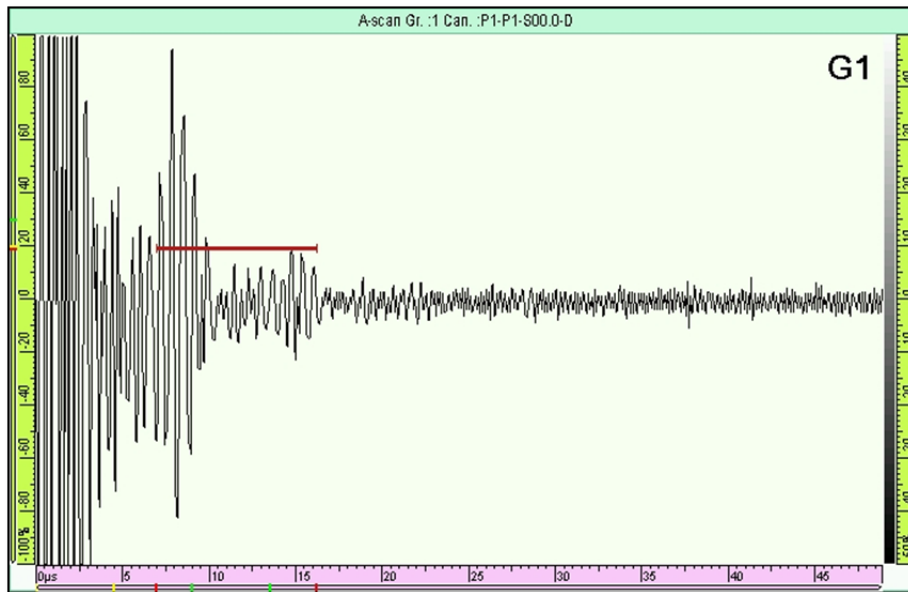


Figure 5.21 Échos et bruits d'onde transversale sur la surface conique

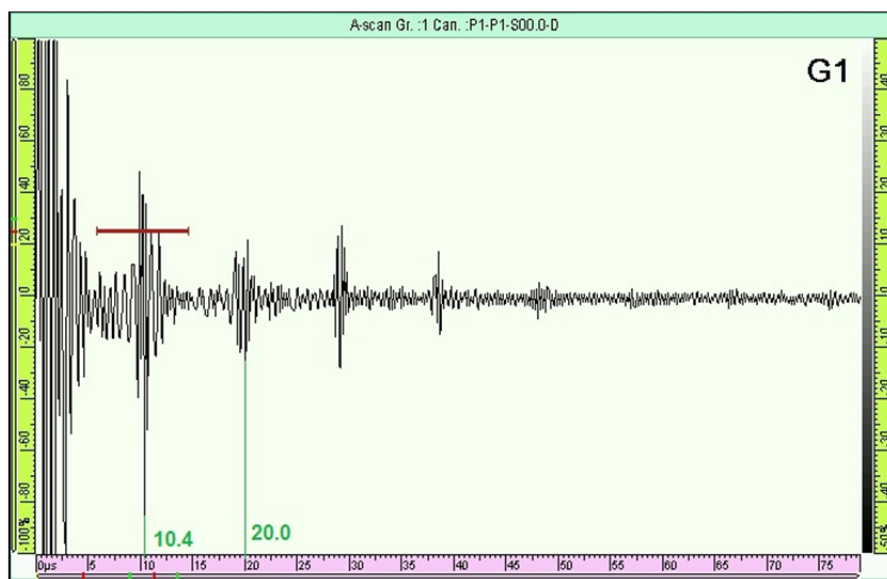


Figure 5.22 Onde transversale sur la surface conique en immersion

5.5.4 Calcul de la vitesse d'onde de surface

Shull (2002b, p. 21) affirme que le ratio de Poisson pour un matériau idéal est 0,5. Typiquement, le ratio de Poisson est environ 0,3. En utilisant les vitesses de l'onde longitudinale et de l'onde de cisaillement, le ratio de Poisson est calculé, par les équations 3.1 et 3.2 (Viens, 2011b) et selon l'équation 5.9 :

$$V_L^2 = V_S^2 \cdot \frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \quad (5.9)$$

$$V_L^2 \cdot (1-2\nu) = 2V_S^2 \cdot (1-\nu)$$

$$V_L^2 - 2V_S^2 = (2V_L^2 - 2V_S^2)\nu$$

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_S^2}{2(V_L^2 - V_S^2)}$$

$$\nu = \frac{(0,6119)^2 - 2(0,3221)^2}{2((0,6119)^2 - (0,3221)^2)} = 0,3463$$

Par la suite, la vitesse des ondes de Raleigh, V_R , dans la pièce du Waspaloy est approximativement calculée par l'équation 5.10 (Viens, 2011b, p. 8) :

$$V_R \cong V_S \cdot \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (5.10)$$

$$V_R \cong 0,3221 \times \frac{0,87 + 1,12 \times 0,3463}{1 + 0,3463}$$

$$V_R \cong 0,3009 \text{ cm}/\mu\text{s} = 3\,009 \text{ m/s}$$

O'Neill et Maev (2004, p. 124) affirme que la vitesse des ondes de Rayleigh dans leurs échantillons de Waspaloy est égale à $3,0 \times 10^3 \pm 10$ m/s et cela confirme la précision des mesures de ces travaux du projet.

5.6 Mesure en immersion

Ces expériences empiriques sont effectuées afin de confirmer la validité du choix de mesure en immersion, indiquée dans la partie d'étude préliminaire du plan de travail proposé. Toutefois, il est important de souligner que ce projet de recherche porte sur l'étude d'identification d'une méthode non destructive à sec. Étant donné la limite des sondes disponibles, une série du test est réalisée sur la surface conique intérieure du disque de Waspaloy en utilisant l'appareil OmniScan MX, attaché aux sondes focales en immersion : A315S-SU (10 MHz) et A308S-SU (5 MHz - 19 mm de diamètre nominal d'élément). La pièce de Waspaloy est placée dans le bassin d'eau de l'appareil Tecscan de manière à ce que la surface conique soit minutieusement perpendiculaire à la sonde, les figures 5.23, 5.24 et 5.25. Les mesures sont effectuées sur le plan x-y. Le déplacement de la sonde est contrôlé par l'appareil Tecscan à l'échelle de 0,001 millimètre pour éliminer l'erreur de manipulation et, chaque fois, le déplacement est opéré sur un axe d'un maximum de 24 millimètres autour du défaut de ségrégation, pour préciser les échos obtenus.

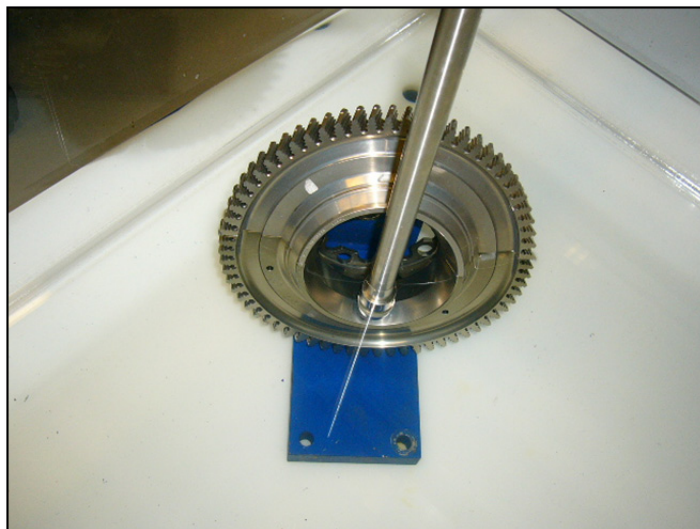


Figure 5.23 Disque de Waspaloy dans le bassin d'eau

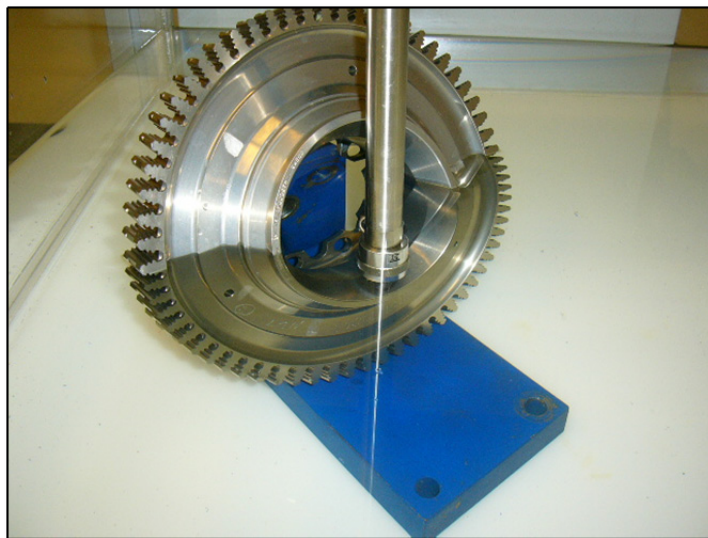


Figure 5.24 Disque de Waspaloy dans le bassin d'eau



Figure 5.25 Sonde travers le défaut de ségrégation

Cette série des tests est une étude qualitative qui permet d'observer les échos distingués à différentes amplitudes correspondant au profil du disque ainsi que les déplacements des échos par rapport à la distance entre la sonde et la surface courbée du disque, sur l'axe des z . Par conséquent, les paramètres de mesure (le départ, l'étendue, le gain, la tension et la porte A) sont définis comme des invariants pour tous les tests. Pour la première série, l'appareil

Omniscan est configuré pour l’Inconel en forme de plaque avec l’épaisseur de 50 mm, pour le type d’onde longitudinale avec une vitesse de 5 700,0 m/s et en mode réflexion en utilisant la sonde A315S-SU. Le tableau 5.6 montre le résumé de la configuration de l’appareil de mesure.

Tableau 5.6 Configuration de l’appareil de mesure ultrasonore

Type	UT	Porte	A
Mode	Réflexion	Départ	27.33 us
Type d’onde	Longitudinale	Largeur	37.85 us
Vitesse du son	5 7000,0 m/s	Seuil	25,00 %
Départ (parcours complet)	0,0 us	Matériau	Inconel
Étendue (parcours complet)	182.12 us	Forme	Plaque
Gain	20,00 dB	Épaisseur	50 mm
Tension	200V	Filtre	Bande passante 10,00 Mhz
Redressement	RF	Facteur d’échelle	58

La figure 5.26 est un exemple des 43 mesures des différents points autour de la surface conique, sur laquelle plusieurs échos ultrasonores sont visibles. Ces essais sont basés sur la méthode de microscopie acoustique (Viens, 2011b, p. 127). La microscopie acoustique et la tomographie acoustique sont des techniques de contrôle non destructif par ultrason en immersion. Ces techniques ne sont pas définies dans le plan de gestion de ce projet en tant qu’étude dans le chapitre de revue de la littérature.

Une autre série de tests en utilisant la sonde A308S-SU montre le même résultat. La figure 5.27 est un exemple pour lequel les échos distingués à différentes amplitudes sont visibles.

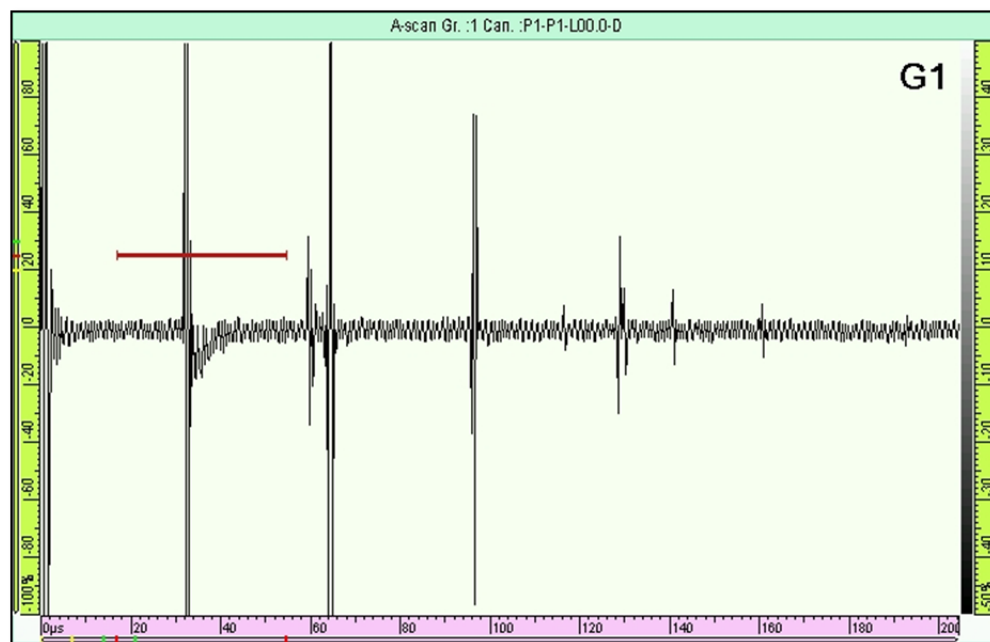


Figure 5.26 Échos ultrasonores sur la surface conique, la sonde A315S-SU

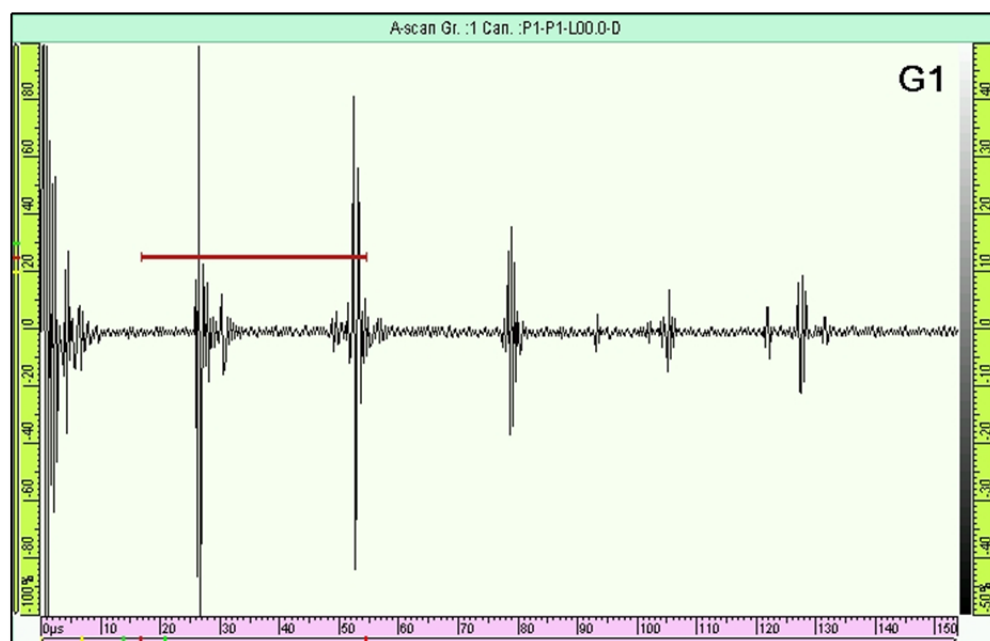


Figure 5.27 Échos ultrasonores sur la surface conique, la sonde A308S-SU

La figure 5.28 est un schéma simplifié du profil du disque inspecté. Pour des raisons de confidentialité, aucune dimension (longueur ou angle) n'est précise. Deux distances sont

indiquées sur le schéma, comme référence, pour illustrer la position de la sonde par rapport à la surface horizontale de la pièce. Ces données sont utilisées dans les calculs précédents des travaux expérimentaux de ce projet. Les flèches de couleur jaune illustrent la position de la sonde par rapport à la surface conique intérieure et le balayage de la sonde sur cette surface.

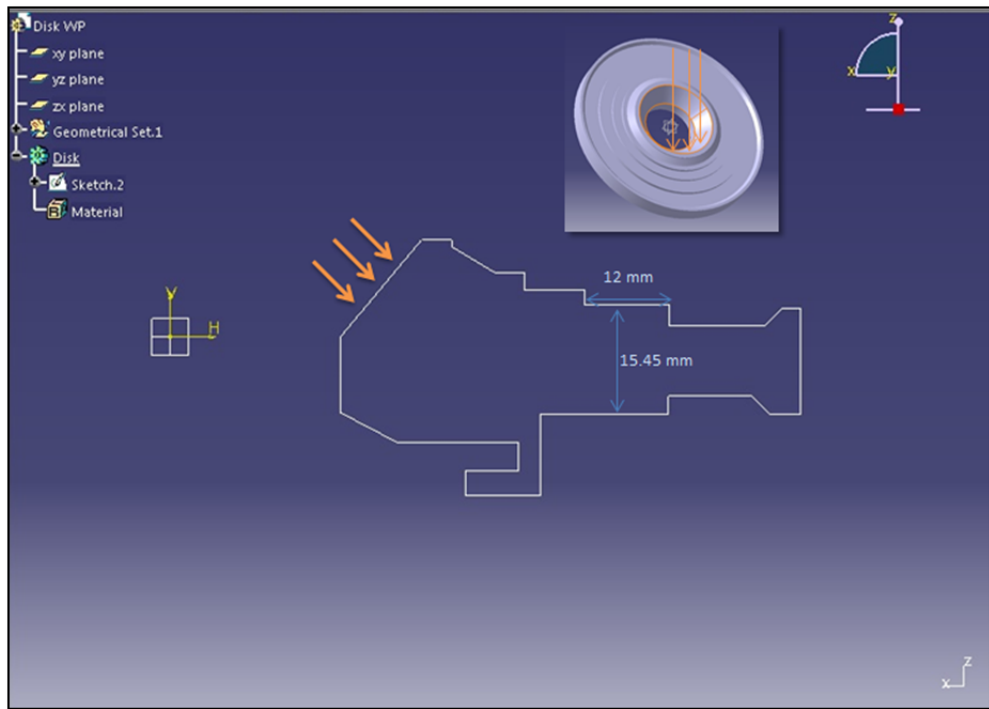


Figure 5.28 Schéma simplifié du profil du disque de Waspaloy

Le principe de micro-interférométrie de la microscopie acoustique explique les complexes échos et les signaux superposés reçus par le capteur. Le profil complexe du disque affecte les mesures de vitesse. C'est évident qu'à chaque mouvement, la distance entre le transducteur et la surface de la pièce change et, en conséquence, la « distance focale » (Viens, 2011b, p. 57) de la sonde varie et « la défocalisation du faisceau » (Monnier, 2013) se produit. Le « principe de la micro-interférométrie [signifie les] [sic] interférences entre le faisceau réfléchi en incidence normale (I) et le faisceau réémis à l'incidence critique de Rayleigh (II) » (Monnier, 2013), la figure 5.29. Cet effet se produit en utilisant les « traducteurs à grand angle d'ouverture pour la génération d'ondes de Rayleigh » (Monnier, 2013), comme les sondes A315S-SU (10 MHz) et A308S-SU (5 MHz) de ce travail. La forme de la sonde

permet également de générer les ondes longitudinale et transversale à la surface. Les interférences entre les ondes de Rayleigh et les ondes directement réfléchies par la surface ainsi que l'atténuation graduelle en fonction de la distance z (Viens, 2011b, p. 127) sont les raisons de la complexité des signaux captés.

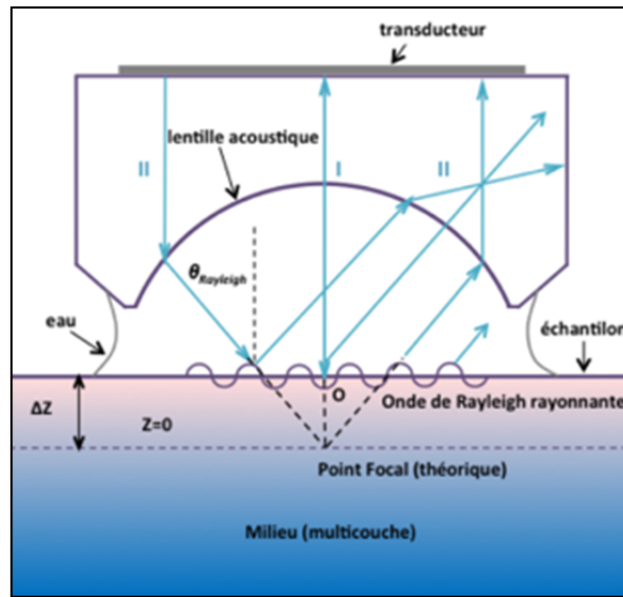


Figure 5.29 Principe de la micro-interférométrie
Tirée de (Monnier, 2013)

5.7 Discussion

Ces travaux expérimentaux sont les mesures de la conductivité électrique et de la vitesse des ondes ultrasonores sur un échantillon de disque de turbine du superalliage du Waspaloy. La précision actuelle des appareils de laboratoire ne permet pas de distinguer la variation de la conductivité électrique au-dessus du défaut de ségrégation. Comme prévu dans la partie d'étude préliminaire du plan de travail proposé, les sondes ultrasonores 5 MHz et 10 MHz permettent d'avoir les échos distingués. La technique de mesure en immersion est également une option performante pour la détection des ségrégations. Pour arriver à cette performance de mesure en immersion, programmer un logiciel adéquat pour le développement d'analyse des signaux est essentiel. La suggestion de l'étude du changement microstructural du Waspaloy dans le froid excessif est une expérience proposée pour l'expérimentation dans un

laboratoire de chimie. La micro-interférométrie acoustique est une technique d'imagerie qui permet l'analyse qualitative des propriétés mécaniques et des propriétés élastiques des matériaux et de la mesure de vitesse des ondes de Rayleigh. La majorité des échos des signaux captés par l'appareil ultrason, pendant les essais des sondes focales en immersion, est composée de plusieurs échos superposés et, en utilisant les équipements accessibles du laboratoire, le contrôle et l'interprétation manuels de ces complexes échos ne sont pas scientifiquement fiables.

CONCLUSION

Ce document contient des recherches et des travaux sur l'évaluation de différentes méthodes alternatives de l'inspection non destructive à sec pour remplacer l'inspection des superalliages de nickel par l'attaque anodique. La technique des attaques chimiques est actuellement la seule méthode pour détecter les défauts métallurgiques tels que les *white spots*, les *freckles* et les marques de brûlure. D'une part, ces anomalies microstructurales diminuent les résistances des superalliages de nickel, ce qui est la cause des défaillances mécaniques ; d'autre part, étant donné les fortes acidités des solutions chimiques, l'environnement corrosif des laboratoires de l'attaque chimique est facilement concevable. Alors, les résultats de ce projet de recherche peuvent servir pour de double sécurité.

Des limites inévitables contrarient le plan de gestion du projet de recherche. Les limites d'accès aux laboratoires, l'absence des accessoires suffisants et la limite de la taille de ségrégation sur la surface de l'échantillon sont des exemples des contraintes imposées aux travaux expérimentaux. Il est important à souligner qu'un projet de recherche scientifique nécessite des échantillons appropriés avec des informations de base sur l'échantillon. La taille et la position de ségrégation sur l'échantillon fourni pour ce projet de recherche ne permet pas de prendre des mesures plus précises et, par conséquent, la fabrication d'un sabot pour générer les ondes de Rayleigh n'a jamais été réalisée.

Le rapport de proportion entre le rayon intérieur de la surface conique de l'échantillon et la fréquence des ondes ultrasonores causera vraisemblablement des contraintes importantes sur la précision de mesure. Dans ce cas, il est fort probable que la fabrication d'un sabot miniature soit inutile pour générer les ondes de Rayleigh sur la surface conique de cet échantillon et pour obtenir les résultats désirés.

Les tests sont réalisés avec la plus grande précision possible. Toutefois, il n'y a qu'un seul échantillon disponible pour ce projet et, dans cette condition, les résultats des mesures de la

vitesse des ondes ultrasonores et de la conductivité électrique ne sont pas suffisamment scientifiques. Or, il est bien évident que les résultats obtenus des tests sont satisfaisants et pourront servir pour les recherches et les travaux à venir.

RECOMMANDATIONS

Selon les informations obtenues lors d'une visite de laboratoire d'attaque chimique, le partenaire industriel de ce projet utilise un système d'inspection par courants de Foucault automatique qui est limité à 2MHz. En accord avec les résultats du présent travail, dépasser la limite de ce système automatique sera une action gagnante considérable.

L'utilisation d'un système d'imagerie de courants de Foucault mérite d'être recommandée. Pour le moment, il n'y a pas de comparaison entre les caractéristiques du système de l'imagerie magnéto-optique et celles du système expérimenté par l'équipe du Dr Nagy. Cependant, leurs résultats semblent très similaires. Le résultat des expériences d'équipe de recherche de Dr Nagy est une affirmation sur l'éventuelle possibilité de révéler les défauts microstructuraux par courants de Foucault. Cela est une ouverture pour l'inspection des inhomogénéités microstructurales, des ségrégations, sur les petites surfaces par courants de Foucault.

L'hypothèse d'utilisation de la technique de microscopie magnéto-optique est éventuellement une méthode efficace de contrôle non destructif à sec pour révéler des anomalies telles que des *white spots* dans les superalliages de nickel.

La micro-interférométrie acoustique est une technique d'imagerie qui permet l'analyse qualitative des propriétés mécaniques et des propriétés élastiques des matériaux. Le contrôle automatique et l'interprétation des signaux par des logiciels spécialisés permettent d'obtenir des résultats scientifiques. Programmer un logiciel adéquat pour le développement d'analyse des signaux est une recommandation proposée.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. K. Zvezdin, et V. A. Kotov. 1997. « Chapter 1. Introduction ». In *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*. Coll. « Condensed Matter Physics »: Taylor & Francis. < <http://dx.doi.org/10.1201/9781420050844.ch1> >. Consulté le 4 septembre 2013.
- Alexander Devaux et al. 2011. « Development of new C&W superalloys for high temperature disk applications ». *Advanced Materials Research*, vol. 278, n° Euro Superalloys 2010, p. 405-410.
- Andrei Group. 2013. « The Faraday effect ». En ligne. < <http://www.physics.rutgers.edu/~eandrei/389/faraday.pdf> >. Consulté le 10 juin 2013.
- ASM, Handbook online. 2011. *ASM Material Information*, 17. En ligne. < <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp> >. Consulté le 7 août 2011.
- Avner, Sidney H. 1987. *Introduction à la métallurgie physique*. Trois-Rivières, Québec: CÉGEP de Trois-Rivières, 696 p.
- B. Décamps, M. Condat, T. Puig et C. Bourda. 1991. « Shearing of γ' precipitates in Waspaloy Deformed by Laser Shock ». *physica status solidi (a)*, vol. 125, n° 1, p. K7–K11.
- Beddoes, Jonathan, et M.J. Bibby. 1999. *Principles of metal manufacturing processes*. En ligne. < <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780340731628> >. Consulté le 12 août 2013.
- Benoît Rittaud. 2013. « Nombres complexes pour calculs d'écoliers ». *Les dossiers de La Recherche.*, vol. Août-septembre 2013, n° 5, p. 98.
- Berger, Jean-Luc, et Pierrick Descure. 1982. *Dispositif photosensible lu par transfert de charges, et caméra de télévision comportant un tel dispositif*. Application. < <http://www.google.com/patents/EP0063061A1?cl=fr> >. Consulté le 23 novembre 2013.
- Bhadeshia, H. K. D. H. 2012. « Nickel Based Superalloys ». En ligne. < <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/superalloys.html>; <http://www.msm.cam.ac.uk/departement/profiles/bhadeshia.php> >. Consulté le 12 octobre 2012.
- Blodgett, Mark P, et Peter B Nagy. 2004. « Eddy current assessment of near-surface residual stress in shot-peened nickel-base superalloys ». *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 23, n° 3, p. 107-123.

- Bosse, Jonathan, Pierre-Yves Joubert, Pascal Larzabal et Anne Ferréol. 2010. « High resolution approach for the localization of buried defects in the multi-frequency eddy current imaging of metallic structures ». *NDT & E International*, vol. 43, n° 3, p. 250-257.
- Bourda, C, Thierry T Puig, B Decamps et M Condat. 1991. « Deformation of a gamma/gamma'WASPALOY after laser shock ». In *ECO4 (The Hague'91)*. p. 148-159. International Society for Optics and Photonics.
- Cantrell Jr, John H. 2008. « Nondestructive Evaluation of Metal Fatigue Using Nonlinear Acoustics ».
- Carpenter Technology Corporation. 1989. *Carpenter Waspaloy*. Coll. « Technical data sheet ». En ligne. < http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?I=102&TAB=DV_DS&E=135... >. Consulté le 2 octobre 2012.
- Carpenter Technology Corporation. 2012. « Nickel superalloys ». En ligne. < <http://www.cartech.com/techcenter.aspx> >. Consulté le 2 octobre 2012.
- Carreon, Hector. 2009. « Detection of creep damage in a nickel-based superalloy turbine bucket using eddy current imaging ». *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 24, n° 1-2, p. 233-241.
- Coelho, Paulo. 1947. *L'Alchimiste*. Paris: J'ai lu, 2009, 1994., 190 p.
- Corner, Métallo. 2013. « L'induction et la fonderie ». En ligne. < <http://www.metallocorner.net/Inducfonderie.html> >. Consulté le 12 octobre 2013.
- David, J . 2002. « Rayleigh Waves ». In *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. En ligne. CRC Press. < <http://dx.doi.org/10.1201/9781420042139.ch8> >. Consulté le 27 mai 2012.
- Dictionnaire TERMIUM Plus. 2012. En ligne. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada: La banque de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada. < <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&srchtxt=&i=1&index=alt> >. Consulté le 12 août 2013.
- Donachie, Matthew J., et Stephen J. Donachie. 2002. *Superalloys - A Technical Guide (2nd Edition)*. En ligne. Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 355 p. < <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSATGE003/superalloys-technical> >. Consulté le 31 juillet 2013.
- Donachie, Matthew J., et Stephen J. Donachie. 2002a. *Superalloys - A Technical Guide (2nd Edition)*. En ligne. Coll. « Chapter 4 - Melting and Conversion ». Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 355 p.

< <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSATGE003/superalloys-technical> >.
Consulté le 10 juin 2012.

Donachie, Matthew J., et Stephen J. Donachie. 2002b. *Superalloys - A Technical Guide (2nd Edition)*. En ligne. Coll. « Chapter 8 - Heat Treating ». Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 355 p.
< <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSATGE003/superalloys-technical> >.
Consulté le 13 septembre 2013.

Donachie, Matthew J., et Stephen J. Donachie. 2002c. *Superalloys - A Technical Guide (2nd Edition)*. En ligne. Coll. « Chapter 12 - Structure/Property Relationships ». Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 355 p.
< <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSATGE003/superalloys-technical> >.
Consulté le 10 juin 2012.

Ensminger, Leonard J., et Dale Bond. 2011. « Use of Ultrasonics in the Nondestructive Testing and Evaluation of Metals ». In *Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications* p. 305-370. Coll. « Dekker Mechanical Engineering »: CRC Press.
< <http://dx.doi.org/10.1201/b11173-9> >. Consulté le 2012/05/28.

Fan, Yuan, Yiming Deng, Zhiwei Zeng, L Udpa, W Shih et G Fitzpatrick. 2006. « Aging aircraft rivet site inspection using magneto-optic imaging: Automation and real-time image processing ». In *Proceedings of the 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference*. p. 9.

Fitzpatrick, Gerald, et Richard Skaugset. 1998. *Detection of Corrosion Under Paint Using Magneto-Optic Imaging*. DTIC Document. < <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADB233601> >.

Gabb, T.P., J. Gayda, J. Telesman et A. Garg. 2008. « The Effects of Heat Treatment and Microstructure Variations on Disk Superalloy Properties at High Temperature ». In *11th International Symposium on Superalloys; 14-18 Sep. 2008; Seven Springs, PA; United States, Superalloys 2008*. p. 10. NASA Glenn Research Center.
< http://www.tms.org/superalloys/10.7449/2008/Superalloys_2008_121_130.pdf >.

Gauché, Jean-Pierre. 2012. *Fonderies et moulages des alliages / Référence 42479210*, 1.1 Conception du revêtement. En ligne. Coll. « Garnissage réfractaire des fours de fusion pour la fonte / Référence M3610 ». < <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/fonderies-et-moulages-des-alliages-42479210/garnissage-refractaire-des-fours-de-fusion-pour-la-fonte-m3610/four-a-induction-a-creuset-m3610v2niv10001.html> >. Consulté le 1 août 2013.

Geddes, Blaine, Hugo Leon et Xiao Huang. 2010. *Superalloys - Alloying and Performance - Chapter 5*. En ligne. Coll. « Compositional Effects »: ASM International, 51 p.

< <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSAP0000H/superalloys-alloying> >.
Consulté le 1 août 2013.

Hauck, E., J.L. Rose, W.J. Song et D.F. Heaney. 2003. « A Surface Wave Mediator Technique for Crack Detection in Green Parts ». *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, n° 9, p. 9-154.

Herrmann, Jan. 2005. « Generation and detection of higher harmonics in Rayleigh waves using laser ultrasound ». M.S. Georgia Institute of Technology, Georgia Institute of Technology, 97 p. < <http://hdl.handle.net/1853/7475> >.

Herrmann, Jan, Jin-Yeon Kim, Laurence J. Jacobs, J. Qu, Jerrol W. Little et Michael F. Savage. 2006. « Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves ». *Journal of Applied Physics*, vol. 99, n° 12, p. 124913-124913-8.

Hewes, John. 2013. « Impedance and Reactance ». In *The Electronics Club*. En ligne. < <http://electronicsclub.info/capacitance.htm> >. Consulté le 12 septembre 2013.

Hu, Qingying (Jim). 2012. « Advanced Magneto-Optic Imaging (MOI) System for Crack Inspection ». In., p. 22. Qi2 / Quest Center. 19823 58th Place South, Suite 200 . Kent, WA 98032 USA: QI 2. < <http://www.airlines.org/Documents/NDTForum2012/2012-27-14-Bondurant-TP-458.pdf> >.

Innovent. 2011. « Magnetic & Optical Systems ». En ligne. < http://www.thgot.de/en/INNOVENT/Departments/site/Magneto_optics_265/ >. Consulté le 12 octobre 2011.

Jackman, Laurence A., Gernant E. Maurer et Sunil Widge. 1994. « White spots in superalloys ». *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. E.A. Loria. En ligne. p. 153-166. < http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1994/Superalloys_1994_153_166.pdf >. Consulté le 12 août 2013.

Johansen, T. H. 2007. « MOI of superconductors in Oslo ». In *NEMS Workshop*. (Nauvo, Finland). Department of Physics, University of Oslo, Norway < <http://www.nems.utu.fi/projects/JohansenTH.pdf> >.

Juedes, Kyle, et Erik J Sánchez. 2012. « Laser-Scanning Magneto-Optical Kerr Effect Microscopy ». En ligne. < http://www.reu.pdx.edu/PowerPoint%20Presenations/2012/Kyle_ppt.pdf >. Consulté le 4 septembre 2013.

Katharine B. Small et al., Carpenter Technology Corporation. 2008. « A Guide to Etching Specialty Alloys for Microstructural Evaluation ». En ligne. Vol. 2013, p. 10. < <http://www.carttech.com/techarticles.aspx?id=1450> >. Consulté le 5 mai 2012.

- Knopp, Jeremy S., John C. Aldrin et Kumar V. Jata. 2009. « Computational methods in eddy current crack detection at fastener sites in multi-layer structures ». *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 24, n° 1-2, p. 103-120.
- Kocks, U Fred, Carlos Norberto Tomé et H-R Wenk. 2000. *Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties*. Cambridge university press.
- Kumar, A., KV Rajkumar, T. Jayakumar, B. Raj et B. Mishra. 2006. « Ultrasonic measurements for in-service assessment of wrought Inconel 625 cracker tubes of heavy water plants ». *Journal of nuclear materials*, vol. 350, n° 3, p. 284-292.
- L. A. Bertram, P. R. Schunk, S. N. Kempka, F. Spadafora et R. Minisandram. 1998. « The macroscale simulation of remelting processes ». *JOM*, vol. 50, n° 3, p. 18-21.
- Lesoult, Gérard. 1989. *Étude des métaux et des alliages : état métallique / Référence 42345210*, 2.2.1 Zone de peau. En ligne. Coll. « Solidification - Macrostructures et qualité des produits / Référence M59 ». < <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/etude-des-metaux-et-des-alliages-etat-metallique-42345210/solidification-m59/texture-des-grains-de-coulee-et-modes-de-cristallisation-m59-niv10002.html#> >. Consulté le 1 août 2013.
- McCary, R., D. Oliver, K. Silverstein et J. Young. 1984. « Eddy current imaging ». *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, n° 5, p. 1986-1988.
- McCord, J. 2005. « Magneto-optical Microscopy - Slides ». En ligne. p. 132. < <http://magnetism.eu/esm/2005-constant/slides/mccord-slides.pdf> >. Consulté le 15 septembre 2013.
- Mix, Paul E (681). 2005. *Introduction to nondestructive testing: a training guide*, Second. New Jersey et Canada: Wiley-Interscience.
- Monnier, Thomas. 2013. « Microscopie Acoustique ». En ligne. < <http://lva.insa-lyon.fr> >. Consulté le 3 novembre 2013.
- Murry, Guy. 2010. *Aide-mémoire métallurgie : métaux, alliages, propriétés*, 2. 330 p.
- Nagy, Peter B. 2008. « Electromagnetic Materials State Awareness Monitoring ». En ligne. < http://www.ase.uc.edu/~pnagy/NDE/AFOSR_Prognosis_Workshop/Nagy.ppt >. Consulté le 10 août 2013.
- NASA's Marshall Space Flight Center. 2004. « Reading Through Paint ».

- NDT Resource Center. 2012. « Eddy Current Inspection Formula - Electrical Conductivity Conversion ». En ligne. < <http://www.ndt-ed.org/GeneralResources/Formula/ECFormula/IACSConversion/IACS.htm> >. Consulté le 12 octobre 2012.
- NDT ressource center. 2012. « Accoustic Properties for Metals in Solid Form ».
- NDT ressource center. 2013. « Refraction and Snell's Law ». En ligne. < <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm> >. Consulté le 12 octobre 2013.
- Novotný, P., P. Sajdl et P. Macháč. 2004. « A magneto-optic imager for NDT applications ». *NDT & E International*, vol. 37, n° 8, p. 645-649.
- Office québécois de la langue française. 2012. *Le grand dictionnaire terminologique*. En ligne. Québec. < <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/index.html> >. Consulté le 12 mai 2012.
- Olympus, corporation. 2011. « Flaw Detectors ». En ligne. < <http://www.olympus-ims.com/en/flaw-detectors/> >. Consulté le 8 septembre 2011.
- Olympus NDT. 2011. « Panametrics - NDT Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing ». *Ultrasonic Transducers*.
- Paul D. Genereux, Christopher A. Borg. 2000. « Characterisation of freckles in a high strength wrought nickel superalloy ». In *International Symposium on Superalloys*. p. 19-27. Pratt & Whitney United Technologies.
- Quest Integrated, Inc. 2006. *Magnet-Optic Imaging Operator's Manual Model 308 / 37 / TDF*. Bombardier Aéronautique.
- QUEST Integrated, Inc. . 2011. « MOI 308 - Magneto Optic Imaging Systems [Rapid Rivet Inspection] ». En ligne. < <http://www.qi2.com/images/pdfs/moibrochure.pdf> >. Consulté le 23 novembre 2011.
- R.J. Smith, G.J. Lewis and, D.H. Yates. 2001. « Development and application of nickel alloys in aerospace engineering ». *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 73, n° 2, p. pp. 138-146.
- Radtke, U., R. Zielke, H. G. Rademacher, H. A. Crostack et R. Hergt. 2001. « Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing ». *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 36, n° 3, p. 251-268.
- Robin M. Forbes Jones, Laurence A. Jackman. 1999. « The Structural Evolution of Superalloy Ingots during Hot Working ». *JOM*, vol. 51, n° 1, p. 9.

- Rulf, Benjamin. 1969. « Rayleigh Waves on Curved Surfaces ». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 45, n° 2, p. 7.
- Saint-Gobain Crystals - Photonic Materials. 2013. « Garnet Substrates ». En ligne. < <http://www.photonic.saint-gobain.com/garnet-substrates.aspx> >. Consulté le 20 août 2013.
- SAPRIEL, Jacques. 1995 *Matériaux pour l'électronique et dispositifs associés*, base documentaire : 42271210. En ligne. Coll. « 2. Applications de l'acousto-optique »: Editions T.I. < <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatique-th13/materiaux-pour-l-electronique-et-dispositifs-associes-42271210/> >. Consulté le 28 juillet 2013.
- Shih W.C.L., G.L. Fitzpatrick. 2002. « Magneto-Optic Imaging Technology, a new tool for aircraft inspection ». *AMPTIAC*, vol. 6, n° 3.
- Shull, Peter J . 2002. « Ultrasound ». In *Nondestructive evaluation: Theory, Techniques, and Applications* (2011/10/13) En ligne. p. 130. Coll. « Dekker Mechanical Engineering », 3: CRC. < <http://dx.doi.org/10.1201/9780203911068.fmatt> >. Consulté le 13 octobre 2011.
- Sobchenko, I., J. Pesicka, D. Baither, W. Stracke, T. Pretorius, L. Chi, R. Reichelt et E. Nembach. 2007. « Atomic force microscopy (AFM), transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM) of nanoscale plate-shaped second phase particles ». *Philosophical Magazine*, vol. 87, n° 17, p. 2427-2460.
- Sollar, Aude. 2006. « Refusion à l'arc sous vide du superalliage 718: Modélisation du procédé et étude de la formation des white spots ». Institut National Polytechnique de Lorraine, 151 p.
- Special Metals Corporation. 2004. *Waspaloy*. La fiche technique. 4 p. < <http://www.specialmetals.com/documents/Waspaloy.pdf> >.
- Storr, Wayne. 2013. « Basic Electronics Tutorials ». En ligne. < http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_1.html >. Consulté le 12 septembre 2013.
- Tavrin, Y., et JH Hinken. 1999. « Detection of segregations in aero engine turbine discs ». *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics(Germany)*, vol. 4, n° 6, p. 1.
- Thome, David K. 1998. *Development of an Improved Magneto-Optic/Eddy-Current Imager*. DTIC Document.
- Tottle, Charles Ronald. 1984. *An encyclopaedia of metallurgy and materials*. Plymouth, UK: Macdonald and Evans, 380 p.

- Vander Voort, G.F. et al. 2004. *Metallography and Microstructures of Heat-Resistant Alloys, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook*, 9. En ligne. Coll. « Metallography and Microstructures of Heat-Resistant Alloys », 820-859 p. < <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp> >. Consulté le 2012.
- Vary, Alex. 1986. « Analytical Ultrasonics in Materials Research and Testing ». In *NASA Conference Publication 2383*. National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, OH (USA). Lewis Research Center: National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, OH (USA). Lewis Research Center. < <http://www.osti.gov/scitech/biblio/5435022> >. Consulté le 18 juin 2012.
- Viens, Martin. 2011a. « Courants de Foucault (ET) ». In *Essais mécaniques et contrôle non destructif et Laboratoire* Note de cours MEC761. p. 76, Cours n°1. Montréal: École de technologie supérieure. < https://cours.etsmtl.ca/mec761/Documents/Acetates/04_Courants_de_Foucault.pdf >. Consulté le 10 septembre 2011.
- Viens, Martin. 2011b. « Ultrasons (UT) ». In *Essais mécaniques et contrôle non destructif* Note de cours MEC761. p. 138, 5. Montréal: École de technologie supérieure. < https://cours.etsmtl.ca/mec761/Documents/Acetates/05_Ultrasons.pdf >. Consulté le 10 septembre 2011.
- Viens, Martin. 2012. « Échantillonnage et traitement, numérique du signal ». In *Instrumentation et contrôle de procédés industriels* Note de cours MEC743. p. 32, cours n°6. Montréal: École de technologie supérieure. < https://cours.etsmtl.ca/mec743/Documents/Acetates/06_Traitement_du_signal_echantillonnage_et_conversion_A-N.pdf >. Consulté le 12 juin 2013.
- Viens, Martin, et J. David N. Cheeke. 1990. « Highly sensitive temperature sensor using SAW resonator oscillator ». *Sensors and Actuators A: Physical*. En ligne. Vol. 24, n° 3, p. 209-211. < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092442479080059E> >. Consulté le 12 juillet 2013.
- Viens, Martin, Li Xing, Wang Zuoqing, Jen Cheng Kuei et J. D. N. Cheeke. 1996. « Ultrasonic thin-walled tube wave structure for sensing devices ». *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*. En ligne. Vol. 43, n° 2, p. 331-336. < <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> >. Consulté le 5 août 2013.
- Wosik, Jarosław, Beata Dubiel, Adam Kruk, Heinz-Josef Penkalla, Florian Schubert et Aleksandra Czyska-Filemonowicz. 2001. « Stereological estimation of microstructural parameters of nickel-based superalloy Waspaloy using TEM methods ». *Materials Characterization*, vol. 46, n° 2-3, p. 119-123.

- Yu, F., M.P. Blodgett et P.B. Nagy. 2006. « Eddy current assessment of near-surface residual stress in shot-peened inhomogeneous nickel-base superalloys ». *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 25, n° 1, p. 16-27.
- Yu, Feng, et Peter B. Nagy. 2004. « QNDE 2004 inversion Poster ». In. Dept. Aerospace Eng. & Eng. Mechanics University of Cincinnati Cincinnati, Ohio 45221-0070 <<http://www.ase.uc.edu/~pnagy/ClassNotes/Seminars/QNDE 200>>.
- Yurchenko, Vitaliy V. 2009. « Magneto-optical Imaging based on Faraday Effect ». In *Combined Summer school and Symposium on Magnetism*. (Backagarden Höör (Skane) Sweden). Department of Physics, University of Oslo, P.O.Box 1048, Blindern, 0316 Oslo, Norway: Centre for Materials Science and Nanotechnology, Oslo, Norway. < <http://www.fys.uio.no/super/> >.

