



HAL
open science

Génération et détection sans contact des ondes de Rayleigh par méthodes ultrasons-laser et EMAT en mode statique et dynamique : application à la détection de défauts surfaciques dans le champignon du rail

Bada Ndao

► To cite this version:

Bada Ndao. Génération et détection sans contact des ondes de Rayleigh par méthodes ultrasons-laser et EMAT en mode statique et dynamique : application à la détection de défauts surfaciques dans le champignon du rail. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2016. Français. NNT : 2016VALE0038 . tel-04810573

HAL Id: tel-04810573

<https://theses.hal.science/tel-04810573v1>

Submitted on 29 Nov 2024

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

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

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de **DOCTEUR** de l'Université de Valenciennes
et du Hainaut-Cambrésis - UVHC

Spécialité : **Electronique**

Bada NDAO

Soutenue le 15 décembre 2016 à Valenciennes

Laboratoires d'accueil

- ✓ Département Opto-Acousto-Electronique de l'IEMN- UMR CNRS 8520
- ✓ Département Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique de Mines Douai

Ecole Doctorale SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, Centrale Lille)

**GENERATION ET DETECTION SANS CONTACT DES ONDES DE
RAYLEIGH PAR METHODES ULTRASONNS-LASER ET EMAT EN MODE
STATIQUE ET DYNAMIQUE**

Application à la détection de défauts surfaciques dans le champignon du rail

JURY

Président du jury

- M. Dazel Olivier Professeur des Universités, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

Rapporteurs

- M. Duflo Hugues Professeur des universités, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes - UMR CNRS 6294
Université le Havre Normandie
- M. Burtin Christian Maître de Conférences HDR, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR CNRS
6183, Ecole Centrale de Nantes

Examineur

- M. Dazel Olivier Professeur des Universités, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

Membres invités

- M. Martin Philippe Expert surveillance des rails, SNCF Réseau
- M. Boukamel Adnane Docteur, HDR, Directeur du programme Scientifique et de la Formation RAILENIUM

Co-directeurs de thèse

- M. Duquennoy Marc Professeur des universités, Laboratoire IEMN/DOAE UMR CNRS 8520,
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
- M. Bourse Gérard Directeur de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, Département TPCIM

Co-encadrant

- M. Jenot Frédéric Maître de Conférences HDR, Laboratoire IEMN/DOAE UMR CNRS 8520,
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Remerciements

Je remercie l'Institut de Recherche Technologique RAILENIUM pour avoir financé ces travaux de thèse qui se sont déroulés en collaboration au sein du laboratoire IEMN/DOAE et au département TPCIM, Ecole Nationale Supérieure des Mines Douai. Ils sont respectivement dirigé par : Monsieur le professeur Jamal ASSAAD et Madame le professeur Patricia KRAWCZAK, je les remercie de m'avoir accueilli pour la réalisation de ce projet dans de bonnes conditions.

Je souhaite remercier en premier lieu mes directeurs de thèse, M. Marc DUQUENNOY, Professeur des universités, Laboratoire IEMN/DOAE, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et M. Gérard BOURSE, Directeur de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, Département TPCIM pour m'avoir accordé leur confiance tout au long de ces années ainsi que pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

J'exprime ma profonde gratitude envers Monsieur Hugues DUFLO, Professeur des Universités, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Université le Havre Normandie et à Monsieur Christian BURTIN, Maître de Conférences HDR, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Ecole Centrale de Nantes, pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur Olivier DAZEL, Professeur des Universités, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Monsieur Philippe MARTIN, Expert surveillance des rails, SNCF Réseau et à Monsieur Adnane BOUKAMEL, Docteur, HDR, Directeur du programme Scientifique et de la Formation RAILENIUM pour avoir accepté de participer au jury de thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur Frédéric JENOT, Maître de Conférences HDR, Laboratoire IEMN/DOAE, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et à Monsieur Gérard BOURSE, Directeur de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Mines Douai, pour m'avoir encadré durant ces trois années. Leurs connaissances et conseils ont rendu possible l'aboutissement de ce travail de thèse.

Je remercie particulièrement Monsieur Frédéric RIVART et Madame Lucie BENMEDDOUR, Techniciens au Laboratoire IEMN/DOAE et Monsieur Hervé DEMOUVEAU, Maître Assistant à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, pour leur contribution à la mise en œuvre des démonstrateurs. Nos discussions furent nombreuses et enrichissantes.

J'ai eu la chance de travailler durant ces années, dans une ambiance conviviale et chaleureuse, en partie, grâce à l'ensemble des doctorants du laboratoire. Je pense notamment à Daher et Laïd qui ont partagé avec moi le bureau 208, je les remercie pour leur bonne humeur et leur joie de vivre. Je n'oublie pas non plus mes autres collègues thésards parmi lesquels, Kaïs, Ulrich, Rafatou...et aussi Monsieur Jean Pierre MIMARD et Monsieur Pierre BEDART du département TPCIM. Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude pour nos fructueux échanges quotidiens.

Je remercie toute ma famille pour m'avoir soutenu dans les moments les plus difficiles de mon parcours. J'adresse également un remerciement à mon ami Mountaga pour tout son soutien.

Enfin, j'adresse un remerciement particulier à ma chère épouse Oumy qui a su m'épauler au quotidien et surtout dans les derniers mois de cette thèse. Je la remercie pour s'être occupée de mes princesses Thioro et Amy tout au long de ces années. Merci à mes deux filles pour m'avoir donné, au quotidien, une motivation, de l'énergie et le courage à franchir les obstacles les plus difficiles.

A mon grand-père : NDIAYE Thiadiakhou

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	6
------------------------------------	----------

CHAPITRE I. ETAT DE L'ART.....	9
---------------------------------------	----------

1.1 INTRODUCTION	9
1.2 DESCRIPTION DU RAIL ET DES DEFAUTS DANS LE CHAMPIGNON	9
1.2.1 PRESENTATION DU RAIL	9
1.2.2 CODIFICATION DES DEFAUTS DANS LE RAIL	10
1.2.3 LES DEFAUTS DANS LE CHAMPIGNON DU RAIL	11
1.2.4 PROPAGATION DES DEFAUTS	14
1.3 LES METHODES DE CONTROLES NON DESTRUCTIFS DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	14
1.3.1 METHODES DE CONTROLE ULTRASONORE DU RAIL PAR ONDES DE SURFACE EN STATIQUE	15
1.3.2 METHODES DE CONTROLE AUTOMATISE DU RAIL AVEC DEPLACEMENT RELATIF	17
1.3.3 MISE EN EVIDENCE DE LA PERTINENCE DU CHOIX DES TECHNOLOGIES UTILISEES	23
1.4 LES ONDES ULTRASONORES	24
1.4.1 PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES D'ONDES	24
1.4.2 MOYENS DE GENERATION DES ONDES ULTRASONORES DE SURFACE	28
1.5 INTERACTION ONDE DE RAYLEIGH AVEC UN DEFAUT SURFACIQUE	29
1.6 CONCLUSION	36

BIBLIOGRAPHIE	37
----------------------------	-----------

CHAPITRE II. METHODES DE GENERATION ET DE DETECTION DES ONDES ULTRASONORES SANS CONTACT	41
--	-----------

2.1 INTRODUCTION	41
2.2 METHODE DE GENERATION ET DE DETECTION D'ONDE ULTRASONORE PAR LASER	41
2.2.1 DEFINITION DU LASER	41
2.2.2 MECANISME DE GENERATION DES ULTRASONS PAR LASER	43
2.2.3 DETECTION SANS CONTACT	49
2.2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METHODE ULTRASONS-LASER	53
2.2.5 GENERATION ET DETECTION ULTRASONORES PAR EMAT	54
2.3 DESCRIPTION D'UN EMAT	54
2.3.1 MECANISME DE LA FORCE DE LORENTZ.....	56
2.3.2 PRINCIPE DE LA DETECTION PAR EMAT	58
2.3.3 INFLUENCE DU LIFT-OFF	59
2.3.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES EMATS	59
2.4 CONCLUSION	60

BIBLIOGRAPHIE	61
----------------------------	-----------

CHAPITRE III. DETECTION EN MODE STATIQUE..... 63

3.1	INTRODUCTION	63
3.2	PRESENTATION DES ECHANTILLONS	63
3.3	ECHANTILLON POUR ESSAIS EMATs	64
3.4	ECHANTILLONS POUR ESSAIS ULTRASONS-LASER.....	65
3.5	DETECTION DES DEFAUTS PAR ULTRASONS-LASER	67
3.5.1	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	67
3.5.2	PROPAGATION DE L'ONDE DE RAYLEIGH GENeree PAR ULTRASONS-LASER DANS LE CHAMPIGNON DU RAIL	68
3.5.3	PRINCIPE DE LA DETECTION.....	70
3.5.4	DETECTION DES SQUATS	73
3.5.5	DETECTION DES HEAD-CHECKS	76
3.6	DETECTION DES DEFAUTS PAR ULTRASONS-EMAT	78
3.6.1	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	78
3.6.2	PROPAGATION DE L'ONDE DE RAYLEIGH GENeree PAR EMAT DANS LE RAIL	80
3.6.3	METHODE EXPERIMENTALE DE DETECTION	82
3.6.4	DETECTION DES SQUATS	83
3.6.5	METHODE DE LOCALISATION D'UNE FISSURE	85
3.6.6	DETECTION DES HEAD-CHECKS	86
3.7	CONCLUSION	87

BIBLIOGRAPHIE 89

CHAPITRE IV. ETUDE DE FAISABILITE DE LA DETECTION EN MODE DYNAMIQUE..... 91

4.1	INTRODUCTION	91
4.2	OBJECTIFS ET ENJEUX DU CONTROLE NON DESTRUCTIF (CND) EN DYNAMIQUE DANS LE FERROVIAIRE	91
4.3	MISE EN ŒUVRE DE DEMONSTRATEURS POUR ESSAIS EN DYNAMIQUE	92
4.3.1	CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES DEMONSTRATEURS.....	93
4.3.2	AXE DE GUIDAGE LINEAIRE POUR ESSAIS ULTRASONS-LASER.....	93
4.3.3	AXE DE GUIDAGE LINEAIRE POUR ESSAIS EMAT	94
4.3.4	ETALONNAGE DES RAMPES DE DEPLACEMENT.....	95
4.4	ESSAIS ULTRASONS-LASER EN MODE DYNAMIQUE.....	97
4.4.1	DEMONSTRATEUR POUR LES ESSAIS ULTRASONS-LASER	97
4.4.2	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	98
4.4.3	METHODE DE SYNCHRONISATION DU DISPOSITIF	99
4.4.4	ETALONNAGE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL SUR UN ECHANTILLON SANS DEFAUT.....	100
4.4.5	DETECTION DE FISSURES SURFACIQUES EN MODE DYNAMIQUE	101
4.4.6	DISCUSSION SUR LE DISPOSITIF DE DETECTION.....	106
4.5	ESSAIS ULTRASONS-EMAT EN MODE DYNAMIQUE	107
4.5.1	ETALONNAGE DU LIFT-OFF	108
4.5.2	MISE EN ROUTE DU MOTEUR	110
4.5.3	RESOLUTION DU PARASITAGE DES SIGNAUX.....	111
4.5.4	DETECTION DE FISSURES SURFACIQUES EN MODE DYNAMIQUE	112

4.6	CONCLUSION	118
	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>119</u>
	<u>CONCLUSION GENERALE.....</u>	<u>120</u>

Introduction générale

Les contrôles de la qualité et de la santé des pièces deviennent un impératif incontournable dans le milieu industriel car ils visent à améliorer les aspects de sécurité et de maintenance préventive des installations. Le contrôle non destructif (CND) a comme objectif de vérifier le bon fonctionnement des parties critiques d'un système sans en altérer les propriétés physiques. L'histoire des CND commence au début du XX^e siècle avec les avancées de la physique moderne, mais c'est à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques de CND ont pris leur essor, en particulier dans l'industrie mécanique, puis aéronautique. Vers les années 1960-1970, le développement des centrales nucléaires et de l'aéronautique a engendré une forte accélération de l'utilisation des CND, et différentes méthodes ont été mises au point afin d'apporter des solutions adéquates à la détection d'anomalies dans les structures.

Cette tâche est souvent rendue complexe d'une part, par les contraintes structurelles provenant de la nature du défaut recherché et de la géométrie des pièces à contrôler, et d'autre part des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué (en cours de fabrication, en service...).

Parmi ces méthodes de CND existantes, celles basées sur les ultrasons ont été largement utilisées pour le contrôle des structures dans divers domaines industriels, en particulier (mécanique, aéronautique, ferroviaire...). Elles permettent d'examiner les pièces avec comme objectif, la détection et le dimensionnement des défauts, la caractérisation des propriétés de matériaux, la mesure d'épaisseur, etc. Depuis les années 70, elles sont également été utilisées pour la réalisation de l'imagerie (B-scan, C-scan,...).

Pour le secteur ferroviaire, ces méthodes ultrasonores ont grandement contribué à améliorer les procédés de maintenance et ont permis à améliorer la fiabilité des contrôles, garantissant ainsi une meilleure durée de vie des structures telles que les rails et les roues.

Aujourd'hui, la détection en mode dynamique des défauts surfaciques, tels que les squats et les head-checks localisés au niveau de la tête du rail (champignon) représente un enjeu économique et sécuritaire majeur pour l'industrie ferroviaire. Ces défauts sont généralement provoqués par la fatigue de contact de roulement (FCR), causée par les chargements de plus en plus lourds et la densité grandissante du trafic. Ils sont difficilement détectables par les techniques d'inspections classiques et cela surtout lorsque ces fissures ont une profondeur inférieure à 5 mm.

Afin d'assurer la sécurité de l'infrastructure ferroviaire, des opérations de maintenance sont régulièrement organisées. La plupart des méthodes de contrôle habituelles occasionnent l'interruption ou le ralentissement du trafic, ce qui a pour effet d'augmenter les coûts de fonctionnement pour les compagnies ferroviaires. Afin de garantir l'état de santé de la voie, les sections de rail contenant des défauts FCR en dessous du seuil critique (≈ 5 mm) doivent être identifiées et réparées sans provoquer trop de perturbations sur le trafic, le réseau ferroviaire doit alors être inspecté avec des méthodes efficaces, fiables et pouvant s'effectuer en mode dynamique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse. Le but est de montrer la faisabilité en laboratoire, des méthodes de contrôle non destructif innovantes basées sur la génération et la détection sans contact d'ondes ultrasonores du type « ondes de Rayleigh » pouvant s'effectuer en statique comme en dynamique. Pour réaliser cette étude, nous étudierons le potentiel de la méthode Ultrasons-Laser et celui de la méthode EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) pour la détection de défauts FCR situés au niveau du champignon du rail en mode statique et dynamique.

A ce jour, il n'existe pas, à notre connaissance, dans l'industrie ferroviaire des systèmes capables de détecter en mode dynamique des squats et des head-checks dans leur phase d'initiation. Le challenge est donc de taille et sera de démontrer la faisabilité du contrôle en dynamique avec un déplacement à vitesse significative (≈ 30 km/h) en laboratoire. L'objectif à plus long terme étant un contrôle à plus de 100 km/h sur les voies.

Le mémoire qui présente ces travaux de recherche, réalisés au laboratoire IEMN-DOAE et à l'école des Mines DOUAI, est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous présenterons une étude descriptive du rail de chemin de fer et des défauts que l'on peut rencontrer, en particulier ceux qui se trouvent à la surface du champignon (squats et head-checks). Un état de l'art des diverses méthodes de détections de défauts dans le rail sera fait et nous introduirons tout naturellement la pertinence des deux méthodes sans contact utilisées pour ces travaux : la méthode Laser et la méthode EMAT. Nous présentons également l'interaction des ondes de Rayleigh avec une fissure surfacique.

Le second chapitre présente les mécanismes de génération et de détection des ondes de Rayleigh basés sur l'utilisation de la méthode Ultrasons-Laser et la méthode EMAT. Ce chapitre sera subdivisé en deux grandes parties.

Premièrement, nous présenterons deux exemples de régimes de génération des ondes ultrasonores qui peuvent se présenter lors de l'interaction d'un faisceau laser (lumière) avec une surface solide (matière). Les diagrammes de directivités des ondes de Rayleigh ainsi que des techniques de détections optiques sans contact mécanique seront également présentées.

Deuxièmes, nous présenterons la description des EMATs ainsi que le mécanisme de couplage physique qui régit le fonctionnement des capteurs utilisés dans cette étude. Le principe de la détection des ondes ultrasonores par EMAT et l'influence du lift-off (entrefer) seront aussi évoqués ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

Le troisième chapitre, concernera l'étude de faisabilité de la détection en statique des défauts de types squats et head-checks avec l'instrumentation de mesure disponible au laboratoire de l'UVHC pour la méthode Ultrasons-Laser et avec le système PowerBox 2 pour la méthode EMAT, aux Mines Douai. Dans un premier temps, nous présenterons les différents échantillons qui seront utilisés. Dans chaque partie, que ce soit celle dédiée aux essais Ultrasons-Laser ou EMAT, nous présenterons le dispositif expérimental utilisé, les principes de détection des défauts surfaciques ainsi que les résultats obtenus. En plus de la détection, une méthode de localisation des défauts sera proposée.

Le dernier chapitre concernera l'étude de faisabilité de la détection en mode dynamique des squats et des head-checks avec l'utilisation des ondes de Rayleigh générées et détectées par la méthode Ultrasons-Laser et EMAT. Dans un premier temps, nous présenterons les objectifs et les enjeux du contrôle du rail en mode dynamique. Les démonstrateurs mis en œuvre pour réaliser ces essais en dynamique dans un environnement laboratoire y seront présentés. Nous décrirons également le dispositif expérimental utilisé pour chacune des deux méthodes, les résultats obtenus concernant la détection des défauts superficiels. Les contraintes liées à l'utilisation des méthodes de détection dans un contexte dynamique seront également évoquées.

Chapitre I. Etat de l'art

1.1 Introduction

Ce premier chapitre sera consacré à l'état de l'art sur les défauts pouvant apparaître dans le rail en particulier dans le champignon mais aussi à l'ensemble des différentes méthodes de contrôle du rail existant.

Il s'articulera de la manière suivante :

La première partie présentera la description du rail de chemin de fer ainsi que les défauts rencontrés plus fréquemment dans le champignon du rail. La deuxième partie portera sur les méthodes de CND couramment utilisées pour l'inspection des rails, et de valider le choix des méthodes d'inspection qui feront l'objet de notre travail. La troisième partie, présentera brièvement les différents types d'ondes se propageant dans un solide isotrope et leurs domaines d'application, la dernière partie sera consacrée à l'interaction de l'onde de Rayleigh avec les défauts surfaciques.

1.2 Description du rail et des défauts dans le champignon

1.2.1 Présentation du rail

Le rail est une barre profilée obtenue par laminage de billettes en acier pouvant être réalisé suivant différentes nuances d'aciers, principalement des alliages au manganèse [0,7 à 1,7%] [1]. C'est un élément essentiel de la structure ferroviaire qui sert à la fois, de support et de guide de roulement pour les véhicules. Selon ses dimensions, son profil et son poids, le rail est codifié par l'Union Internationale du Chemin de fer (UIC) [2]. Dans le réseau ferré de France le rail utilisé est du type UIC60 (figure 2). Il est constitué de trois parties : le champignon, l'âme et le patin.

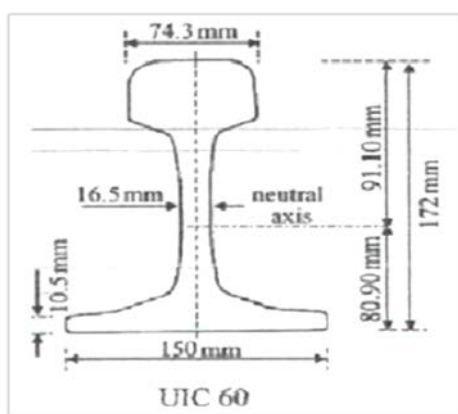


Figure 1: Dimensions de rail UIC60 [2]

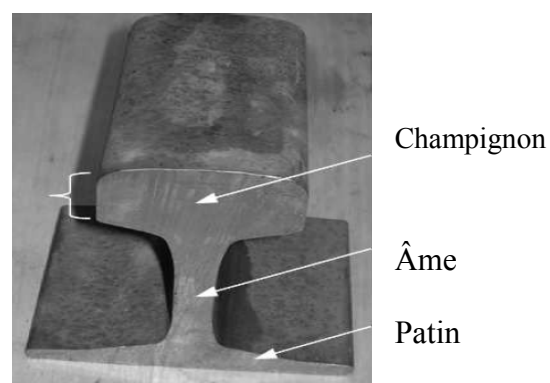


Figure 2 : Nomenclature du rail [2]

Le rail peut être vu sous trois plans (figure 3) : un plan transversal, un plan vertical et un plan horizontal, chaque plan contient respectivement un axe transversal, un axe vertical et un axe longitudinal. Cette décomposition géométrique du rail facilite la classification des défauts.

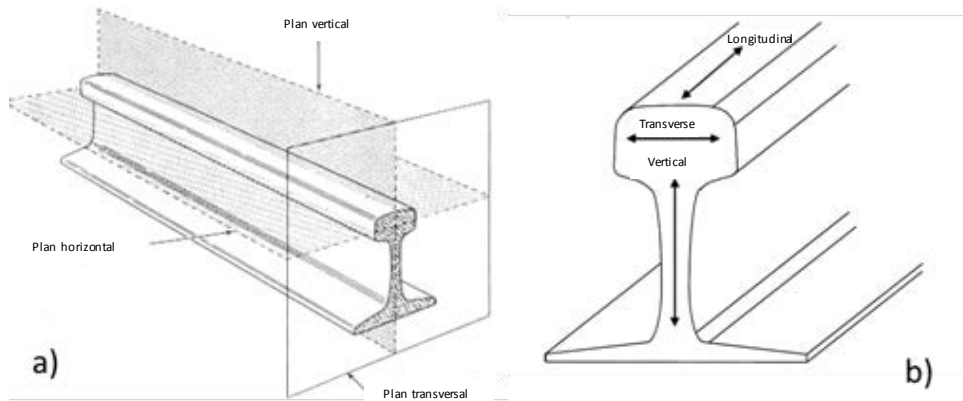


Figure 3 : géométrie du rail

1.2.2 Codification des défauts dans le rail

Les défauts dans le rail ont été étudiés, classifiés et codifiés par l'Union Internationale des chemins de fer (UIC). Ce code s'intéresse aux défauts favorisant l'endommagement du rail. Il comporte généralement quatre chiffres précédés de l'abréviation UIC.

- Le premier chiffre indique :

La position du défaut sur le rail (sur les extrémités du rail ou en dehors des extrémités).

Défauts d'origine métallurgique (pendant la fabrication du rail).

Les défauts de soudure ou de meulage.

- Le second chiffre indique :

La position dans la section du rail où le défaut provient

Le type de soudure lorsqu'il s'agit d'un défaut de soudure ou de re-surfage.

- Le troisième chiffre indique :

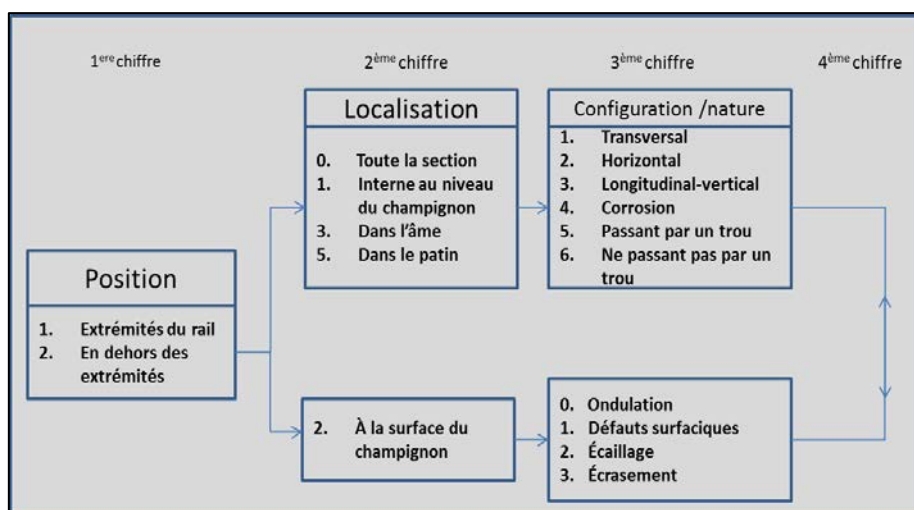
La nature ou l'orientation (par rapport aux axes du rail définis précédemment) du défaut dans le cas d'une rupture ou d'une fissure du rail.

La cause ou l'origine du défaut dans le cas d'endommagement du rail.

L'orientation ou le type du défaut dans le cas d'un défaut de soudure ou de meulage.

- Le quatrième chiffre n'est utilisé qu'en cas de besoin spécifique.

Sur la base de ce code et en s'inspirant du classement des défauts effectué dans [2], nous pouvons classer certains défauts comme suit :



Une transcription de ce schéma permet de codifier certains défauts (tableau ci-dessous). Ce code a pour but de simplifier et d'uniformiser au niveau international, l'appellation des défauts présents notamment dans les rails de chemin de fer.

UIC	Type de défaut	Nature et localisation	Manifestation
113	défaut de fissuration longitudinale verticale	défauts se trouvant sur les extrémités du rail	ils peuvent se développer et entraîner la rupture du champignon
211	Tache ovale dans le champignon	discontinuité interne de forme ovale dans le rail	il se propage vers la surface du rail et peut devenir visible au niveau de la face du web (âme)
212	fissuration horizontale	fissuration horizontale sur le long de la surface de roulement du rail	discontinuités internes qui peuvent causer des dépressions locales à la surface de roulement
221	désintégration de la surface de roulement	désagrégation progressive de la surface de roulement du rail	Fissure, Enlèvement de matière, Affaissement sur la surface de roulement
2201	ondulation régulière	ondulation périodique avec une longueur d'onde [3-8 cm]	l'oscillation à haute fréquence de la piste comportant une résonance et qui conduit à des contraintes élevées sur le rail, à la fatigue des traverses en béton avec une rupture possible du lit du rail, desserrage des écrous de fixation et une usure accélérée des tampons et des clips,
2202	Ondulation à grande période régulier	ondulation surfacique périodique avec une longueur d'onde [8-30cm]	pareille que 2201, il se produit principalement sur des endroits où les rails présentent des courbures de 600m et plus petites
2203	usure latérale		Ce type de défaut touche généralement l'extrémité des courbures de la voie, l'usure latérale peut devenir dangereuse au-delà d'un certain point, car il affecte l'écartement des rails. (elle réduit la durée de vie)
2221	écaillage du banc de roulement (schelling)		Déformation irrégulière de la surface de roulement est observée avant la formation de coquille, de quelques millimètres de profondeur dans le rail. La section latérale de ces coquilles est très variable. Ce type de défaut n'est un d'isolé car il se produit toujours sur une large zone
2222	creux sur les coins du champignon		ils se produisent de la même manière que l'UIC2221. et après une période d'évolution, la matière se désintègre et fini par la formation de trous sur le coin du champignon
Head-check	écaillage du congé de roulement		ce type de défaut apparait dans la zone du congé de roulement du rail extérieur en courbe

1.2.3 Les défauts dans le champignon du rail

Parmi les défauts rencontrés dans le rail en voie, hormis les défauts d'usure du profil, ceux causés par la fatigue de contact roue-rail sont les plus fréquents. Ils peuvent, s'ils ne sont pas détectés à temps, proliférer et conduire à des ruptures de rail et par conséquent, constituent un

risque d'accident potentiel pour le transport ferroviaire. Ces défauts peuvent être classés en trois groupes selon leur origine :

Fissures causées par des défauts de fabrication du rail (ex : les fissures verticales (VSP Vertical Split Head), qui sont dues à des problèmes métallurgiques pendant la fabrication du rail).

Les défauts dus à la manipulation et à l'utilisation inappropriée (ex : l'écaillage de la surface de roulement dû aux brûlures de la roue UIC2221).

Les défauts de fatigue par contact de roulement (FCR) (exemple : les squats (UIC221) et les head-checks.

De nos jours, avec les avancées technologiques dans l'industrie métallurgique mais aussi du fait des avancées de la recherche, les propriétés physicochimiques du rail sont mieux maîtrisées, de même que les procédés de fabrication [3]. Ceci conduit à une forte évolution de la qualité des rails. Par conséquent, les défauts les plus couramment rencontrés sont ceux causés par fatigue de contact (FCR) roue-rail.

L'augmentation du tonnage de fret transporté par rail plus de 17%, en 2001, la croissance du nombre d'usagers (par exemple au Royaume-Uni, plus de 50% de voyageurs entre 2003 et 2013) et de la course à la grande vitesse avec l'avènement des TGVs ont occasionné la densification du trafic ferroviaire [4]. Cela provoque une augmentation du chargement mécanique appliqué au rail et par conséquent la fatigue du rail au niveau de la zone de contact roue-rail, généralement appelée «bande de roulement» où la répartition des contraintes en surface est plus importante. Ceci se traduit généralement par la rupture du matériau au niveau de cette zone avec l'apparition de fissures de faibles dimensions telle que les squats et les head-checks qui peuvent se propager et atteindre des dimensions critiques à long terme.

Nous présentons dans les sections suivantes, trois types de défauts qui sont souvent présents dans le champignon du rail.

1.2.3.1 Les fissures verticales (VSP) UIC213

Les fissures verticales (Vertical Split Head, UIC 113 et 213) sont des défauts principalement dus à des problèmes métallurgiques pendant la fabrication des rails. Elles occasionnent une fissuration du rail en interne et peuvent se propager sur une longueur pouvant aller jusqu'à 120 mètres dans l'axe longitudinal du rail, entraînant la rupture du champignon sur une longueur conséquente.



Figure 4 : Fissures verticales [5]

1.2.3.2 Les squats

Les squats sont des fissures qui apparaissent et se propagent dans le champignon. Au premier stade, la fissuration apparaît sur une profondeur jusqu'à environ 4 mm, formant un angle ouvert de (10° à 30°) par rapport à la surface extérieure du rail. Ensuite, en fonction de la distribution des contraintes, deux directions de propagations sont possibles:

Une propagation vers l'extérieur provoquant une perte de matière ou un écrasement, ce qui laisse une cavité à la surface (figure 5).

Une propagation vers l'intérieur du champignon, dans le sens vertical, ce qui provoque la rupture du rail dans de nombreux cas (figure 6).



Figure 5 : Squat : écrasement superficiel [6]

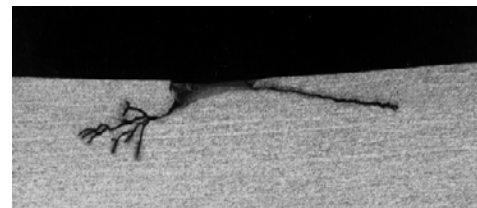
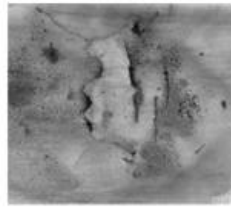


Figure 6 : Squat : propagation vers l'intérieure [6]

Les squats se traduisent par l'écrasement de la bande de roulement. Ils provoquent de forts impacts roue-rail lorsqu'ils sont en contact, pouvant causer l'usure du rail et celui de la roue, mais aussi une nuisance sonore élevée quand le train roule à grande vitesse. Les vibrations résultantes de la structure ferroviaire peuvent entraîner le desserrement des écrous sur le train et/ou sur les fixations du rail.

1.2.3.3 Les head-checks

Ce sont des fissures ouvertes à la surface du rail présentant une grande densité au mètre, principalement sur la face de roulement du rail extérieur des parties en courbe. En fonction des conditions climatiques locales, de la qualité et du profil du rail, des fissures parallèles apparaissent espacées de 1 à 7 mm environ les unes des autres, se propageant à un angle de 25° vers l'intérieur du champignon pour reprendre ensuite, dans bien des cas, un tracé parallèle à la surface de roulement ou s'orientant vers le bas. Ces fissures se réunissent bien souvent, provoquant la rupture du matériau sur la face de roulement ou des ruptures multiples du rail sur plusieurs mètres.

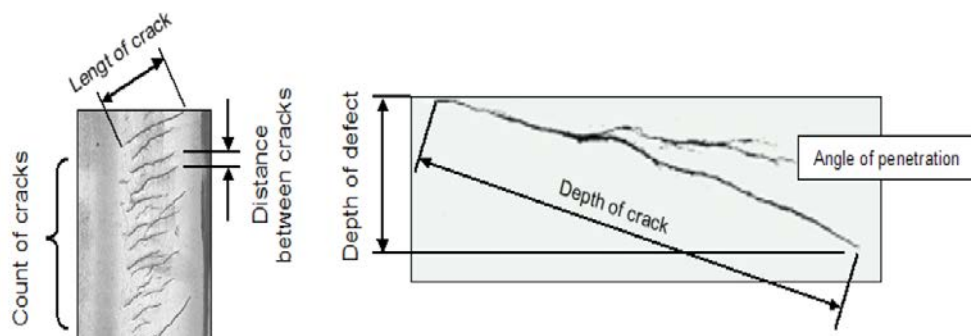


Figure 7: head-check [7]

1.2.4 Propagation des défauts

Suivant l'initiation d'une fissure, nous pouvons noter différentes phases de son évolution au cours du temps (figure 8). En fonction du niveau des sollicitations (mécanique, climatique...) les vitesses de propagation et la sévérité de la fissure diffèrent. Cependant, quelle que soit leur nature, ces fissures, si elles ne sont pas détectées rapidement, sont potentiellement dangereuses.

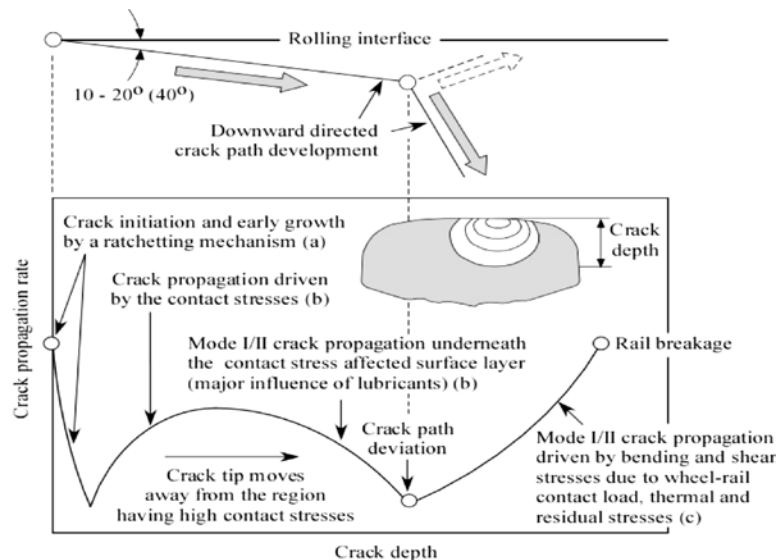


Figure 8: Modes d'évolution d'une fissure initiée à la surface du rail [6]

1.3 Les méthodes de contrôles non destructifs dans le domaine ferroviaire

Les gestionnaires de l'infrastructure ferroviaire manifestent un intérêt grandissant dans le développement de nouvelles techniques pour l'évaluation fiable et précise des rails afin de résoudre la problématique des ruptures de rail (figure 9). L'objectif de ces nouvelles techniques sera d'améliorer l'efficacité de la maintenance préventive afin d'anticiper la rupture du rail avec des plannings de réparation par meulage ou par le remplacement des sections endommagées de manière beaucoup plus adaptée. Ces ruptures présentent généralement des coûts de maintenance exorbitants et peuvent occasionner des accidents graves si elles ne sont pas identifiées à temps.

Par exemple, sur le plan économique, on dénote plus de 100 ruptures de rail en Europe chaque année, ce qui représente, d'après, une estimation de l'Union Européenne (UE) en 2001, des coûts de maintenance de l'ordre de 300 M€ annuel. Mais aussi sur le plan sécuritaire, ces ruptures peuvent être à l'origine de catastrophes, comme c'était le cas en 1992 à Wisconsin, un accident dû à un déraillement de train causé par une fissure transverse qui n'avait pas été détectée lors des séances d'inspection [8] et en octobre 2000 avec le tragique accident à Hatfield suite à un déraillement de train en raison d'une rupture de rail.

Depuis les années 70, avec le développement des techniques d'inspection non destructives, le nombre de défauts détectés dans le rail n'a cessé de s'accroître comme le révèle la figure 9.

Cela a permis, grâce à des séances de maintenance appropriées, de stabiliser le nombre de ruptures de rail malgré la croissance des sollicitations de la structure ferroviaire.

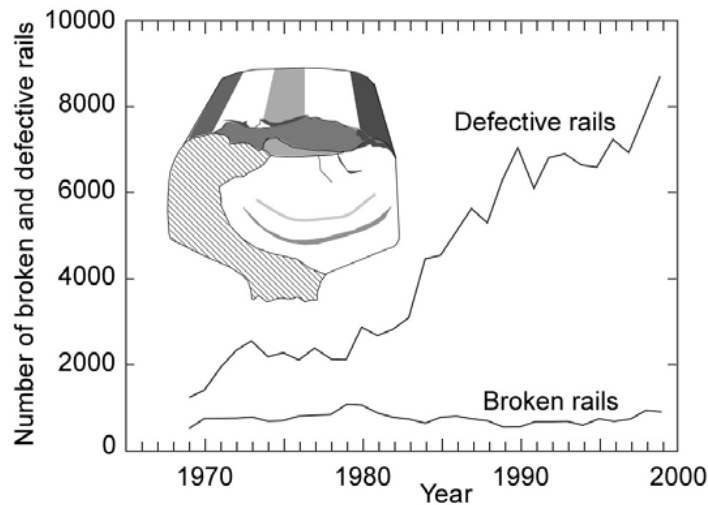


Figure 9: Effet de la croissance des méthodes CND sur le nombre de ruptures de rails en UK [6]

Dans cette partie, nous présenterons un bref historique des techniques utilisées ou en cours de développement pour l'inspection non destructive des rails.

Suivant la nature du matériau et le type de défaut, plusieurs méthodes d'inspection non destructives existent. Parmi ces méthodes nous pouvons citer la thermographie, les méthodes à induction magnétique MFL (Magnetic Flux Leakage), ACFM (Alternating Current Field Measurement) et CF (Courants de Foucault), l'inspection visuelle et le contrôle par ultrasons. En réalité les processus de contrôle du rail peuvent être subdivisés en deux catégories.

La première regroupe les procédures statiques, qui concernent plus souvent la caractérisation des défauts, la vérification et la validation de certains résultats issus des inspections dynamiques.

La seconde est relative à une procédure d'inspection automatisée qui vise plus particulièrement à la détection de défauts avec mouvement relatif.

1.3.1 Méthodes de contrôle ultrasonore du rail par ondes de surface en statique

Auparavant, la technique de contrôle du rail s'effectuait manuellement avec des systèmes d'inspection portatifs. De nos jours, avec l'essor des systèmes de détection automatisés, les méthodes statiques, s'orientent de plus en plus vers la caractérisation des défauts, la vérification et la validation de certains résultats indécis issus des inspections automatiques.

Nous nous limiterons dans cette partie uniquement aux méthodes de contrôle ultrasonore.

En effet, la localisation et la caractérisation des défauts reposent respectivement sur l'analyse du temps de vol de l'onde réfléchiée par un obstacle (défaut) et sur la comparaison d'amplitude du signal par rapport à un autre signal de référence ou sur l'analyse du contenu fréquentiel.

Dans les années 70, la majeure partie des publications concernant les ondes de surface utilisées pour l'inspection du rail, utilisaient des fréquences de quelques MHz. Parmi elles nous pouvons citer celle de Halle [9] qui utilise des transducteurs piézoélectriques, en configuration pitch-catch, émettant des ondes de Rayleigh à 4,2 MHz pour déterminer la profondeur des défauts mais également pour suivre l'état des fissures durant les essais de fatigue. L'utilisation de ces fréquences permet d'avoir de courtes longueurs d'onde, de l'ordre de 0,7 mm, pour la caractérisation des fissures millimétriques.

De nos jours, une partie importante des publications s'intéresse à l'utilisation des ondes de surface à basse fréquence, pour lesquelles les longueurs d'onde sont plus importantes. Elles sont moins sensibles aux rugosités de surface et peuvent se propager sur des distances encore plus longues. Ces ondes de surface permettent aussi d'explorer des zones plus profondes.

Des méthodes d'inspection sans contact utilisant des ondes de surface à basse fréquence ont été développées par de nombreux instituts de recherche, telles que l'Université de Warwick [9], l'Imperial College [10] en Angleterre et l'Université de Pennsylvanie aux USA [11].

En effet, la longueur et la profondeur des défauts FCR apparues sur la tête du rail peuvent se propager respectivement jusqu'à 25 mm et 10 mm, pour ensuite se propager de manière accélérée. Afin de détecter et de dimensionner ces défauts de petite taille, des ondes de surface dans la gamme fréquentielle de 200-400 kHz sont utilisées par Edwards et al. [9] puis par Chao et al [12].

L'utilisation des transducteurs acoustiques électromagnétiques (EMAT) comme méthode d'inspection dans l'industrie ferroviaire, a fait l'objet de plusieurs études. Beaucoup de travaux ont été effectués par des chercheurs Britanniques pour la caractérisation en statique des défauts surfaciques (2,5 à 15 mm de profondeur) dans le rail avec des ondes de Rayleigh [9], [13], [14], mais aussi avec des ondes SH [15]. Les fréquences utilisées sont comprises entre 50 et 500 kHz.

Rosli et al [16] ont caractérisé des fissures artificielles transverses, de profondeur comprise entre 2 mm et 10 mm et inclinées de 25° par rapport à la surface de roulement du rail, en utilisant des EMATs sous la configuration émetteur-récepteur. La fréquence centrale des ondes de Rayleigh générées est de 200 kHz dans une bande comprise entre 50-500 kHz.

Avec le développement des sources laser et de la métrologie optique, le contrôle non destructif a connu un essor important avec l'utilisation des méthodes optiques pour la génération et la détection d'ondes ultrasonores. Dans le domaine ferroviaire ces méthodes, dites méthodes Ultrasons-Laser, sont utilisées pour la détection et la caractérisation de défauts surfaciques et internes du rail.

L'interaction des ondes de surface avec des défauts surfaciques dans le rail a été étudiée par Kim et al [17]. Le système utilisé est constitué d'un laser impulsionnel Nd:YAG pour la génération d'ondes ultrasonores et d'un vibromètre laser à effet Doppler pour la détection. Des défauts surfaciques dont la profondeur est inférieure à 5 mm ont été détectés avec des ondes surfaciques (ondes de Rayleigh).

Des méthodes de contrôle hybrides sont aussi parfois utilisées. Par définition, une méthode CND est dite hybride lorsqu'elle est réalisée avec la combinaison de deux ou plusieurs technologies distinctes, l'une pour la génération et l'autre pour la détection. Cette combinaison est souvent motivée pour la plupart, par un besoin de surmonter certaines limitations techniques que peuvent présenter l'une ou l'autre méthode suivant les exigences du contrôle. Mais aussi, elles sont souvent utilisées comme moyen de comparaison afin de valider la fiabilité des résultats [18].

Dans le cas de la méthode laser, un des soucis majeur provient souvent de la sensibilité de détection dépendant du pouvoir réflecteur de la surface (rugosité, propreté,...), il est parfois envisagé de combiner la génération par une source laser soit avec des transducteurs couplés par air [14], [19], [20], soit avec des transducteurs électromagnétiques pour la réception, dans le but de détecter des fissures dans le rail [21], [22].

1.3.2 Méthodes de contrôle automatisé du rail avec déplacement relatif

1.3.2.1 Les méthodes visuelles

Des systèmes de détection visuelle ont été développés pour la recherche de déformations du profil, de boulons manquants ou desserrés, de fissures débouchantes à la surface du rail ou au niveau de la roue...

La mise en place de systèmes d'Inspection Visuelle Automatisée (IVA) constitue un gain de temps considérable comparé aux techniques manuelles. Cependant, il existe sur le marché des systèmes d'IVA performants. Parmi eux, on peut citer celui fabriqué par la société ZG OPTIQUE SA et la société MERMEC. Ces systèmes équipés de sources lasers dont le principe consiste à envoyer un faisceau laser sur la surface de l'échantillon, la variation de l'amplitude du faisceau réfléchi par la surface permet de recueillir des informations sur le profil de la structure testée. Ce sont des systèmes performants pour détecter des irrégularités en surface du champignon mais aussi pour la mesure du profil du rail. Les vitesses d'inspection peuvent aller théoriquement jusqu'à 350 km/h. Il existe aussi des systèmes équipés de caméras à haute résolution [23], qui permettent de détecter les déformations de profils, des pièces manquantes dans l'infrastructure de la voie ferrée, mais aussi des défauts avec de grandes ouvertures en surface.

Cependant, ces méthodes visuelles sont très limitées pour évaluer la sévérité d'un défaut en profondeur et restent généralement utilisées pour le contrôle du profil superficiel du rail ainsi que les autres éléments de la voie ferrée.

1.3.2.2 Les méthodes électromagnétiques

La méthode d'inspection par Courants de Foucault (CF) est une méthode électromagnétique. Lorsque l'on place un matériau conducteur électrique dans un champ magnétique variable dans le temps, des courants induits appelés courant de Foucault, se développent à l'intérieur de celui-ci.

Ce courant variant dans le temps, crée un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation. Ainsi, pour la détection de la perturbation, le flux magnétique créé par les

courants induits, modifie l'impédance de l'inducteur ou de la bobine électrique suivant l'instrument utilisé pour induire ce courant. L'analyse de cette variation donne des informations exploitables pour contrôler le matériau. Cette méthode est utilisée dans plusieurs secteurs industriels comme dans l'aérospatial et le ferroviaire.

Un prototype de système d'inspection mobile par courant de Foucault, a été développé et testé au Canada. Ce système dénommé DYNATRAK 2 est équipé de sondes à courant de Foucault (figure 10) performantes pour la détection de head-checks sur le champignon du rail.

SPENO International et le BAM (l'Institut fédéral Allemand pour la recherche sur les matériaux et les essais) en collaboration avec le réseau ferré d'Allemagne, ont récemment intégré des sondes à CF sur un train de meulage [24].

Avec les systèmes à CF, il est possible d'inspecter les head-checks contenus dans le rail pour des vitesses inférieures à 100 km/h. Des tests effectués par Krull et al. [25] ont d'ailleurs, permis de mettre en évidence une bonne corrélation entre les résultats d'essais statiques et ceux réalisés à 76 km/h.

Comme la majeure partie des méthodes électromagnétiques, les capteurs CF perdent très vite leur sensibilité par rapport à l'entrefer. Pour un fonctionnement optimal, cet entrefer est de l'ordre de 1mm (distance entre la sonde et le rail).

Un des inconvénients des sondes à CF réside d'une part au niveau de la profondeur de pénétration δ des CF qui est donnée par la relation $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}}$; (avec f : la fréquence, μ : la perméabilité magnétique du matériau et σ : la conductivité électrique du matériau).

Une augmentation de la fréquence provoque une atténuation encore plus rapide des C.F. en fonction de la profondeur dans le matériau. De plus, il peut y avoir, pour des fréquences élevées, des phénomènes capacitifs parasites engendrés par les capacités inter-spores de la sonde.

Une baisse de la fréquence permet d'augmenter la pénétration des courants mais en contrepartie, la sensibilité de la méthode est fortement réduite. D'autre part cette méthode ne mesure que les variations d'impédance de la bobine qui sont dues à la présence des défauts. Il est donc nécessaire d'avoir une collection de défauts étalons pour calibrer la méthode. On peut également mesurer le champ magnétique généré, dans ce cas cette méthode, nécessite une analyse mathématique poussée pour corréliser les caractéristiques du défaut au champ magnétique de façon à réaliser une imagerie du défaut et non pas une imagerie de champs.



Figure 10 : Le système DYNATRAK 2 [26]

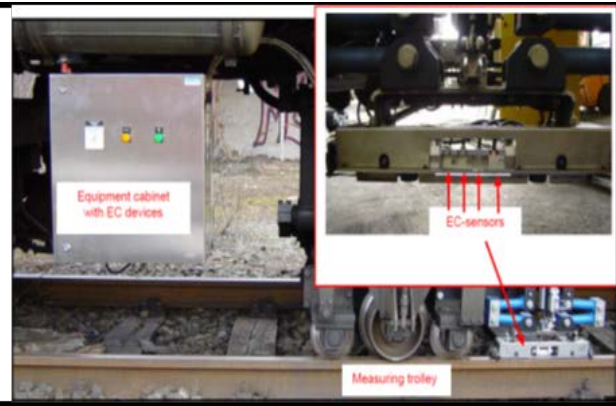


Figure 11 : Système de mesure par CF, embarqué sous le train de meulage [24]

Il existe aussi d'autres méthodes telles que la méthode MFL et la méthode ACFM, qui sont toutes pratiquement similaires au principe de la méthode CF. La méthode ACFM en particulier, est une méthode de contrôle non destructif, qui est basée sur l'utilisation d'une source de courant électrique alternatif pour alimenter l'inducteur. Ceci permet d'avoir un contrôle sur le champ magnétique induit à l'intérieur du matériau sous test, contrairement à la méthode CF. Ce champ induit se propageant dans l'échantillon sera perturbé en présence d'irrégularités. Pour détecter cette perturbation, un champ magnétique est placé au voisinage pour détecter les variations du champ magnétique induit. Son application s'étend à tous les matériaux conducteurs électriques. Dans le domaine ferroviaire, la méthode ACFM a été utilisée pour la caractérisation de défauts FCR au Royaume Uni [27] et au Portugal. Cette méthode basée sur la mesure de perturbations du champ magnétique, permet de détecter et de caractériser des défauts FCR (tel que les head-check) présents sur la tête du rail, avec des résolutions de mesure de l'ordre de 2mm en profondeur. C'est une méthode qui peut se faire sans contact (lift-off ≈ 2 mm) avec des vitesses d'inspection qui peuvent aller jusqu'à 3 km/h [27]. Elle nécessite l'emploi de générateurs à fréquence élevée (5 kHz à 50 kHz). Une des limites de cette méthode provient de sa sensibilité à l'épaisseur (par rapport à l'axe transversal) de la fissure.

1.3.2.3 La thermographie

La thermographie est aussi une méthode d'évaluation de défauts. Elle est apparue avant la mise au point des caméras infrarouges (IR). Les premières applications pour la détection de défauts remontent aux années 1960, mais avec le développement de la caméra IR à la fin des années 1970, cette méthode a connu une révolution notamment avec la possibilité de détecter des contrastes de température sur de vastes zones d'inspection. Elle a été utilisée pour la mesure de profondeur de squats ouverts en surface [28]. L'analyse des courbes de contraste de phase révèle que la résolution de cette méthode est de l'ordre de 5 mm.

Le principal avantage de la thermographie sur les autres méthodes est qu'elle couvre des surfaces d'inspection plus grandes en peu de temps (idéal pour l'industrie). Mais, en revanche la résolution des mesures est faible.

1.3.2.4 Contrôle ultrasonore ‘traditionnel’ (capteurs piézoélectriques)

Traditionnellement les techniques de CND ultrasonores disponibles pour l’inspection des structures ferroviaires, s’effectuaient avec des méthodes par contact, notamment avec l’utilisation des transducteurs piézoélectriques. Ces méthodes habituelles n’assuraient pas les niveaux de fiabilité requis pour des inspections dynamiques préventives de défauts surfaciques du rail. En effet, la génération des ondes de surface avec les transducteurs piézoélectriques, nécessite l’utilisation du principe de changement de mode par réfraction, ce qui n’est pas facile à mettre en œuvre dans le cas d’une inspection avec déplacement relatif, car le liquide de couplage déposé sur le rail atténue les ondes de Rayleigh.

Un problème qui peut aussi se poser avec cette méthode ultrasonore classique est l’exigence d’avoir des transducteurs piézoélectriques couplés acoustiquement à la structure comme les roues (figure 12), à l’aide d’un milieu de couplage telle que de l’huile ou de la graisse ou encore, avec l’utilisation d’un système de projection d’eau sur la roue ou le rail.

Son application s’oriente plus souvent pour la détection de défauts internes. Dans ce sens, il existe des systèmes de détection ultrasonore à base de transducteurs piézoélectriques qui sont embarqués dans un train pour des inspections dynamiques du rail. Parmi eux, nous pouvons citer celui développé par la société EURAILSCOUP, cette société a mis en place un système pour inspecter des défauts internes du rail. Ce système permet de contrôler le rail avec des vitesses de déplacement théoriques allant jusqu’à 100 km/h.

Il y a aussi la société Scan-Master qui a développé un système similaire à celui d’EURAILSCOUP.

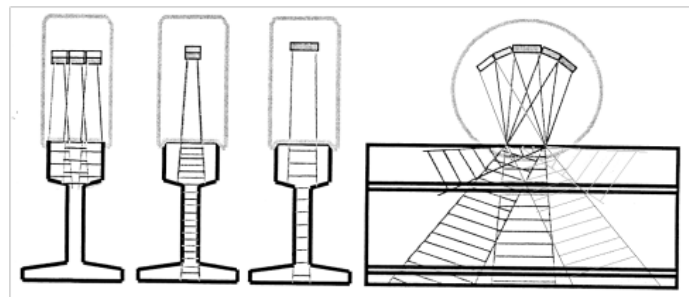


Figure 12 : Plusieurs transducteurs ultrasonores disposés à des angles différents afin d'augmenter la capacité de détection globale du système [5]

La majeure partie des systèmes existant annonce des vitesses théoriques d’inspection pouvant aller de 40 à 70 km/h [29], [30], et jusqu’à 100 km/h avec la nouvelle génération de véhicules [31]. Par ailleurs à ces vitesses, un pourcentage élevé des défauts décelés (70% à 80%) représente de fausses indications après vérification par des tests manuels [29].

Par conséquent, les méthodes d’inspection ultrasonore traditionnelles sont limitées en termes de rapport fiabilité et vitesse. Mais aussi, les rapports coûts/efficacités ne sont pas favorables pour l’industrie ferroviaire dans le cadre d’inspections surfaciques du rail.

1.3.2.5 Ultrasons-multiéléments

Actuellement, il existe d'autres applications dérivées des transducteurs piézoélectriques, notamment les multiéléments.

Les transducteurs multiéléments ont été utilisés pour l'évaluation des soudures de rails, mais leur application s'étend à d'autres secteurs industriels. Le CEA (Commissariat de l'Energie Atomique) en collaboration avec la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) a mis en place une méthode d'inspection ultrasonore pour la détection de défauts dans le rail, telles que les inclusions. Cette méthode repose sur la mise en œuvre d'un transducteur multiéléments associé à un traitement de données spécifique [32]. A ce jour, les multiéléments ne permettent pas de générer des ondes surfaciques. Par conséquent, cette méthode est plus adaptée à la détection et à la caractérisation de défauts plus en profondeur. Ainsi, SPENO INTERNATIONAL S.A a développé un système de contrôle mobile du rail à base de transducteurs multiéléments [33]. Le capteur émet à des angles compris entre -70° et $+70^\circ$ afin d'avoir un champ ultrasonore plus large (figure 13). Les vitesses d'inspection annoncées peuvent aller jusqu'à 80 km/h.

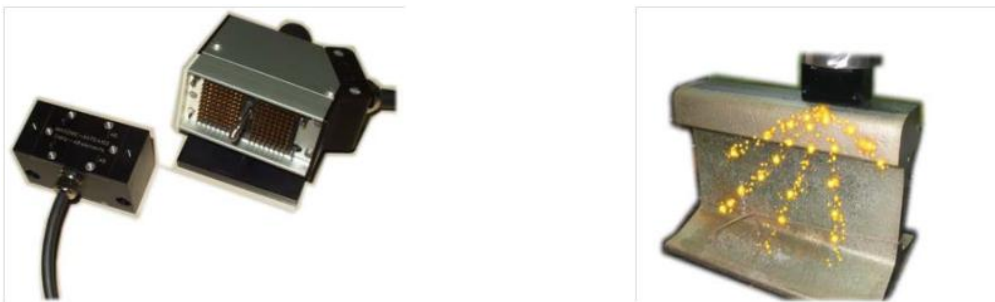


Figure 13: Transducteur multiéléments (SPENO)

1.3.2.6 Application de la méthode des Ultrasons-Laser dans le rail ferroviaire

La méthode Ultrasons-Laser n'est pas la méthode la plus courante dans le secteur ferroviaire du fait de sa complexité de mise en œuvre. Cette complexité est d'autant plus élevée dans le cadre d'un contrôle des rails à vitesse d'exploitation.

Néanmoins, il existe des systèmes en phase de développement. C'est le cas du système LURI (Laser Ultrasonics for Rail Inspection) [34], qui est développé par la division innovation et contrôle non destructif de FORCE Technology en collaboration avec le laboratoire national de recherche optique plasma du Danemark. LURI est constitué par une unité de commande et une unité optique pour la génération et la détection d'ondes ultrasonores. L'ensemble est embarqué dans un train pour l'inspection en mode dynamique. Les vitesses d'essais peuvent aller jusqu'à 40 km/h, avec une perte de la fiabilité des mesures lorsque la vitesse d'inspection augmente. Ce système peut générer trois types d'ondes : les ondes longitudinales, les ondes transversales et les ondes de Rayleigh. Les défauts testés avec le système LURI sont : des défauts internes au niveau du champignon du rail (UIC211, UIC212 et UIC213) et au niveau de la base (UIC2321) et des ruptures complètes de la section du rail (UIC200). Ils annoncent

aussi avoir effectué des essais sur des défauts surfaciques du type (UIC222) sans publier les résultats.

Le TTCI (Transportation Technology Center, Inc.) (Colorado U.S.), en collaboration avec TECNOGAMMA (Italie) a développé aux États-Unis un système Ultrasons-Laser pour la détection de défauts cités ci-dessus [35]. Les vitesses de contrôle peuvent aller jusqu'à 32 km/h, mais de manière raisonnable la vitesse qui offre des mesures fiables se situe entre 8 km/h et 15 km/h. À ce jour, pour ces deux systèmes, leur utilisation pour la détection de squats ou de head-checks n'a pas été précisée.

1.3.2.7 Application de la technologie des ultrasons-EMAT dans le rail ferroviaire

Depuis les années 1970, les transducteurs EMATs ont commencé à être étudiés dans le but de développer des moyens de détection de défauts sans contact. Leur conception et leur instrumentation ont été facilitées par la genèse de modèles physiques [36], [37].

Edwards et al. [38] ont travaillé sur la mise au point d'une méthode EMAT utilisant la génération d'ondes de Rayleigh pour la caractérisation de fissures sur la bande de roulement du rail avec déplacement relatif.

Dans le projet I-RAIL (Intelligent On-line High-Speed Rail) financé dans le cadre du 7^{ème} PC de la recherche au profit des PME et regroupant 10 partenaires de 5 pays européens, un système d'inspection ultrasonore utilisant la technologie EMAT a été mis en place [39]. Ce système achevé depuis octobre 2012, a subi plusieurs séries d'essais au Portugal à des vitesses allant jusqu'à 15 km/h. Le type d'onde utilisé est l'onde de Rayleigh sur une gamme de fréquences comprise entre 100kHz ($\lambda \approx 30$ mm) et 600 kHz ($\lambda \approx 5$ mm), le lift-off (entrefer) maximal est de 2 mm sous la configuration pitch-catch (constituée d'un EMAT pour la génération et de plusieurs EMATs pour la réception). Des essais en laboratoire ont permis de détecter des défauts à la surface du rail (défauts du type : GCC (Gauge Corner Cracking), fissure surfaciques...) comme l'indique la figure 14. Cette figure représente l'influence de chaque défaut (ou de l'absence de défaut) sur la propagation des ondes de Rayleigh dans le rail.

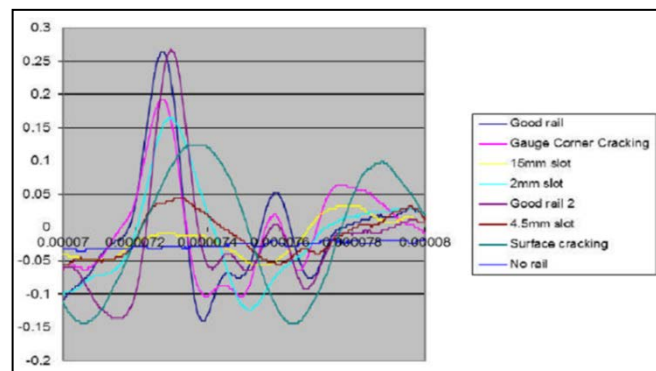


Figure 14: Courbes montrant les résultats de tests par EMAT pour différents types de défauts sur rail [39]

1.3.3 Mise en évidence de la pertinence du choix des technologies utilisées

Ce tableau synthétise la spécificité des différentes méthodes de contrôle non destructif illustrées dans ce document. Son analyse permet de justifier le choix que nous avons effectué pour ces deux méthodes (Ultrasons-Laser et EMAT) pour la détection de fissures de petite taille à la surface du champignon. Il ne s'agira pas là, de faire une comparaison qualitative de ces méthodes, mais plutôt, un choix de celles qui répondront le mieux à la problématique de notre recherche.

Méthodes CND	Spécificité	Défauts détectés	Performances générales	Fiabilité pour détecter des défauts surfaciques initiaux
Ultrasons conventionnels	Manuelle ou automatique (>70 km/h)	Surfaciques (dans le champignon du rail) et Volumiques (web et base du rail).	-Inspection manuelle fiable mais peut manquer certains défauts se trouvant à la base. - À grande vitesse : peu sensible aux défauts surfaciques de profondeur <5 mm et les défauts internes dans la base.	Peu fiable
MLF	Systèmes automatiques (jusqu'à 35km/h)	Surfaciques et sub-surfaciques au niveau du champignon	peu sensible aux défauts surfaciques de profondeur <5 mm. Courte durée de vie	Peu fiable
PEC	Manuelle ou automatique (jusqu'à 70 km/h)	Surfaciques et sub-surfaciques	Fiable mais très affectée par l'état de surface et les variations du décollement.	Fiable mais très affectée par l'état de surface et les variations du décollement
Inspection visuelle	Manuelle ou automatique (jusqu'à 320 km/h)	Fissures débouchantes, profil du champignon, ondulation de la bande de roulement, pièces manquantes, ballast défectueux	-Fiable pour la détection d'ondulations, de profil du champignon, de pièces manquantes et ballast défectueux à grande vitesse. -Peu fiable pour détecter des fissures à la tête du rail pour des vitesses >4 km/h. -Impossible de détecter des défauts internes	Pas fait pour la détection des fissures de petites tailles surfaciques et sub-surfaciques
EMAT	Manuelle ou automatique (jusqu'à 10 km/h)	Fissures surfaciques sur le champignon, le web et la base Volumiques	-Fiable pour détecter les défauts surfaciques et volumiques dans le champignon -Mais affecté par le décollement	Bonne fiabilité
Ultrason laser	Manuelle ou automatique (jusqu'à 10 km/h)	- Fissures surfaciques sur le champignon, le web et la base - Fissures volumiques	-Fiable pour détecter les défauts surfaciques et volumiques -Mais affecté par les variations du décollement -Difficile à mettre en œuvre pour des vitesses élevées	Bonne fiabilité et avec une bonne résolution

Pour le contrôle du rail en surface avec des vitesses importantes, ces deux méthodes répondent mieux à notre cahier des charges. Ainsi, nous détaillerons le principe, les avantages et les limites de chacune de ces deux méthodes dans le chapitre suivant.

1.4 Les ondes ultrasonores

1.4.1 Présentation des différents types d'ondes

Par définition, les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui ont une fréquence supérieure à 20 kHz. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu et du type d'onde [40]. La gamme de fréquences classique est comprise entre 500 kHz et 20 MHz. Cependant, en imagerie on peut utiliser des fréquences de l'ordre de 100 à 200 MHz et au-delà du Gigahertz le terme utilisé est hyper-son. De manière générale, la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore dépend de la masse volumique et des propriétés élastiques du milieu dans lequel elle se propage.

Il existe deux catégories d'ondes ultrasonores dans les solides. Les ondes volumiques qui se propagent à l'intérieur de la structure étudiée et les ondes guidées.

1.4.1.1 Les ondes volumiques

Dans le cas d'un solide isotrope considéré comme infini, deux ondes peuvent se propager :

D'une part on trouve les ondes longitudinales qui peuvent être définies comme des ondes de compression et dont sa polarisation est parallèle à la direction de propagation. Elles se propagent dans le matériau avec une vitesse supérieure aux autres ondes. Par exemple dans l'acier sa vitesse est de l'ordre de 5940 m/s.

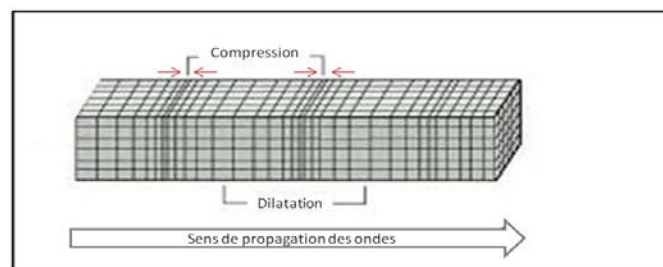


Figure 15: Propagation d'une onde longitudinale

D'autre part, il existe les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement qui sont polarisées perpendiculairement à la direction de propagation. Leur vitesse de propagation est toujours inférieure à celle de l'onde longitudinale, elle est de l'ordre de 3240 m/s dans l'acier.

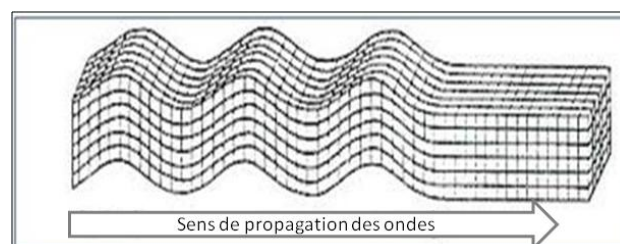


Figure 16 : Propagation d'une onde transversale

Ces ondes sont généralement utilisées en contrôle non destructif pour le contrôle des soudures, en utilisant des ondes réfractées à différents angles (45° , 60° et 70°). Elles peuvent également être utilisées pour la détection de défauts internes du rail.

1.4.1.2 Les ondes surfaciques ou ondes guidées

Les ondes de surface ou ondes Rayleigh sont des ondes guidées par la surface libre du solide, elles se propagent au voisinage de la surface dans les solides semi-infinis, nous les présenterons dans la section suivante. Les principaux modes guidés que l'on peut générer dans un solide dont l'épaisseur est proche de la longueur d'ondes sont les modes de Lamb symétriques ou antisymétriques et les ondes SH.

1.4.1.3 Les ondes de surface de type Rayleigh

Dans le cas d'un solide semi-infini tel que le rail, l'onde guidée qui s'y propage a les mêmes propriétés que l'onde de Rayleigh.

Ce sont des ondes élastiques qui se propagent à la surface d'un solide semi-infini (ondes de Rayleigh) de façon guidée sur de longues distances.

Cette onde a été découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Elle possède un déplacement elliptique, assez semblable à celui du mouvement des vagues, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical «rétrograde» à faible profondeur et «prograde» pour une profondeur supérieure au cinquième de la longueur d'onde ($z \cong 0.2\lambda_R$).

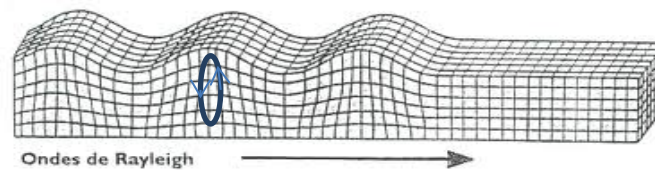


Figure 17: Propagation d'une onde de Rayleigh

Son énergie acoustique est concentrée à la surface de l'échantillon dans une épaisseur de peau (de l'ordre de la longueur d'onde). Elle est polarisée dans le plan sagittal, constituée d'une composante longitudinale et transversale (déphasées de $\pi/2$). Sa vitesse de propagation est de l'ordre de 2940 m/s dans l'acier. Son énergie est moins atténuée en fonction de la distance de propagation que celle des ondes volumiques. Ses caractéristiques font de cette onde un moyen intéressant pour la détection de défauts surfaciques. Par conséquent, nous accorderons un grand intérêt à ce type d'onde dans ces travaux de thèse.

Viktorov [41] a établi les relations des composantes de déplacement de l'onde de Rayleigh se propageant dans un demi-plan.

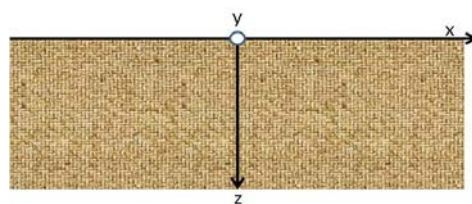


Figure 18 : Demi-plan occupé par l'échantillon

Il considère un plan de propagation de l'onde de Rayleigh harmonique situé entre un demi-espace solide, isotrope et parfaitement élastique et le vide. La région $z>0$ est occupée par le solide (figure 18). La propagation s'effectue suivant l'axe x . Puisque les déplacements sont indépendamment de y , il introduit un potentiel scalaire ϕ et un potentiel vecteur ψ dans l'expression du vecteur déplacement d'une particule :

$$v = \text{grad}\phi + \text{rot}\psi \quad (1)$$

Seule la composante du vecteur potentiel suivant l'axe y est supposée non nulle. Les potentiels ϕ et ψ sont respectivement appelés les potentiels d'onde longitudinale et d'onde transversale et vérifient la condition des équations d'onde suivantes :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_l^2 \phi = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_t^2 \psi = 0 \quad (3)$$

$k_l = \omega\sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}$ et $k_t = \omega\sqrt{\rho/\mu}$ sont les nombres d'onde des modes longitudinaux et transversaux respectivement. ω est la fréquence angulaire, λ et μ les constantes élastiques de Lamé, ρ est la masse volumique du milieu. Les composantes de déplacement des particules suivant les axes x et z sont respectivement données par U_x (déplacement in-plane) et U_z (déplacement out-of-plane) en fonction des potentiels :

$$U_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (4)$$

$$U_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

La recherche de la solution des équations (2 et 3) correspondant à la description d'une onde plane harmonique se propageant dans la direction positive de l'axe x , conduit à :

$$\phi = F(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (6)$$

$$\psi = G(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (7)$$

Les fonctions $F(z)$ et $G(z)$ sont obtenues en résolvant les équations différentielles résultant de la substitution des équations 6 et 7 dans 2 et 3 respectivement.

$$\phi = Ae^{-qz}e^{i(kx - \omega t)} \quad (8)$$

$$\psi = Be^{-sz}e^{i(kx - \omega t)} \quad (9)$$

Où, $q^2 = k^2 - k_l^2$; $s^2 = k^2 - k_t^2$,

L'insertion des expressions de ϕ et ψ dans les équations régissant les conditions aux limites, à savoir que les composantes de contrainte σ_{zz} et σ_{xz} s'annulent à la frontière $z=0$, permet d'obtenir les expressions finales des potentiels comme suit :

$$\phi = -Ae^{i(kx - \omega t) - qz} \quad (10)$$

$$\phi = iA \frac{2kq}{k^2 + s^2} e^{i(kx - \omega t) - sz} \quad (11)$$

Kest déterminé par l'équation caractéristique ci-dessous :

$$4k^2qs - (k^2 + s^2)^2 = 0 \quad (12)$$

Après remplacement et simplification, cette équation peut s'écrire sous cette forme :

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0 \quad (13)$$

Où $\eta = \frac{k_t}{k} = \frac{c}{c_t}$; $\xi = \frac{k_l}{k_t} = \frac{c_t}{c_l}$ (c_t et c_l représentent la vitesse de phase de l'onde transversale et longitudinale respectivement).

La relation 13 est souvent appelée équation de Rayleigh. Elle a 6 solutions dépendantes uniquement du coefficient de poisson (ν) du matériau. Parmi celles-ci, on pourra utiliser la solution correspondant à l'onde de Rayleigh se propageant à la surface libre du demi-plan dont l'approximation est donnée par la formule de Bergman:

$$\eta_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (14)$$

Pour ν variant entre 0 et 0.5, la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh varie monochromatiquement de $0.87c_t$ à $0.96c_t$. Il est facile de constater que cette vitesse n'est pas dispersive, puisque c_t et η ne dépendent pas de la fréquence. Cependant dans les milieux non homogènes, la vitesse de l'onde de Rayleigh peut être dispersive.

Les expressions (10 et 11) décrivent l'onde de Rayleigh, elles montrent que cette onde est la résultante de deux ondes non homogènes (une onde longitudinale et transversale) qui se propagent à la limite du demi-espace à la même vitesse et dont l'atténuation en fonction de la profondeur est régie par la relation $\exp\left(-\sqrt{k_R^2 - k_l^2} z\right)$ pour le mode longitudinal et par $\exp\left(-\sqrt{k_R^2 - k_t^2} z\right)$ pour le mode transversal. Ainsi, en intégrant ces expressions dans (4) et (5), la partie réelle des composantes du déplacement suivant x et z sont données par :

$$U_x = Ak_R \left(e^{q_{Rz}} - \frac{2q_R s_R}{k_R^2 + s_R^2} e^{-s_R z} \right) \sin(k_R x - \omega t) \quad (15)$$

$$U_z = Aq_R \left(e^{q_{Rz}} - \frac{2k_R^2}{k_R^2 + s_R^2} e^{-s_R z} \right) \cos(k_R x - \omega t) \quad (16)$$

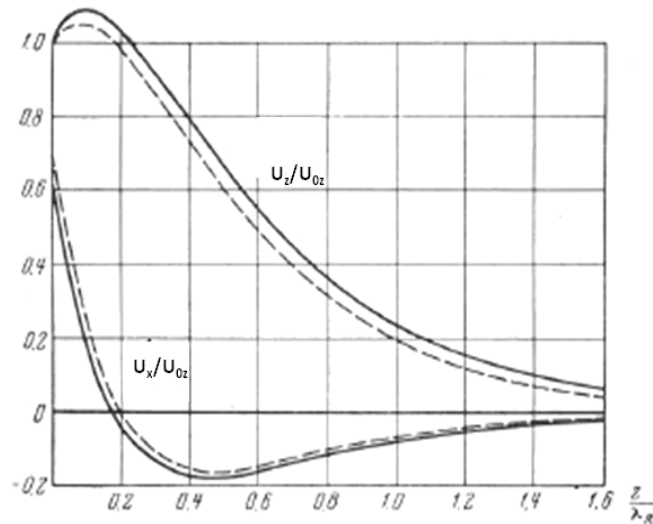


Figure 19 : Variation de l'amplitude des déplacements in-plane et out-of-plane en fonction de la profondeur [41]

La figure 19 illustre la dépendance de l'amplitude des deux composantes de l'onde de Rayleigh en fonction du ratio profondeur sur la longueur d'onde. Les courbes sont données sous forme adimensionnelle ; les amplitudes de déplacement sont normalisées par rapport à celles correspondant au déplacement normal à la surface (U_{0z}) à $z=0$. On observe sur cette figure que l'amplitude du déplacement normal U_z croît dans un premier temps pour entamer ensuite une décroissance exponentielle en fonction de $\left(\frac{z}{\lambda_R}\right)$. Le déplacement (in-plane) parallèle à la surface décroît et change de signe à partir de $z \approx 0.2\lambda_R$.

1.4.2 Moyens de génération des ondes ultrasonores de surface

Les méthodes actuelles de CND ultrasonores appliquées au ferroviaire pour la recherche de défauts surfaciques s'orientent plus particulièrement à l'utilisation des ondes de surface pour l'inspection du rail. Les ondes de surface sont d'un intérêt grandissant pour le contrôle des rails. Elles ont été utilisées au Royaume-Uni et en Amérique du Nord pour l'évaluation des rails. Ces ondes offrent de meilleures sensibilités aux défauts surfaciques et sub-surfaciques, tels que : les fissures transversales, les head-check, les squats...

Les amplitudes de ces ondes sont suffisamment élevées et elles peuvent se propager sur de longues distances avec moins d'atténuation.

Plusieurs moyens permettent de générer les ondes de surface avec ou sans contact entre le capteur et l'échantillon sous test :

D'une part, les technologies de génération qui s'effectuent généralement au contact de l'échantillon et nécessitant l'utilisation de couplant.

Les transducteurs piézoélectriques :

L'utilisation des transducteurs à angle variable ou à « coin » de plexiglas permet de générer des ondes de surface (Rayleigh et Lamb).

L'utilisation des transducteurs interdigitaux (électrodes imprimées sur un film type PVDF ou feuille piézo-composite) permet de générer des ondes de surface (Rayleigh et Lamb).

L'utilisation des éléments piézoélectriques sous forme de barrette encore appelé peigne excité selon un mode de vibration approprié (longitudinal ou transversal) est une autre façon de générer des ondes guidées (Lamb ou SH).

D'autre part, les technologies qui ne nécessitent pas l'utilisation de couplant et qui s'effectuent généralement sans contact :

- Les capteurs EMATs (Electro-magnetic-Acoustic-Transducer)

- La génération par source laser

Dans le cadre des CND appliqués au rail avec ondes de surface, les méthodes couramment utilisées sont celles de l'impact LASER ou avec EMATs.

1.5 Interaction onde de Rayleigh avec un défaut surfacique

La modélisation de la diffraction des ondes de Rayleigh lors de l'interaction avec une fissure a été étudiée par plusieurs auteurs. Dans le cas d'un bord de fissure dans une plaque, Kundu et Mal [42] ont utilisé une théorie asymptotique de la diffraction pour calculer les intensités des ondes diffractées à haute fréquence à la surface de la plaque. Tuan et al. [43] et Simon [44] ont étudié le problème de la transmission et de la réflexion des ondes de Rayleigh par une fissure en utilisant des techniques de perturbation aux bords de la fissure. La dispersion de l'onde de Rayleigh par une fissure, notamment lorsqu'elle est inclinée avec un angle choisi arbitrairement par rapport à la normale de la surface libre d'un demi-espace a été étudiée par Zhang et Achenbach [45]. Ils utilisent une représentation intégrale du champ de déplacement des ondes diffractées pour obtenir les expressions des déplacements surfaciques. Leur méthode est basée sur le théorème de la réciprocité de Betti-Rayleigh [46] pour les champs d'onde élastique harmonique. C'est un théorème qui peut être utilisé pour exprimer le champ d'onde diffracté sous forme d'une intégrale sur la surface de la fissure. La dispersion des ondes de surface incidentes et des échos produits par une fissure a été étudiée par Mendelsohn et al. [47] dans le cas plan à deux dimensions. Les travaux réalisés dans cet article ont permis d'obtenir une solution exacte au problème de la diffraction d'une onde élastique par une fissure, en forme d'onde harmonique.

Chenyin et al. [48] ont étudié le processus d'interaction d'une onde de Rayleigh avec une fissure normale à la surface du matériau. Ils ont établi les relations fondamentales entre les coefficients, de réflexion ($R_R(f)$) et de transmission ($T_R(f)$), et la profondeur de la fissure comme suit :

$$R_R(f) = \frac{FFT(A_{r0})}{FFT(A_0)} \quad (17)$$

$$T_R(f) = \frac{FFT(A_{t0})}{FFT(A_0)} \quad (18)$$

Où, A_0 , A_{r0} et A_{t0} représentent respectivement les amplitudes de l'onde de Rayleigh incidente, réfléchie et transmise.

Les méthodes de détection de défauts superficiels sont basées sur l'analyse des temps de vols des ondes diffractées par un défaut en mode pulse-écho [49] ou sur la comparaison de l'amplitude du signal transmis par le défaut en mode pitch-catch, avec un signal [50].

Quand une onde de Rayleigh rencontre un défaut superficiel, un processus de diffraction typique se produit. L'analyse des ondes générées par le défaut permet de déterminer l'ensemble de ses paramètres physiques. Ils sont principalement fonction du rapport (d/λ) entre la taille de la fissure et de la longueur d'onde de l'onde de surface incidente. Ces paramètres sont généralement mesurés dans le champ lointain de la fissure pour éviter les interférences multiples des nombreux modes produits au voisinage du défaut. Par ailleurs, dans le cas de la détection de défauts à géométrie complexe (exemple : présentant des branches), la détection en champ lointain de la fissure est souvent entravée par l'influence des discontinuités géométriques et par la diffraction multiple qui se produit au sein de l'échantillon.

Pour une fissure isolée, Jian et al. [51] ont développé une méthode basée sur le calcul des temps de vol des ondes réfléchies pour évaluer l'influence de la conversion de modes en champ proche et lointain de la fissure. Les trajets des différentes ondes sont modélisés à la figure 20 :

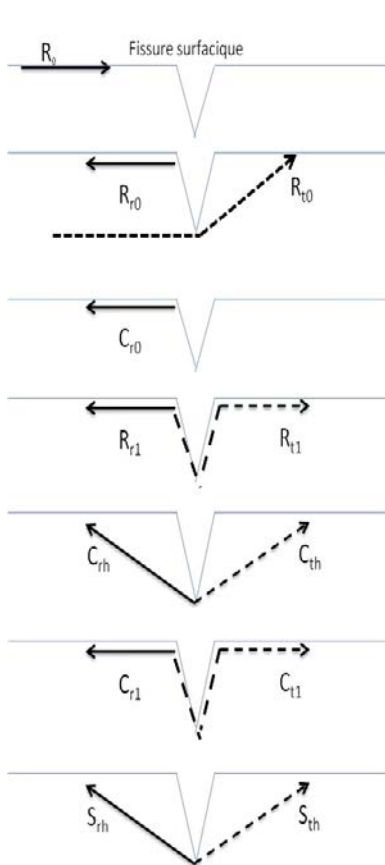


Figure 20 : Direction de propagation des ondes diffractées par une fissure

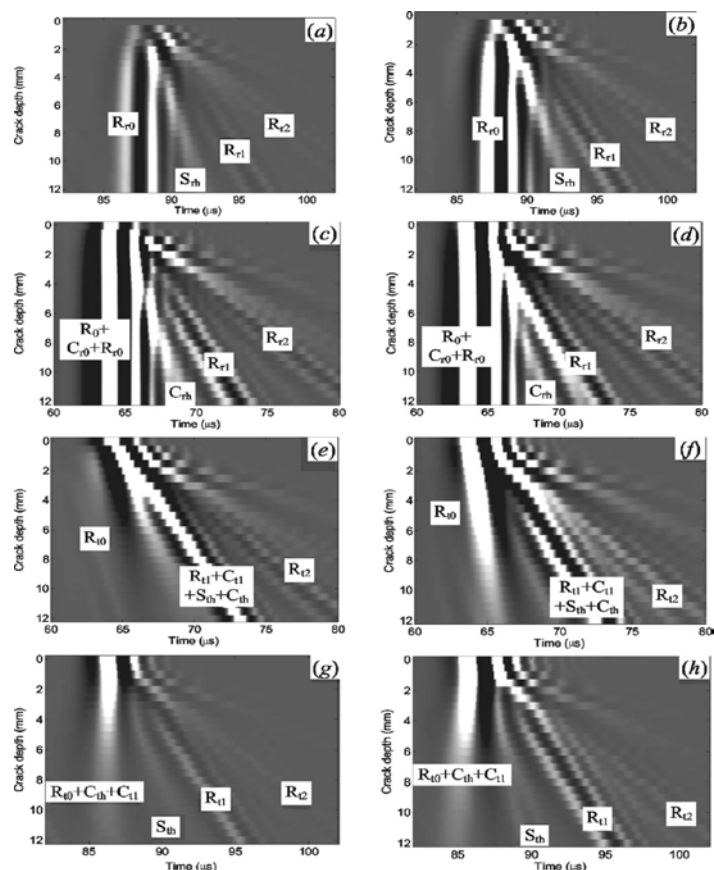


Figure 21 : Déplacement in-plane (1ère col.) et out-of-plane (2ème col.) en fonction de la profondeur de la fissure et de sa position vis-à-vis du point de détection et de l'émetteur [51]

La source de génération de l'onde est placée à 180 mm du défaut afin de négliger l'influence des ondes de volume générées. Ainsi, suivant la distance entre le point de détection et la position du défaut, les déplacements in-plane et out-of-plane sont détectés à 66 mm (Fig.21 : (a) et (b) et à 0,2 mm (c) et (d)) respectivement avant le défaut (essai en réflexion) et à des distances du point de détection après le défaut (essai en transmission) de 0,2 mm (fig. 21(e) et (f) et de 66 mm (fig. 21 : g et h). L'absence de certains modes sur les différentes images provient du fait que toutes ces ondes ne se propagent pas à la même vitesse dans l'échantillon.

D'après la figure 20, les expressions des temps de vol de ces différentes ondes sont :

$$t_{R_0} = (l + x)/V_R \quad (19)$$

$$t_{R_{r1}} = (l - x + 2h)/V_R \quad (20)$$

$$t_{C_{r0}} = (l - x)/V_L \quad (21)$$

$$t_{R_{t1}} = (l + x + 2h)/V_R \quad (22)$$

$$t_{C_{t1}} = \frac{l + 2h}{V_R} + \frac{x}{V_L} \quad (23)$$

$$t_{C_{rh}} = t_{C_{th}} = \frac{l + h}{V_R} + \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{V_L} \quad (24)$$

$$t_{S_{rh}} = t_{S_{th}} = \frac{l + h}{V_R} + \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{V_T} \quad (25)$$

Où, V_R , V_L et V_T sont respectivement les vitesses de l'onde de Rayleigh, de l'onde longitudinale et de l'onde transversale générée indirectement par le défaut. La profondeur de la fissure est représentée par h , l représente la distance entre le défaut et la source et x celle séparant le défaut et le point de détection.

Dans le cas où la fissure est inclinée d'un angle α par rapport à la surface libre de l'échantillon, Chenyin et al. [48] ont proposé une méthode permettant la détermination de cette inclinaison en se basant sur les temps de vol des différentes ondes diffractées par la fissure. La figure 22 représente la section transversale de l'échantillon de base.

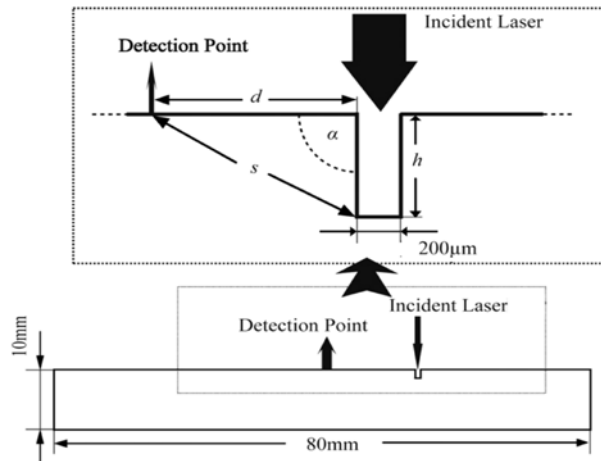


Figure 22 : Section transversale de l'échantillon [48]

L'analyse des temps d'arrivée des ondes se propageant dans l'échantillon au niveau du point de détection permet de calculer l'angle que fait celle-ci par rapport à la surface en utilisant la loi cosinus décrite comme suit :

Ils définissent V_R , V_T et V_L comme étant respectivement la vitesse de l'onde de Rayleigh, de l'onde transversale et de l'onde longitudinale. Les expressions des temps de vol de ces ondes et des modes convertis, t_L , t_S , t_R , t_{nR} et t_{nS} , ont été établies dans un premier temps par Jian et al. [52] :

$$t_L = \frac{d}{V_L} \quad (26)$$

$$t_S = \frac{d}{V_T} \quad (27)$$

$$t_R = \frac{d}{V_R} \quad (28)$$

$$t_{nR} = \frac{2h + d}{V_R} \quad (29)$$

$$t_{nS} = \frac{h}{V_R} + \frac{s}{V_R} \quad (30)$$

En utilisant la loi cosinus, l'expression de s peut être donnée par :

$$s = \sqrt{d^2 + h^2 - 2dh * \cos\alpha} \quad (31)$$

De (31) on peut en déduire l'expression de α comme suit :

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + h^2 - s^2}{2dh} \right) \quad (32)$$

En substituant les équations (26) à (29) dans celle de (32), la relation entre α , les temps de vol et les vitesses des différentes ondes est donnée par :

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{4t_R^2 + (t_{nR} - t_R)^2}{t_R(t_{nR} - t_R)} - \frac{V_T^2(2t_{nS} + t_R - t_{nR})^2}{V_R^2 t_R(t_{nR} - t_R)} \right] \right\} \quad (33)$$

La connaissance des temps de vol de la partie de l'onde de Rayleigh convertie en onde de volume t_{nS} et des temps de vol de l'onde de Rayleigh directe (t_R) et réfléchi par le bord de la fissure (t_{nR}) permet d'évaluer la valeur de l'inclinaison du défaut surfacique.

L'étalonnage de l'amplitude reçue par les transducteurs EMATs, dans le cas où une fissure surfacique se trouve entre l'émetteur et le récepteur, a été effectué par Edwards et al. [14]. Ils utilisent une barre d'aluminium contenant des fentes usinées perpendiculairement par rapport à la surface libre pour simuler des fissures surfaciques. L'émetteur et le récepteur sont maintenus à une distance de 162,5 mm l'un de l'autre. Le déplacement out-of-plane est mesuré. La variation de l'amplitude crête de l'onde transmise en fonction de la profondeur du défaut est mise en évidence à la figure 23, la figure 24 donne l'atténuation de l'onde en fonction de la profondeur du défaut mesurée et le résultat obtenu par simulation.

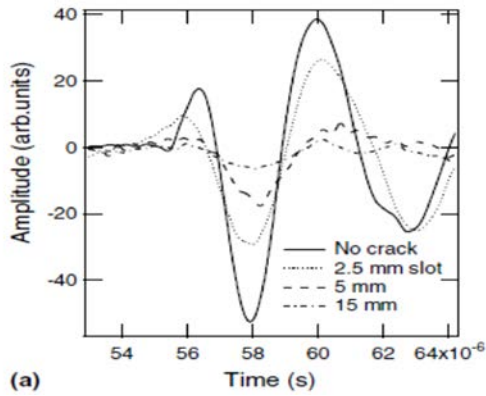


Figure 23 : Etalonnage de l'amplitude recueillie sur un échantillon sans défaut et avec des fentes de profondeur 2,5 mm, 5 mm et 15 mm, [14]

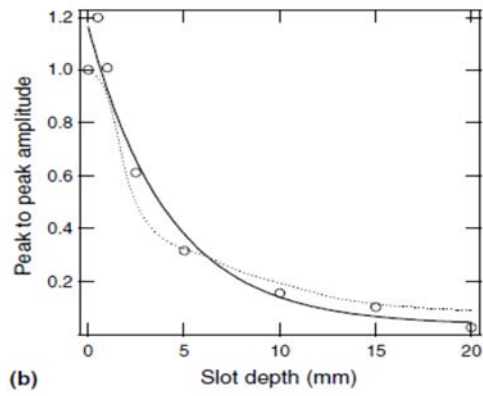


Figure 24 : Atténuation de l'onde transmise en fonction de la profondeur : comparaison des résultats expérimentaux (points ouverts) avec la simulation (ligne continue), [41]

Dans cet article Edwards et al montrent que l'amplitude de l'onde transmise par le défaut varie en $1/d$, où d est la profondeur du défaut, d'autres auteurs estiment que cette dépendance est fonction de d/λ_R [14].

Dutton et al. [53] dans son étude sur l'interaction des ondes Rayleigh avec des défauts plans type fissures orientés suivant différents angles par rapport à la surface, ont préconisé de travailler dans le champ lointain à cause des conversions de mode. Il a montré que les coefficients de réflexion et de transmission de l'onde (figure 25) sur le défaut étaient sensibles à la fois à sa profondeur et à son inclinaison et qu'il était nécessaire de le prendre en compte dans la calibration.

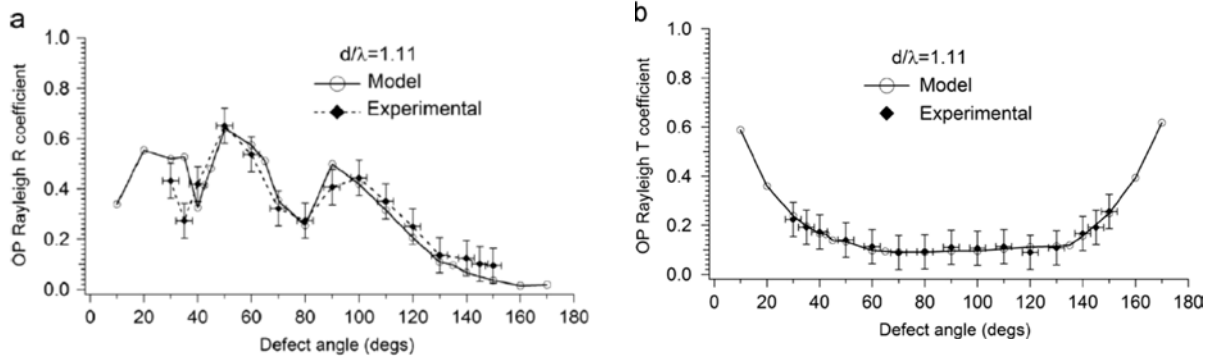


Figure 25 : Modèle et données expérimentales (génération laser) pour $d/\lambda = 1,11$. (a) coefficient de réflexion out-of-plane, (b) le coefficient de transmission out-of-plane, [53]

L'étude menée par Rosli et al. [16] ont également montré la dépendance du coefficient de transmission $C_T = A_t/A_i$ en fonction de $1/d$, A_t et A_i étant respectivement l'amplitude transmise et incidente de l'onde de Rayleigh. Ces résultats sont présentés aux figures 26 et 27.

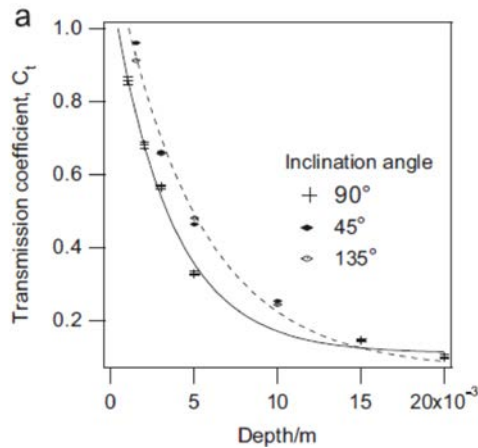


Figure 26 : (a) Courbes de calibration “In-plane” en fonction de la profondeur du défaut, [16]

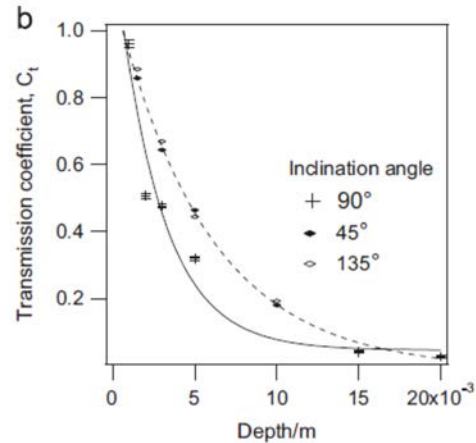


Figure 27 : (b) Courbes de calibration “Out-of-plane” en fonction de la profondeur du défaut, [16]

La méthode de détection basée sur la variation d’amplitude présente certaines difficultés. Dans le cas d’essais en champ proche, cette technique est souvent perturbée par les interférences constructives multiples qui s’y produisent Kromine et al. [54]. Elles sont d’autant plus importantes que le rapport (d/λ) est faible [53]. Pour des mesures d’amplitude de l’onde de Rayleigh réfléchi par un défaut, la contribution des modes convertis est plus avérée sur la composante dans le plan (In-plane) que sur celle normale à la surface (out-of-plane) [53]. L’amplitude de la composante In-plane décroît plus vite en fonction de la distance, que la composante out-of-plane. Cela voudrait dire que l’utilisation de la composante out-of-plane de l’onde de Rayleigh est plus intéressante pour les mesures de la réflexion en champ lointain, car l’influence des modes convertis est moindre. Lorsque plusieurs fissures sont présentes entre l’émetteur et le récepteur une partie plus importante du signal est filtrée par ces défauts et la profondeur peut être surestimée.

L’analyse fréquentielle des signaux obtenus sur des échantillons de rail contenant des fissures artificielles et naturelles, orientées longitudinalement et transversalement par rapport à l’axe du champignon a été réalisée par Edwards et al. [9]. Cette analyse fréquentielle des signaux (figure 28) obtenus après réflexion sur des fissures étalons a permis de remonter à la profondeur du défaut à partir de la fréquence de coupure relative au défaut, dans ce cas une fréquence de coupure de 640 kHz (figures 29) correspond à une fissure de 4,5 mm.

Les variations du lift-off entraînent des fluctuations sur l’amplitude du signal, par ailleurs cette limitation peut être surmontée par un traitement fréquentiel.

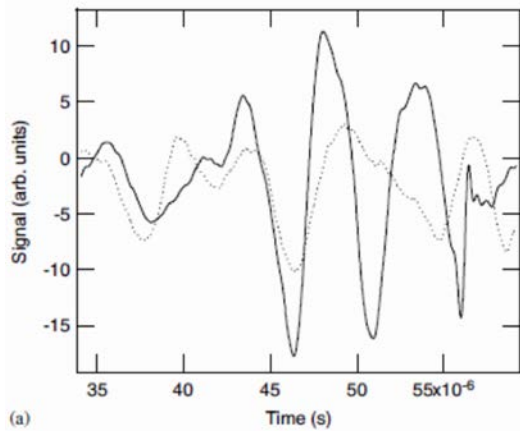


Figure 28 : (a) Signaux obtenus dans une zone sans défaut (ligne pleine) et dans une zone avec défaut entre les deux capteurs (pointillés), [9]

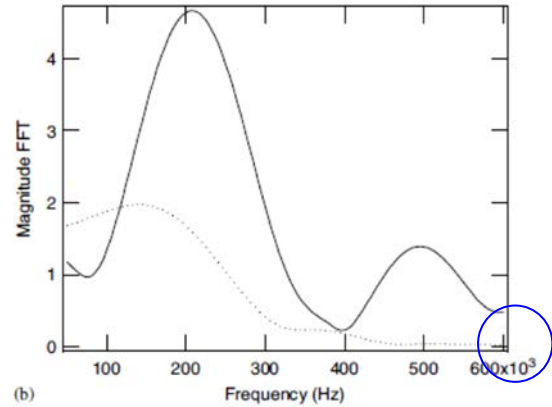


Figure 29 : (b) FFT des signaux de l'onde de Rayleigh, [9]

Jian et al. [51] ont étudié l'interaction des ondes de Rayleigh sur des fentes de profondeur allant de 0,5 mm à 20 mm, usinées sur des blocs d'aluminium plats. L'amplitude obtenue par calcul, de l'onde de Rayleigh réfléchi par la fente devrait être égale à 0,4 fois celle de l'onde incidente dans le cas où la profondeur de la fissure est plus grande que la longueur d'onde. La figure 30 présente l'évolution de l'amplitude dans le plan des vitesses de particules dans le cas d'une fissure de 3 mm de profondeur interférant avec une onde de Rayleigh ayant une longueur d'onde de 5 mm. Les valeurs négatives en abscisse de la courbe correspondent à la position de la sonde située avant la fente.

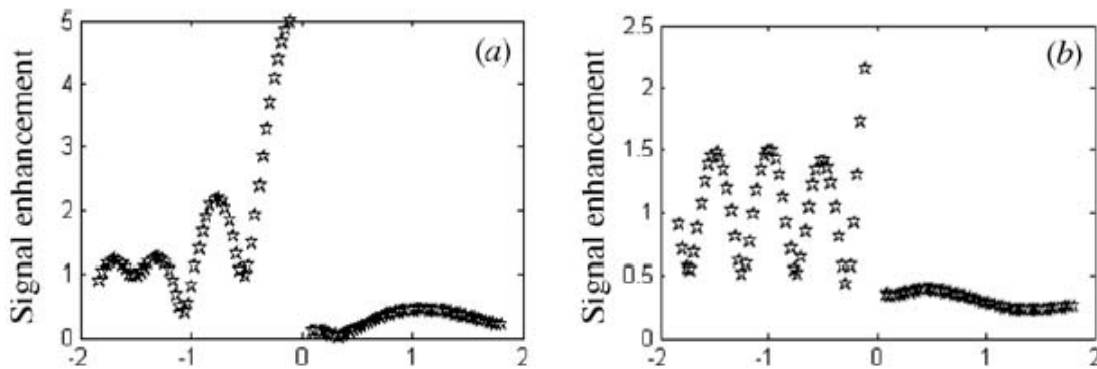


Figure 30 : amplitude du signal dans le plan de vitesses des particules : (a) in-plane et (b) out-of-plane, autour d'une fissure de 3 mm de profondeur, [51]

Les interférences occasionnées par la présence du défaut rendent difficile le calcul de la FFT des ondes de Rayleigh réfléchies ou transmises. En raison des oscillations du coefficient de réflexion en fonction de la profondeur en fissure, il peut être difficile d'utiliser la mesure de la réflexion pour déterminer la profondeur de la fissure directement. Les spectres fréquentiels des ondes de Rayleigh réfléchies sont également liés à la profondeur de la fissure, mais la relation est très complexe et sensible au lift-off. Les auteurs ont également démontré que les

temps d'arrivée des ondes de Rayleigh réfléchies et transmises pouvaient être utilisés pour calculer la profondeur de la fissure.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le rail IUC60 utilisé par Réseau Ferré de France et la classification des défauts qui peuvent y être rencontrés. Dans le cadre de notre travail, notre attention porte plus particulièrement sur les défauts de type fissure, situés au niveau de la bande de roulement du rail, tels que les squats et les head-checks.

Après avoir décrit les méthodes de contrôle en statique et en dynamique appliquées dans le domaine ferroviaire et en particulier au rail, nous avons montré l'intérêt des méthodes sans contact telle que les méthodes Ultrasons-Laser et EMAT.

L'analyse portant sur l'interaction de l'onde de Rayleigh sur les défauts de type fissure nous permet de dégager deux voies pour l'interprétation des mesures ultrasonores, notamment en ce qui concerne la profondeur des défauts et leur inclinaison :

De nombreux auteurs préconisent d'évaluer la profondeur du défaut à partir de la mesure du coefficient de réflexion et de transmission de l'onde de Rayleigh sur le défaut. La méthode est facile à mettre en œuvre, mais elle est sensible à plusieurs paramètres : la profondeur et l'orientation du défaut, le champ proche de l'onde, le lift-off dans le cas des EMATs et elle nécessite la réalisation d'un calibrage. Il s'avère nécessaire d'utiliser les temps de vol des ondes réfléchies et converties sur le défaut pour déterminer son inclinaison.

Cette étude bibliographique nous a permis de conforter notre choix d'aborder la détection des défauts superficiels dans le champignon du rail en utilisant des ondes de Rayleigh avec une technologie de génération et détection sans contact EMAT et/ou Laser.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons, plus en détail, les méthodes de génération et de détection d'ondes ultrasonores par Laser et EMAT.

Bibliographie

- [1] R. DEROUCHE, “Rails de chemins de fer - Aspects métallurgiques - - Aspects métallurgiques Défectologie | Techniques de l’Ingénieur.”.
- [2] N. Jimenez–Redondo et al., “Automated and Cost Effective Maintenance for Railway (ACEM–Rail),” *Procedia - Soc. Behav.Sci.*, vol. 48, pp. 1058–1067, 2012.
- [3] LUCCHINI, “Rails et laminés pour superstructures de chemin de fer.”.
- [4] ORR, “The Rail industry in Britain | Office of Rail and Road,” 2015. [Accessed: 21-Jan-2016].
- [5] S. ScanMaster Ltd, “ScanMaster – Ultrasonic Inspection Solutions» Ultrasonic Inspection Solutions,” Ltd. .
- [6] U. Zerbst, R. Lundén, K.-O. Edel, and R. A. Smith, “Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 76, no. 17, pp. 2563–2601, Nov. 2009.
- [7] R. Pohl, A. Erhard, H.-J.Montag, H.-M. Thomas, and H. Wüstenberg, “NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection,” *NDT E Int.*, vol. 37, no. 2, pp. 89–94, Mar. 2004.
- [8] V. V. Krylov, “Distinctive characteristics of guided surface-wave propagation in complex topographic structures,” *Am. Institute Phys.*, 1987.
- [9] R. S. Edwards, S. Dixon, and X. Jian, “Characterization of defects in the railhead using ultrasonic surface waves,” *NDT E Int.*, vol. 39, no. 6, pp. 468–475, Sep. 2006.
- [10] D. Hesse and P. Cawley, “Excitation of Surface Wave Modes in Rails and their Application for Defect Detection,” in *AIP Conference Proceedings*, 2006, vol. 820, pp. 1593–1600.
- [11] C. myoung lee, J. L. Rose, and Y. Cho, “A guided wave approach to defect detection under shelling in rail,” *NDT E Int.*, vol. 42, no. 3, pp. 174–180, Apr. 2009.
- [12] L. U. Chao, T. U. Zhan-kuan, C. Jian-jun, and L. I. Lian-xiu, “RCF Damage Characteristics of High-speed Railway Rail and Research Development of NDT Techniques,” *Fail. Anal.Prev.*, vol. 4, no. 1, pp. 51–57, 2009.
- [13] Y. Fan, S. Dixon, R. S. Edwards, and X. Jian, “Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head,” *NDT E Int.*, vol. 40, no. 6, pp. 471–477, Sep. 2007.
- [14] R. S. Edwards, S. Dixon, and X. Jian, “Depth gauging of defects using low frequency wideband Rayleigh waves,” *Ultrasonics*, vol. 44, no. 1, pp. 93–98, Jan. 2006.
- [15] J. L. Rose, M. J. Avioli, P. Mudge, and R. Sanderson, “Guided wave inspection potential of defects in rail,” *NDT E Int.*, vol. 37, no. 2, pp. 153–161, Mar. 2004.
- [16] M. H. Rosli, R. S. Edwards, B. Dutton, C. G. Johnson, and P. T. Cattani, “identifying surface angled cracks on aluminium bar using EMATs and automated computer system,” in *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1211, pp. 1593–1600.
- [17] N.-H. Kim, H. Sohn, and S.-W. Han, “Rail Inspection Using Noncontact Laser Ultrasonics,” *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, vol. 32, no. 6, pp. 696–702, Dec. 2012.

- [18] R. S. Edwards, A. Sophian, S. Dixon, G.-Y. Tian, and X. Jian, "Dual EMAT and PEC non-contact probe: applications to defect testing," *NDT E Int.*, vol. 39, no. 1, pp. 45–52, Jan. 2006.
- [19] S. Kenderian, B. B. Djordjevic, D. Cerniglia, and G. Garcia, "Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique," *Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 48, no. 6, pp. 336–341, Jun. 2006.
- [20] R. E. Green Jr., "Non-contact ultrasonic techniques," *Ultrasonics*, vol. 42, no. 1–9, pp. 9–16, avril 2004.
- [21] S. Dixon, S. E. Burrows, B. Dutton, and Y. Fan, "Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection," *Ultrasonics*, vol. 51, no. 1, pp. 7–16, Jan. 2011.
- [22] P. R. Murray and R. J. Dewhurst, "Application of a laser/EMAT system for using shear and LS mode converted waves," *Ultrasonics*, vol. 40, no. 1–8, pp. 771–776, mai 2002.
- [23] Berry, A., Nejikovsky, B., Gilbert, X., & Tajaddini, A. (2008). High speed video inspection of joint bars using advanced image collection and processing techniques. In *Proceedings of the 2008 World congress on railway research*, Seoul, Korea.
- [24] R. Pohl, R. Krull, and R. Meierhofer, "A new Eddy Current Instrument in a Grinding Train," *ECNDT Conference -Berlin, Germany*, Septembre 2006..
- [25] R. Krull, H. Hintze, M. Luke, M. Thomas, and S. Rhe, "Eddycurrent Detection of Head Checks on the Gauge Corners of Rails:
<http://www.ndt.net/article/v07n06/thomas/thomas.htm>. [Accessed: 22-Jan-2016].
- [26] G. du C. T. C. G. des politiques, "Mise au point du prototype Dynatrak II," 01-Nov-2008. <http://data.tc.gc.ca/archive/fra/innovation/cdt-projets-ferroviaire-a-9098-1303.htm>. [Accessed: 26-Oct-2016].
- [27] M. P. Papaelias, M. C. Lugg, C. Roberts, and C. L. Davis, "High-speed inspection of rails using ACFM techniques," *NDT E Int.*, vol. 42, no. 4, pp. 328–335, juin 2009.
- [28] D. Peng and R. Jones, "NDI of Rail Squats and Estimating Defect Size and Location Using Lock-In Thermography," *Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 29–38, 2013.
- [29] M. Peterson, B. Jeffrey, and R. Gutkowski, "Limitations in size and type of detectable defects in rail flaw inspection," 2000.
- [30] G. H. Cope, *British railway track Design, construction and maintenance*. 1993.
- [31] D. F. Cannon, K.-O. Edel, S. L. Grassie, and K. Sawley, "Rail defects: an overview," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 10, pp. 865–886, Oct. 2003.
- [32] P. Brdif, J. Plu, P. Pouligny, and C. Poidevin, "Développement d'une méthode de contrôle des rechargements de rails," 2008. [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/cofrend2008/papers/084.pdf>. [Accessed: 22-Jan-2016].
- [33] R. Alaix, "High Speed Rail Testing with Phased Array Probes," 2006. [Online]. Available: <http://www.uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/242.pdf>. [Accessed: 22-Jan-2016].
- [34] S. A. Nielsen, A. L. Bardenshtein, A. M. Thommesen, and B. Stenum, "Automatic Laser Ultrasonics for Rail Inspection," *Proceedings of the 16th WCNDT.*, 2004.
- [35] I. TIP5-CT, "D4.4.1 – Rail Inspection Technologies." 2006.

- [36] M. Eskandarzade, T. Kundu, N. Liebeaux, D. Placko, and F. Mobadersani, "Numerical simulation of electromagnetic acoustic transducers using distributed point source method," *Ultrasonics*, vol. 50, no. 6, pp. 583–591, may 2010.
- [37] X. Jian, S. Dixon, K. T. V. Grattan, and R. S. Edwards, "A model for pulsed Rayleigh wave and optimal EMAT design," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 128, no. 2, pp. 296–304, avril 2006.
- [38] Edwards, R. S., Fan, Y., & Dixon, S. (2007, March). High speed detection and characterization of defects in the railhead. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (Vol. 894, No. 1, pp. 1406-1412)*. AIP Publishing.
- [39] Report I-Rail, "Final publishable summary report I-RAIL." 18-Jan-2013.
- [40] M. Wanin, *Evaluation non Destructive de la Qualité des Matériaux (Partie 1)*. Ed. Techniques Ingénieur, 2001.
- [41] I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications," 1967. <http://www.abebooks.com/book-search/title/rayleigh-lamb-waves/>. [Accessed: 18-Jan-2016].
- [42] T. Kundu and A. K. Mal, "Diffraction of Elastic Waves by a Surface Crack on a Plate," *J. Appl. Mech.*, vol. 48, no. 3, pp. 570–576, Sep. 1981.
- [43] H.-S. Tuan and R. C. M. Li, "Rayleigh-wave reflection from groove and step discontinuities," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 55, no. 6, pp. 1212–1217, Jun. 1974.
- [44] D. A. Simons, "Reflection of Rayleigh waves by strips, grooves, and periodic arrays of strips or grooves," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, no. 5, pp. 1292–1301, May 1978.
- [45] C. Zhang and J. D. Achenbach, "Numerical analysis of surface-wave scattering by the boundary element method," *Wave Motion*, vol. 10, no. 4, pp. 365–374, août 1988.
- [46] K. O'Bryant, "A Generating Function Technique for Beatty Sequences and Other Step Sequences," *J. Number Theory*, vol. 94, no. 2, pp. 299–319, juin 2002.
- [47] D. A. Mendelsohn, J. D. Achenbach, and L. M. Keer, "Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack," *Wave Motion*, vol. 2, no. 3, pp. 277–292, Sep. 1980.
- [48] N. Chenyin Ni, S. Yifei, S. Zhonghua, and L. Jian, "An analysis of angled surface-breaking crack detection by dual laser source generated ultrasound," *NDT Amp E Int.*, vol. 43, no. 6, pp. 470–475, 2010.
- [49] O. Dupond, T. Fouquet, and J. Tirira, "influence of stress corrosion crack morphology on ultrasonic examination performances," *Review of Progress in QNDE*, 28, 89-96(2008).
- [50] M. H. Rosli, R. S. Edwards, and Y. Fan, "In-plane and out-of-plane measurements of Rayleigh waves using EMATs for characterising surface cracks," *NDT & E International*, 2012 - Elsevier.
- [51] X. Jian, S. Dixon, N. Guo, and R. Edwards, "Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks," *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 6, p. 64906, Mar. 2007.
- [52] X. Jian, Y. Fan, R. S. Edwards, and S. Dixon, "Surface-breaking crack gauging with the use of laser-generated Rayleigh waves," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 6, p. 64907, Sep. 2006.

- [53] B. Dutton, A. R. Clough, M. H. Rosli, and R. S. Edwards, "Non-contact ultrasonic detection of angled surface defects," *NDT E Int.*, vol. 44, no. 4, pp. 353–360, juillet 2011.
- [54] A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy, and J. D. Achenbach, "Laser Ultrasonic Detection of Surface Breaking Discontinuities: Scanning Laser Source Technique," *Mater. Eval.*, vol. 58, no. 2, Feb. 2000.

Chapitre II. Méthodes de génération et de détection des ondes ultrasonores sans contact

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons deux méthodes de génération et de détection d'ondes ultrasonores sans contact par source Laser et par transducteurs électromagnétiques EMATs. L'utilisation des techniques de contrôle non destructif par des méthodes EMATs et ultrasons-laser répondent à un besoin croissant des industriels. L'utilisation des méthodes sans contact semble être très prometteuse pour des applications telles que la détection de défaut dans le rail en mode dynamique.

Nous proposons dans un premier temps d'étudier le mécanisme de génération et de détection des ondes ultrasonores par sources laser. Nous définirons le LASER et aborderons deux régimes de génération que sont le régime thermoélastique et le régime d'ablation. Dans cette partie, nous étudierons les diagrammes de directivité des ondes acoustiques en particulier ceux des ondes de Rayleigh produits par une source linéique.

La deuxième partie portera sur le mécanisme de génération et de détection d'ondes ultrasonores par EMATs. Une description d'un système EMAT sera effectuée ainsi qu'une présentation de l'importance de la disposition des éléments constitutifs d'un EMAT pour la production d'ondes ultrasonores. Les sondes utilisées dans le cadre de cette thèse fonctionnent suivant le principe de la force de Lorentz, raison pour laquelle, une partie sera dédiée à ce mécanisme de génération d'ondes ultrasonores ainsi que le principe de la détection des capteurs EMAT.

2.2 Méthode de génération et de détection d'onde ultrasonore par laser

2.2.1 Définition du laser

Le 'LASER' connu sous l'acronyme anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » est une source lumineuse aux propriétés d'émission bien particulières. Il est constitué d'un milieu matériel dans lequel la lumière peut être amplifiée, d'un système de pompage pour l'inversion de population favorisant l'augmentation du nombre de photons émis et d'une cavité optique constituée d'un miroir M1 100% réfléchissant et un autre M2 semi-réfléchissant qui laisse passer la lumière cohérente lorsque le seuil d'oscillation dans la cavité est atteint (figure 1).

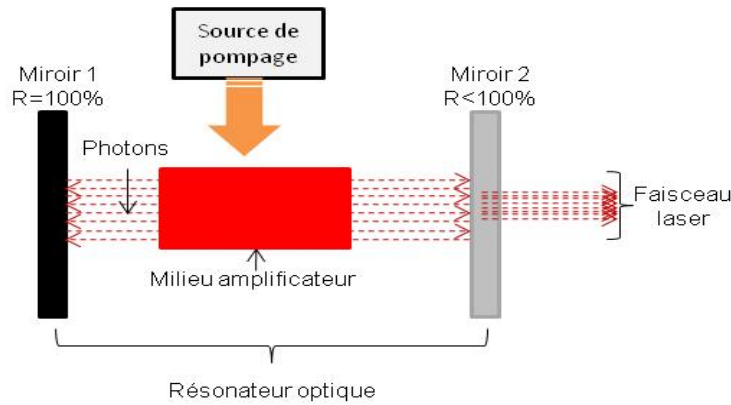


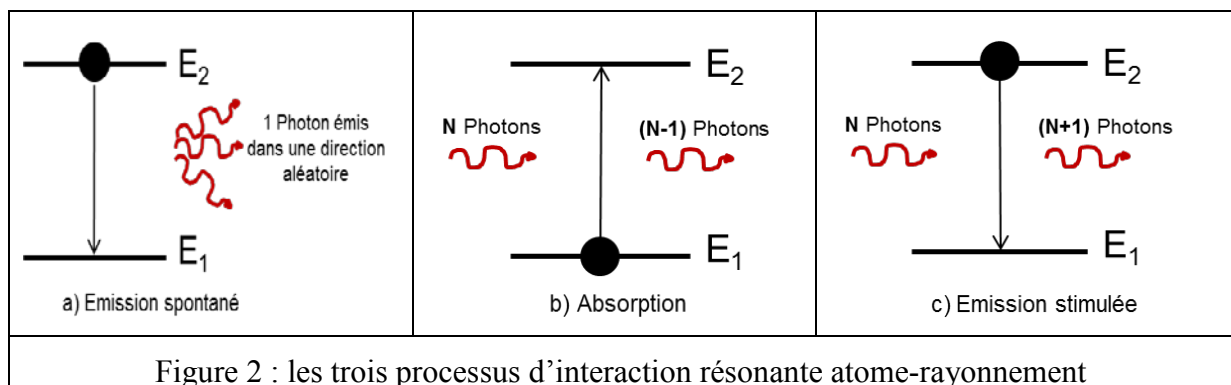
Figure 1 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un laser

Dans le résonateur optique, trois processus d'interaction atome-rayonnement peuvent s'y produire (figure 2) : l'émission spontanée, l'absorption et l'émission stimulée.

L'émission spontanée qui est régie par le fait qu'un atome se trouvant dans un état excité se désexcite spontanément pour retrouver son état fondamental en perdant un photon d'énergie $E_2 - E_1 = h\nu$. C'est un processus aléatoire et la lumière est émise dans une direction aléatoire.

Lors de l'absorption, l'atome transite de son état fondamental noté E_1 vers son état excité E_2 en absorbant un photon.

L'émission stimulée se produit en présence d'un rayonnement incident résonant avec la fréquence de transition. Ce rayonnement a pour effet de faire passer l'atome de son état excité vers son état fondamental en émettant un photon qui s'ajoute à ce rayonnement déjà présent dans la cavité. Le mode d'émission est imposé par celui du rayonnement incident. C'est un processus cohérent, les photons sont émis dans la même direction et à la même phase que celles du rayonnement incident.



Le démarrage du laser est obtenu en commutant le paramètre de pompe d'une valeur inférieure au seuil à une valeur supérieure au seuil d'oscillation. Suivant leur dynamique de démarrage, trois types de lasers peuvent être distingués :

Les lasers de type A : c'est le cas du laser He-Ne. Dans ce cas, l'inversion de population s'effectue quasiment instantanément au pompage et l'oscillation s'établit de manière exponentielle.

Les lasers de type B : C'est le cas du laser utilisé dans cadre de ces travaux (laser Nd:YAG). Pour ce type de laser, l'inversion de la population qui est proportionnelle au gain se fait lentement. Le comportement dynamique de ces lasers est résumé sur la figure 3 : Le gain croît lentement pour atteindre la valeur seuil au bout d'un temps caractéristique. Ensuite, il s'effondre soudainement engendrant une impulsion géante. L'amplification s'arrête immédiatement lorsque le gain est supérieur au seuil. Cependant, le pompage continu à faire augmenter le gain et le processus se reproduit.

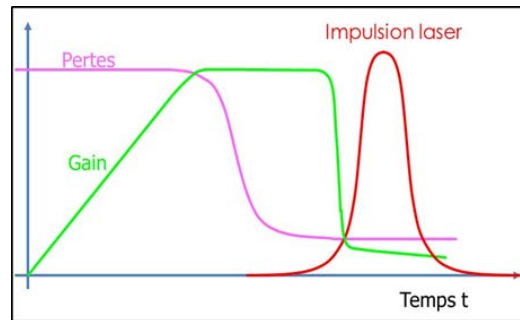


Figure 3 : Processus de déclenchement d'un laser type B

Les lasers de type C : Dans certains cas, ce type de laser peut fonctionner de manière analogue à un type B. Cependant dans la plus part des cas, l'évolution est chaotique et les solutions instables.

Le fonctionnement pulsé d'un laser peut produire des intensités crêtes largement plus importantes en utilisant la faculté du milieu à stocker l'énergie et à la libérer sous forme d'impulsions courtes. Ainsi des puissances crêtes de centaines de MW peuvent être atteintes dans des impulsions de quelques dizaines de nanosecondes.

L'utilisation de la technique du Q-Switch, permet de contrôler et de stabiliser la dynamique pulsée. C'est une technique qui permet d'augmenter les pertes dans la cavité durant un certain temps pour conserver le laser sous le seuil et empêcher l'oscillation de se créer. L'énergie stockée pendant cette durée va être libérée soudainement dans une impulsion après avoir réduit les pertes jusqu'à leurs valeurs initiales. Cette technique revient donc à périodiquement basculer le facteur de qualité Q de la cavité d'une valeur faible à une valeur forte d'où le nom.

2.2.2 Mécanisme de génération des ultrasons par laser

Lorsqu'on focalise un faisceau laser impulsionnel à la surface d'un échantillon absorbant à la longueur d'onde optique du laser choisi, la partie de l'énergie absorbée (A) provoque une brusque élévation locale de la température sous une faible épaisseur de peau à partir de la surface libre de l'échantillon. Cet échauffement de la matière provoque des phénomènes de dilatation et de compression qui sont à l'origine de la génération d'ondes acoustiques dans la structure. Ce mécanisme de génération a été étudié par plusieurs auteurs, en particulier par Scruby et al [1], Royer [2] et puis par Jenot [3].

Suivant la durée des impulsions laser deux sous-domaines d'applications des ultrasons existent :

D'une part, on a l'acoustique microseconde, qui subsiste lorsque l'impulsion laser à une durée de l'ordre de la nanoseconde. Dans cette gamme temporelle de ces impulsions, les fréquences ultrasonores associées sont de l'ordre de quelques dixièmes à quelques dizaines de MHz.

D'autre part, on a l'acoustique picoseconde, qui subsiste lorsqu'on utilise des impulsions femtoseconde, ce qui correspond à des fréquences ultrasonores générées de l'ordre du THz.

Suivant la densité de puissance du rayonnement absorbé par l'échantillon, différents mécanismes de génération des ondes ultrasonores existent. On a d'une part, ceux qui ne provoquent pas l'endommagement de la structure à tester (exemple du régime thermoélastique) et d'autre part on a ceux qui entraînent l'endommagement de la structure (tel que le régime d'ablation).

Nous nous intéresserons plus en détail à ces deux exemples de régime de génération dans les deux paragraphes suivants.

2.2.2.1 Régime d'ablation

On parle de régime de génération en d'ablation lorsque la densité de puissance absorbée par l'échantillon sous test dépasse son seuil d'absorption. Cette intensité seuil dépend à la fois des propriétés du matériau et de la durée de l'impulsion, elle est donnée par l'expression ci-dessous [4].

$$I_s = (T_v - T_i) \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \kappa \cdot \rho \cdot C}{4 \cdot \Delta\tau}} \quad (1)$$

Où I_s représente la densité de puissance lumineuse absorbée, T_v et T_i représentent respectivement les températures de vaporisation et initiale du matériau, ρ la masse volumique, C la capacité thermique massique, κ la conductivité thermique et $\Delta\tau$ la durée de l'impulsion laser.

Lorsque la densité de puissance de radiation est supérieure à ce seuil, il se produit une vaporisation de la matière. Les particules éjectées engendrent un champ de forces essentiellement normales à surface de la structure sous test. Ce phénomène est assimilable à un piston comme le montre la figure 4.

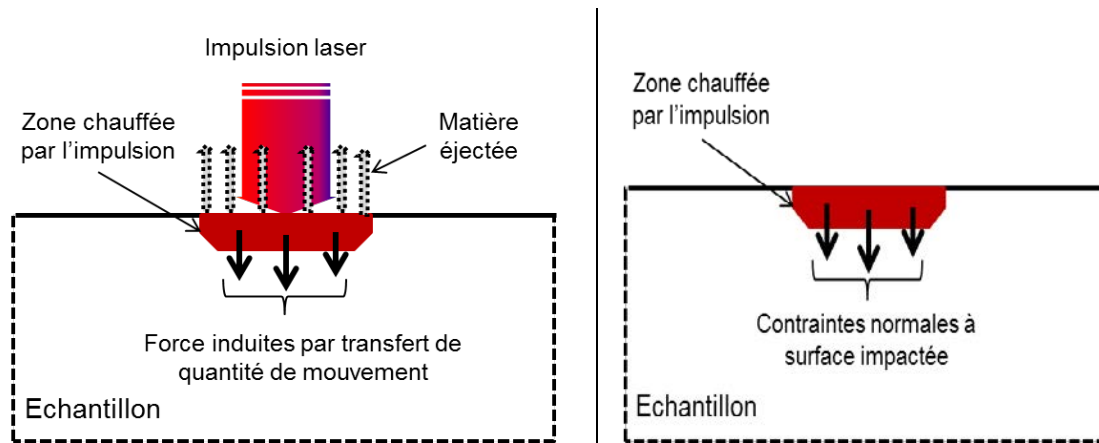


Figure 4 : Mécanisme de génération ultrasonores par source laser ponctuel en régime ablation

2.2.2.2 Régime thermoélastique

Par ailleurs, pour une densité de puissance rayonnée sur un échantillon inférieur à son seuil de vaporisation, le régime de génération est dit régime thermoélastique. Dans le cadre du Contrôle Non Destructif (CND), c'est le régime qui est généralement utilisé car il n'entraîne pas l'endommagement de la surface de l'échantillon. La majeure partie travaux effectués par ultrasons-laser dans le laboratoire de l'IEMN-DOAE, a été réalisée avec ce régime de génération. Parmi ces travaux, nous pouvons citer ceux de Lemaire [5] et Fourez [6] qui portent sur la caractérisation des structures du type couche sur substrat. La propagation des ondes de surface générées par sources lasers et l'interaction de ces ondes avec des échantillons susceptibles de contenir certains défauts a été étudiée par Faëse [7].

La partie de l'énergie incidente absorbée par l'échantillon est convertie en chaleur par effet Joule. Cette élévation locale de la température dans une faible couche superficielle du matériau couramment appelée épaisseur de peau, est suffisante pour provoquer des contraintes mécaniques, du fait que l'échantillon ne peut pas se dilater librement. Ceci est à l'origine de la génération des ondes acoustiques. Ce champ de contraintes engendre des forces perpendiculaires entre elles et parallèles à la surface libre où l'impact a eu lieu (figure 5). Dans le cas d'un matériau métallique tel que l'acier, ce phénomène se déroule très près de la surface du fait de la faiblesse de la profondeur de pénétration.

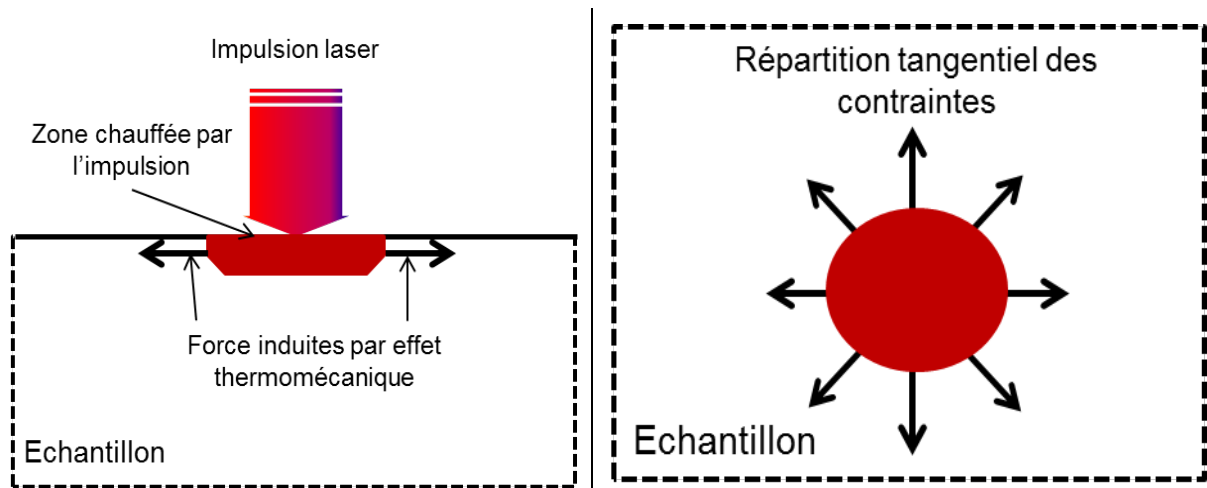


Figure 5 : Mécanisme de génération ultrasonores par source laser ponctuel en régime thermoélastique

2.2.2.3 Diagramme de directivité des ondes volumique

L'énergie rayonnée par une source ponctuelle laser n'est pas omnidirectionnelle en particulier, pour les modes longitudinal et transversal. Afin d'étudier ce phénomène, plusieurs auteurs ont œuvré pour la caractérisation des diagrammes de directivités dans différents régimes de génération en champ lointain.

Miler et al [8] ont calculé en utilisant la méthode par élément fini, la variation de l'intensité de l'onde rayonnée par une source ponctuelle en fonction de la direction de propagation.

Les diagrammes de directivité des modes longitudinal et transversal en régime d'ablation sur un échantillon d'aluminium ont été déterminés expérimentalement par Hutchins et al. [9]. Cette même étude a été étendue sur différents matériaux [10] mais aussi par Corbel et al. [11].

Zhang et al [12] ont étudié les diagrammes de directivité, en tenant compte l'effet de la diffusion thermique, des modes longitudinaux et transversaux en régime thermoélastique dans le cas d'une source ponctuelle. Ils ont montré que l'influence de cet effet sur la directivité de l'onde longitudinale est de plus en plus importante lorsque le profil spatial du faisceau gaussien s'élargit et/ou la fréquence ultrasonore augmente.

a- En régime thermoélastique

Dans le cas d'une source ponctuelle, Rose [13] a formalisé les équations donnant la répartition d'énergie sur les fronts d'ondes longitudinales et transversales. Les équations (2 et 3) permettent de représenter les diagrammes de directivité de ces deux modes de propagation pour un solide isotrope.

$$L(\theta) = \frac{\sin\theta \cdot \sin 2\theta \cdot \sqrt{\eta^2 - \sin^2\theta}}{(\eta^2 - 2\sin^2\theta)^2 + 2\sin\theta \cdot \sin 2\theta \cdot \sqrt{\eta^2 - \sin^2\theta}} \quad (2)$$

$$T(\theta) = \frac{\sin 2\theta \cdot \cos 2\theta}{\cos^2 2\theta + 2\sin\theta \cdot \sin 2\theta \cdot \sqrt{\eta^{-2} - \sin^2\theta}} \quad (3)$$

Où $L(\theta)$ et $T(\theta)$ représentent respectivement la directivité associée aux modes longitudinaux et transversaux. $\eta = V_L/V_T$ est le rapport entre la vitesse de l'onde longitudinale (V_L) et la vitesse de l'onde transversale (V_T) dans le matériau considéré.

Ces deux formules montrent que cette répartition de l'énergie dépend uniquement du rapport η et l'angle de détection θ .

Nous considérons l'irradiation d'un échantillon d'acier par une source ponctuelle laser où les vitesses de propagation pour l'onde longitudinale est $V_L = 5940$ m/s et pour l'onde transversale, elle est $V_T = 3240$ m/s.

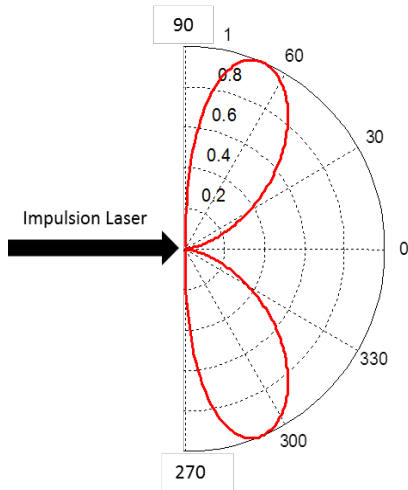


Figure 6 : Diagramme de directivité en champ lointain de l'onde longitudinale dans le rail avec une source ponctuelle

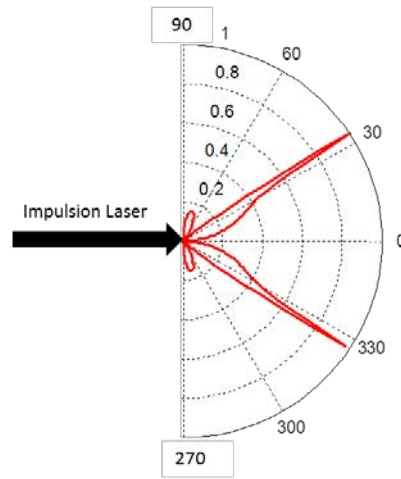


Figure 7 : Diagramme de directivité en champ lointain de l'onde transversale dans le rail avec une source ponctuelle

Les figures 6 et 7 représentent les diagrammes de directivité des ondes longitudinales et transversales dans le cas d'une source ponctuelle en régime thermoélastique dans un échantillon d'acier. L'énergie rayonnée par une source ponctuelle laser est maximale aux alentours de $\pm 65^\circ$ pour l'onde longitudinale et est aux alentours de $\pm 35^\circ$ pour l'onde transversale par rapport à l'épicentre.

b- En régime d'ablation

En régime d'ablation, Rose [13] a aussi établi les équations associées aux amplitudes de déplacement longitudinal ($A_L(\theta)$) et transversal ($A_T(\theta)$) comme suit :

$$A_L(\theta) = \frac{\cos 2\theta \cdot (\eta^2 - 2\sin^2\theta)}{(\eta^2 - 2\sin^2\theta)^2 + 2\sin\theta\cos 2\theta \cdot \sqrt{(\eta^2 - \sin^2\theta)}} \quad (4)$$

$$A_T(\theta) = \frac{\sin 2\theta \cdot \sqrt{(\eta^{-2} - \sin^2\theta)}}{\cos^2 2\theta + 2\sin\theta\cos 2\theta \cdot \sqrt{(\eta^{-2} - \sin^2\theta)}} \quad (5)$$

Ces travaux ont montré que l'amplitude de déplacement de ces ondes volumique dans ce régime est inversement proportionnelle à la distance entre le point source et le point de détection.

L'énergie rayonnée par une source ponctuelle laser en ablation est maximale à l'épicentre 0° et décroît lentement jusqu'à la direction parallèle à la surface pour l'onde longitudinale (figure 8) et à une direction semblable dans le régime thermoélastique qui est de ±35° pour l'onde transversale (figure 9).

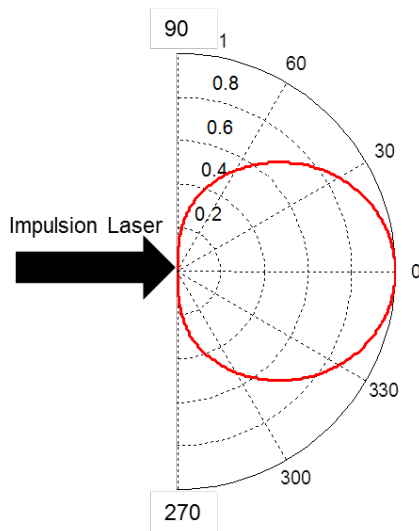


Figure 8 : Diagramme de directivité de l'onde longitudinale en régime ablation

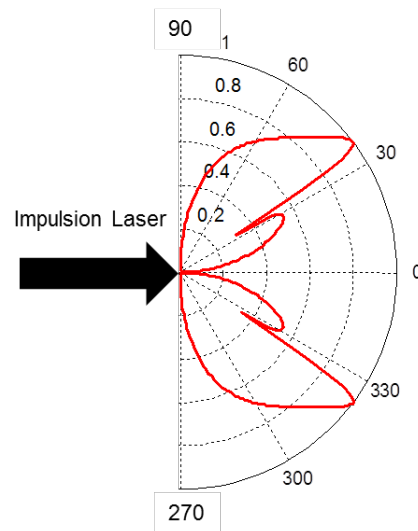


Figure 9 : Diagramme de directivité de l'onde transversale en régime ablation

2.2.2.4 Diagramme de directivité de l'onde de Rayleigh

L'utilisation d'une source linéique présente l'avantage d'optimiser l'amplitude de l'onde générée suivant une direction privilégiée. Ceci est d'un intérêt important dans le cadre du contrôle du rail par ondes de surface en particulier les ondes de Rayleigh.

Aindow et al [14] ont étudié expérimentalement la directivité de l'onde de Rayleigh produite par des sources linéiques à différentes longueurs (x) sur du métal. Ce travail a permis de formaliser la variation d'intensité associée aux déplacements surfaciques en fonction de l'angle formé par la normale à la source et la droite passant par le centre de la source et le point de détection comme suit :

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi x f_R}{V_R} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi x f_R}{V_R} \cdot \sin\theta} \quad (6)$$

Où x est la longueur de la source, V_R la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh et f_R sa fréquence.

Nous avons appliqué cette formule dans le cas d'un échantillon d'acier isotrope avec une fréquence de 1 MHz et à différentes longueurs de la source.

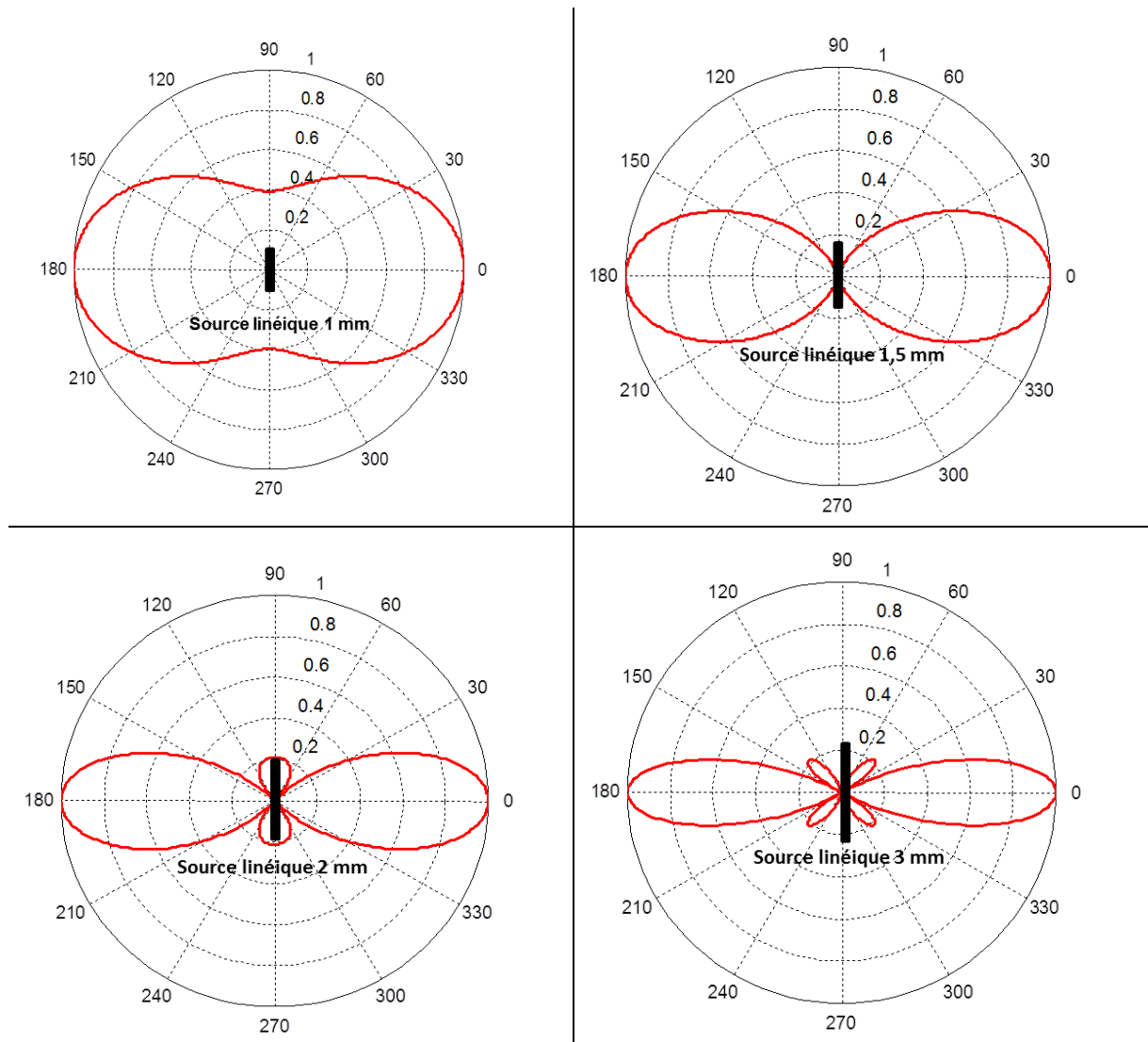


Figure 10 : Diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh générées par une source linéique à différents longueur dans un échantillon de rail

Les différentes figures ci-dessus, mettent en évidence la répartition d'énergie associée au déplacement de l'onde de Rayleigh suivant la longueur de la source utilisée. Pour une même fréquence, plus la longueur de la ligne source est grande ; plus l'énergie rayonnée est concentrée suivant la normale à celle-ci.

2.2.3 Détection sans contact

Pour détecter des déplacements surfaciques provoqués par la propagation d'ondes ultrasonores, des méthodes de détection offrant une sensibilité suffisante pour déceler ces déplacements si petits sont nécessaires.

Avec le développement de la métrologie optique, plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour la mesure de déplacement surfacique à l'échelle nanométrique. Ces systèmes de détection reposent sur la mesure de vitesse de déplacement de la surface ou sur la mesure du déphasage induit par le déplacement normal de la surface libre de l'échantillon en régime continu ou transitoire [15] (Interférométrie de déplacement). D'une manière générale, le

principe de la mesure par interférométrie consiste à mesurer la différence entre un faisceau de référence et un autre faisceau lumineux perturbé par les vibrations surfaciques ayant des trajets différents [16]–[18]. Les ondulations normales de la surface modulent la phase du faisceau réfléchi par cette surface comme suit:

$$\Delta\phi = 2kucos(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Avec $ucos(\omega t + \varphi)$ étant l'expression du déplacement de la surface et $k\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$ le nombre d'ondes. Les détecteurs optiques convertissent directement cette modulation de phase en modulation d'amplitude.

Cependant ces systèmes de détection optiques peuvent être classés en deux catégories:

Les interféromètres homodynes : ce sont des systèmes dans lesquels les deux faisceaux ont la même longueur d'onde. Un seul laser suffit.

Les interféromètres hétérodynes : ce sont des systèmes optiques dans lesquels les deux faisceaux qui interfèrent n'ont pas la même longueur d'onde. Ils nécessitent parfois l'utilisation de deux lasers (un représentant la pompe et l'autre représentant la sonde) ou uniquement un laser et avec un modulateur acousto-optique pour modifier la fréquence sur l'un des trajets optiques.

2.2.3.1 Principe de l'interférométrie homodyne

Cette méthode de détection est basée sur l'interférence de deux faisceaux issus d'une même source (figure 11). Le faisceau (S) réfléchi par l'échantillon et l'autre faisceau de référence (R) ont la même fréquence et même polarité. Scruby [1] et Royer [2] ont établi les équations décrivant la superposition de deux champs électromagnétiques.

Considérons E_R le champ électrique du faisceau de référence et E_S celui du faisceau sonde réfléchi par l'échantillon :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } E_R = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp i(f_L t + \phi_R) \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (8)$$

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } E_S = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp i(f_L t + \Delta\phi + \phi_S) \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (9)$$

Où E_0 est l'amplitude du champ électrique, ϕ_R et ϕ_S représentant les phases respectives des faisceaux (R) et (S).

L'expression du courant fourni par le photodétecteur doté d'un facteur de réponse S (mA/mW) suite à l'interférence des deux faisceaux s'écrit :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } I = I_0 + I_0 \cos(\Delta\phi + \phi_S - \phi_R) \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (10)$$

Où le second terme du second membre contient l'expression du déplacement de la surface

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } i(t) = I_0 \cos(\Delta\phi + \phi_S - \phi_R) \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (11)$$

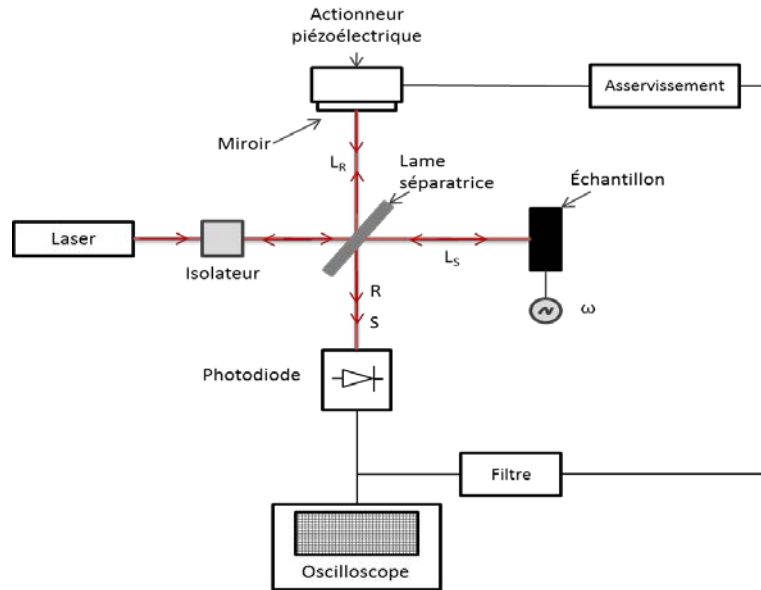


Figure 11 : Sonde homodyne du type Michelson

2.2.3.2 Interférométrie de Speckle

Cette technique de détection a été inventée dans les années 1970 pour pallier les limites de l'holographie dans le domaine de l'interférométrie en ce qui concerne le milieu d'enregistrement.

Les systèmes interférométriques se heurtent souvent aux problèmes liés à l'état de surface (surface peu réfléchissante et/ou irrégularité surfacique à l'échelle de la longueur d'onde) des échantillons à contrôler. Dans le cas des structures à surface rugueuse, le faisceau lumineux diffracté par les différentes parties de la surface n'est pas en phase, par conséquent celui-ci est diffusé dans un angle solide plus grand.

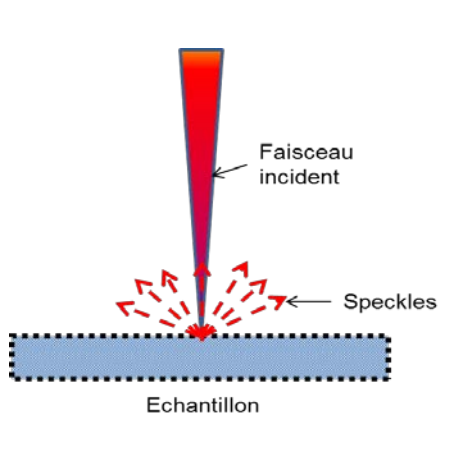


Figure 12 : La production de speckles par laser sur une surface diffusante

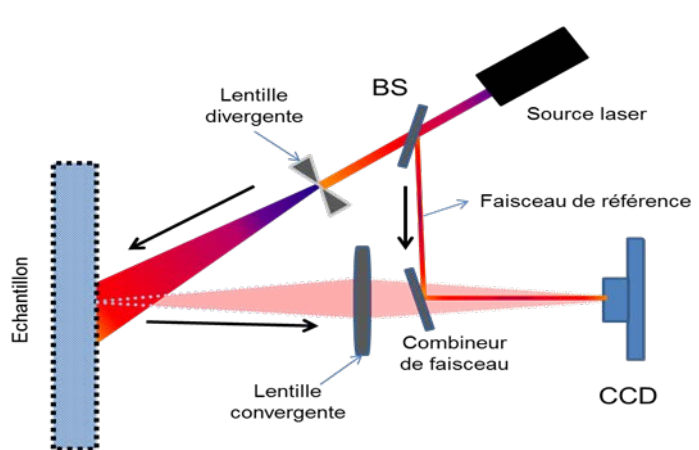


Figure 13 : Principe de l'interféromètre à speckle

Un interféromètre à speckle est constitué d'une source laser dont le faisceau lumineux émit est divisé en deux parties par une lame séparatrice. 90% du faisceau de sortie éclaire la

surface de l'échantillon après passage de la lentille. L'autre partie renvoyée dans une caméra CCD est prise comme référence. Le faisceau diffracté par la surface est renvoyé à son tour dans la caméra CCD après passage d'une lentille.

Scruby et al [1] ont établi l'expression de la puissance du faisceau diffusé $P(\theta)$ par unité angle solide (Γ) suivant la direction normale de la surface de l'échantillon avec un angle θ en utilisant la loi cosinus de Lambert, comme suit :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } P(\theta) = \frac{\Gamma w_i}{\pi} \cos\theta \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (34)$$

Où w_i est la puissance du faisceau incident.

Ils considèrent un élément de surface (ds) éclairé par le faisceau incident supposé gaussien de rayon r_0 par rapport à la largeur à mi-hauteur ($1/e^2$). L'intensité du faisceau réfléchi par l'élément de surface, supposé centré par rapport au faisceau incident, sur la CCD est donnée par :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } I_{ds} = \frac{P_{so}}{F^2} \frac{2}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) ds \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (12)$$

Où P_{so} est la puissance du faisceau diffracté par la surface par unité d'angle solide vers le détecteur.

Le rapport maximal entre la moyenne du carré de la puissance du signal obtenu par interférence entre les speckles et le faisceau de référence sur celles du bruit est donné par :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } \left(\frac{\langle P_s^2 \rangle}{\langle P_N^2 \rangle}\right)_{max} = \frac{2\zeta P_{so} \lambda^2}{\pi r_0^2 h \nu \Delta f} \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (13)$$

Où ζ est le rendement quantique du détecteur CCD, Δf la bande passante, h représente la constante de Planck et ν la fréquence du laser.

Le déplacement normal de la surface associée est donné par :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } \delta_{x_N} = \frac{r_0}{4\pi} \left(\frac{h\nu\Delta f}{\zeta w_0}\right)^{1/2} \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (14)$$

Par exemple, avec un faisceau laser issu d'une source d'He-Ne de puissance 2 mW et focalisé à la surface d'un échantillon avec un diamètre du spot de 0,05 mm. Si le photodétecteur utilisé a une bande passante de 10 MHz et avec $\zeta = 0,75$, alors le déplacement enregistré correspondrait à 0,3 nm.

Dans le cas du contrôle du rail en voie, où l'état de surface par endroits peut présenter des imperfections optiques, l'utilisation de détecteurs basés sur ce principe pourrait être une alternative par rapport au système de détection utilisé dans le cadre de ces travaux de thèse.

2.2.3.3 Principe de l'interférométrie hétérodyne

Cette méthode de mesure a été mise en œuvre par Royer et al. [16] pour mesurer des déplacements normaux à la surface de l'ordre $10^{-10}m$.

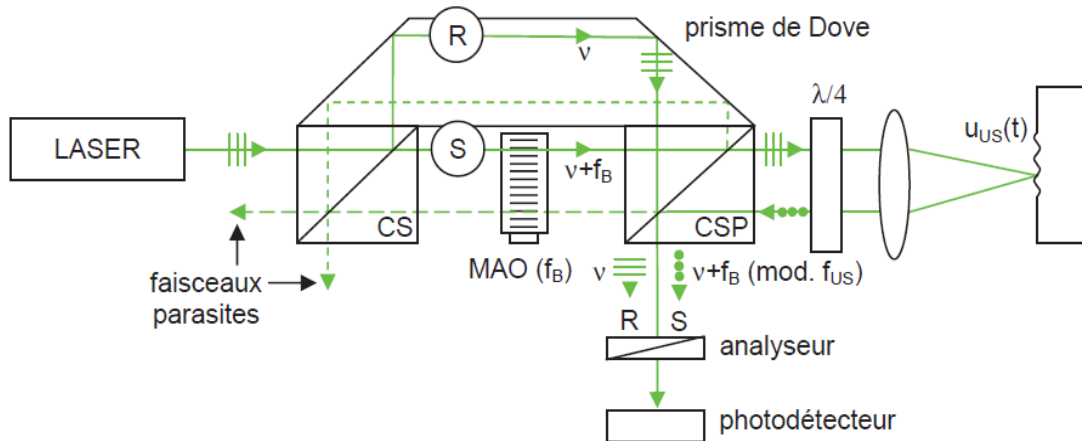


Figure 14 :Schéma optique d'une sonde interférométrique hétérodyne [7]

Cette figure représente la configuration optique compacte de la sonde interférométrique hétérodyne du type Mach-Zehnder. Le faisceau polarisé horizontalement de fréquence $\nu = f_L$ issu de la source laser est divisé en deux par le cube séparateur (CS). Celui passant par le prisme de Dove, y subit deux réflexions avant d'être renvoyé vers un photodétecteur, est pris comme faisceau de référence et l'autre faisceau constitue la sonde. Ce dernier faisceau traverse un modulateur acousto-optique qui a pour but de modifier sa fréquence en le décalant de quelques MHz ($f_B = 70 \text{ MHz}$) par rapport au faisceau de référence. Ce faisceau sonde est par la suite réfléchi par la surface de l'échantillon vibrant à la fréquence f_u par conséquent, sa phase sera modulée à cette fréquence. Il traverse une deuxième fois la lame quart d'onde et le cube séparateur (CSP) avec une polarisation verticale. Le cube CSP dévie le faisceau sonde vers un photodétecteur. Ces deux faisceaux ayant des polarités croisées passent à travers un analyseur orienté à 45° pour permettre à ces deux faisceaux d'interférer.

Contrairement à l'interférométrie homodyne, ici, les deux champs électriques décrivent dans les équations (8 et 9) n'ont plus la même fréquence. Suivant le même calcul en remplaçant les fréquences de chaque onde le signal $i(t)$ de fréquence f_B en sorti du détecteur peut ainsi s'écrire :

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } i(t) \propto I_0 \cos[f_B t + \Delta\phi + \varphi_S - \varphi_R] \text{Erreur ! Signet non défini.} \quad (15)$$

2.2.4 Avantages et inconvénients de la méthode ultrasons-laser

La méthode de génération d'ondes ultrasonores par laser s'effectue sans contact avec l'échantillon à caractériser, ce qui lui donne la possibilité de contrôler des échantillons à géométrie complexe, difficiles d'accès et/ou portés à haute température. Plusieurs types d'ondes sont générés simultanément pour une impulsion laser donnée. L'utilisation des systèmes de détection optiques offre une large bande passante, par exemple la sonde interférométrique dénommée « sonde SH-140 », utilisée dans ces travaux de thèse, a une bande passante de 45 MHz.

Cependant l'un des inconvénients majeurs de cette méthode provient de son coût qui peut dépasser les centaines de milliers d'euros mais aussi des normes de sécurité très strictes à

respecter lors de l'utilisation des lasers de puissance du fait de leur dangerosité. La majeure partie des systèmes de détection optiques sont très sensibles à l'état de la surface à tester mais aussi des vibrations mécaniques qui ont pour effet de moduler l'amplitude des signaux. Tout ceci limite parfois le champ d'application des détecteurs optiques.

2.2.5 Génération et détection ultrasonores par EMAT

Les EMATs (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) sont des dispositifs électromagnétiques capables de générer et détecter des ondes ultrasonores dans des matériaux conducteurs électriques. Leur fonctionnement peut se faire sans contact et ne nécessite pas l'utilisation de couplant. L'utilisation des EMATs n'est pas récente et date des années 1970.

2.3 Description d'un EMAT

Le mécanisme de génération d'un EMAT peut se faire suivant trois mécanismes en fonction des propriétés de l'échantillon [19]–[21] : la force de Lorentz, la force d'aimantation et/ou la magnétostriction.

Un dispositif EMAT est généralement constitué d'une bobine conductrice et d'un aimant permanent (Figure 15.a) ou d'un électro-aimant.

Lorsque la bobine, placée au voisinage d'un échantillon conducteur électrique, est alimentée par un générateur électrique à la fréquence ultrasonore désirée, un courant de Foucault est induit au voisinage de celle-ci. Le champ magnétique présent interagit avec ce courant et engendre une force électromagnétique appelée force de Lorentz dont l'expression peut s'écrire comme suit :

$$F = J \wedge B$$

(16)

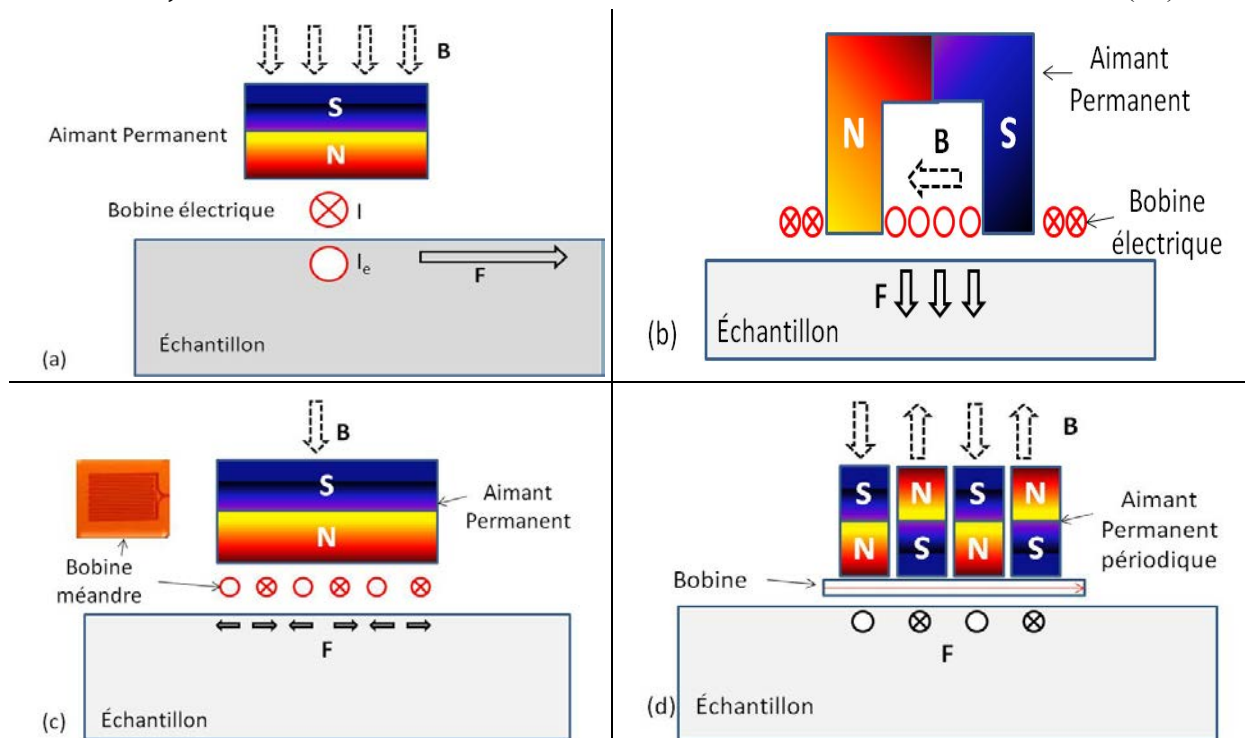


Figure 15 : Différentes configurations de l'aimant et la bobine pour la génération d'ondes

ultrasonores suivant le mécanisme de la force de Lorentz

Le mécanisme de la génération d'ondes par la technologie EMAT est fortement lié à la disposition du champ magnétique statique généré par l'aimant et du courant induit par la bobine. Plusieurs types d'onde peuvent être générés suivant la polarité de l'aimant et la direction de circulation du courant.

Comme nous pouvons le constater : l'utilisation d'un aimant en forme de (u) (figure 15.b), permet la génération d'ondes longitudinales dans le matériau. Pour générer des ondes de surface du type Rayleigh, la configuration (figure 15.c) utilisant une bobine dite bobine méandre peut être utilisée. Enfin, la configuration utilisant des aimants permanents périodiques comme indiqué à la figure 15.d offre la possibilité de générer des ondes de cisaillement horizontales (SH), qui se propagent horizontalement par rapport à la surface de l'échantillon. Ce dernier type d'onde est très difficilement obtenu avec les autres méthodes classiques.

L'optimisation des rendements de ces dispositifs nécessite une bonne compréhension des mécanismes de couplage entre le courant d'excitation, le champ électromagnétique et les champs de déplacement associés, produits par les ondes ultrasonores résultantes.

Afin de répondre à cette problématique, plusieurs auteurs ont étudié les mécanismes de génération d'ondes ultrasonores par EMAT. Thompson [22] a présenté un modèle par éléments finis qui prédit l'efficacité de génération des ondes ultrasonores par EMAT dans des polycristaux métalliques ferromagnétiques, notamment les ondes guidées du type Rayleigh ou Lamb. Le principe de fonctionnement des EMAT a également été étudié par élément fini par Ludwig [23] puis par Kaltenbacher [24]. Jian et al [25] ont développé un modèle pour la génération d'ondes de Rayleigh par EMAT et trouvé la solution à ce modèle par éléments finis. Ils ont expliqué comment les forces de Lorentz dues aux champs magnétiques statique et dynamique interagissent de façon constructive et destructive, cela montre que pour atteindre une bonne efficacité de génération des ondes de Rayleigh, l'orientation du champ magnétique externe doit être correcte.

Kawashima [26] a étudié expérimentalement que pour un même transducteur, les caractéristiques des ondes générées diffèrent selon le type du matériau (non magnétique ou ferromagnétique). Dans le cas des matériaux non magnétiques, la génération d'ondes ultrasonores par EMAT est régie par le mécanisme de la force de Lorentz [27]. Dans le cas des échantillons ferromagnétiques comme l'acier, la génération d'un EMAT s'effectue suivant deux mécanismes : la magnétostriction et la force de Lorentz.

Le mécanisme de la force de Lorentz est linéaire et insensible aux propriétés du matériau telles que la conductivité électrique et la perméabilité magnétique relative, tandis que la magnétostriction est fortement non-linéaire et dépend en grande partie des propriétés physiques du matériau et de l'orientation du champ magnétique appliqué [28].

Des études antérieures ont montré que la magnétostriction constitue le mécanisme dominant lorsque le champ magnétique statique de l'EMAT est orienté parallèlement à la surface de l'échantillon ferromagnétique [28]. Par ailleurs, quand le champ statique est normal à la surface de l'échantillon, certains auteurs affirment que le mécanisme de la force de Lorentz

est dominant [28]–[30], en revanche d’autres affirment que la magnétostriction est l’effet majeur pour la plupart des cas pratiques [31].

Dans le cadre de notre étude qui est portée sur des échantillons de rail constitués en acier ferromagnétique, le mécanisme de génération des ondes ultrasonores par EMAT est dominé par la force de Lorentz car le champ magnétique des sondes utilisées est toujours orienté normalement à la surface libre.

Le mécanisme de la force de Lorentz sera abordé dans la section suivante en s’inspirant des travaux Hirao et al [18] et de Bozorth [27].

2.3.1 Mécanisme de la force de Lorentz

Le principe de fonctionnement d’un EMAT peut être décrit par les équations de Maxwell [19] :

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (17)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (18)$$

La loi d’Ohm :

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (19)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (20)$$

Où \mathbf{E} (V/m) et \mathbf{D} (C/m²) représentent respectivement le champ électrique et la densité de flux électrique, \mathbf{B} (T) et \mathbf{H} (A/m) représentent la densité de flux magnétique et le champ magnétique respectivement, \mathbf{J} (A/m²) est la densité de courant, \mathbf{M} (T) est la magnétisation, σ et μ_0 (= $4\pi 10^{-7}$ H/m) représentent respectivement la conductivité électrique et la perméabilité magnétique dans le vide. Le terme $\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$ est souvent très faible dans toutes les régions, sa contribution est négligée pour des fréquences inférieures à 100 MHz (approximation quasi-statique).

Pour simplifier les calculs, on considère un plan à deux dimensions comme le montre la figure 16, Ce dispositif est constitué d’un EMAT placé au voisinage d’un échantillon ferromagnétique avec un entrefer (lift-off) noté h .

L’application d’un champ électrique \mathbf{E} sur un matériau conducteur électrique fait apparaître un champ de forces dites force de Coulomb ($-e\mathbf{E}$) qui est appliqué aux électrons individuellement (e). Le mouvement des électrons qui en résulte est décrit par l’équation (21)

$$m\dot{\mathbf{v}}_e = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \frac{m\mathbf{v}_e}{\tau} \quad (21)$$

Où n_e est la densité de nombre d’électrons, m est la masse de l’électron, τ ($\tau \approx 10^{-14}$ s) est le temps de collision moyen entre un ion et un électron, \mathbf{v}_e représente la vitesse moyenne des

électrons. L'hypothèse de négliger les oscillations harmoniques du champ électrique avec la fréquence angulaire ω ($\omega\tau \ll 1$) permet de réécrire l'équation 21 sous la forme suivante :

$$n_e \frac{m\mathbf{v}_e}{\tau} = -n_e e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) \quad (22)$$

Le champ de forces appliquées aux ions est approximativement donné par :

$$\mathbf{f} = NZ_e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_i \Delta \mathbf{B}) + n_e(m\mathbf{V}_e)/\tau \quad (23)$$

Où N , Z_e et \mathbf{V}_i représentent respectivement le nombre d'électrons, la densité de charge et la vitesse des ions. En notant que, $NZ_e = n_e e$ et que la vitesse des ions est négligeable par rapport à celle des électrons. La vitesse des ions étant très inférieure à celle des électrons, le premier terme de l'équation 23 peut être négligé.

$$\text{Erreur ! Signet non défini. } \mathbf{f} = -n_e e \mathbf{V}_e \times \mathbf{B} \text{ Erreur ! Signet non défini.} \quad (24)$$

Par analogie à l'équation 17, le terme $-n_e e \mathbf{V}_e = \mathbf{J}$ est la densité de courant induit.

Or d'après l'équation 18, la densité de courant \mathbf{J} peut s'exprimer comme :

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{H}_x^M}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{H}_z^M}{\partial x} \quad (25)$$

\mathbf{H}_x^M et \mathbf{H}_z^M représentent les composantes du champ magnétique dans le matériau, leur expression ont été établis par Hirao [19] comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{H}_x^M = \frac{I}{2a} \cdot A_0 e^{-k_0 h} e^{qz} \cos k_0 x \\ \mathbf{H}_z^M = \frac{k_0 \delta}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{\mu}_{xx}}{\bar{\mu}_{zz}} \cdot \frac{I}{2a} \cdot A_0 e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-k_0 h} e^{qz} \sin k_0 x \end{cases} \quad (26)$$

Où :

$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \eta \bar{\mu}_{xx}}}$; est la profondeur de pénétration (qui est de l'ordre de 0,01 mm à 1 MHz dans l'acier).

Λ ; est la périodicité de la bobine, elle est proportionnelle à la longueur d'onde ultrasonore générée par l'EMAT.

a ; est ici le diamètre d'un filament de la bobine.

$$A_0 = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{a\pi}{\Lambda}\right) ;$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\Lambda} ;$$

$$\text{Et } q^2 = \frac{\bar{\mu}_{xx}}{\bar{\mu}_{zz}} k_0^2 + \frac{2j}{\delta^2}; (\text{Re}(q) < 0)$$

L'approximation $k_0 \delta \ll 1$ permet de déduire que $\mathbf{H}_x^M \gg \mathbf{H}_z^M$. Cela implique que la densité de courant induit devient : $\mathbf{J} = -\frac{\partial \mathbf{H}_x^M}{\partial z}$

Ainsi, l'expression des composantes f_x et f_z de la force de Lorentz peut s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} f_x = B_z \frac{\partial H_x^M}{\partial z} \\ f_z = -B_x \frac{\partial H_x^M}{\partial z} \end{cases} \quad (27)$$

Cette expression de la force de Lorentz ne tient pas compte de la contribution du champ magnétique dynamique engendré par le courant induit. Jian et al [25] stipulent que pour des applications de CND où les fréquences sont de l'ordre de plusieurs centaines de kHz à quelques MHz, la contribution du champ dynamique peut être plus grande que celle du champ magnétique statique. Ceci dépend de l'intensité du champ magnétique statique et de celle du courant qui traverse la bobine, mais également des propriétés du matériau. A cet effet, la négligence de la contribution du champ dynamique ne doit pas être systématique.

Cependant, dans le cas où cette contribution n'est pas négligée, l'expression de la force de Lorentz peut s'écrire :

$$\begin{cases} f_x = (B_z + \mu_0 \bar{\mu}_{zz} H_z^M) \frac{\partial H_x^M}{\partial z} \\ f_z = -(B_x + \mu_0 \bar{\mu}_{xx} H_x^M) \frac{\partial H_x^M}{\partial z} \end{cases} \quad (28)$$

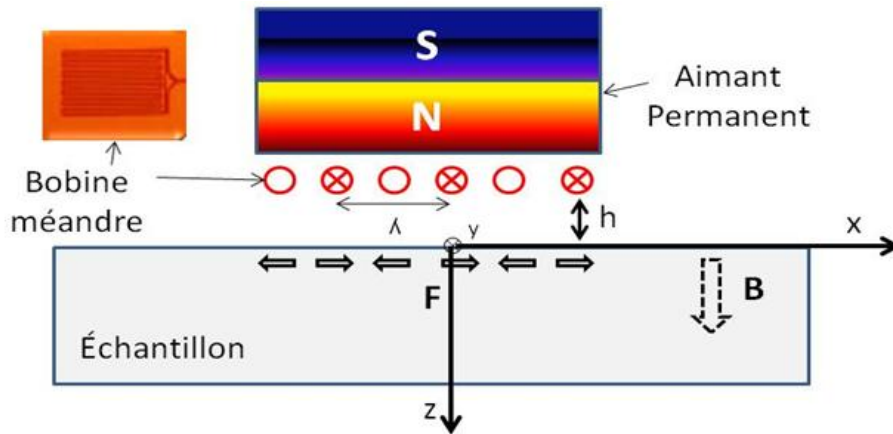


Figure 16 : schéma d'un dispositif détaillé dans le plan xz

2.3.2 Principe de la détection par EMAT

La réception des ondes ultrasonores par EMAT s'effectue suivant le principe inverse de la génération. Les déformations engendrées par la propagation des ondes ultrasonores créent un champ magnétique dynamique au voisinage de la surface de l'échantillon conducteur électrique. Ce champ peut être détecté par un EMAT placé au voisinage de cette surface.

Le champ électrique induit par la déformation (\mathbf{u}) du matériau peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B} \quad (29)$$

Ceci est le mécanisme inverse de la force de Lorentz. La densité de courant induit dans le matériau est de la forme :

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}) \quad (30)$$

Ce courant est détecté par le transducteur et est transformé en un signal de tension proportionnelle à la vitesse de l'onde émise [32].

2.3.3 Influence du lift-off

La présence d'un entrefer h entre la bobine et la surface libre de l'échantillon est appelé lift-off par certains auteurs comme Hirao et al [19]. En revanche, pour d'autres comme Petcher et al [33], le lift-off est défini comme étant la distance entre l'aimant et la surface libre du matériau. Son augmentation diminue exponentiellement l'amplitude du champ magnétique statique dans le matériau comme le montre l'équation 26.

Suivant la nature du matériau, son influence sur l'émetteur et le récepteur peut différer. Petcher et al [33] ont mis en évidence ce phénomène dans leur étude. La figure b, donne la variation de l'amplitude crête-à-crête de l'onde de Rayleigh détectée en fonction du lift-off pour l'émetteur et le récepteur. Sur l'aluminium, on observe que les deux capteurs ont la même sensibilité par rapport au lift-off, tandis que dans l'acier l'émetteur est plus sensible au lift-off que le récepteur.

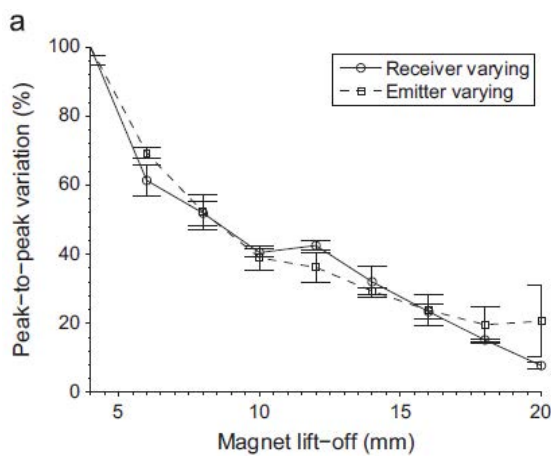


Figure 17 : Variation de l'amplitude du signal en fonction du lift-off sur un échantillon d'aluminium [33]

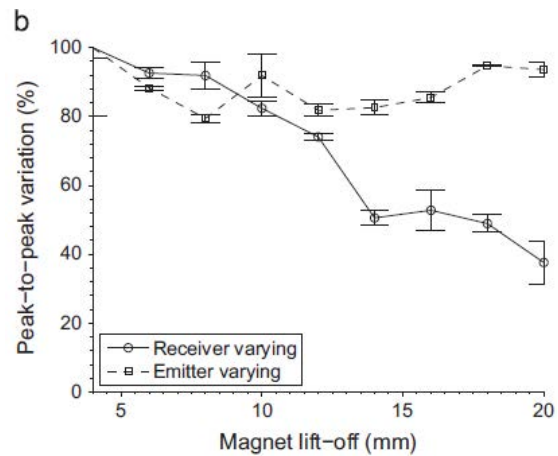


Figure 18 : Variation de l'amplitude du signal en fonction du lift-off sur un échantillon d'acier [33]

2.3.4 Avantages et inconvénients des EMATs

Les EMATs présentent plusieurs avantages dans le contrôle non destructif. Son fonctionnement ne nécessite pas un contact avec l'échantillon, ni l'utilisation de couplant acoustique, ce qui facilite l'opération et permet de minimiser les temps de préparation de la surface. Ils offrent une bonne reproductibilité des mesures, ce qui n'est pas souvent le cas avec les capteurs piézoélectriques en raison de l'étalement du fluide couplant qui n'est parfois

pas uniforme à la surface de l'échantillon. Les EMATs peuvent aussi s'utiliser pour le contrôle d'échantillons portés à température élevée.

Un autre avantage est que les EMATs sont capables de produire une large gamme d'ondes ultrasonores de manière simple selon la configuration du capteur : type de bobine et orientation du champ magnétique statique.

Malgré ces avantages, les EMAT présentent des inconvénients notamment ceux liés à leur sensibilité au lift-off mais aussi à leur faible rendement de transmission comparé aux transducteurs piézoélectriques.

2.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter les différentes méthodes de contrôle non destructif sans contact utilisées dans le cadre de ces travaux de thèse.

Dans un premier temps nous avons présenté la méthode de génération et de détection ultrasonores par sources laser. Ceci, nous a permis de présenter brièvement le fonctionnement d'un laser, mais aussi d'aborder les mécanismes de génération d'ondes ultrasonores par interaction rayonnement-matière. Parmi les différents modes de génération abordés, le mode thermoélastique offre la possibilité de générer les ondes acoustiques dans le matériau sans altérer ses propriétés. Par conséquent, une attention particulière lui a été accordée dans ces travaux. Nous avons aussi vu que l'utilisation d'une source linéique permet de concentrer l'énergie de l'onde de Rayleigh générée suivant une direction normale à celle-ci, cela représente une caractéristique intéressante dans le cadre du contrôle du rail. Des exemples de techniques de détection par interférométries ont été présentés ainsi que les avantages et inconvénients de cette méthode.

Dans un second temps nous nous sommes intéressés à la génération et à la détection d'ondes ultrasonores par EMAT. La description des dispositifs EMAT a été abordée, nous y avons montré l'importance de l'orientation du champ magnétique et du sens du courant dans la bobine pour la génération et la détection de divers types d'ondes ultrasonores. Suivant les propriétés du matériau, trois mécanismes de couplages peuvent entrer en jeu, dans le cadre de cette étude, le mécanisme de couplage suivant le principe de la force de Lorentz a été pris en compte, les raisons ont été explicitées. Nous avons montré le principe de la détection par EMAT, qui est régi par le mécanisme inverse de la génération. Enfin, comme nous l'avons fait pour la méthode ultrasons-laser, les avantages et les inconvénients de la méthode EMAT ont été présentés.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différents résultats obtenus en statique portant sur la détection de défauts sur des échantillons de rail d'une part avec la méthode ultrasons-laser et d'autre part avec la méthode EMAT.

Bibliographie

- [1] C. B. Scruby et L. E. Drain, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*. CRC Press, 1990.
- [2] D. Royer, Génération et détection optiques d'ondes élastiques. Ed. Techniques Ingénieur, 1996.
- [3] F. Jenot, Génération et détection d'ondes élastiques par sources lasers : applications au contrôle non destructif. Valenciennes, 2003.
- [4] J. Ready, *Effects of High-Power Laser Radiation*. Elsevier, 2012.
- [5] M. Lemaire, Caractérisation de structures du type couche sur substrat par ultrasons-lasers. Valenciennes, 2008.
- [6] S. Fourez, « Caractérisation de couches minces par ondes de surface générées et détectées par sources lasers », phdthesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.
- [7] F. Faëse, Génération d'ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers : applications à la caractérisation sans contact de défauts. Valenciennes, 2013.
- [8] G. F. Miller et H. Pursey, « The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid », *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 223, n° 1155, p. 521-541, may 1954.
- [9] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, et S. B. Palmer, « Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, n° 5, p. 1362-1369, nov. 1981.
- [10] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, et S. B. Palmer, « Laser generated ultrasound at modified metal surfaces », *Ultrasonics*, vol. 19, n° 3, p. 103-108, may 1981.
- [11] C. Corbel, F. Guillois, D. Royer, M. A. Fink, et R. De Mol, « Laser-generated elastic waves in carbon-epoxy composite », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 40, n° 6, p. 710-716, nov. 1993.
- [12] P. Zhang, C. F. Ying, et J. Shen, « Directivity patterns of laser thermoelastically generated ultrasound in metal with consideration of thermal conductivity », *Ultrasonics*, vol. 35, n° 3, p. 233-240, may 1997.
- [13] L. R. F. Rose, « Point-source representation for laser-generated ultrasound », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, n° 3, p. 723-732, mars 1984.
- [14] A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, et S. B. Palmer, « Laser-generation of directional surface acoustic wave pulses in metals », *Opt. Commun.*, vol. 42, n° 2, p. 116-120, juin 1982.
- [15] J.-P. Monchalain, « Optical detection of ultrasound », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 33, p. 485-499, sept. 1986.
- [16] D. Royer et E. Dieulesaint, « Optical Detection of Sub-Angstrom Transient Mechanical Displacements », 1986. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.institut-langevin.espci.fr/IMG/pdf/IEEE1986.pdf>. [Consulté le: 09-févr-2016].

- [17] J.-P. Monchalain, R. Héon, P. Bouchard, et C. Padioleau, « Broadband optical detection of ultrasound by optical sideband stripping with a confocal Fabry–Perot », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, n° 16, p. 1612-1614, oct. 1989.
- [18] D. Royer, M.-H. Noroy, et M. Fink, « Optical generation and detection of elastic waves in solids », *J. Phys. IV*, vol. 04, n° C7, p. C7-673-C7-684, juill. 1994.
- [19] M. Hiraet H. Ogi, *EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [20] X. Jian, S. Dixon, K. Quirk, et K. T. V. Grattan, « Electromagnetic acoustic transducers for in- and out-of plane ultrasonic wave detection », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 148, n° 1, p. 51-56, nov. 2008.
- [21] S. B. Palmer et S. Dixon, « Industrially viable non-contact ultrasound », *Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 45, n° 3, p. 211-217, mars 2003.
- [22] R. B. Thompson, « A model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals », *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. 25, n° 1, p. 7-15, janv. 1978.
- [23] R. Ludwig et X.-W. Dai, « Numerical simulation of electromagnetic acoustic transducer in the time domain », *J. Appl. Phys.*, vol. 69, n° 1, p. 89-98, janv. 1991.
- [24] M. Kaltenbacher, K. Ettinger, R. Lerch, et B. Tittmann, « Finite element analysis of coupled electromagnetic acoustic systems », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, n° 3, p. 1610-1613, mai 1999.
- [25] X. Jian, S. Dixon, K. T. V. Grattan, et R. S. Edwards, « A model for pulsed Rayleigh wave and optimal EMAT design », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 128, n° 2, p. 296-304, avr. 2006.
- [26] K. Kawashima, « Experiments with two types of electromagnetic ultrasonic transducers », *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 60, n° 2, p. 365-373, août 1976.
- [27] M. R. Gaertner, W. D. Wallace, et B. W. Maxfield, « Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals », *Phys. Rev.*, vol. 184, n° 3, p. 702-704, août 1969.
- [28] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*. Princeton (N.J.); Toronto; London [etc]: D. Van Nostrand, 1951.
- [29] A. Wilbrand, « EMUS-Probes for Bulk Waves and Rayleigh Waves. Model for Sound Field and Efficiency Calculations », in *New Procedures in Nondestructive Testing*, P. D. P. Höller, Éd. Springer Berlin Heidelberg, 1983, p. 71-80.
- [30] Wilbrand, A., « Quantitative modeling and experimental analysis of the physical properties of electromagnetic-ultrasonic transducers. », in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 7A*, 1988, p. 671-680.
- [31] H. Ogi, « Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves », *J. Appl. Phys.*, vol. 82, n° 8, p. 3940-3949, oct. 1997.
- [32] R. Ribichini, « Modelling of Electromagnetic Acoustic Transducers », févr-2011.
- [33] P. A. Petcher, M. D. G. Potter, et S. Dixon, « A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail », *NDT E Int.*, vol. 65, p. 1-7, juill. 2014.

Chapitre III. Détection en mode statique

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons rappelé les mécanismes utilisés par les méthodes Ultrasons-Laser et EMAT afin de générer et de détecter les ondes de Rayleigh. Ce chapitre aura pour objectif de valider la faisabilité de la détection, en statique, de défauts surfaciques sur le champignon du rail tels que les squats et les head-checks avec les équipements disponibles pour ces deux méthodes de contrôle. Les résultats obtenus pourront servir d'éléments de référence pour une éventuelle comparaison des performances des deux techniques pour le contrôle en statique.

La détection de défauts surfaciques dans le rail en statique avec des ondes ultrasonores de surface a déjà fait l'objet de plusieurs publications. Parmi ces travaux nous pouvons citer par exemple ceux qui ont utilisés la méthode piézoélectrique [1] et [2], ceux qui ont utilisés la méthode EMAT [3], [4]–[7] mais également il y a d'autres qui se sont intéressés à la méthode Ultrasons-Laser [8]–[11].

C'est dans cet esprit que ce chapitre présentera les résultats expérimentaux des essais réalisés en statique pour la détection de fissures surfaciques localisées au niveau du champignon du rail. Nous présenterons dans un premier temps les échantillons utilisés pour la réalisation des essais.

Ensuite, nous effectuerons une mesure expérimentale de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh générées avec les deux méthodes utilisées dans cette étude.

Après cela, nous présenterons les résultats des essais mis en œuvre pour la détection des défauts surfaciques par Ultrasons-Laser ainsi que le dispositif expérimental utilisé.

De la même manière nous allons présenter les résultats des essais obtenus avec les EMATs après avoir décrit le dispositif expérimental utilisé.

Nous terminerons ce chapitre par une conclusion et des perspectives.

3.2 Présentation des échantillons

Dans le cadre de cette étude de faisabilité, nous effectuons dans un premier temps les essais en statique sur des échantillons de rail contenant des défauts artificiels ayant la forme des défauts précités dans le chapitre 1. A cet effet, nous avons fait usiner avec une fraise scie, des fentes représentatives de squats et de head-checks sur les échantillons destinés aux essais EMAT et Ultrasons-Laser.

Nous avons fait le choix de ne pas utiliser les mêmes échantillons pour les deux méthodes de détection utilisées dans cette étude. Ce choix se justifie par le fait que, pour la méthode Ultrasons-Laser, les éléments du dispositif expérimental comme les lasers disponibles au laboratoire ne peuvent être déplacé au-dessus du rail en raison de leurs poids. Ainsi, nous avons choisi de faire déplacer les échantillons pour cette méthode.

Afin de réduire le poids des échantillons pour faciliter le déplacement, nous avons prélevé des morceaux de champignons du rail. Parmi ces échantillons, nous avons réalisé des fissures artificielles représentatives des défauts recherchés.

Contrairement au dispositif pour la méthode Ultrasons-Laser, le dispositif expérimental pour la méthode EMAT est moins imposant en termes de poids et de volume. Ainsi, les capteurs EMATs peuvent être déplacés plus facilement. C'est pour cette raison que nous avons utilisé des sections de rail plus longues, permettant de contenir à la fois des défauts artificiels représentatifs de squats et de head-checks.

3.3 Echantillon pour essais EMATs

Sur le tronçon de rail de type UIC60, nous avons usiné 4 fissures (figure 1) dont un squat (D1) et 3 fissures représentatives de Head-check (D2, D3, D4). Les caractéristiques de ces différentes fissures sont mentionnées sur le tableau 1. La figure 1 montre la géométrie surfacique des fissures sur la tête du rail et la figure 2 présente leurs profils en profondeur suivant la section transversale du rail.

	D1	D2	D3	D4
Profondeurs réelles prenant compte de l'inclinaison θ° (mm)	4	8	7	4,1
Ouverture de la lèvre (mm)	1,5			
Angle d'inclinaison par rapport à la surface de roulement (α°) (figure 1)	0	45	45	70
Angle d'inclinaison par rapport au plan transversal du rail (θ°) (figure 2)	0	0	45	70
Nature du défaut	Squat	Head-check	Head-check	Head-check

Tableau 1: Nomenclature et caractéristiques des défauts surfaciques

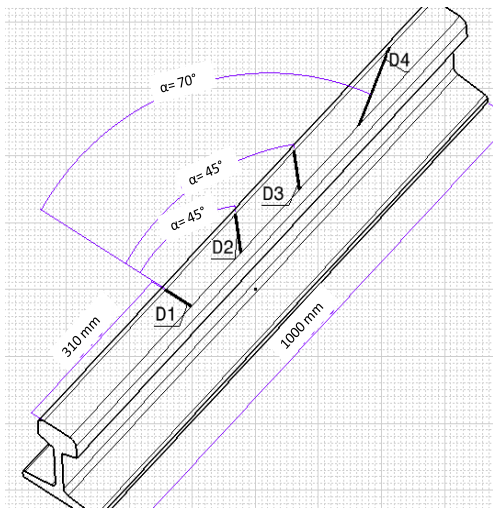


Figure 1 : Configuration des défauts mettant en évidence les angles d'inclinaison des fissures par rapport à la surface de roulement

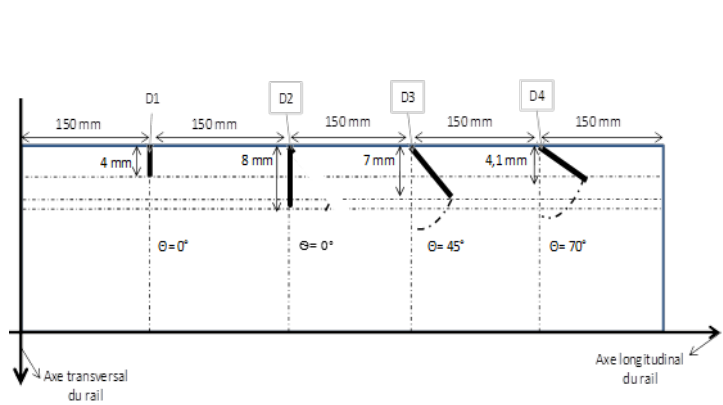
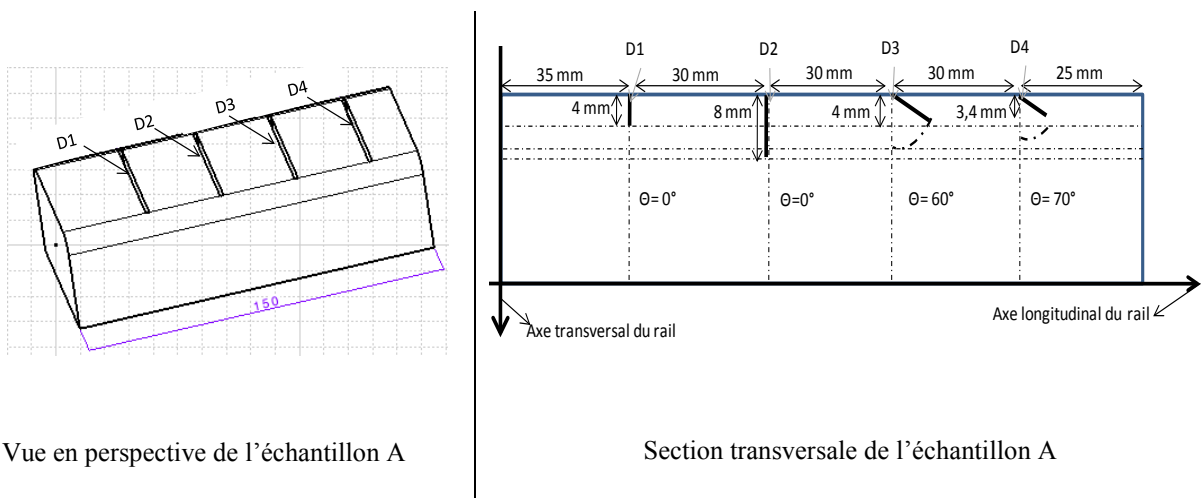


Figure 2 : Configuration des défauts mettant en évidence les angles d'inclinaison des fissures par rapport au plan transversal du rail (θ°) (coupe transversale de la section du rail)

3.4 Echantillons pour essais Ultrasons-Laser

Nous disposons de trois échantillons, le premier constitue notre échantillon de référence et est supposé sans défaut. Sur les deux autres échantillons A et B, de longueur 150 mm chacun, nous avons réalisé respectivement, des fissures artificielles représentatives de squats et de head-checks. Sur l'échantillon A, les quatre squats sont perpendiculaires à l'axe longitudinal du rail. Les fissures D1 et D2 sont parallèles au bord du rail pris comme le plan transversal du rail ($\theta=0^\circ$), tandis que D3 et D4 font un angle par rapport au bord, respectivement de 60° et 70° . L'ouverture des fissures est d'environ 1,5 mm.

Les paramètres géométriques des ces quatre squats sont donnés à la figure 3 et dans le tableau 2.



Vue en perspective de l'échantillon A

Section transversale de l'échantillon A

Figure 3 : Configuration de l'échantillon A contenant des squats (unités en mm)

	D1	D2	D3	D4
Profondeurs (mm)	4	8	4	3,4
Ouverture de la lèvre (mm)	1,5			
Angle d'inclinaison par rapport au plan transversal du rail (θ°)	0	0	60	70
Nature du défaut	Squat			

Tableau 2 : Paramètres géométriques de l'échantillon A

Sur l'échantillon B (figure 4), nous y avons usiné trois fissures, (trois head-checks). Ces fissures D5, D6 et D7 sont inclinées par rapport à la surface de roulement du rail respectivement de 25° et de 45° pour les deux dernières. Elles forment aussi un angle (θ) par rapport au bord du rail de 25° et de 45° pour les deux dernières (voir tableau 3).

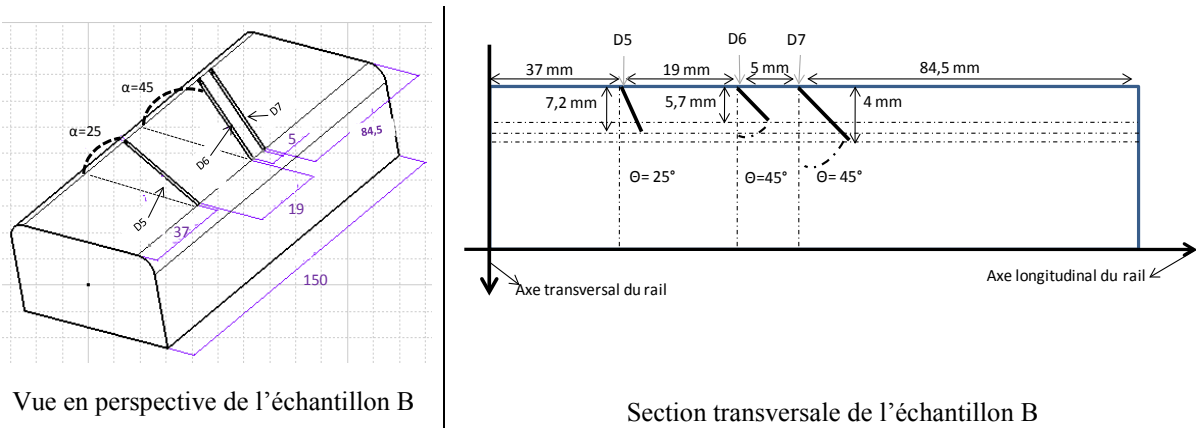


Figure 4 : Configuration de l'échantillon B contenant des head-checks en fonction de leurs inclinaisons (α , θ) et de leurs positions

	D5	D6	D7
Profondeurs réelles prenant compte de l'inclinaison θ° (mm)	7,2	5,7	8,5
Ouverture de la lèvre (mm)	1,5		
Angle d'inclinaison par rapport à la surface de roulement (α°)	25	45	45
Angle d'inclinaison par rapport au plan transversal du rail (θ°)	25	45	45
Nature du défaut	Head checks		

Tableau 3 : Nomenclature et caractéristiques des défauts superficiels sur l'échantillon B

3.5 Détection des défauts par Ultrasons-Laser

3.5.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la génération et la détection des ondes ultrasonores dans le rail est illustré à la figure 5. Il est constitué d'une source laser Nd:YAG impulsionnelle qui peut être doublée en fréquence et d'un interféromètre hétérodyne de type Mach-Zehnder (SH-140) permettant la détection du déplacement normal de la surface de l'échantillon provoqué par les ondes ultrasonores.

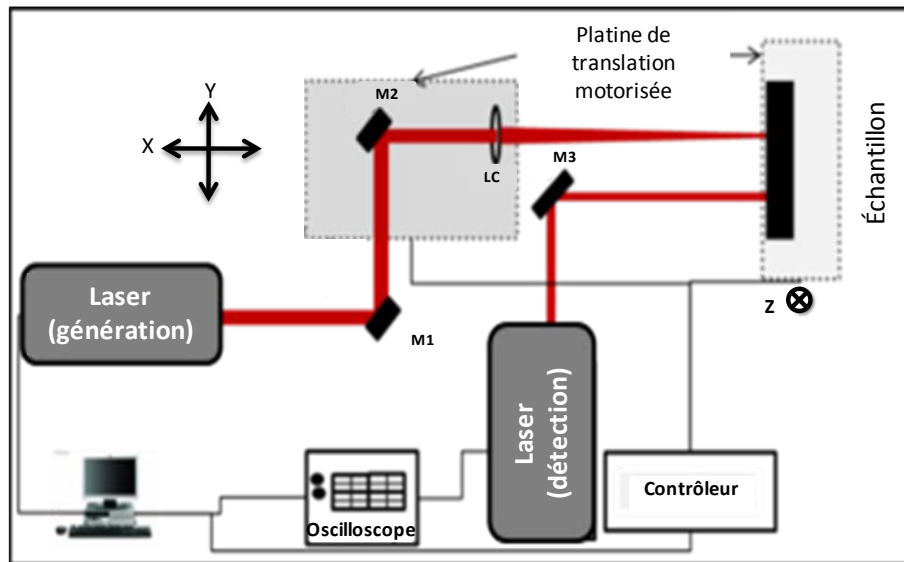


Figure 5 : Schéma du dispositif expérimental pour la méthode Ultrasons-Laser

Le faisceau source est renvoyé par l'intermédiaire de deux miroirs plans vers une lentille cylindrique. Cette lentille focalise le faisceau sur la surface de l'échantillon sous la forme d'une ligne. Comme cela a été présenté au chapitre précédent, l'utilisation de la source linéique permet de favoriser la direction de propagation des ondes de Rayleigh excitées et donc de mieux maîtriser la propagation suivant la direction perpendiculaire à l'axe de la ligne qui passe par son milieu d'un point de vue de l'amplitude des déplacements engendrés [12]–[16]. Le miroir M2 et la lentille sont placés sur une platine de translation pour permettre le réglage de la distance entre émetteur-récepteur suivant y.

3.5.1.1 Laser de génération

Les sources linéiques présentent l'avantage de pouvoir être très directives ce qui n'est pas le cas des sources ponctuelles qui sont omnidirectionnelles [14], [17]–[19].

La source utilisée pour la génération des ondes ultrasonores, est un laser Nd:YAG doublé en fréquence ce qui correspond à une longueur d'onde de 532 nm [20]. L'énergie en sortie peut être ajustée en modifiant le facteur de qualité de la cavité laser. Une augmentation ou une diminution du retard Q-Switch permet de varier l'énergie en sortie du laser [21].

Cette énergie en sortie du laser peut aller de quelques mJ à une centaine de mJ. La répartition spatiale de l'énergie lumineuse est gaussienne. La largeur à mi-hauteur de la variation

temporelle de l'énergie lumineuse émise est comprise entre 4 et 6 ns au maximum d'énergie [13].

3.5.1.2 Système de détection

Nous disposons d'une sonde interférométrique hétérodyne (SH-140) de longueur d'onde 532 nm, d'une puissance de 100 mW et dont la bande passante est comprise entre 200 kHz et 45 MHz. Elle délivre un signal proportionnel au déplacement normal de la surface de l'échantillon engendré par le passage de l'onde ultrasonore. Sa détectivité est inférieure à $10^{-4} \text{Å} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ et sa sensibilité d'environ $10 \text{ mV} \cdot \text{Å}^{-1}$ [13]. Son principe de fonctionnement est présenté dans le chapitre 2. Un miroir de renvoi (M3) permet au faisceau sonde d'atteindre l'échantillon et de régler son orientation vis-à-vis de ce dernier. Une importante phase de réglage de la sonde est effectuée préliminairement à chaque expérience. Elle consiste à maximiser l'amplitude de la porteuse en jouant sur l'orientation du miroir M3 et la focalisation du faisceau sonde avec l'objectif en sortie du SH-140. Il faut en outre s'assurer de l'horizontalité de la surface de l'échantillon vis-à-vis de la sonde pour disposer des mêmes performances sur la totalité de la surface de l'échantillon.

L'acquisition des signaux s'effectue par le biais d'un oscilloscope Lecroy 9350A dont la fréquence d'échantillonnage est de 500 MHz. Il offre la possibilité d'optimiser le rapport signal/bruit de nos mesures par plusieurs moyens : en réalisant une moyenne arithmétique sur plusieurs impulsions, en optimisant la bande passante autour de nos fréquences d'étude et en proposant des filtres passe-bas de bruit haute fréquence.

Un ordinateur contrôle la source laser et les tables de déplacement. Il permet l'acquisition des données et d'effectuer des essais automatisés. Ces divers instruments du dispositif expérimental communiquent par bus GPIB.

Un procédé de traitement du signal est ensuite appliqué sur les signaux temporels et l'analyse des résultats donne des informations sur l'intégrité de l'échantillon de rail.

3.5.2 Propagation de l'onde de Rayleigh générée par Ultrasons-Laser dans le champignon du rail

Premièrement, nous cherchons à déterminer expérimentalement la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans un échantillon de rail sans défaut. Ensuite, nous évaluons l'interaction onde/défauts en statique sur des échantillons contenant des défauts artificiels représentatifs des squats et des head-checks.

Pour obtenir la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh se propageant dans un échantillon, nous effectuons des mesures du temps de vol de l'onde de surface entre l'émetteur et le récepteur. Pour cela nous procédons comme suit :

Le point de détection étant maintenu à une position fixe, la source linéique est éloignée du point de détection suivant l'axe longitudinal de l'échantillon de référence par pas de 6 mm (figure 6).

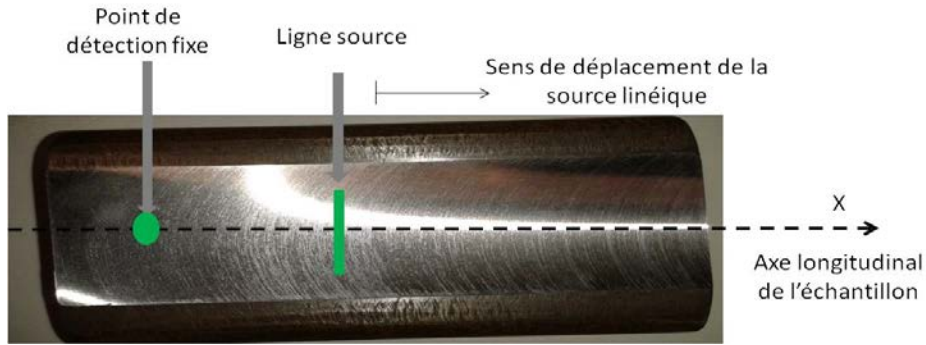
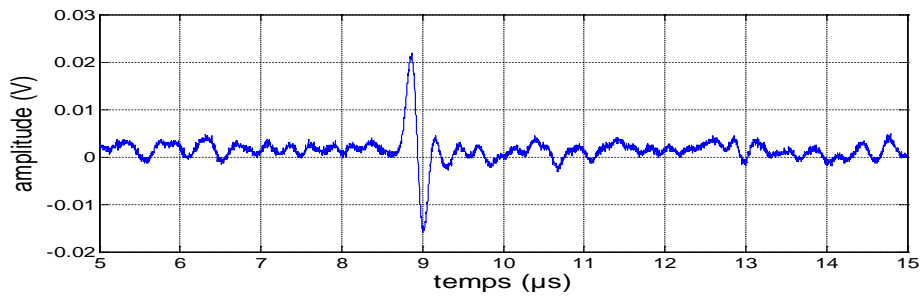
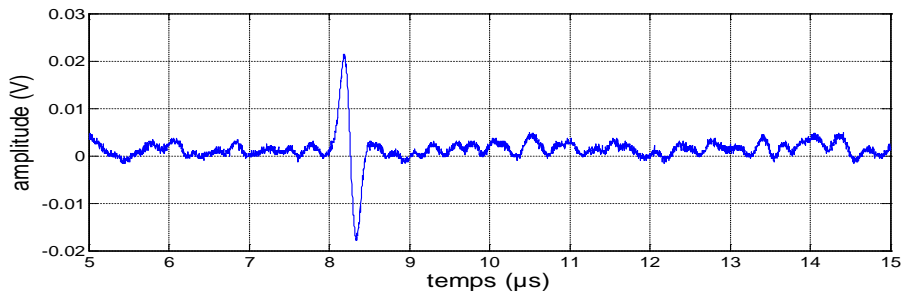
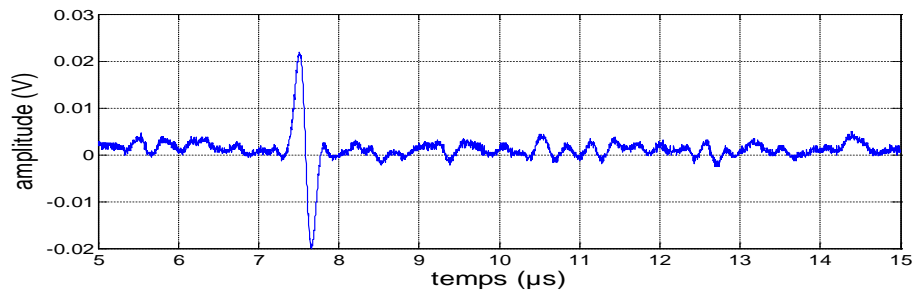


Figure 6 : Configuration expérimentale

Quelques résultats sont présentés dans le tableau 4 :



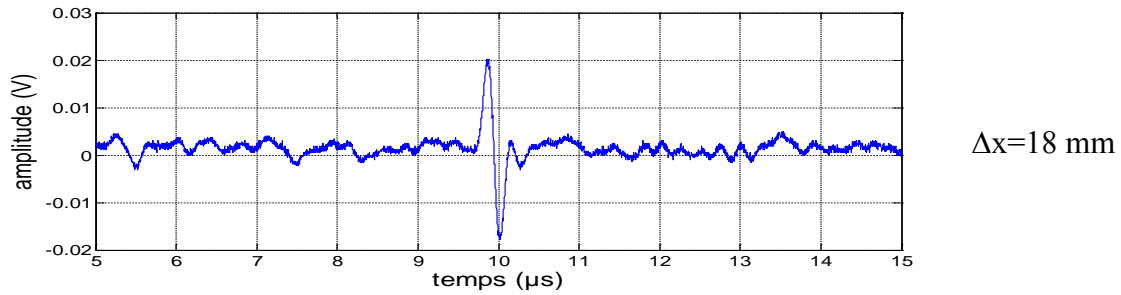


Tableau 4 : Exemple de signaux associés à l'onde de Rayleigh en fonction de la distance de propagation entre l'émetteur et le récepteur

Pour chaque mesure, nous notons la distance de séparation et le temps d'arrivée de l'onde. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7. Le calcul de la pente permet d'obtenir la vitesse de l'onde de Rayleigh. Celle-ci est de 2970 m/s, ce qui est en accord avec les valeurs de la littérature [16].

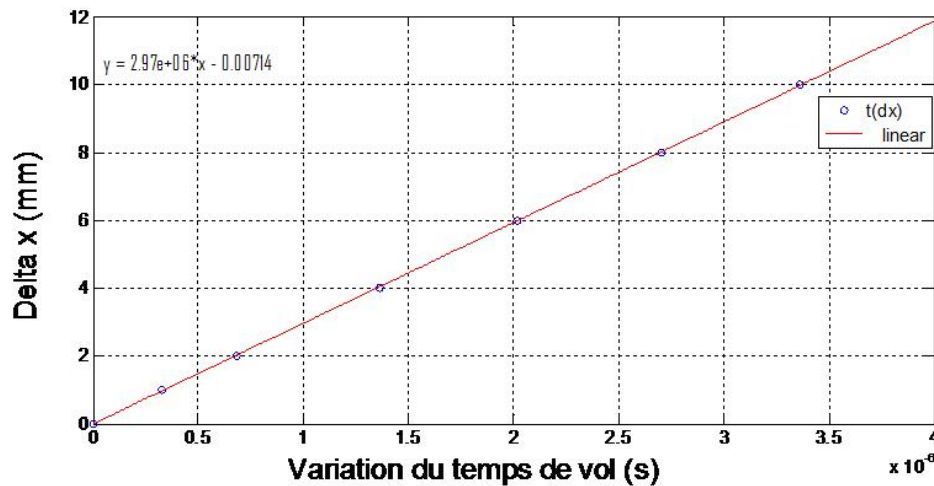


Figure 7 : Variation de la distance Emetteur-Récepteur en fonction la différence des temps de vol de l'onde de surface

3.5.3 Principe de la détection

La méthode de détection d'un défaut surfacique par ondes de Rayleigh s'effectue généralement comme suit :

Cas d'un contrôle dit «pulse/écho» (i.e. un seul capteur jouant le rôle d'émetteur de récepteur est utilisé) : la détection se fait par l'analyse des échos qui peuvent être engendrés par la présence éventuelle d'un défaut. En Ultrasons-Laser cette technique de détection n'existe pas car c'est une méthode qui nécessite deux systèmes distincts : un pour l'émission et un autre pour la détection des ondes.

Cas d'un contrôle émission/réception (i.e. un capteur émet et l'autre reçoit) : la détection peut se faire, soit par l'analyse des variations de l'amplitude du signal transmis (la présence d'une fissure entre l'émetteur et le récepteur module l'amplitude du signal direct) [7], soit par l'analyse des variations du temps de vol des échos engendrés par un défaut.

Dans cette configuration, si aucune fissure n'est présente entre la source et le point de détection, nous aurons dans un premier temps le signal direct (S1) transmis par l'émetteur, ainsi, la présence d'un écho (R1) en plus de ce signal direct sera considéré comme un écho engendré par un défaut (figure 8). En revanche, si une fissure ayant une profondeur plus petite que la longueur d'onde ultrasonore, l'amplitude du signal direct (S1) est atténuée par celle-ci (figure 9).

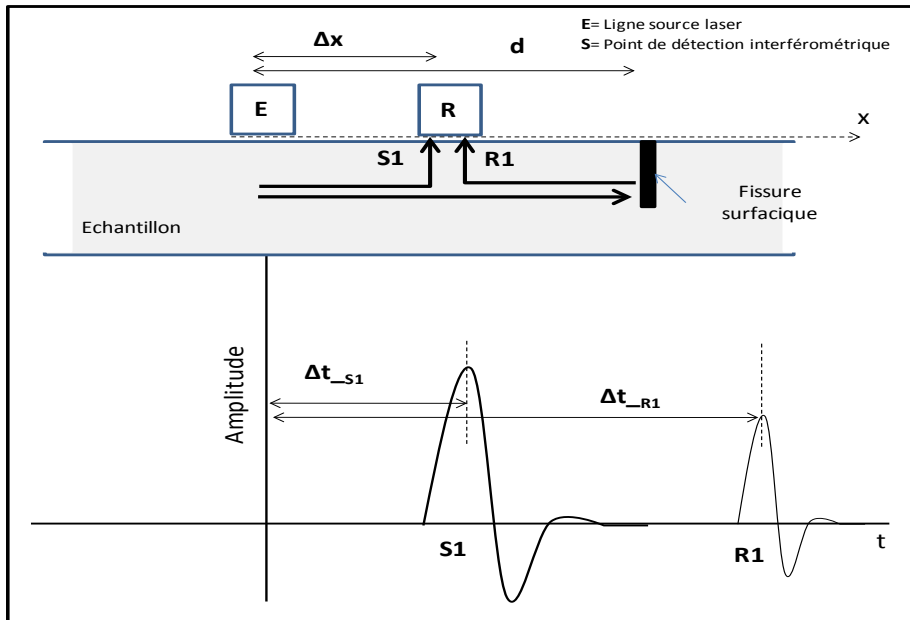


Figure 8 : Configuration de la détection en réflexion

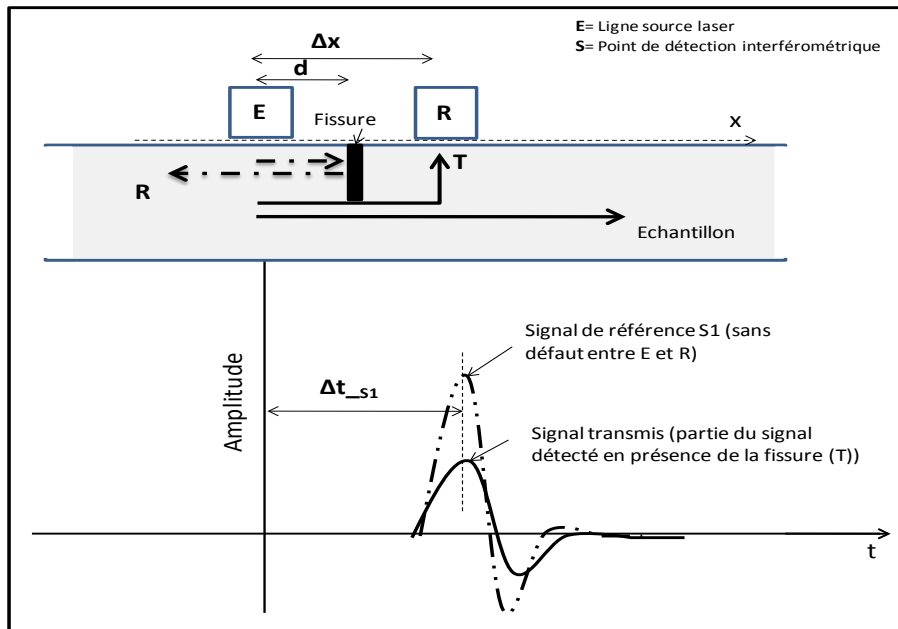


Figure 9 : Configuration de la détection en transmission

L'exploitation des temps de vol de l'écho produits par le défaut permet de calculer sa position comme suit :

Soit V_R la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh dans l'échantillon,

Pour le signal direct S1 : on considère Δt_{-S1} le temps de propagation de l'onde directe entre la source linéique (E) et le point de détection (R). La distance de séparation entre E et R est alors donnée par : $\Delta x = \Delta t_{-S1} * V_R$.

Pour l'écho R1 : On considère Δt_{-R1} le temps de propagation de l'onde générée par la source et réfléchi par le défaut avant d'être détectée par l'interféromètre. La distance parcourue par cette onde est notée L et peut être calculée en utilisant la relation $L = (2d - \Delta x) = \Delta t_{-R1} * V_R$.

Dans le cas d'un contrôle en condition réelle (i.e. inspection des voies ferrées en service), si le véhicule transportant les capteurs est équipé d'un système de localisation donnant en temps réel la position de l'émetteur avec une bonne précision et d'un système de jet de peinture, la connaissance de la distance (L) permettrait de localiser le défaut.

Généralement les véhicules qui permettent de faire l'inspection du rail sont équipés d'un système de jet de peinture qui est synchronisé avec le système de détection pour marquer, au niveau du patin, chaque signalement de défaut.

Par ailleurs, dans le cas de notre méthode, l'émission des ondes de Rayleigh se faisant suivant les deux directions perpendiculaires à l'axe de la source linéique, le même défaut peut être vu par le récepteur de part et d'autre vis-à-vis du déplacement (i. e. devant et/ou derrière par rapport au sens de déplacement de la locomotive).

Dans le cas où le défaut se trouve entre l'émetteur et le récepteur (figure 9), la présence d'une fissure peut être mise en évidence soit par l'analyse des variations d'amplitudes entre les différents signaux, soit par l'analyse fréquentielle. La détection d'un défaut basée sur la variation d'amplitude est une méthode de détection assez difficile à mettre en œuvre expérimentalement. Car les paramètres susceptibles d'induire une fluctuation sur l'amplitude du signal, hormis la présence d'un défaut, sont multiples (exemple : variation de la distance entre l'échantillon et la sonde, état de surface, température...). L'identification de l'origine d'une fluctuation d'amplitude n'est pas chose aisée, et nécessite une phase de calibration approfondie du système de détection.

L'avantage de la méthode d'analyse fréquentielle provient du fait que ces fluctuations d'amplitude affectent très peu le contenu fréquentiel. Lorsque la profondeur du défaut est plus petite que la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh, la partie haute fréquence de l'onde est réfléchi par la fissure vers le récepteur et seules les basses fréquences vont être détectées. Dans le cas où la profondeur de la fissure est supérieure à la longueur d'onde utilisée, l'onde émise est totalement réfléchi [22]. D'une manière générale, la fissure agit comme un filtre passe bas.

Dans le cadre de notre étude, qui s'intéresse plus particulièrement à la détection de fissures d'une profondeur inférieure à 5 mm, l'utilisation de cette méthode semble peu pertinente en raison de la faiblesse de ces temps de parcours des différentes trajectoires que peuvent parcourir les ondes de Rayleigh autour de la fissure, mais aussi de la sensibilité de notre système de détection à dissocier ces différentes ondes comme présenté dans [23].

3.5.4 Détection des squats

Nous effectuons des mesures en déplaçant l'échantillon avec une platine de translation de haute précision par pas de 2 mm suivant l'axe central Δ du rail (figure 10). La source (E) et le point de détection (R) sont distants d'environ 2 cm. L'observation des résultats permet de constater que lorsqu'on est dans une configuration d'essai en réflexion, en plus du signal direct, l'écho associé au défaut apparaît comme le montre la figure 8.

Cela n'est pas le cas lorsqu'on est dans une configuration émission/réception (i.e. le défaut se trouvant entre la source et le point de détection). L'onde de Rayleigh générée est atténuée par la fissure en fonction de sa profondeur (voir figure 9).

Dans le cas des essais Ultrasons-Laser, les longueurs d'onde associées aux ondes de Rayleigh excitées (aux alentours de 3 mm) sont plus petites que la profondeur des défauts étudiés. ($3,4 \text{ mm} \leq \text{Profondeur de défauts} \leq 8 \text{ mm}$)

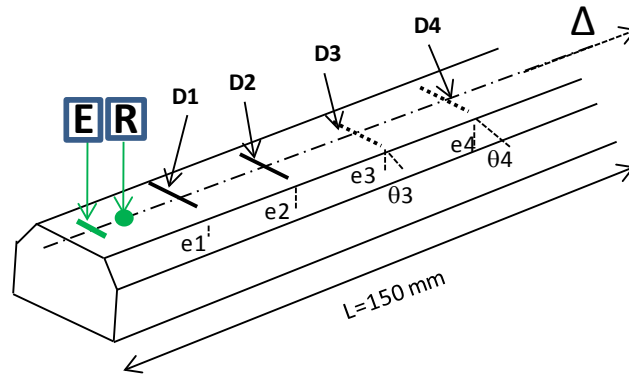
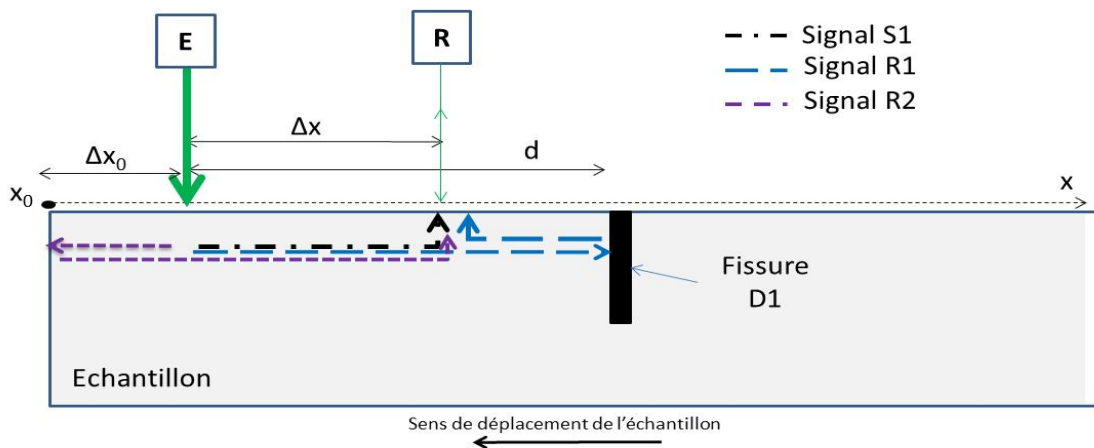


Figure 10 : Configuration de l'émetteur et du récepteur sur la surface du champignon du rail



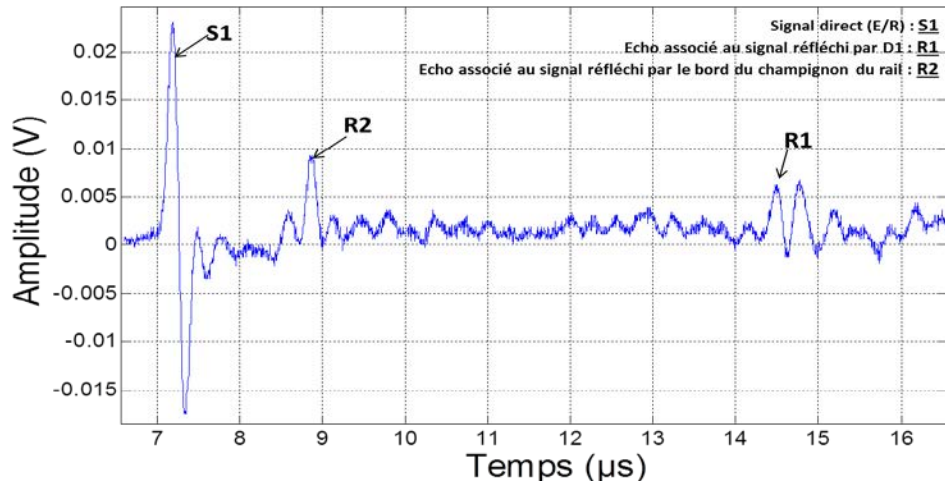


Figure 11 : Signature des défauts (D1) sur le signal temporel à une position donnée de l'émetteur et du récepteur sur le rail.

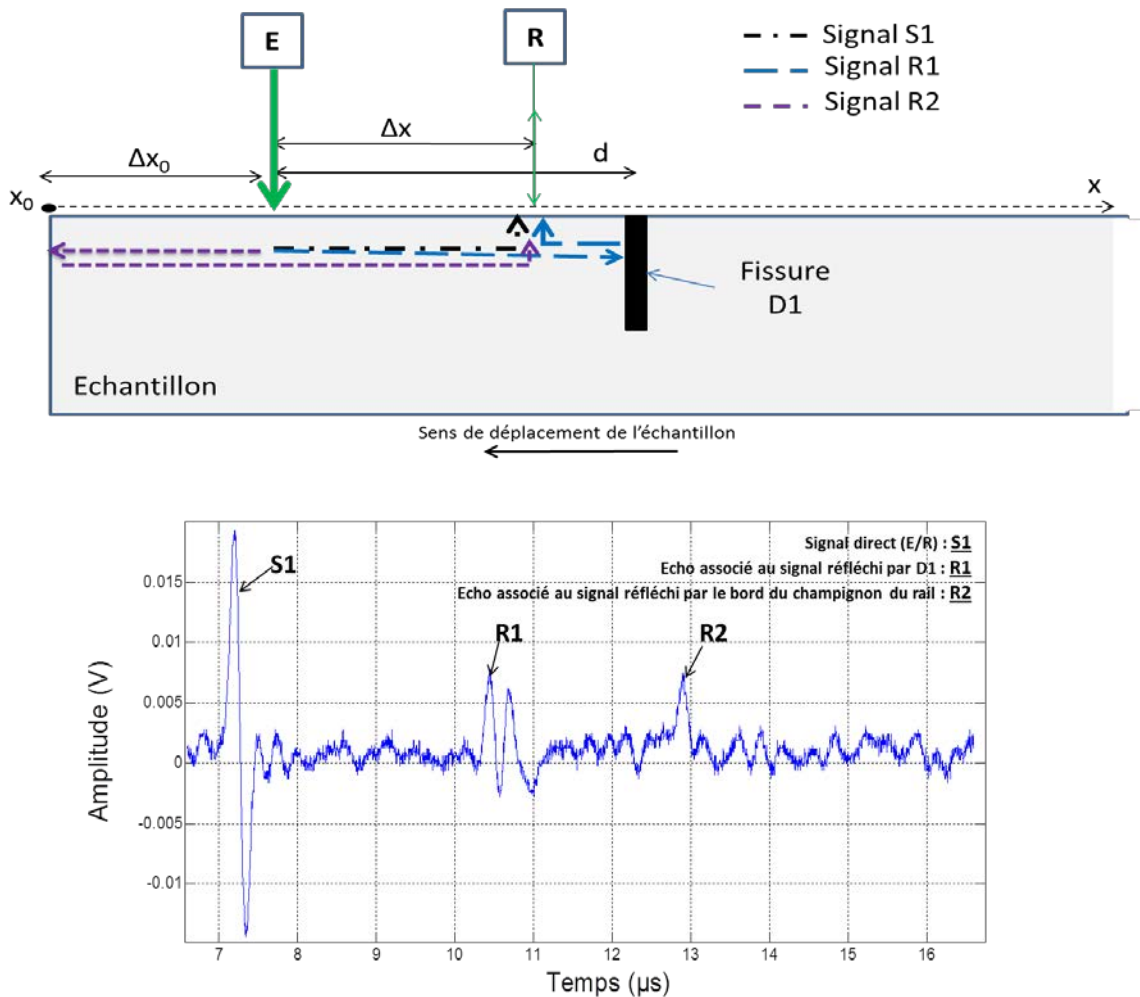


Figure 12 : Signature des défauts (D1) sur le signal temporel à une position donnée de l'émetteur et du récepteur sur le rail.

Non seulement cette méthode permet la détection d'une fissure, mais elle permet également de déterminer sa position en exploitant les temps de vol des échos produits par le défaut et le bord de l'échantillon.

La première mesure est réalisée de telle sorte que la source soit à environ 2 mm du bord de l'échantillon, l'émetteur et le récepteur sont maintenus constamment à une distance de 2 cm.

Après identification des échos, le calcul des temps de vol de chaque écho présent, permet de comparer la localisation (par rapport au bord du rail) du défaut avec celle qui a été mesurée lors de l'usinage.

Si nous ne nous intéressons qu'à l'onde qui se propage vers la direction du bord de l'échantillon (figure 12), les équations du trajet de la propagation des ondes de Rayleigh excitées peuvent s'écrire comme suit :

$$X_{R2} = 2. \Delta X_0 + \Delta X \quad (1)$$

Le temps de propagation de cette onde pour parcourir la distance X_{R2} est pris au maximum de l'amplitude du signal obtenu. Pour le premier résultat correspondant à la position de référence, ce temps (t_{R2}) est de l'ordre de 8,9 μs . En considérant la vitesse de propagation de l'onde déterminée précédemment ($V_R = 2970 \text{ m.s}^{-1}$) nous pouvons calculer la valeur de ΔX_0 comme suit :

$$\Delta X_0 = \frac{V_R \cdot t_{R2} - \Delta X}{2} \quad (2)$$

Si l'on considère l'onde qui se propage vers le défaut, nous détectons d'abord le premier passage de l'onde correspondant au signal S1 est détecté dans un premier temps et la distance émetteur récepteur peut être obtenu, connaissant le temps de propagation t_{S1} , par la relation :

$$\Delta X = V_R * t_{S1} \quad (3)$$

Cette onde poursuit sa propagation jusqu'au premier défaut (exemple D1) (figure 12) pour voir une partie de son énergie réfléchi et renvoyée vers le récepteur. La distance d séparant l'obstacle et la source de génération peut être calculée comme suit :

$$d = \frac{V_R * t_{R1} + \Delta X}{2} \quad (4)$$

Ces relations vont nous permettre d'obtenir ces différentes distances pour plusieurs positions de l'émetteur-récepteur par rapport au défaut.

	Valeurs théoriques (mm)			Valeurs expérimentales (mm)		
	ΔX_0	d	Position de D1	ΔX_0	d	Position de D1
Position 1	2	33	35	2,4	32,4	34,8
Position 2	4	31	35	4,4	30,5	34,8
Position 3	8	27	35	8,4	26,4	34,8

La comparaison des résultats théoriques et expérimentaux montre un écart d'environ 2% sur la localisation d'un défaut à différents endroits. Ce résultat montre que l'analyse des temps de

vols des signaux obtenus est non seulement un moyen efficace permettant de mettre en évidence la présence d'un défaut mais aussi sa localisation.

Dans le cadre d'un contrôle en mode dynamique, la connaissance de la distance d entre l'émetteur et le défaut est suffisante pour localiser un défaut. En équipant le véhicule chargé de déplacer les capteurs d'un système de localisation associé à une système de jet de peinture pour le marquage des zones suspectes comme cela se fait actuellement, la position du récepteur peut être connue en temps réel par rapport à un point de référence.

3.5.5 Détection des head-checks

Sur un second échantillon B contenant des défauts artificiels représentatifs des head-checks, nous avons réalisé des essais pour évaluer l'influence de l'inclinaison (α) d'une fissure sur sa détectabilité.

Pour cela, nous effectuons des essais à la surface de l'échantillon par pas de 5 mm sur l'axe central du champignon du rail. Pour chaque mesure réalisée, nous analysons le signal obtenu comme nous l'avons fait avec les squats. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer les limites de la méthodologie de détection dans le cadre d'une fissure présentant une inclinaison.

La détection d'un défaut par la technique de réflexion est limitée par l'inclinaison de la fissure par rapport à l'axe des deux taches optiques. Suivant la loi de réflexion de Snell-Descartes, l'onde ultrasonore générée par l'émetteur arrivant sur l'interface d'une fissure faisant un angle α par rapport à la direction de propagation sera réfléchié dans une direction formant un angle opposé à l'angle d'incident par rapport à la normale de l'interface. Par conséquent plus cet angle d'incidence est important, plus l'onde ultrasonore réfléchié par la fissure est renvoyée hors de la zone de détection du récepteur.

Les essais réalisés concernant le défaut D5 de l'échantillon (B) dont l'inclinaison (α) avec la direction de propagation est de 25° et avec une inclinaison $\theta=25^\circ$ par rapport au plan transversal du rail, nous ont permis de constater (figure 13) que pour une distance entre le point de détection et le centre du défaut inférieure à 5 mm l'écho représentatif de celui-ci est bien observable.

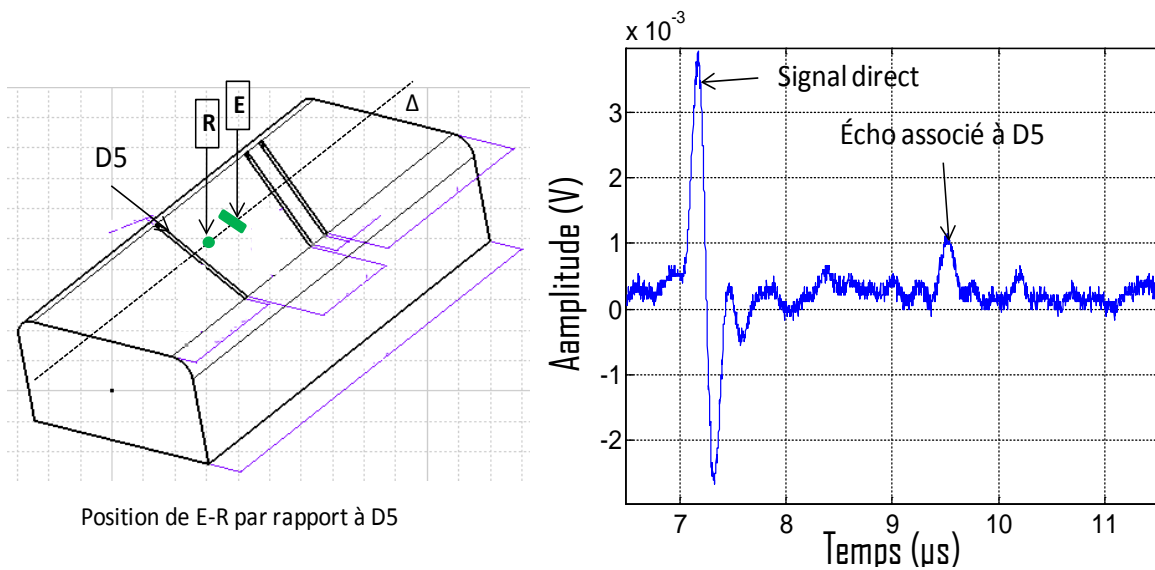


Figure 13 : Signal obtenu pour une distance d'environ 3 mm entre le point de détection et le milieu du défaut D5

Au-delà de cette distance, l'écho associé à D5 (figure 14) n'est plus observable.

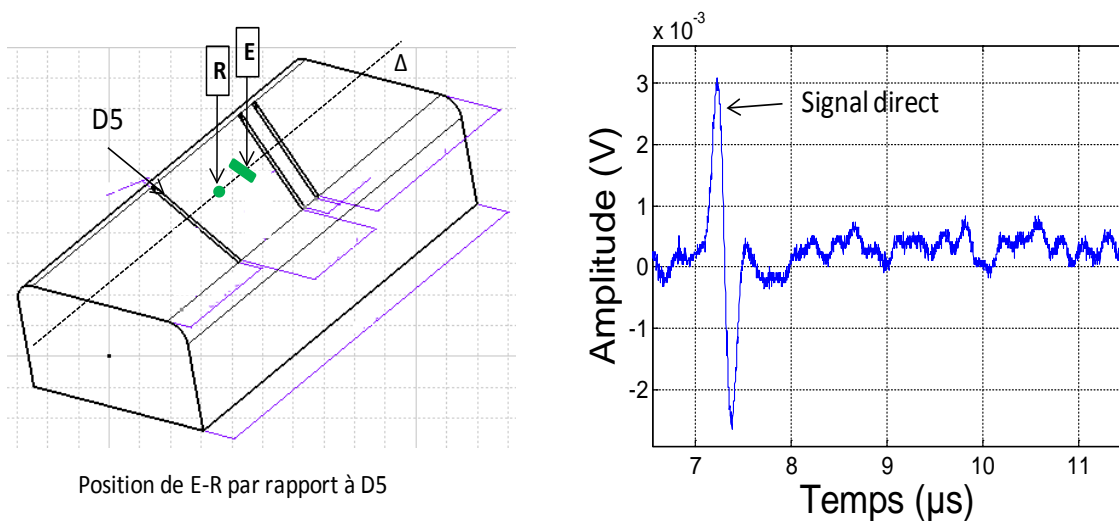


Figure 14 : Signal obtenu pour une distance d'environ 8 mm entre le point de détection et le milieu du défaut D5

En réalisant le même essai sur le défaut D7 dont l'inclinaison (45°) est plus prononcée que celle de D5, nous avons trouvé que l'écho associé à cette fissure n'est observable que lorsque le point de détection se trouve au voisinage immédiat de celle-ci (environ 1 mm).

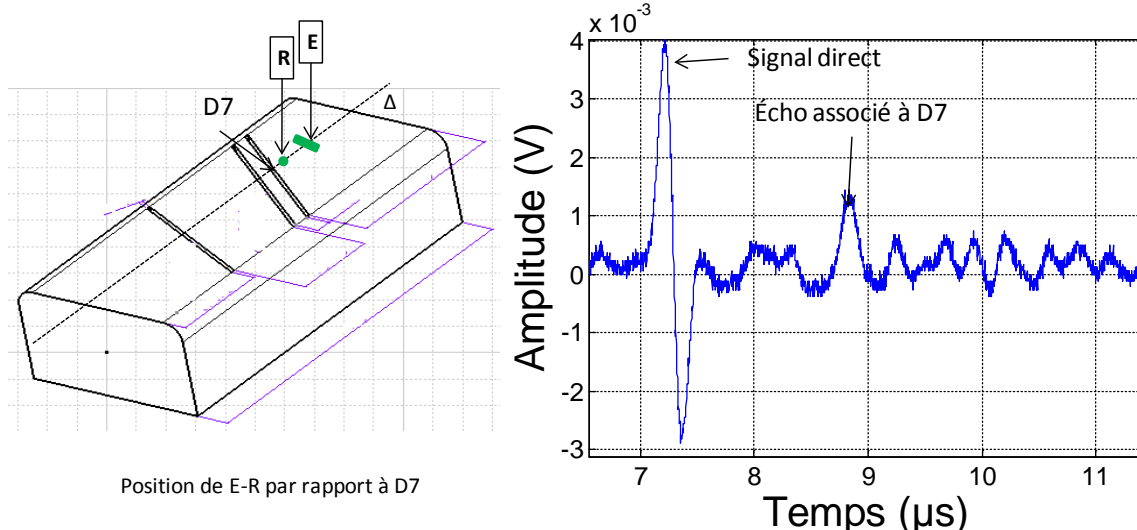


Figure 15 : Signal obtenu pour une distance d'environ 1 mm entre le point de détection et le milieu du défaut D7

Au-delà de cette distance de séparation, l'écho associé à cette fissure n'est plus observable.

Ces résultats confirment que la méthode de détection basée sur l'analyse des échos associés aux réflexions des ondes de Rayleigh par les head-checks est limitée par son inclinaison. On remarquera que la profondeur du défaut n'intervient pas dans cette analyse, les profondeurs des défauts D6 et D7 étant de 7,2 et 8,5 mm respectivement. C'est principalement les inclinaisons α et θ du défaut qui conditionnent la réflexion de l'onde incidente.

Une des alternatives serait d'étudier les signaux transmis (signaux directs) entre l'émetteur et le récepteur, lorsque la profondeur du défaut est inférieure à la longueur d'onde.

3.6 Détection des défauts par Ultrasons-EMAT

Les EMATs ou (Electro-magnetic Acoustic Transducers) sont des capteurs qui fonctionnent sur le principe de la magnétostriction (matériaux ferromagnétiques) et sur celui de la loi de Lorentz. Des systèmes utilisant cette technique sans contact sont apparus dans les équipements dédiés au contrôle ultrasonore à partir des années 70 [24].

3.6.1 Dispositif expérimental

Pour la réalisation des essais avec les EMATs, nous disposons d'une PowerBox 2 (Innerspec Technology USA). C'est un instrument conçu pour des applications de contrôle non destructif nécessitant de fortes énergies et des vitesses d'acquisition importantes. La PowerBox 2 (tableau 5) a deux voies d'acquisition, ce qui permet de travailler avec quatre capteurs un émetteur et un récepteur par voie. Dans cette étude, nous utiliserons au maximum trois capteurs (1 E et 2 R).

La fréquence de récurrence de l'excitation peut aller jusqu'à 2 kHz, ce qui permet d'effectuer les acquisitions en déplacement à vitesse élevée, elle utilise un pilotage externe via un logiciel « UT Power ». Des impulsions « Spike » et « Tone-Burst » peuvent être générées sur une bande fréquentielle allant de 50 kHz à 6 MHz (voir tableau 5), pour exciter une gamme

complète de types d'ondes ultrasonores, et en particulier les ondes guidées en configuration pitch-catch ou pulse-écho.

Un adaptateur d'impédance assure la compatibilité électrique entre les capteurs (Emetteurs/Récepteurs) et la PowerBox 2. Suivant le type d'aimants, l'architecture de la bobine et la direction du champ magnétique produit par l'aimant permanent, plusieurs types d'ondes peuvent être générés et détectés. Dans le cadre du projet, les sondes utilisées génèrent des ondes de Rayleigh.

Ultrasonic Channels	2
Bandwidth	150 kHz to 7 MHz @ 8KW 50kHz- 7Mhz @ 4KW
Pulse Repetition Frequency	Up to 2kHz
RF Pulser	Spike, Toneburst Waveforms 8 kW Power Output per Channel 1200Vpp @ 25App into 50 Ohms 1% Max. Duty per Channel
Magnet Pulser	NA
Receivers	50 Ω Input Impedance -20 dB to 60 dB Gain 0.3 dB Gain Resolution 8 Low Pass RF Filters; (Off. .1, .2, .5, 1, 2, 5, 10 MHz) 8 High Pass RF Filters; (Off. .1, .2, .5, 1, 2, 5, 10 MHz)
P/R Modes	Pulse-Echo, Pitch-Catch
A/D Converters	14-bit, 100MHz
Filtering	IIR/FIR Digital Filters
Rectification	Full-wave, +/- half-wave, and RF mode
Evaluation Gates	4 Gates per Channel Amplitude and Time Measurements

Tableau 5 : Caractéristiques de la PowerBox 2

Le dispositif expérimental est schématisé à la figure 16, ci-après :

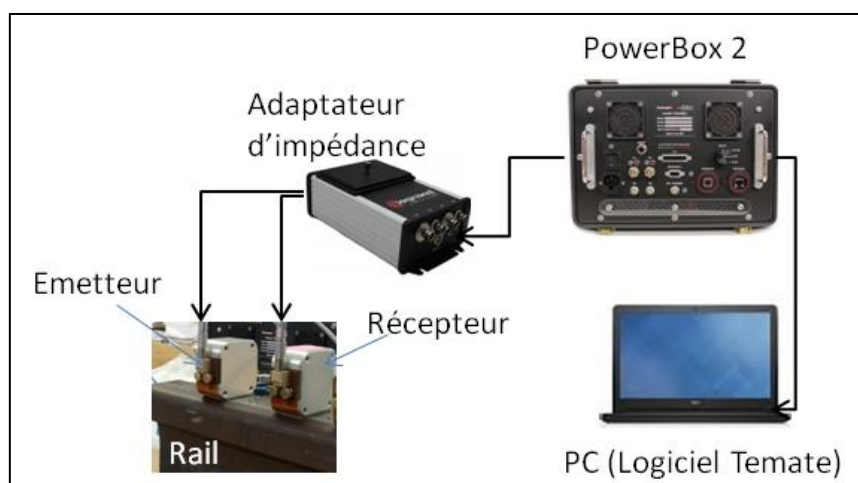


Figure 16 : Dispositif expérimental

La fréquence d'échantillonnage de la PowerBox peut varier de 25 MHz à 100 MHz. La base de temps des données est définie par le choix de cette fréquence d'échantillonnage et de la durée de l'acquisition. Les amplitudes sont données en unité arbitraire ou en pourcentage d'affichage sur l'interface graphique du logiciel Temate (figure 17).

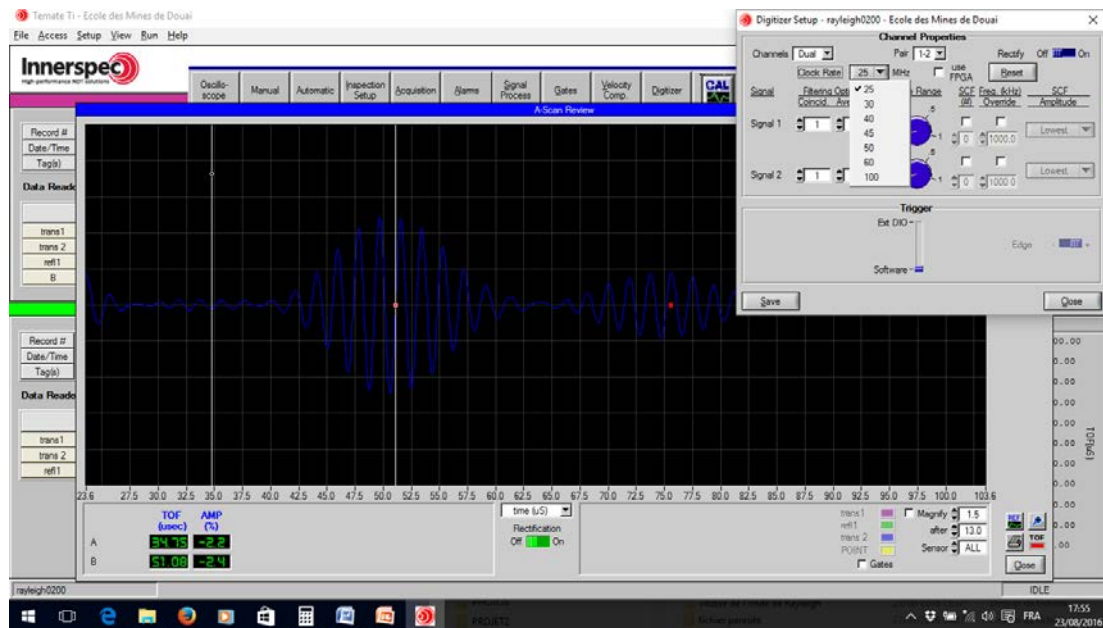


Figure 17 : Interface graphique du logiciel d'acquisition des données

Nous utilisons la configuration dite pitch-catch avec un émetteur et un seul récepteur dans le cadre de ces essais en statique. Ce type de configuration offre la possibilité de détecter la présence d'un défaut par deux analyses différentes : une par réflexion et une autre par transmission.

3.6.2 Propagation de l'onde de Rayleigh générée par EMAT dans le rail

Nous réalisons la même expérience que précédemment afin de vérifier la valeur de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh générée par le capteur EMAT. Cet essai a été réalisé sur un échantillon de rail supposé sans défaut. A première vue, ce rail ne présentait pas de fissures sur la surface de la bande de roulement, mais il y avait des affaissements surfaciques, souvent appelés « squats ».

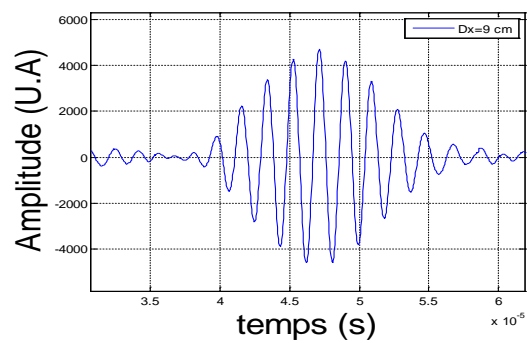
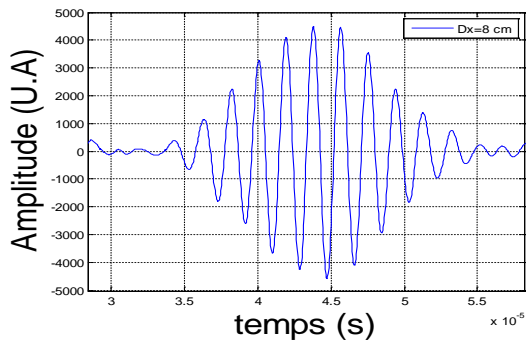
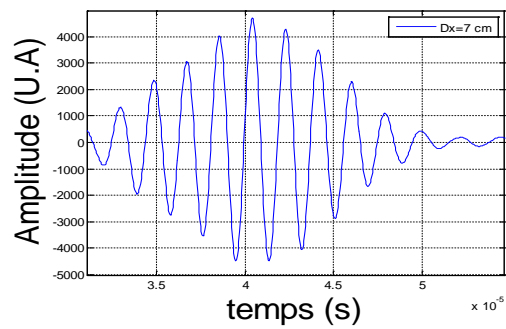
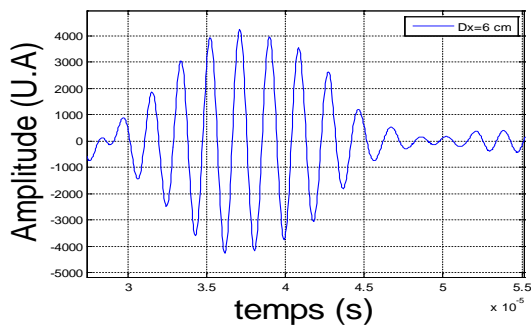
La figure 18 montre la configuration selon laquelle l'essai a été réalisé. L'émetteur (E) est maintenu à une position fixe prise comme référence et le récepteur (R) est déplacé par pas 1 cm. La longueur d'onde des ondes de Rayleigh émise par la sonde utilisée est de 6,35 mm et la puissance d'alimentation est de 450 W.

Les capteurs EMAT utilisés génèrent des ondes de Rayleigh soit à la fréquence de 586 kHz ou de 469 kHz pour des longueurs d'onde respectivement de 5,08 mm ou de 6,35 mm dans l'acier. Un aimant permanent fournit une induction magnétique \mathbf{B} de 1 Tesla, la force \mathbf{F} d'attraction de cet aimant est de 256 N.



Figure 18 : Configuration des capteurs sur le rail pour déterminer expérimentalement la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh générée

Pour chaque position, nous traitons le signal enregistré par le récepteur. Quelques résultats de ces essais sont représentés à la figure 19 ci-après :



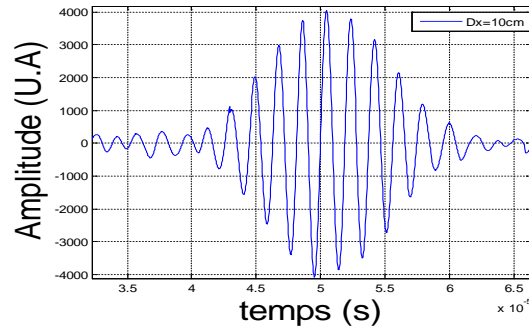


Figure 19 : Signaux de l'onde de Rayleigh en fonction de la distance de propagation entre l'émetteur et le récepteur

Ces signaux correspondent pour chaque position à l'onde directement détectée par le récepteur après transmission par l'émetteur. Connaissant la distance entre chaque position consécutive, la mesure du temps de vol de chacun des signaux permet de calculer la vitesse de propagation de l'onde dans le rail considéré (figure 20) qui est de l'ordre 2980 m/s.

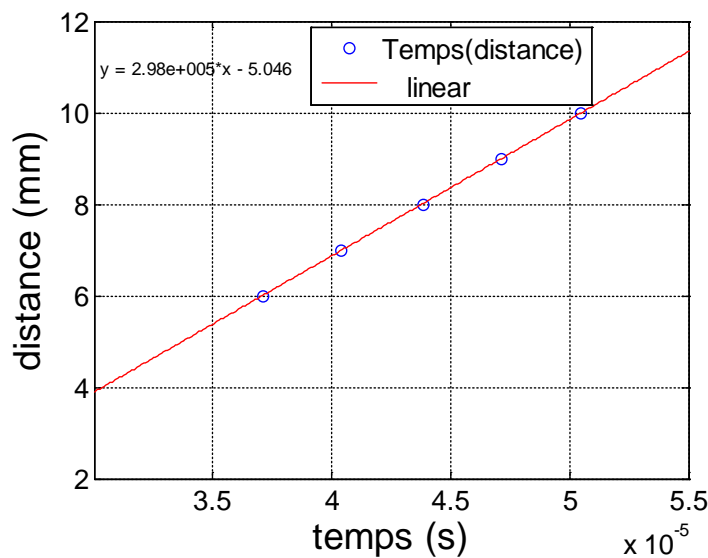


Figure 20 : Détermination de la vitesse de l'onde de Rayleigh générée par EMAT

3.6.3 Méthode expérimentale de détection

La procédure de mesure est la suivante, l'émetteur et le récepteur sont maintenus à une distance fixe. Nous effectuons un déplacement des deux capteurs par pas de 10 cm tout au long de la bande de roulement (voir figure 21).

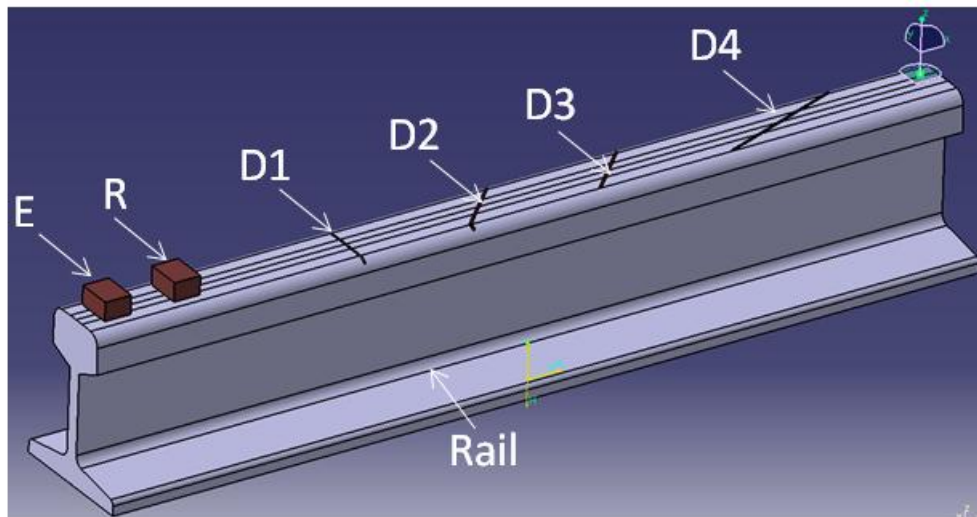


Figure 21 : Configuration des capteurs sur l'échantillon

Nous utilisons ici des capteurs qui génèrent des ondes de Rayleigh à une fréquence de l'ordre de 500 kHz ($\lambda = 5$ mm), la puissance d'excitation est de 1,8 kW.

3.6.4 Détection des squats

3.6.4.1 Méthode en réflexion

Nous allons nous intéresser à la fissure D1 qui constitue l'unique squat parmi ces fissures. Elle se situe à 31 cm du premier bord du rail. Comme nous l'avons vérifié sur un rail de trois mètres de longueur, l'onde de Rayleigh générée par les EMATs peut se propager à plus d'un mètre de distance. Par conséquent, des signaux provenant de réflexions multiples peuvent être observés dans cette zone, ce qui peut rendre difficile l'interprétation des résultats.

Pour mettre en évidence la présence du squat D1 nous analysons dans un premier temps les différents signaux extraits de l'acquisition, lorsque les deux capteurs (E et R1) sont entre le bord du rail et D1. Les deux résultats obtenus pour deux positions (au bord du rail et à 6 cm) montrent bien la présence de la fissure via l'apparition d'échos supplémentaires à celui du signal direct et de l'écho du bord (voir figure 22).

La méthode pour comprendre les trajets des échos présents sur l'acquisition est la suivante : l'onde générée par l'émetteur se propage suivant les deux directions de l'axe longitudinal du rail. L'onde se propageant vers le récepteur est détectée dans un premier temps (signal direct) car elle parcourt le trajet le plus court. L'onde partie dans la direction inverse est réfléchi par le bord du rail et sera ensuite détectée par le récepteur (écho du bord). En fonction de la densité d'énergie, ces deux ondes vont se propager dans le matériau. A la rencontre d'un obstacle, le signal direct est d'abord réfléchi par celui-ci (réflexion du signal direct), suivi de l'écho du bord (réflexion due l'écho du bord).

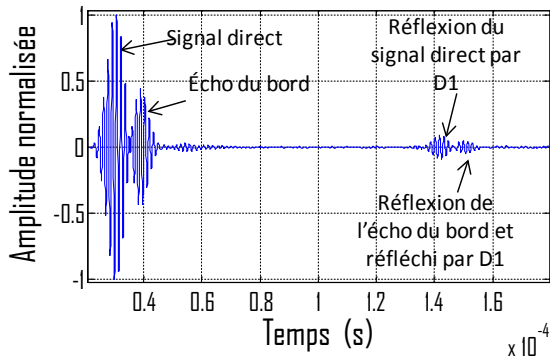


Figure 22 : Signature du défaut D1 sur le signal obtenu avec (E) à proximité du bord du rail

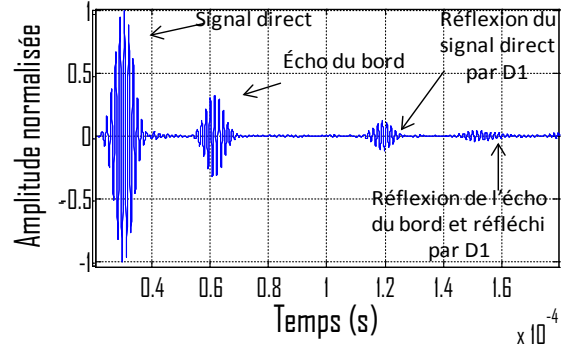


Figure 23 : Signature du défaut D1 sur le signal obtenu à une distance d'environ 6 cm du bord

3.6.4.2 Méthode en transmission

Pour la détection d'une fissure superficielle en transmission, nous nous basons sur la comparaison des propriétés du signal direct sur une zone sans défaut avec celui obtenu lorsqu'une fissure se trouve entre l'émetteur et le récepteur. La présence d'une fissure entre les deux capteurs va jouer un rôle de « filtre passe bas » [22]. La fréquence des ondes de Rayleigh étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde, seules les composantes dont la longueur d'onde est supérieure à la profondeur de la fissure (les basses fréquences) seront susceptibles d'être détectées par le récepteur. Par conséquent, l'onde de Rayleigh émise va être atténuée par la fissure (voir figure 25) et le signal détecté sera nettement plus faible par rapport au résultat de la figure 24 correspondant à un signal obtenu en l'absence d'une fissure [25]. Ici, la profondeur de la fissure (4 mm) étant de l'ordre de la longueur d'onde de la sonde utilisée, pratiquement toute l'énergie de l'onde de Rayleigh émise est réfléchi par celle-ci.

L'amplitude du signal direct en l'absence d'une fissure est de 8367 en unité arbitraire. Lorsque le défaut D1 est situé entre l'émetteur et le récepteur ce signal direct est fortement atténué par la présence de celui-ci en raison de sa profondeur et devient 522 en unité arbitraire. Cela correspond à une perte d'amplitude d'environ 93,8 %.

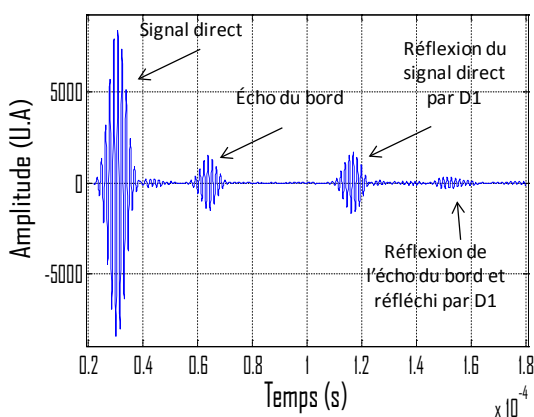


Figure 24 : Signaux obtenus sur une zone sans fissure entre l'émetteur et le récepteur

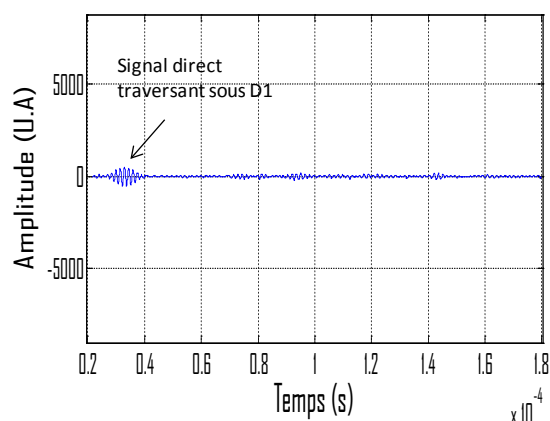


Figure 25 : Signaux obtenus sur une zone avec fissure entre l'émetteur et le récepteur

3.6.5 Méthode de localisation d'une fissure

Pour la localisation du défaut, nous allons utiliser la méthode de calcul réalisée dans le paragraphe plus haut. L'émetteur et le récepteur sont maintenus à une distance fixe de 61 mm, les deux capteurs sont déplacés par pas de 1 cm, la vitesse de l'onde de Rayleigh dans l'acier étant de l'ordre de 2980 m/s.

Sur la figure 26, les différents trajets des ondes représentées ci-dessous sont définis comme suit :

S1 représente le signal direct, R1 la réflexion sur le bord, R2 le signal direct réfléchi par l'interface de la fissure D1 et R3 représente l'onde provenant du bord et qui est réfléchi une seconde fois par le défaut.

Le calcul des temps de vol correspondant s'effectue :

$$T_{R1} = \frac{2\Delta X_0 + \Delta X}{V_R} = \frac{X_{R1}}{V_R}$$

$$T_{R2} = \frac{2\Delta X_1 + \Delta X}{V_R} = \frac{X_{R2}}{V_R}$$

$$T_{R3} = \frac{2\Delta X_0 + \Delta X + 2\Delta X_1}{V_R} = \frac{X_{R3}}{V_R}$$

La distance parcourue par chaque onde avant d'être détectée au niveau du récepteur se calcule comme suit en utilisant les relations précédentes :

Le signal direct S1 se propage sur une distance $\Delta X \cong 71 \text{ mm}$, R1 se propage sur une distance $X_{R1} = 2\Delta X_0 + \Delta X$, R2 parcourt $X_{R2} = \Delta X + 2\Delta X_1$ et R3 se propage sur $X_{R3} = 2\Delta X_0 + 2\Delta X_1 + \Delta X$.

Grâce aux temps de vols de ces différents échos, nous allons calculer ces distances de propagation puis en déduire la position (d) du défaut par rapport au bord du rail en utilisant trois essais à différents endroits.

Le tableau ci-dessous montre le résultat du calcul de la distance entre la fissure et le bord du rail comparée avec la valeur mesurée.

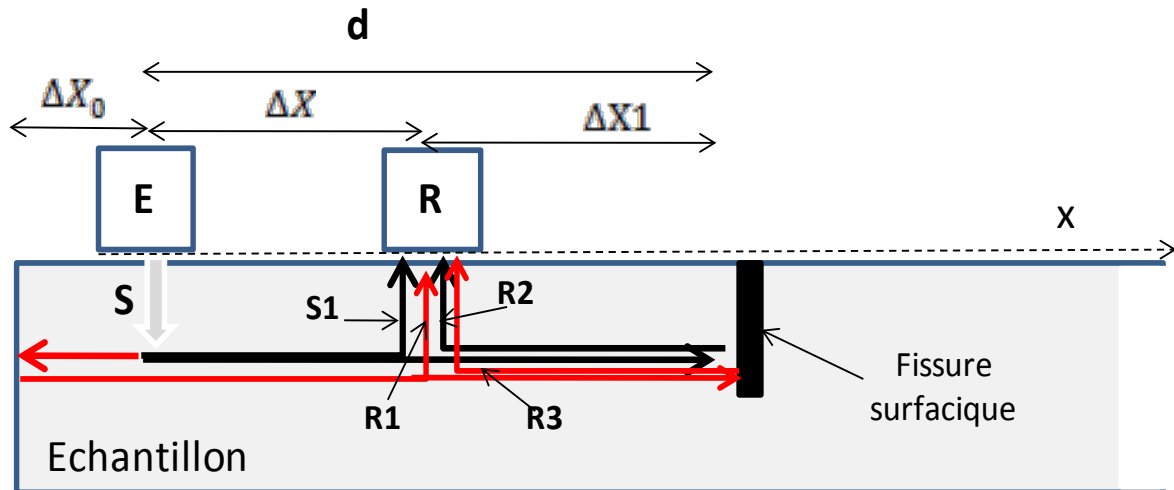


Figure 26 : Schéma illustrant les trajectoires des ondes générées pour la localisation d'une fissure

Une fois ces distances connues, nous pouvons en déduire la valeur de la distance séparant la fissure et le bord du rail qui est pris comme position de référence :

$$\Delta X_0 = \frac{X_{R1} - \Delta X}{2} \quad (5)$$

$$d = \Delta X_0 + \Delta X \quad (6)$$

En additionnant ces deux distances nous trouvons approximativement la position de la fissure sur la tête du rail

	Valeurs théoriques (mm)			Valeurs expérimentales (mm)		
	ΔX_0	d	Position D1	ΔX_0	d	Position D1
Zone 1	10	300	310	15	271	286

Nous constatons une erreur de moins de 8% entre la valeur mesurée et celle calculer avec le temps de vol des échos. Cette erreur est probablement due en partie par la largeur d'émission et de réception des capteurs qui est de l'ordre de 30 mm chacun qui fait qu'on ne maîtrise pas exactement la distance entre l'émetteur et le récepteur.

De la même manière que précédemment avec la méthode Ultrasons-Laser, dans le cadre d'une inspection en dynamique la connaissance de la distance ΔX_1 permet d'obtenir la position du défaut.

3.6.6 Détection des head-checks

Comme la méthode de détection par Ultrasons-Laser, la détection d'une fissure du type head-check est aussi limitée par son inclinaison. Plus l'angle entre la normale de la fissure et la direction de propagation est important (figure 27), plus la probabilité d'observer un écho est faible.

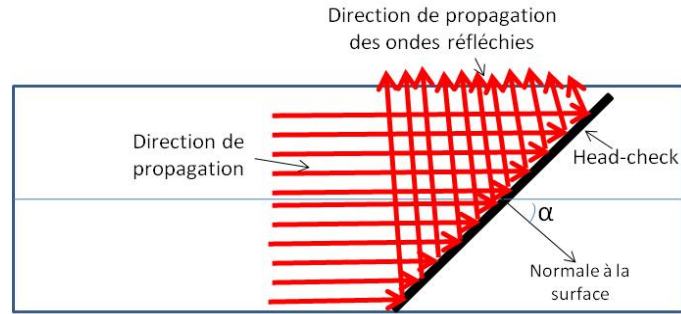


Figure 27 : Propagation des ondes de Rayleigh en présence d'une fissure inclinée

Pour mettre en évidence l'influence de cette inclinaison, nous allons effectuer un scan de la surface du champignon du rail par pas de 1 cm. L'ensemble des résultats obtenus seront représentés sous forme d'une cartographie (figure 28).

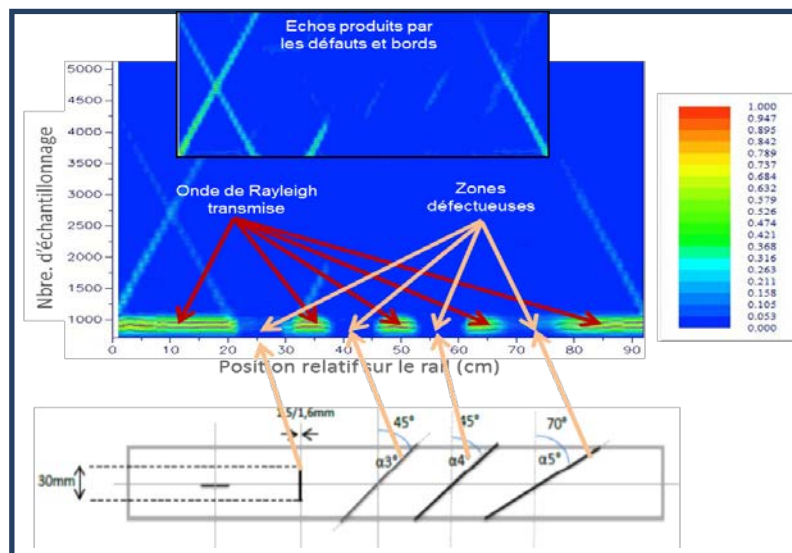


Figure 28 : Cartographie de la surface du rail

Ce résultat est une vue globale de la surface du rail. D'une part nous pouvons observer des zones de fortes intensités correspondant aux signaux directs sous R1. Elles sont séparées par des zones d'intensités quasi nulles traduisant l'absorption de ces signaux directs par les 4 fissures présentes dans l'échantillon. D'autre part, nous avons une partie, de moins forte intensité, représentative de l'ensemble des échos présents sur le scan. Sur celle-ci, les échos associés aux deux bords du rail et au défaut D1 sont clairement observables. Tandis que, ceux associés aux fissures inclinées ($\theta = \alpha = 45^\circ$ ou 70°) sont peu visibles.

3.7 Conclusion

Dans Le chapitre 2 nous avons rappelé les différents mécanismes de génération et de détection des ondes de Rayleigh par les méthodes Ultrasons-Laser et EMAT.

Dans ce chapitre nous avons présenté les dispositifs expérimentaux tant pour la méthode Ultrasons-Laser que pour celle des EMATs, utilisés pour la réalisation des essais.

Dans la première partie, nous avons expliqué le choix des échantillons et décrit les essais qui ont été réalisés pour chacune des méthodes Laser et EMAT.

Dans la seconde partie, nous avons montré la faisabilité de la détection en statique, des fissures représentatives de squats et de head-checks de petites tailles à la surface du champignon du rail, en utilisant les ondes de Rayleigh générées par la méthode Ultrasons-Laser. Cette étude nous a permis de déterminer les limites de détection de la méthode en présence de fissures inclinées.

La troisième partie propre à la détection des défauts en utilisant la technique EMAT, a permis de démontrer la faisabilité de la méthode en détection statique et également ses limites. Les fissures représentatives de squats sont plus faciles à détecter, car elles sont perpendiculaires au plan de propagation, celles qui représentent les head-checks sont plus difficiles à détecter dès que l'angle d'inclinaison par rapport au plan de propagation atteint 45° , ceci étant dû à la réflexion de l'onde suivant la loi de Snell-Descartes. C'est pourquoi nous avons décidé de refaire un nouvel échantillon avec des fissures réalisées par électroérosion, représentatives de squats et de head-checks inclinés de 20° ayant une profondeur de 3 et 6 mm et une largeur de lèvres de 0,45 mm.

Dans chacune des parties concernant les techniques Laser et EMAT, une méthode de localisation des fissures surfacique a été proposée. Elle a permis de déterminer la position d'un défaut avec une précision inférieure à 8 % avec la méthode EMAT et d'environ 2 % avec la méthode Ultrasons-Laser.

Bibliographie

- [1] D. Hesse and P. Cawley, “Excitation of Surface Wave Modes in Rails and their Application for Defect Detection,” in AIP Conference Proceedings, 2006, vol. 820, pp. 1593–1600.
- [2] D. E. Chimenti, “Review of air-coupled ultrasonic materials characterization,” Ultrasonics. September 2014
- [3] K. Zhang, P. Yi, Y. Li, B. Hui, and X. Zhang, “A New Method to Evaluate Surface Defects with an Electromagnetic Acoustic Transducer,” Sensors, vol. 15, no. 7, pp. 17420–17432, Jul. 2015.
- [4] Y. Fan, S. Dixon, R. S. Edwards, and X. Jian, “Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head,” NDT & E International, vol. 40, no. 6, pp. 471–477, Sep. 2007.
- [5] J. L. Rose, M. J. Avioli, P. Mudge, and R. Sanderson, “Guided wave inspection potential of defects in rail,” NDT & E International, vol. 37, no. 2, pp. 153–161, Mar. 2004.
- [6] P. A. Petcher, M. D. G. Potter, and S. Dixon, “A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail,” NDT & E International, vol. 65, pp. 1–7, juillet 2014.
- [7] R. S. Edwards, S. Dixon, and X. Jian, “Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves,” NDT & E International, vol. 39, no. 6, pp. 468–475, Sep. 2006.
- [8] X. Jian, Y. Fan, R. S. Edwards, and S. Dixon, “Surface-breaking crack gauging with the use of laser-generated Rayleigh waves,” Journal of Applied Physics, vol. 100, no. 6, p. 64907, Sep. 2006.
- [9] D. Cemiglia, G. Garcia, S. Kalay, and F. Prior, “Application of laser induced ultrasound for rail inspection,” In Proceedings of the World Congress in Railway Research. Montreal, Canada.
- [10] N.-H. Kim, H. Sohn, and S.-W. Han, “Rail Inspection Using Noncontact Laser Ultrasonics,” Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 32, no. 6, pp. 696–702, Dec. 2012.
- [11] S. A. Nielsen, A. L. Bardenshtein, A. M. Thommesen, and B. Stenum, “automatic laser ultrasonics for rail inspection,” Proceedings of the 16th WCNDT., 2004.
- [12] F. Jenot, Génération et détection d’ondes élastiques par sources lasers : applications au contrôle non destructif. Valenciennes, 2003.
- [13] M. Lemaire, Caractérisation de structures du type couche sur substrat par ultrasons-lasers. Valenciennes, 2008.
- [14] F. Faëse, Génération d’ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers : applications à la caractérisation sans contact de défauts. Valenciennes, 2013.
- [15] S. Fourez, “Caractérisation de couches minces par ondes de surface générées et détectées par sources lasers,” phdthesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.

- [16] S. Kenderian, B. B. Djordjevic, and R. E. Green, "Sensitivity of point- and line-source laser-generated acoustic wave to surface flaws," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 50, no. 8, pp. 1057–1064, Aug. 2003.
- [17] L. R. F. Rose, "Point-source representation for laser-generated ultrasound," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, no. 3, pp. 723–732, Mar. 1984.
- [18] A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, and S. B. Palmer, "Laser-generation of directional surface acoustic wave pulses in metals," *Optics Communications*, vol. 42, no. 2, pp. 116–120, juin 1982.
- [19] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, and S. B. Palmer, "Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no. 5, pp. 1362–1369, Nov. 1981.
- [20] O. Xeridat, "Etude expérimentale de la propagation, de la diffusion et de la localisation des ondes de Lamb," phdthesis, Université Nice Sophia Antipolis, 2011.
- [21] Carsten, S. H. David, D. Eleni, and C.-L. Mathieu, "Langrock: Flash Lamp Pumped Quanta Ray Nd: YAG Laser Experiment," *Pulse*, 20(40), 60.
- [22] R. S. Edwards, S. Dixon, and X. Jian, "Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves," *NDT & E International*, vol. 39, no. 6, pp. 468–475, Sep. 2006.
- [23] K. G. Hall, "Crack depth measurement in rail steel by Rayleigh waves aided by photoelastic visualization," *Non-Destructive Testing*, vol. 9, no. 3, pp. 121–126, Jun. 1976.
- [24] M. Hirao and H. Ogi, *EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [25] I. Baillie, P. Griffith, X. Jian, and S. Dixon, "implementing an ultrasonic inspection system to find surface and internal defects in hot, moving steel using EMATs," in *AIP Conference Proceedings*, 2009, vol. 1096, pp. 1711–1718.

Chapitre IV. Etude de faisabilité de la détection en mode dynamique

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3 nous avons présenté l'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés pour montrer la faisabilité de la détection de fissures surfaciques localisées au niveau du champignon du rail par l'utilisation des ondes de Rayleigh générées par le biais de deux méthodes distinctes que sont : la méthode Ultrasons-Laser et la méthode EMAT.

Dans ce chapitre, nous allons reprendre ces dispositifs, et les associer avec les démonstrateurs mis en œuvre pour étudier la faisabilité de la détection de ces fissures en dynamique.

L'objectif sera d'étudier le potentiel de chacune de ces deux méthodes à détecter des squats et des head-checks en fonction de la vitesse de déplacement des capteurs (méthode EMAT) ou de l'échantillon (méthode Ultrasons-Laser), afin de simuler un contrôle automatique de la tête du rail à une vitesse maximum de 22 km/h dans le cas des EMAT.

Ainsi, ce chapitre sera organisé comme suit :

Premièrement, nous aborderons les objectifs et les enjeux du contrôle du rail avec déplacement relatif de manière générale et en particulier ceux de la détection des fissures en phase d'initiation (profondeur comprise entre 3 et 6 mm) sur le champignon du rail en mode dynamique.

Deuxièmement, nous présenterons les démonstrateurs mis en œuvre pour la réalisation des essais en dynamique. Dans cette partie, nous aborderons la question du choix et du dimensionnement des démonstrateurs pour les essais Ultrasons-Laser et EMAT.

Dans la troisième et quatrième partie, nous présenterons respectivement, les essais Ultrasons-Laser et EMAT réalisés pour étudier la faisabilité de la détection de fissures surfaciques précoces avec mouvement relatif entre l'échantillon et les instruments de mesure.

4.2 Objectifs et enjeux du Contrôle Non Destructif (CND) en dynamique dans le ferroviaire

Les méthodes de CND dans le ferroviaire s'orientent de plus en plus vers le contrôle de l'intégrité des structures ferroviaires. Ainsi, dans le cadre d'une inspection dynamique du rail, le choix d'une méthode parmi d'autres est souvent conditionné par :

-L'adéquation de celle-ci par rapport aux exigences du contrôle : dans le cadre de la détection de fissures dans le rail par exemple, suivant le type du défaut et sa position l'utilisation d'une méthode peut être plus appropriée qu'une autre,

-Les performances de la méthode : Plus la probabilité de détection d'une méthode est élevée plus elle peut être considérée comme efficace.

- La durée de vie du système de contrôle utilisé : dans le cas des méthodes qui nécessitent un contact entre le dispositif de contrôle et la pièce par l'intermédiaire d'un couplant qui est souvent réalisé à l'aide d'un « ruban » humidifié. Le frottement entre ces deux pièces est une source d'usure qui nécessite le remplacement régulier de l'élément de couplage afin de garantir la fiabilité des mesures.

- Le coût financier lié à l'utilisation d'une méthode.

Ces dernières années avec l'augmentation de la vitesse des trains en service, l'application des moyens de contrôle permettant l'inspection des infrastructures ferroviaires avec mouvement relatif du système de détection, et en particulier dans le cas du rail, a connu un essor important. Parmi les méthodes utilisées, celles ultrasonores occupent une place importante en raison de leur sensibilité à détecter les défauts de petite taille, invisibles avec les méthodes optique (fissures surfaciques, fissures internes...) grâce à la diversité des types d'ondes qui peuvent être produites.

A cet effet, l'objectif de cette partie sera d'étudier la faisabilité de la détection en mode dynamique des fissures surfaciques localisées sur le champignon du rail telles que les squats et les head-checks (définis au chapitre 3) en utilisant des ondes de Rayleigh avec deux méthodes distinctes : la méthode Ultrasons-Laser et la méthode EMAT.

La mise en place de tels systèmes d'inspection dans l'industrie ferroviaire représente un enjeu économique considérable, notamment la réduction des temps de maintenance. Par exemple une interruption d'une heure du trafic chez Eurotunnel représente un coût de plusieurs millions d'euro. Sur le plan sécuritaire, ils offrent la possibilité de rapprocher les opérations de contrôle afin d'augmenter la sûreté des voies ferrées.

4.3 Mise en œuvre de démonstrateurs pour essais en dynamique

L'objectif visé est de mettre en œuvre deux bancs d'essais permettant la réalisation des tests avec mouvement relatif entre l'échantillon et les dispositifs de mesure. L'idée de réaliser deux bancs distincts est surtout motivée par deux principales raisons :

D'une part, en raison de la structure imposante du dispositif de mesure optique (source laser et sonde) disponible au laboratoire, la conception d'un système permettant de déplacer en continu cet ensemble par rapport à un échantillon fixe n'est pas possible. Nous avons dû faire le choix de déplacer l'échantillon et non le système de mesure.

D'autre part, en raison des exigences liées aux vitesses de déplacement visées et des contraintes liées aux dimensions des salles d'essais, nous avons opté pour un compromis entre longueurs des rampes d'accélération, de décélération et la longueur de la zone utile (zone de mesure où la vitesse est constante) afin de concevoir des bancs de déplacement remplissant le cahier des charges.

Les problématiques et le dimensionnement lié au déplacement de chaque banc sont présentés ci-dessous.

4.3.1 Choix et dimensionnement des démonstrateurs

Le modèle de moteur choisi pour le déplacement du charriot est un servomoteur électrique « Brushless » issu de la gamme BMD de la société Bonfiglioli (figure 1). Il est fabriqué en utilisant la technologie innovante des « pôles saillants » permettant la réduction des dimensions avec des avantages intéressants en termes de densité de couple, d'intégration globale et de performances dynamiques.

Le moteur BMD 145 fonctionne à 400 volts triphasés. Il tourne à des vitesses allant jusqu'à 6000 tr/mn. Il offre un rendement de 97 % et est conforme à la norme IE4¹.

C'est un moteur à faible inertie qui possède un couple de 16,8 Nm.

Grâce à un variateur « Active Cube » (figure 2) ce moteur brushless est piloté sans codeur.



Figure 1 : Moteur brushless BMD 145 [1]



Figure 2 : Variateur de vitesse Active Cube [2]

4.3.2 Axe de guidage linéaire pour essais Ultrasons-Laser

En raison des dimensions limitées de la salle laser, nous avons fait le choix d'utiliser des échantillons de rail de longueur inférieure à 20 cm afin de pouvoir réduire la longueur de la zone utile au détriment de celle des rampes d'accélération et de décélération pour que le banc de guidage ait des dimensions permettant son intégration dans la salle laser, tout en offrant la possibilité d'atteindre des vitesses de l'ordre de 7 m/s en zone utile.

L'axe de guidage utilisé est représenté sur la figure 3. Il s'agit d'une unité DLS4 de chez Hepcomotion, qui offre une solution complète aux problèmes de guidage linéaire. Il s'adapte efficacement à pratiquement toutes les applications de positionnement linéaire. Il comporte aux extrémités deux boîtiers : en sortie moteur, l'arbre de sortie permet le couplage direct avec un motoréducteur et l'entraînement de la courroie, à l'autre extrémité la poulie de renvoi. Ces deux entités sont reliées par un corps en aluminium rigide sur lequel est fixé le charriot.

Pour le choix de la longueur de l'axe, nous faisons un calcul de cinématique relativement simple avec comme paramètres d'entrée l'accélération du servomoteur et la distance de la

¹ La norme CEI 60034-30 redéfinit les classes de rendement applicables aux moteurs asynchrones basse tension, selon une échelle s'étendant de IE1 à IE4, et harmonise ainsi les différentes prescriptions nationales.

zone de mesure où la vitesse reste constante tout en ayant une contrainte de longueur totale du banc qui ne doit pas dépasser 3 m.

L'équation des rampes d'accélération et de décélération peut s'écrire :

$$X1 = \pm \frac{1}{2} * \gamma * t^2 \quad (1)$$

Où X1 représente la longueur de la phase d'accélération et/ou de décélération. La valeur du temps t est déterminée par la relation (2). Il s'agit du temps que met le charriot avec une accélération ($\gamma = 30 \text{ m/s}^2$) pour atteindre une vitesse (V) de 7 m/s en partant d'une position au repos.

$$t = \frac{V}{\gamma} \quad (2)$$

Par calcul $t=0,233 \text{ s}$, ce qui correspond à une distance de ($X1=0,817 \text{ m}$)

Afin de diminuer au maximum la longueur de l'axe, nous prenons comme longueur de la zone à vitesse constante, celle de l'échantillon le plus long (soit 0,150 m).

Pour des raisons de sécurité nous avons ajouté à cette course une marge de 0,16 m de chaque côté pour éviter au charriot de taper sur les extrémités du banc.

En prenant en compte toutes ces considérations, nous avons choisi une longueur totale d'axe de 2,61 m (voir figure 3).

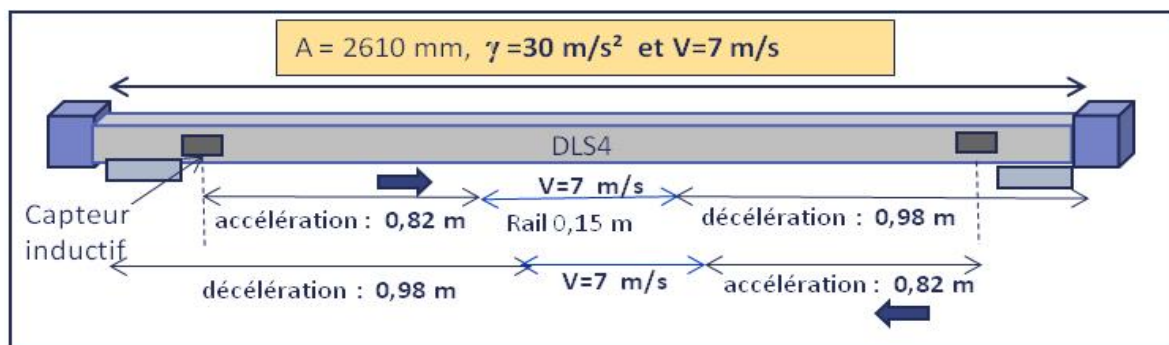


Figure 3 : Dimensionnement de l'axe de guidage pour les essais Ultrasons-Laser

4.3.3 Axe de guidage linéaire pour essais EMAT

Contrairement aux contraintes liées à l'emplacement du banc Ultrasons-Laser, nous disposons d'un local à l'école des Mines Douai où celles-ci ne se posent plus. La contrainte majeure pour la mise en œuvre de ce démonstrateur provient d'une part de la force d'attraction des capteurs sur l'échantillon du rail précisée dans le chapitre 3, et étant de l'ordre 256 N par capteur au voisinage de la surface du rail. Ainsi pour déplacer ces deux capteurs sans contact avec le rail, ce démonstrateur doit être suffisamment rigide afin d'assurer les déplacements des capteurs EMAT, sans flexion ni jeux de l'ensemble (axe et support capteurs). D'autre part, les vitesses de déplacements qui sont visées obligent à bien dimensionner l'axe choisi afin de pouvoir les atteindre, tout en assurant le bon freinage du charriot afin d'éviter les chocs sur les butées en fin de course.

Comme nous l'avons réalisé pour l'axe de guidage linéaire (DLS4) pour les essais Ultrasons-Laser, en partant du même principe de calcul, le dimensionnement de la DLS4 pour les essais EMAT est schématisé comme suit :

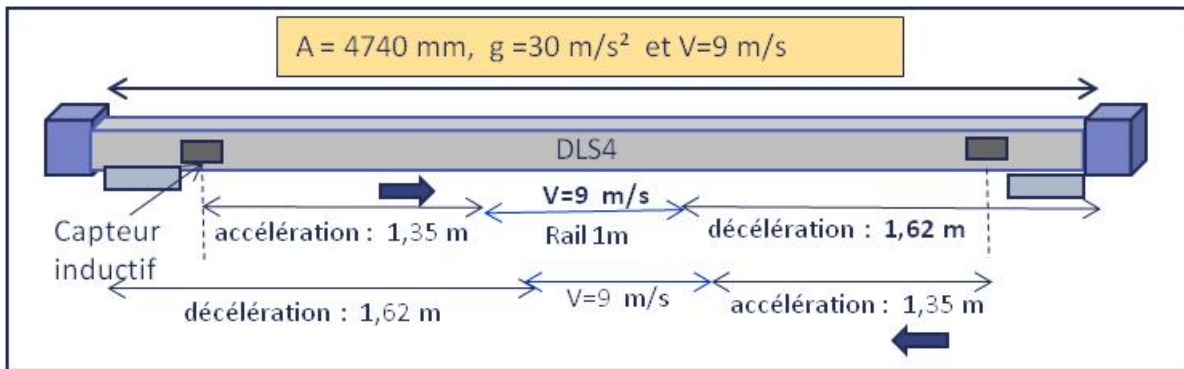


Figure 4 : Dimensionnement de l'axe de guidage linéaire pour les essais EMAT

Il s'agit d'un axe qui a une longueur totale de 5 m. Il permet un déplacement des capteurs jusqu'à une vitesse de 32 km/h sur une distance d'un mètre comme présenté sur la figure 4.

4.3.4 Etalonnage des rampes de déplacement

Le pilotage du moteur est assuré par le variateur de vitesse qui est à son tour configuré par un logiciel « Vectron-Inverter Manager ». La configuration des paramètres de déplacement s'effectue via l'interface « Vtable » (figure 5) du logiciel. Les unités sont données en fonction de u (avec $u = 10^{-4} \text{ m}$).

Motion Blocks	Index 0	Index 1	Index 2	Index 3
1202 Target Position / Distance		0 units	-30000 units	0 units
1203 Speed		10000 u/s	10000 u/s	10000 u/s
1204 Acceleration		50000 u/s ²	50000 u/s ²	50000 u/s ²
1205 Ramp Rise Time		0 ms	0 ms	0 ms
1206 Deceleration		50000 u/s ²	50000 u/s ²	50000 u/s ²
1207 Ramp Fall Time		0 ms	0 ms	0 ms
1208 Motion Mode		0 - absolute	0 - absolute	0 - absolute
1209 Touch-Probe-Window		65536 units	65536 units	65536 units
1210 Touch-Probe-Error: Next M...		-2	-2	-2
1211 No. of Repetitions		0	0	0
1212 Delay		100 ms	100 ms	100 ms
1213 Delay: Next Motion Block		2	3	0
1214 Event 1		7 - Off	7 - Off	7 - Off
1215 Event 1: Next Motion Block		0	0	0
1216 Event 2		7 - Off	7 - Off	7 - Off

Annotations : Cycle de déplacement (encadré autour des lignes 1202 et 1203), Vitesse de déplacement (encadré autour de la ligne 1203).

Figure 5 : Interface de programmation du variateur (Vtable)

Du fait que les moteurs utilisés pour les deux démonstrateurs soient identiques, nous allons présenter l'étalonnage des déplacements du charriot réalisé sur le démonstrateur EMAT sur une distance de 3 m. Pour cela nous procédons comme suit :

Nous subdivisons la distance ($d=3 \text{ m}$) en trois sections d'un mètre : la section du milieu représente la zone où le rail sera posé, sur celle-ci, le déplacement du charriot restera uniforme. De part et d'autre de cette section on considère le mouvement uniformément accéléré ou décéléré. Grâce à la cinématique, nous pouvons déterminer théoriquement les

valeurs d'accélération et de décélération à programmer dans la « Vtable » afin d'atteindre la vitesse désirée tout en assurant le bon arrêt à l'autre bout de la course.

Sur le tableau 5, nous présentons les résultats pour quelques valeurs de la vitesse du charriot en imposant une longueur de 1 m à vitesse constante.

Accélération (m/s ²)	Décélération (m/s ²)	Vitesse (m/s)
4,5	4,5	3
8	8	4
12,5	12,5	5
18	18	6
24,5	24,5	7

Tableau 5 : Valeurs théoriques des accélérations et décélérations en fonction de la vitesse du charriot

Afin de vérifier si le charriot suit bien les paramètres de déplacement imposés, nous utilisons une loi de réciprocité qui consiste à intégrer les valeurs d'accélération et de décélération obtenues par calcul théorique dans la « Vtable ». Cela permet de vérifier si les paramètres de sortie expérimentaux seront conformes à ceux d'entrées théoriques. Pour cela nous utilisons l'interface « oscilloscope » du logiciel de pilotage qui donne le déplacement du charriot (figure 6).

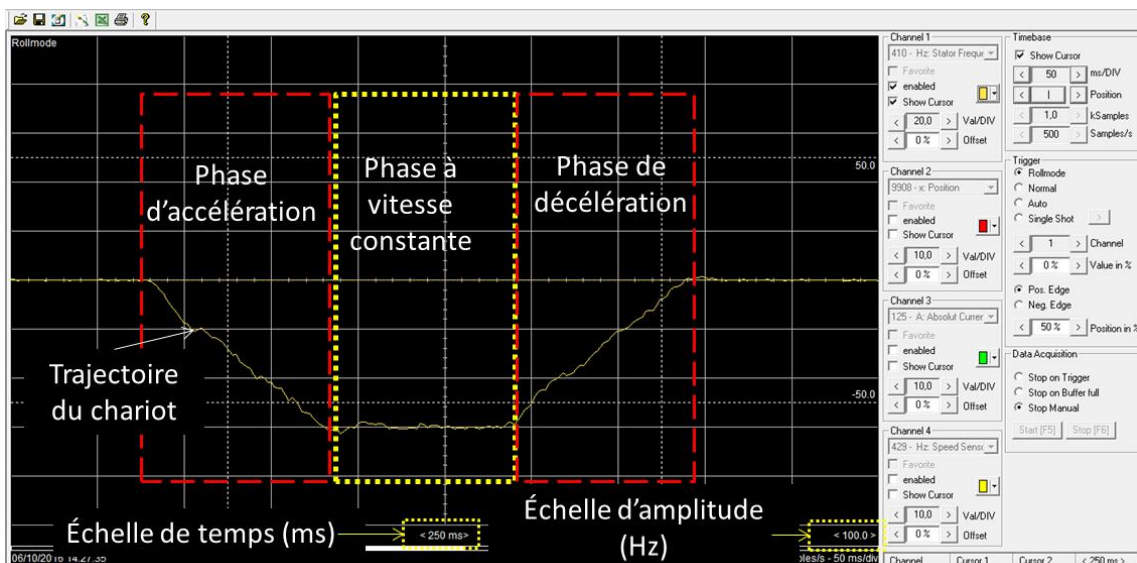


Figure 6 : Signal associé au déplacement du charriot sur l'interface oscilloscope du logiciel « Vplus »

Pour chaque phase d'accélération et de décélération affichée sur l'oscilloscope, nous prélevons sa durée (en ms) à l'aide du curseur et la valeur de l'amplitude. Cette dernière représente la vitesse maximale atteinte par le charriot au cours du déplacement et elle est

donnée sous forme fréquentielle (F(Hz)). Pour convertir cette valeur de vitesse en unité (m/s), nous utilisons une formule de conversion donnée par le constructeur présentée ci-dessous :

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = F(Hz) * \frac{P.1115}{P.373} * \frac{P.117}{P.1116} * 10^{-4} \quad (3)$$

Où les constantes représentent des paramètres intrinsèques du moteur : P.1115=2000, P.1116=P.117=1 et P.373=4.

Connaissant la vitesse du charriot dans la zone où celle-ci est constante ainsi que la durée pour parcourir cette zone, nous pouvons remonter à la distance de celle-ci. Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

Durée accélération (ms)	Vitesse (m/s)	Fréquence (Hz)	Durée vitesse cste (ms)	Durée décélération (ms)	Distance pour vitesse constante (m)
672	3,02	60,4	352	648	1,06
504	4	80	258	504	1,03
384	5,01	100,2	208	400	1,04
336	6,05	120,9	160	320	0,97
288	7,09	141,8	128	280	0,91

Tableau 6 : étalonnage des rampes de déplacement du charriot

Ces résultats nous permettent de remonter aux valeurs d'entrées théoriques avec une erreur d'environ $\pm 5\%$ sur la longueur de la zone à vitesse constante. Cette erreur peut être reliée à la précision des valeurs déterminées sur le signal avec les curseurs.

4.4 Essais Ultrasons-Laser en mode dynamique

Par rapport aux dispositifs de mesure classiques avec un capteur piézoélectrique de contact, les méthodes de détection optique présentent l'avantage d'une mesure sans contact avec une large bande passante.

4.4.1 Démonstrateur pour les essais Ultrasons-Laser

Le laboratoire IEMN-DOAE est doté de plus d'une quinzaine d'années d'expérience dans le domaine du contrôle non destructif par Ultrasons-Laser. A cet effet, il dispose d'une salle expérimentale dédié pour cela et dont l'équipement n'a cessé de faire ses preuves à travers plusieurs travaux de thèses portant sur la caractérisation de divers types d'échantillons en statique[3]–[6].

Cependant, la détection de défauts par Ultrasons-Laser sur une cible mouvante est une nouveauté pour le laboratoire et probablement une première dans les laboratoires de recherche française.

C'est pour cela, qu'une bonne partie de ces travaux a été consacré à la conception d'un démonstrateur, type laboratoire, capable de déplacer les échantillons aux vitesses visées tout en gardant le dispositif optique existant.

Ainsi, nous avons mis en œuvre un démonstrateur constitué d'un axe de guidage linéaire type « DLS4 » [7], d'un porte échantillon qui sera fixé sur le charriot de la DLS4, d'un support d'axe constitué par des profilés en aluminium, d'un moteur BMD 145 et d'une protection de l'ensemble.

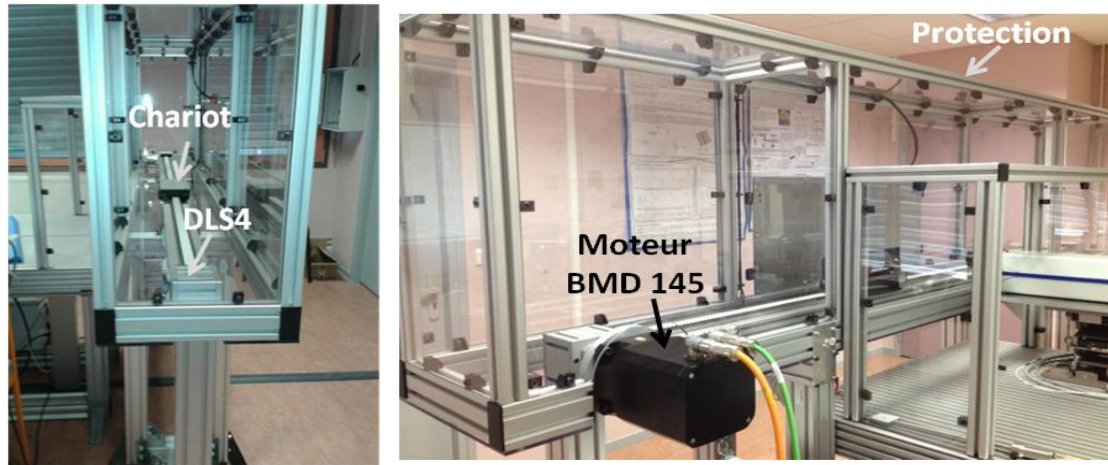


Figure 7 : Démonstrateur pour essais Ultrasons-Laser

4.4.2 Dispositif expérimental

Le dispositif pour la réalisation des essais en dynamique est constitué par la source laser et par la sonde interférométrique hétérodyne utilisée dans le chapitre précédent concernant les essais en statique.

Le laser impulsionnel Nd:YAG doublé en fréquence ($\lambda = 532 \text{ nm}$) génère un faisceau qui est focalisé sur la surface de l'échantillon de rail convenablement maintenu sur le charriot du démonstrateur, après passage par deux miroirs plans (M1 et M2) et par une lentille cylindrique (LC). Une photodiode détectant le passage de chaque impulsion est placée à la sortie du laser. La focalisation de ces impulsions à la surface du rail va engendrer la génération des ondes ultrasonores dans l'échantillon.

Pour la détection des déplacements normaux de la surface de l'échantillon provoqués par les ondes de Rayleigh, nous utilisons une sonde interférométrique hétérodyne SH-140. Son faisceau est directement focalisé sur la surface du rail à proximité de la source linéique produite par le laser de génération.

Le moteur BMD 145 est relié à la photodiode par l'intermédiaire du variateur de vitesse « Active Cube » pour permettre de synchroniser les impulsions laser avec le lancement du déplacement du charriot.

L'acquisition des signaux issus de la sonde interférométrique s'effectue par le biais d'un oscilloscope. La photodiode et la sonde interférométrique sont également reliées pour la synchronisation des acquisitions.

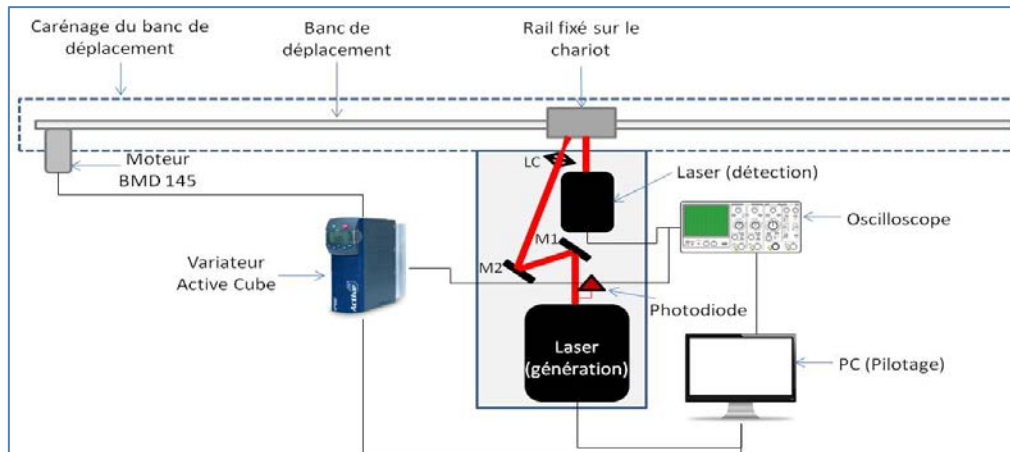


Figure 8 : Dispositif expérimental pour essais Ultrasons-Laser

La fréquence des impulsions lumineuses émises étant égale à 10 Hz, il est nécessaire de synchroniser le départ du charriot avec celles-ci pour que certaines impulsions se situent au niveau de la zone d'inspection souhaitée au moment du passage de l'échantillon.

4.4.3 Méthode de synchronisation du dispositif

Le variateur de vitesse comporte plusieurs types de configurations des paramètres de fonctionnement (Bonfiglioli [2]). Ces configurations se différencient essentiellement par le mode de contrôle du dispositif d'actionnement du moteur. Les entrées numériques et analogiques, qu'il contient, peuvent être combinées et intégrées avec des protocoles de communication en option.

A cet effet, nous utilisons le mode de commande à trois conducteurs, qui est, parmi d'autres, une option permettant de commander le dispositif d'actionnement du variateur par des impulsions numériques.

Ainsi, ce dispositif d'actionnement est paramétré pour le démarrage par l'état logique du signal « start commande à trois conducteurs ». Suivant le sens de rotation du moteur, les signaux de commande Start droite (consigne de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre) et Start gauche (consigne de rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre) sont des impulsions qui actionnent le démarrage respectivement à droite ou à gauche du moteur.

Après avoir paramétré adéquatement les entrées numériques dans la « Vtable », le schéma mis en œuvre pour la synchronisation des impulsions laser et la mise en route du variateur est le suivant :

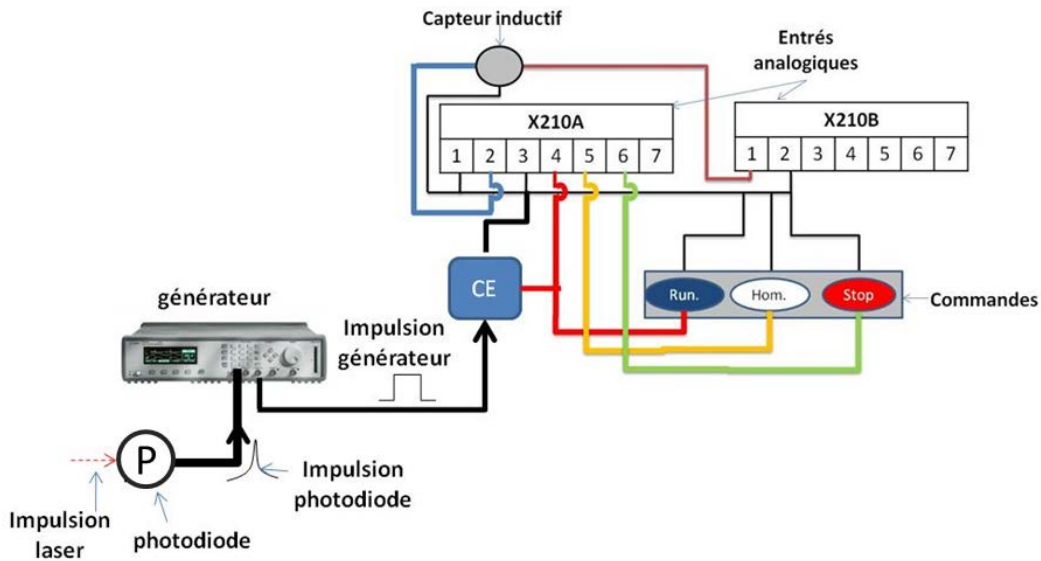


Figure 9 : schéma de la synchronisation des impulsions laser et du démarrage du variateur

Les impulsions lumineuses émises par le laser sont détectées par la photodiode placée à sa sortie. Chaque impulsion est transformée en impulsion électrique et injectée dans le générateur. Celui-ci offre la possibilité de transformer cette impulsion d'entrée de durée de l'ordre de la dizaine de nanosecondes (10 ns) en une impulsion rectangulaire de durée supérieure au temps de réponse du variateur (32 ms) [8]. Cette impulsion dont sa durée est réglée en fonction du cycle souhaité (durée d'un aller-retour du charriot) va passer par une carte électronique jouant le rôle d'interrupteur pour activer le départ du charriot. Le capteur inductif est fixé sur l'axe de la DLS4 à une position proche du moteur et qui est considérée comme position d'origine du charriot. Il détecte la présence de celui-ci par induction électromagnétique.

Pour chaque cycle de déplacement, les paramètres du variateur sont préalablement réglés par l'intermédiaire de la « Vtable ». Un retard de démarrage par rapport à l'instant d'arrivée du front montant de l'impulsion peut être imposé afin qu'une ou plusieurs des impulsions du laser suivantes soit en phase avec la section de l'échantillon que l'on souhaite inspecter au moment de son passage au niveau de la zone d'essais (zone où est localisée la source linéique et le point de détection).

4.4.4 Etalonnage du dispositif expérimental sur un échantillon sans défaut

Afin de valider la fiabilité de la synchronisation réalisée, nous avons effectué, dans un premier temps, des essais sur un échantillon sans défaut. Sur ce rail, nous avons placé du papier thermosensible à la surface du champignon afin de visualiser l'ensemble des tâches provoquées par le laser en fonction de la vitesse de déplacement. La fréquence de répétition des impulsions laser est constante (10 Hz). La longueur de l'échantillon de rail utilisé est de 11 cm, et la distance entre la source linéique et le point de détection est d'environ 2 cm. La zone d'essais est localisée à une distance de 99,5 cm par rapport au capteur inductif (voir figure 10).

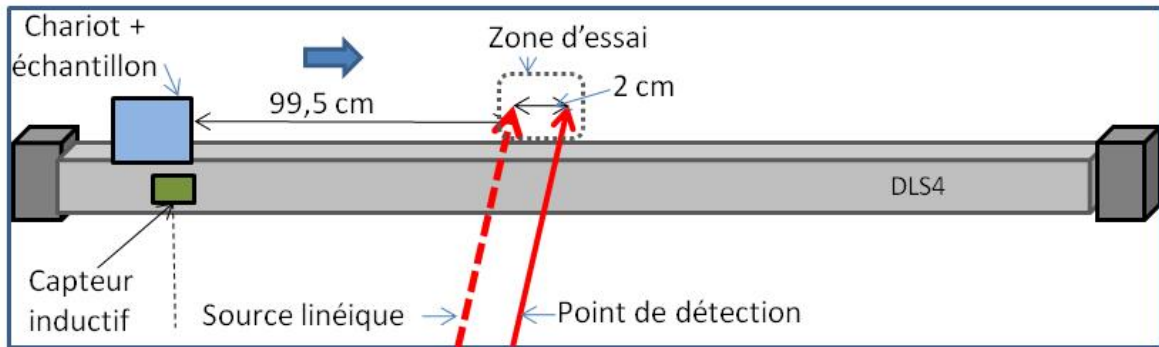


Figure 10 : Schéma du dispositif expérimental pour l'étalonnage du déplacement du charriot

La synchronisation est faite de telle sorte que le l'instant de démarrage du charriot soit toujours conditionné par la première impulsion laser détectée par la photodiode sans tenir compte des impulsions suivantes (cf. figure 8).

Ainsi, nous avons réalisé ce test à plusieurs vitesses afin de déterminer le nombre de traces, sur le papier thermosensible, obtenu pour chacune dans la zone d'essai. Les résultats sont présentés sur le tableau 3.

Vitesse (m/s)	Nombre de traces
0,1	5
0,2	2
$\geq 0,3$	1

Tableau 7 : Nombre d'impulsions laser à la surface du champignon en fonction de la vitesse

Pour des vitesses supérieures ou égales à 0,3 m/s, nous ne pouvons obtenir au maximum une seule impulsion qui atteint l'échantillon.

Le choix des zones à inspecter sur la surface de l'échantillon où les impulsions lasers devront exciter se fait :

Soit en imposant un retard sur l'instant de départ du charriot à partir de la programmation du variateur.

Soit par décalage de la position du capteur inductif (i. e. décalage de la position d'origine).

4.4.5 Détection de fissures surfaciques en mode dynamique

Une fois la mise en place du démonstrateur et la validation de la synchronisation effectuées, nous avons réalisé des essais sur différents échantillons afin d'étudier la faisabilité de la détection de fissures surfaciques en mode dynamique par ondes de Rayleigh.

La détection de fissures surfaciques dans le champignon du rail en dynamique par Ultrasons-Laser n'est pas à ce jour une méthode d'inspection couramment utilisée dans l'industrie ferroviaire. En conséquence, les publications scientifiques associées sont rares. Cependant, des chercheurs Danois, précisent dans leurs travaux avoir réalisé un système d'inspection

automatisé par Ultrasons-Laser capable de détecter des défauts volumiques dans le champignon et la base du rail à des vitesses pouvant aller jusqu'à 40 km/h[9].

Dans le cadre de cette étude qui s'intéresse plus particulièrement aux défauts surfaciques (squats et head-checks), nous présentons les essais réalisés avec le dispositif expérimental afin de valider la faisabilité de la détection de cette famille de défauts avec déplacement relatif.

4.4.5.1 Détection de squats

Dans un premier temps, nous réalisons les essais sur un échantillon contenant des squats. Le dispositif expérimental est décrit à la figure 8. L'oscilloscope est réglé en mode séquentiel afin d'enregistrer l'ensemble des signaux correspondant au nombre de tirs laser durant l'acquisition. La fréquence d'échantillonnage est de 500 MHz, les signaux (2500 points) ont une durée de 5 μ s.

Sur le fichier obtenu, nous récupérons uniquement les séquences correspondant aux signaux utiles (i. e. les signaux ayant la signature du déplacement normale de la surface engendrée par l'onde de Rayleigh).

Pour chaque défaut considéré, nous faisons, sur une zone avoisinante (figure 11. a, c, f), un réglage fin de l'interféromètre afin d'augmenter au maximum le rapport signal sur bruit. Ensuite, avec le sélecteur « Hom » (figure 9), nous faisons un retour du charriot à sa position d'origine (position du capteur inductif).

La figure 11 montre les résultats obtenus sur différents squats à une vitesse de 0,1 m/s. les figures (11.b, d et e) montrent bien que les échos associés aux défauts D1, D2 et D3 sont observables.

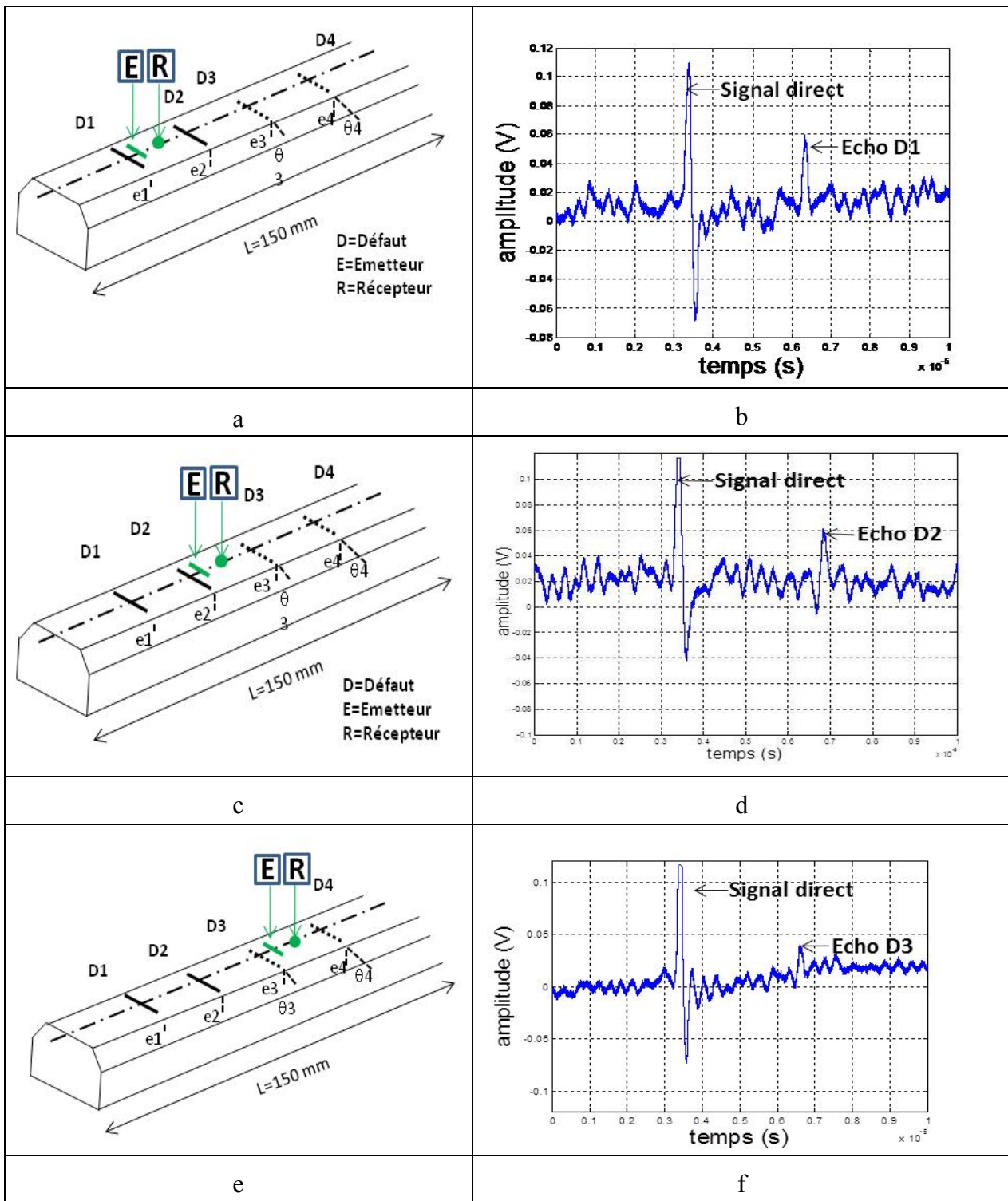


Figure 11 : Position des différentes zones inspectées (a, c et e) avec les différents résultats respectivement associés (b, d et f) à une vitesse de 0,1 m/s

Après ces premiers résultats, nous effectuons d'autres essais suivant le même principe instrumental mais en augmentant progressivement la vitesse de déplacement de l'échantillon.

Les résultats des essais à 0,2 m/s sur deux sections différentes de la surface de l'échantillon sont présentés sur les figures 12 et 13.

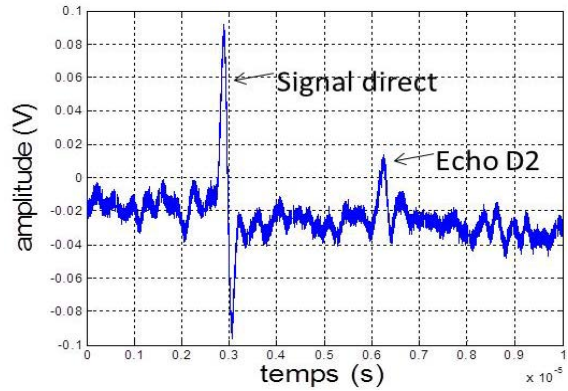
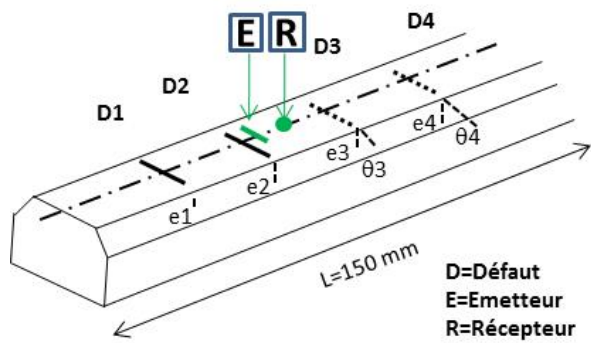


Figure 12 : Signal obtenu à proximité du défaut D2 à une vitesse de 0,2 m/s

La source linéique et le point de détection étant plus près de la fissure D2, nous détectons en plus du signal direct, l'écho associé à celle-ci (figure 12).

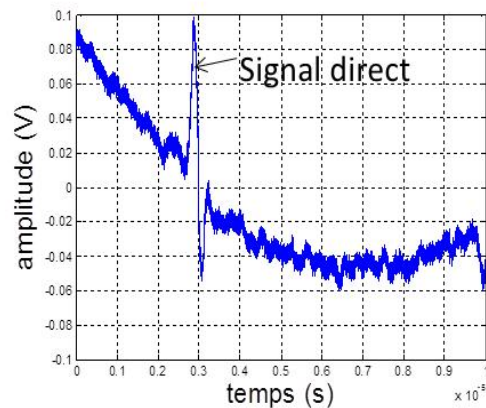
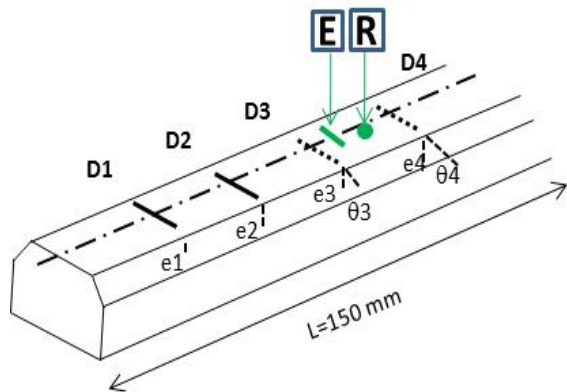


Figure 13 : Signal obtenu à proximité du défaut D3 à une vitesse de 0,2 m/s

La figure 13, représente le résultat d'un essai réalisé au voisinage du défaut D3 à une vitesse de 0,2 m/s. contrairement à l'essai précédent, cette fois-ci on n'observe pas l'écho associé à D3. Cela est dû en partie à l'inclinaison de ce squat par rapport à la section transversale du champignon qui a pour effet de réfléchir l'onde de Rayleigh hors de la détection.

Les essais réalisés à 0,3 m/s n'ont pas donné des résultats qui permettent de détecter la présence d'un défaut. Plusieurs tests ont été effectués en affinant au maximum le réglage de la sonde interférométrique. La figure 14 représente un exemple de résultats parmi les meilleurs qu'on ait pu obtenir à une vitesse de 0,3 m/s.

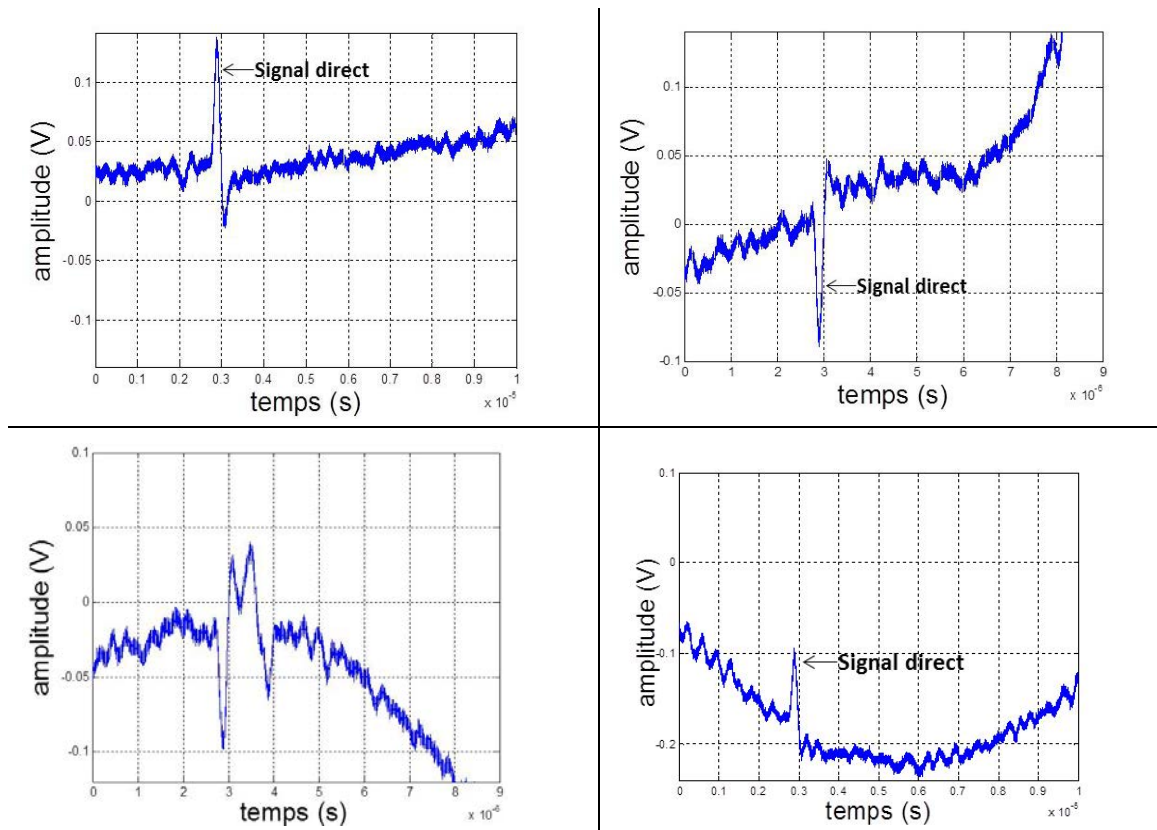


Figure 14 : Signal obtenu sur différentes zones sans défaut à une vitesse de 0,3 m/s

Ces résultats permettent de constater une dégradation des signaux qui débute à partir d'une vitesse de 0,2 m/s.

Les perturbations observées sur les signaux, seraient dues au fait qu'on ait atteint la limite de détection de la sonde interférométrique utilisée en considérant des cibles en mouvement.

4.4.5.2 Détection de head-check

Nous avons aussi réalisé des essais à différentes vitesses avec l'échantillon de rail contenant des défauts représentatifs de head-check. Les mêmes difficultés concernant la dégradation de la détection ont été constatées. De plus, en raison de l'inclinaison des fissures, les échos produits par ces défauts ne sont plus observables, même à une vitesse 0,1 m/s.

Afin d'illustrer cela, nous présentons le résultat d'un essai réalisé à 0,2 m/s au voisinage d'une fissure représentative de head-check (figure 15).

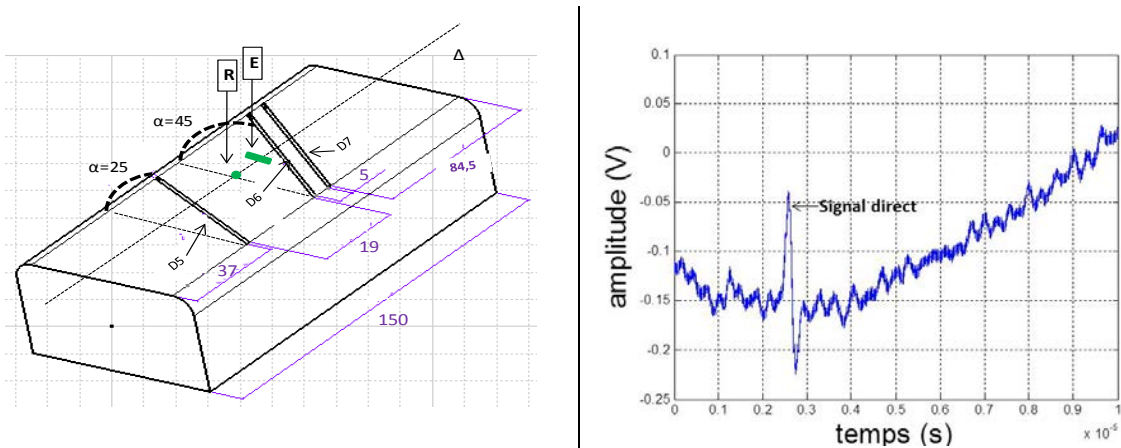


Figure 15 : Zone inspectée sur le champignon du rail et le résultat associé

4.4.6 Discussion sur le dispositif de détection

Dans ce travail, nous avons étudié la détection de fissures surfaciques sur cibles en déplacement en utilisant le système interférométrique de détection existant.

Ce choix se justifie par le fait que nous sommes dans le cadre d'une étude de faisabilité et que le coût d'un autre système de détection optique s'était avéré prohibitif pour cette phase où la faisabilité de la méthode de contrôle envisagée restait à prouver.

Les sondes interférométriques hétérodynes ne sont pas les meilleures candidates pour détecter les déplacements générés par les ondes ultrasonores dans le cas d'échantillons en mouvement [10]. Cela est dû au fait que la méthode de détection de ce type de système est basée sur le mélange d'un faisceau de référence (R) avec un faisceau réfléchi par la surface d'un échantillon (sonde S) pour créer des interférences qui sont collectées dans un photodétecteur intégré. Le résultat obtenu est une intensité électrique proportionnelle au carré du champ électrique de ces deux faisceaux.

Il est clair que la performance de ce type d'interféromètre peut être amoindrie, si le faisceau réfléchi par la surface de l'échantillon sous test n'est pas renvoyé dans la cavité de l'interféromètre pour interférer correctement avec le faisceau de référence. Et cela aura pour conséquence directe de rendre difficile voire quasi impossible l'exploitation du signal résultant.

A cet effet, pour des cibles se déplaçant perpendiculairement à l'axe du faisceau sonde, un petit désalignement de la cible peut provoquer le renvoi du faisceau réfléchi hors de la cavité. A cela aussi peut s'ajouter le fait que l'état de surface des échantillons n'étant pas homogène en termes de réflectivité optique, l'amplitude du champ réfléchi peut ne pas être suffisante pour interférer correctement avec celui du faisceau de référence.

Pour surmonter cette limitation de la méthode Ultrasons-Laser liée à la sonde interférométrique, il faudrait prévoir d'autres systèmes optiques basés sur d'autres principes de fonctionnement. Comme le cas des sondes qui exploitent la diffusion du faisceau incident par la surface de l'échantillon [11], [12], dont le principe de fonctionnement repose sur l'interférence de l'onde de référence avec le speckle du faisceau réfléchi.

En effet, il existe des études qui ont été réalisées pour évaluer les performances des systèmes optiques pour la détection d'ondes ultrasonores générées par sources laser sur des cibles en déplacement. Parmi celles-ci, une étude comparative sur trois types de système interférométrique (un Mach-Zehnder, un Fabry-Pérot confocal et Photo-Induced-EMF (PI-EMF)) pour la détection des vibrations ultrasonores engendrées par des ondes de Lamb se propageant sur un échantillon en mouvement a été réalisée par Ridgway et al. [13]. Les résultats montrent que pour le Fabry-Pérot confocal, les modes symétriques (S_0) et antisymétriques (A_0) peuvent être détectés jusqu'à 15 m/s sans dégradation du rapport signal sur bruit. La sonde PI-EMF, ne permettant pas de détecter le mode fondamental symétrique S_0 des ondes de Lamb générées dans l'échantillon en mouvement, n'a pas été utilisée dans cette étude. Quant au Mach-Zehnder, il nécessite l'utilisation d'un miroir tournant pour la détection d'ondes sur un échantillon se déplaçant. Un rapport signal sur bruit de 10 a été obtenu avec ce système. Cette sensibilité est trois fois supérieure à celle observée en utilisant l'interféromètre Fabry-Perot confocal.

Une classification de différents types d'interféromètres pour la détection d'ondes ultrasonores générées par source laser a été effectuée [10]. Cette classification met en évidence les performances de chaque sonde pour la détection d'ondes ultrasonores sur des échantillons présentant une surface rugueuse et en mouvement (Tableau 4). Il en résulte que l'utilisation des sondes interférométriques telles que le Fabry-Perot et le PI-EMF serait plus adaptée pour la détection d'ondes ultrasonores sur des cibles en mouvement.

Par ailleurs, dans le cadre de notre étude qui s'intéresse plus aux ondes ayant des fréquences inférieures à 2 MHz, la sonde PI-EMF semble mieux adaptée car elle est plus sensible aux ondes ayant une fréquence comprise entre 100 kHz et 100 MHz.

Type d'interféromètre	Réponse sur surface rugueuse	Réponse sur surface en mouvement	Bande de fréquence
Homodyne	Mauvaise	Moyenne	100 kHz à 30 MHz
Hétérodyne	Mauvaise	Moyenne	100 kHz à 30 MHz
Fabry-Perot	Bonne	Bonne	2 MHz à 500 MHz
PI-EMF	Bonne	Bonne	100 kHz à 100 MHz
Photo-réfractif	Bonne	Mauvaise	20 kHz à 300 MHz

Tableau 8 : Réception d'ultrasons par méthode opto-acoustique (Ultrasons-Laser) : caractéristiques de différents interféromètres [10]

4.5 Essais Ultrasons-EMAT en mode dynamique

De la même manière que le laboratoire IEMN-DOAE, le département TPCIM des Mines Douai est une unité de recherche et d'enseignement pluridisciplinaire. Les thématiques de recherche sont : la science des matériaux, la science des procédés, la mécanique des structures et des fluides, la thermique et la physicochimie. Il détient une forte expérience en matière de

contrôle des matériaux. Le Département TPCIM occupe une place de référence dans le domaine de la plasturgie et des composites.

Cependant, l'utilisation des EMAT pour un contrôle en mode dynamique a également été une nouveauté pour le Département TPCIM. Il a donc fallu mettre en œuvre un démonstrateur permettant d'assurer le déplacement des capteurs sans contact au-dessus des tronçons de rail de longueur 1m, avec l'objectif d'atteindre une vitesse de l'ordre de 36 km/h.



Figure 16 : Démonstrateur pour essais EMATs

Il s'agit d'un banc d'essai placé dans une enceinte protectrice en profilés et treillis anodisés fixés sur la dalle en béton figure 16.

Le banc d'essai est composé des éléments suivants :

- Le bâti qui soutient l'axe de guidage DLS4 ainsi que le rail à tester, le déplacement du charriot est assuré par un moteur brushless BMD 145.
- L'instrumentation du charriot mobile comprenant capteurs et conditionneur.
- La PoxerBox 2 de chez Innerspec Technologies, assure la génération des signaux qui alimentent les capteurs EMAT et l'acquisition des signaux, qui est pilotée par un PC.
- L'armoire électrique contenant le variateur de vitesse qui pilote le moteur brushless.

Le variateur est alimenté en triphasé 400 V régime TN et la partie instrumentation par du 230V TN séparé.

Les câbles variateur-moteur et variateur-codeur sont blindés, ils forment deux boucles posées à terre.

Les câbles des capteurs et de générateur US sont des câbles respectivement coaxiaux et triaxiaux, ils cheminent 'en l'air' et sont lovés en boucles multi-spires à 2 mètres du sol.

4.5.1 Etalonnage du lift-off

Des expériences réalisées en statique dans le chapitre 3, concernant l'étude de l'atténuation de l'onde de Rayleigh en fonction de la distance de propagation, nous ont permis de déterminer les distances séparant l'émetteur et le récepteur qui offrent les meilleurs résultats possibles sur

un échantillon sans défaut. Mais dans le cas d'un échantillon contenant des défauts, le choix de la distance entre l'émetteur et le récepteur dépend en plus de deux paramètres :

Cette distance (E/R) doit être inférieure à celle entre deux fissures consécutives afin d'éviter l'interprétation d'échos relatifs à plusieurs défauts comme étant ceux d'un seul.

La largeur de la durée du signal électrique lié à l'émission des EMAT, car si l'émetteur et le récepteur sont séparés d'une distance inférieure à environ 4 cm, l'écho de départ interfère avec l'écho du passage de l'onde émise sous le récepteur. En revanche, si on ne souhaite exploiter que les échos réfléchis par les fissures, nous pouvons placer les deux capteurs côte à côte.

Dès que les écartements entre les capteurs sont convenablement réglés à l'aide des noix de liaison servant à maintenir ces capteurs (figure 17), nous faisons un réglage fin du lift-off qui est la distance entre l'aimant permanent de l'EMAT et la surface du champignon du rail. Ce réglage se fait grâce à un système de glissière qui permet un positionnement fin sur une plage d'un centimètre suivant l'axe des ordonnées (y).

Pour cela nous insérons, hors du rail, des cales en acier inoxydable de différentes épaisseurs dans les glissières de réglage fin se trouvant aux extrémités de la tige. En raison de la force d'attraction magnétique entre le rail et les capteurs (520 N par exemple pour deux capteurs au contact du rail), le charriot a tendance à être légèrement happé par le rail (de l'ordre de quelques millimètres) à chaque fois que les capteurs arrivent au-dessus du rail lors de leur déplacement.

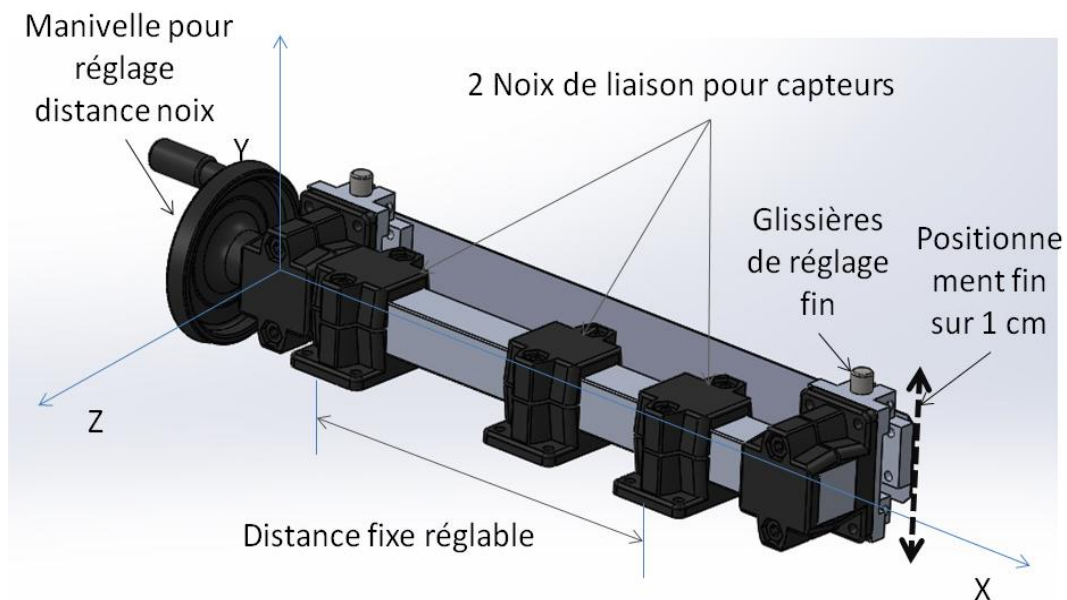


Figure 17 : Méthode de réglage de la distance entre capteurs et du lift-off

Pour évaluer cet abaissement du charriot et régler le lift-off à 1,6 mm, nous insérons une série de cales hors de la surface du rail et puis on déplace le charriot manuellement jusqu'à ce que les EMATs soient au-dessus du rail. Nous évaluons ainsi, pour chaque série, le déplacement causé par l'attraction magnétique à l'aide de deux comparateurs et le lift-off résultant par d'autres cales.

Les résultats sont représentés dans le tableau 5 :

Epaisseurs cales (mm)	Flexion du charriot (mm)	Lift-off (mm)
5	1,5	En contact
6	1,1	1,3
6,4	0,9	1,6

Tableau 9 : Résultats de l'étalonnage du lift-off

Le démonstrateur comporte un moteur brushless permettant d'assurer le déplacement des capteurs EMATs, une DLS4, un support capteurs fixé sur le charriot de la DLS4, des guides de câbles servant à piloter et à alimenter les capteurs et des profilés en aluminium (figure 18).

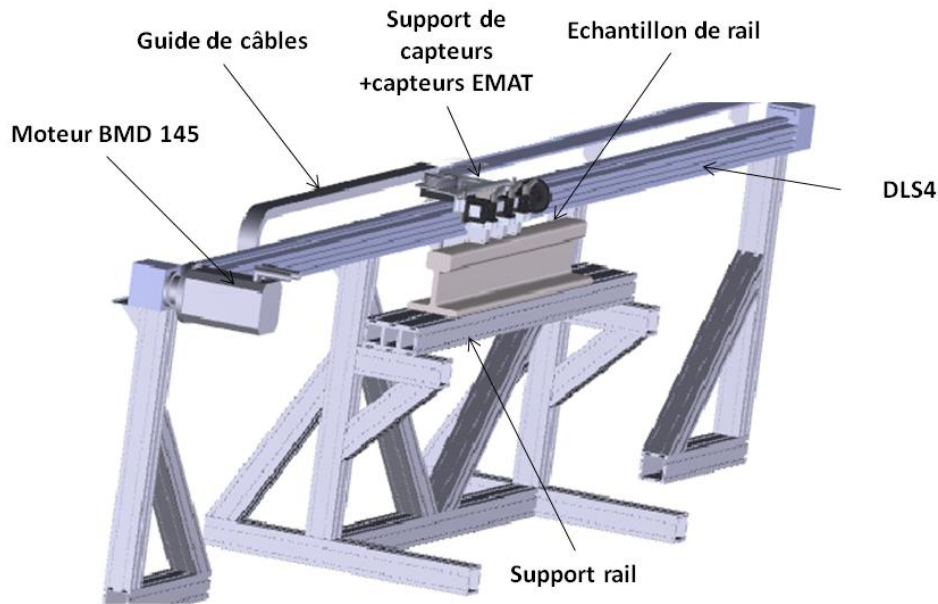


Figure 18 : Schéma du démonstrateur pour essais EMAT

4.5.2 Mise en route du moteur

Contrairement au dispositif expérimental pour essais Ultrasons-Laser, l'activation et le début des acquisitions se font manuellement.

Pour mettre en route le moteur, il suffit d'actionner le sélecteur « Run » une fois que la configuration du variateur est faite.

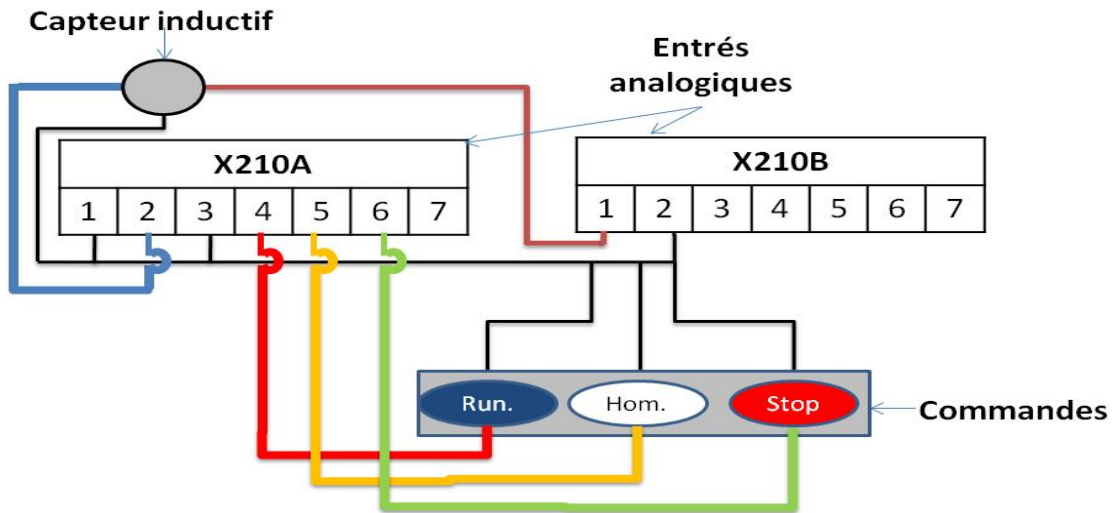


Figure 19 : Schéma du branchement électrique pour la mise en route du moteur

4.5.3 Résolution du parasitage des signaux

Les premiers essais réalisés en mode statique n'ont présenté aucune anomalie. Mais, pour les essais en dynamique nous constatons des signaux parasites qui apparaissent dès que le variateur de vitesse est mis en route. Cette superposition de ces signaux avec le signal utile (i. e. le signal lié à l'onde de Rayleigh) rend difficile l'exploitation des données.

Afin de résoudre ce problème et rendre exploitable les résultats des essais, plusieurs actions orientées vers la CEM (Compatibilité Electromagnétique) ont été menées.

Pour analyser ce problème et trouver une solution, nous commençons par chercher à identifier l'origine des parasites. Pour cela, intéressons-nous à la compréhension du fonctionnement des variateurs sur le plan de la CEM.

Tous les variateurs actuels pour moteurs asynchrones ou brushless sont conçus de la même manière sur le plan de la CEM et ils utilisent les mêmes composants de puissance.

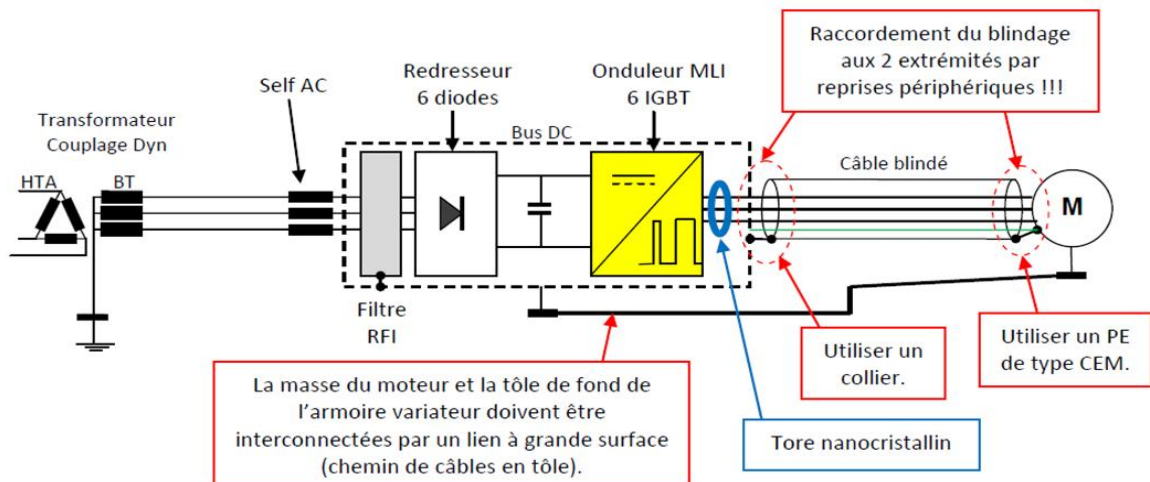


Figure 20 : Schéma de fonctionnement d'un variateur sur le plan de la CEM

La figure 20 représente le schéma type d'une installation reprenant tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble variateur-moteur sur le plan de la CEM.

La self AC triphasée (3 à 5%) permet de réduire les courants harmoniques émis par le variateur et d'amortir les perturbations transitoires venant du réseau électrique. Certains constructeurs proposent une self DC située sur le bus DC, elle atténue les courants harmoniques et elle peut s'ajouter à la self AC.

L'utilisation d'un tore en matériau nanocristallin à la sortie du variateur autour du câble de puissance qui alimente le moteur permet d'atténuer les courants de mode commun HF émis par le variateur. Ce matériau permet une suppression des courants HF (par conversion en chaleur) sans risque de saturation. Dans l'industrie ce tore peut remplacer le blindage du câble moteur.

4.5.4 Détection de fissures surfaciques en mode dynamique

Pour détecter en dynamique les défauts présents sur la surface de l'échantillon, nous configurons le variateur de vitesse de telle sorte que le balayage de la surface du rail par les capteurs s'effectue toujours à vitesse constante.

Le lift-off est maintenu à une distance d'environ 1,6 mm. En l'absence d'un capteur inductif permettant de synchroniser l'arrivée des EMATs sur le rail avec le déclenchement de l'émission des ondes de Rayleigh et l'acquisition des données, la synchronisation se fait manuellement.

Pour des vitesses de déplacement inférieures à 2 m/s, l'acquisition des signaux peut être déclenchée en début de rail et être stoppée manuellement dès que le premier capteur débute sa sortie du rail. Par contre, pour des vitesses supérieures, nous démarrons l'acquisition des données avant le départ du charriot. Par conséquent, il est difficile dans la configuration actuelle du banc, d'associer chaque signal à une position sur le rail, mais une cartographie de l'amplitude des signaux obtenus pour chaque acquisition dans le plan 'temps de vol – position' suivant l'axe du rail permet d'identifier les zones présentant des défauts et dans une certaine mesure, les échos associés à ces défauts.

4.5.4.1 Extraction et traitement des données

Les données expérimentales sont stockées dans la mémoire de la PowerBox au format binaire. Ces fichiers ne peuvent pas s'ouvrir directement dans le Bloc-notes ou Excel en raison de leur extension propriétaire (.rfc). Il a donc été nécessaire de trouver un moyen de convertir ces fichiers sous un format exploitable (.txt) avec des outils de traitement des données tel que Matlab.

Dans un premier temps nous avons utilisé un exécutable « ascii converter » qui est un outil permettant de faire la conversion des données au format .txt. Cependant, cette méthode de conversion prend du temps (une dizaine de minutes) et ne permet pas de faire une analyse rapide des résultats des essais.

C'est pour cette raison que nous avons développé une autre application sous le logiciel Delphi qui permet à la fois de convertir et de représenter les résultats, sous la forme d'une cartographie représentant les niveaux d'amplitude, dans le plan (distance parcourue, temps).

Cependant, nous faisons un traitement des défauts isolément en analysant les signaux associés à la propagation de l'onde de Rayleigh.

4.5.4.2 Détection des squats

Une fois la prise en main du dispositif expérimental terminée, nous étudions la détectivité des squats en fonction de la vitesse de déplacement des capteurs. Pour réaliser cette étude, nous effectuons des essais à différentes vitesses sur deux échantillons de rail différents (un de longueur un mètre et un autre de longueur 0,7 m).

Sur chaque échantillon de rail nous procédons comme suit :

Les capteurs sont écartés l'un de l'autre à une distance intérieure de 6 cm et le lift-off est de 1,6 mm. Le choix des 6 cm d'écart se justifie par le fait qu'elle permet d'éviter que le signal direct soit masqué par le signal électrique lié à l'émission afin d'exploiter à la fois, la transmission et la réflexion.

Pour chaque déplacement, nous analysons les signaux obtenus de part et d'autre du squat (cf. chapitre 3 : échantillon pour essais EMAT). La figure 21 représente une série de mesures effectuées à différentes positions dans une zone près du squat et avec différentes vitesses de déplacement des capteurs.

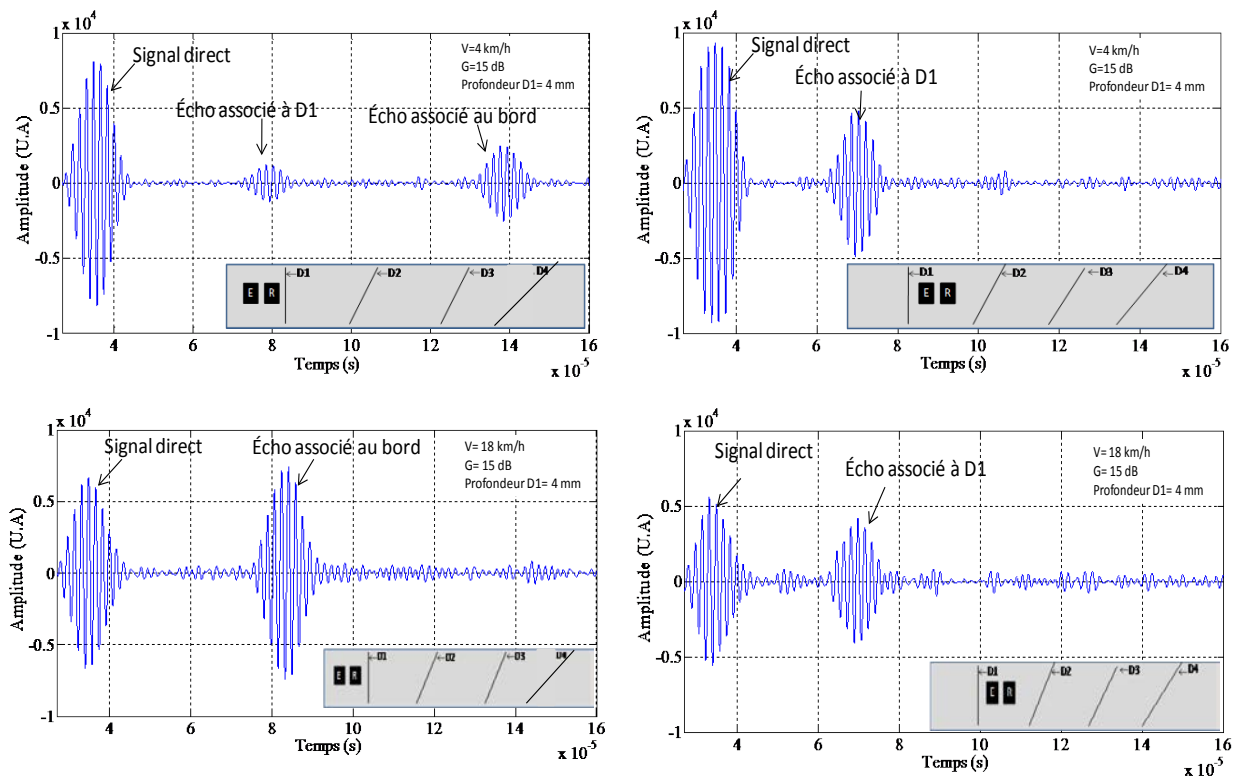


Figure 21 : Mise en évidence de la signature du défaut D1 à différentes positions et en fonction de la vitesse de déplacement

L'analyse de ces résultats permet d'observer la présence des échos associés au squat D1 et ce jusqu'à une vitesse de 18 km/h.

Une fois la faisabilité de la détection de squats en mode dynamique validée avec notre démonstrateur sur des défauts usinés (ouvertures des fissures $\approx 1,5$ mm), nous effectuons des essais sur l'échantillon avec des défauts réalisés par électroérosion, plus proches des défauts réels, qui ont une largeur de lèvres de 0,4 mm (voir tableau 10).

N° défauts	F1	F2	F3	F4
Profondeurs (mm)	3	3	6	6
Angles d'inclinaison par rapport à la surface de roulement (°)	0	20	20	0
Angles d'inclinaison par rapport au plan transversal du rail (°)	0	0	0	0
Ouverture de la lèvre (mm)	0,4			
Nature du défaut	Squat	Head-check	Head-check	Squat

Tableau 10 : Caractéristiques des quatre fissures réalisées par électroérosion

Pour ces essais, nous faisons le choix de rapprocher au maximum les deux capteurs (2,5 cm) pour ne tenir compte que de la partie du signal correspondant aux réflexions engendrées par les fissures.

Le signal direct reste « noyé » dans le signal électrique, et ne sera pas représenté dans les figures, le lift-off est toujours de 1,6 mm. Les résultats de ces essais sont présentés à la figure 22.

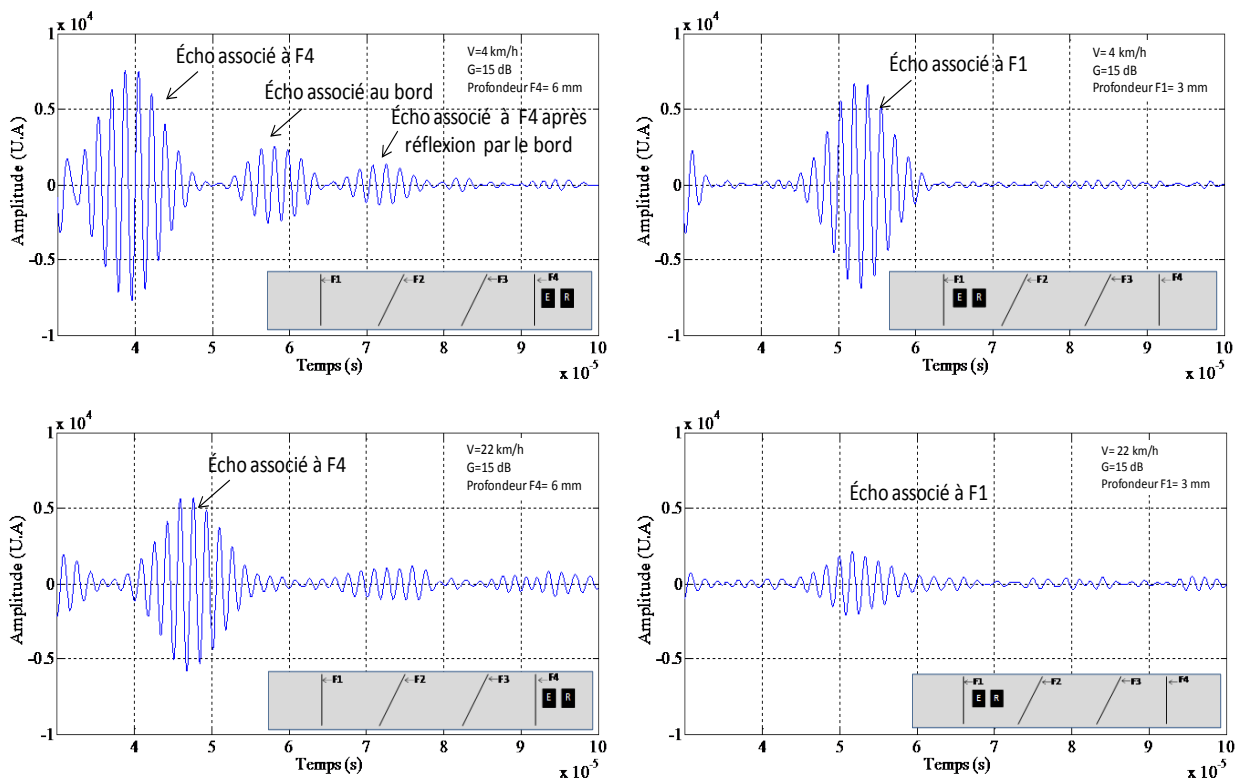


Figure 22 : Mise en évidence des échos associés aux squats F1 et F2 à différentes vitesses de déplacement

Ces résultats montrent que le squat F4 de profondeur supérieure à 5 mm et l'autre squat F2 dont la profondeur est inférieure à 5 mm sont détectables avec les EMATs jusqu'à une vitesse d'au moins 22 km/h, mais il ne s'agit pas de la vitesse limite possible de détection.

On s'est arrêté à cette vitesse uniquement pour des raisons de sécurité lié à l'absence de guides câbles sur le banc, mais la détection des squats avec notre système de détection semble être possible au-delà de cette vitesse.

4.5.4.3 Détection des head-checks

Sur l'échantillon C (rail contenant les fissures réalisées par électroérosion), nous étudions la détectivité des head-checks en dynamique avec le même dispositif. L'émetteur (E) et le récepteur (R) sont à 2,5 cm l'un de l'autre afin d'amplifier les échos produits par les défauts. Ainsi, pour différentes vitesses de déplacement, l'analyse des signaux obtenus permet de mettre en évidence la présence des head-checks F2 et F3 par l'intermédiaire des échos qui leurs sont associés. Ces signaux sont présentés sur la figure 23.

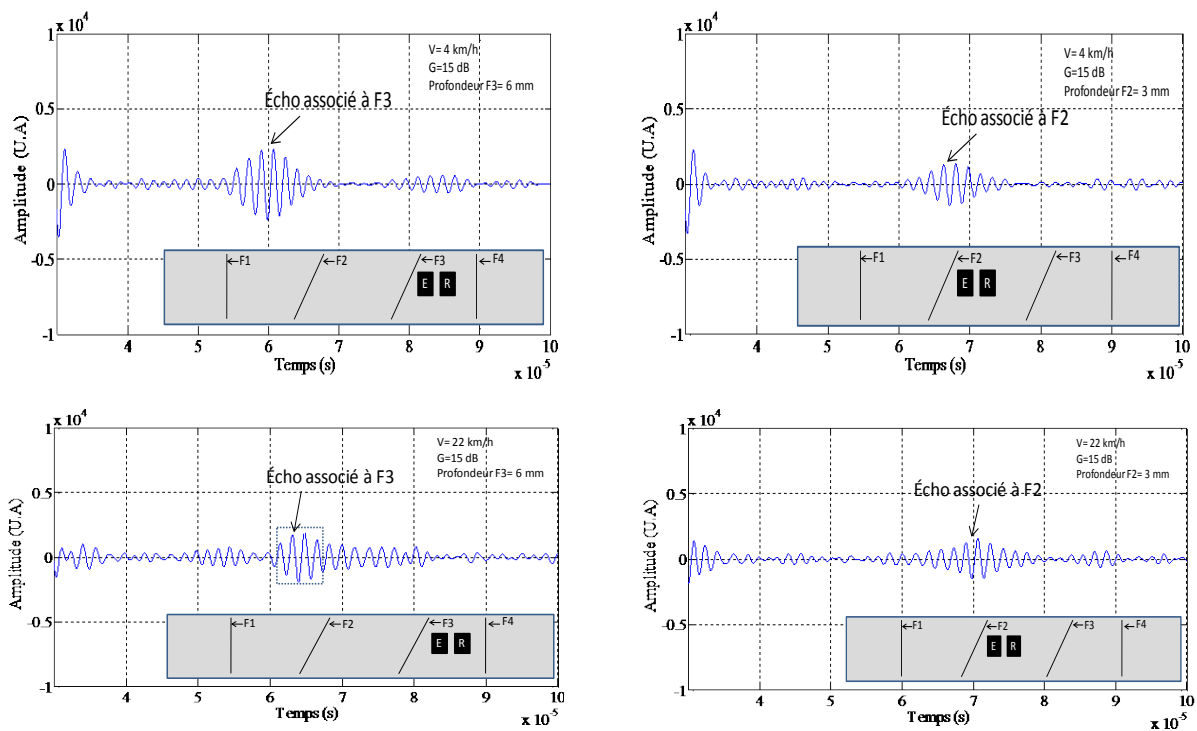


Figure 23 : Mise en évidence des échos associés aux head-checks F2 et F3 à différentes vitesses de déplacement

Contrairement aux squats, la détection en dynamique de head-checks, basée sur l'analyse des échos produits présente des limites avec notre système de détection. Ces limites sont principalement dues à l'inclinaison de la fissure par rapport à la direction de propagation des ondes générées. Plus cette inclinaison est prononcée, moins l'intensité de l'onde réfléchi vers le récepteur est importante, conséquence de la loi de Snell-Descartes.

La figure 23 représente le résultat d'essais réalisés sur les head-checks F2 et F3 (angle d'inclinaison 20°). On note que les échos associés à F2 et F3 sont observables jusqu'à 22 km/h.

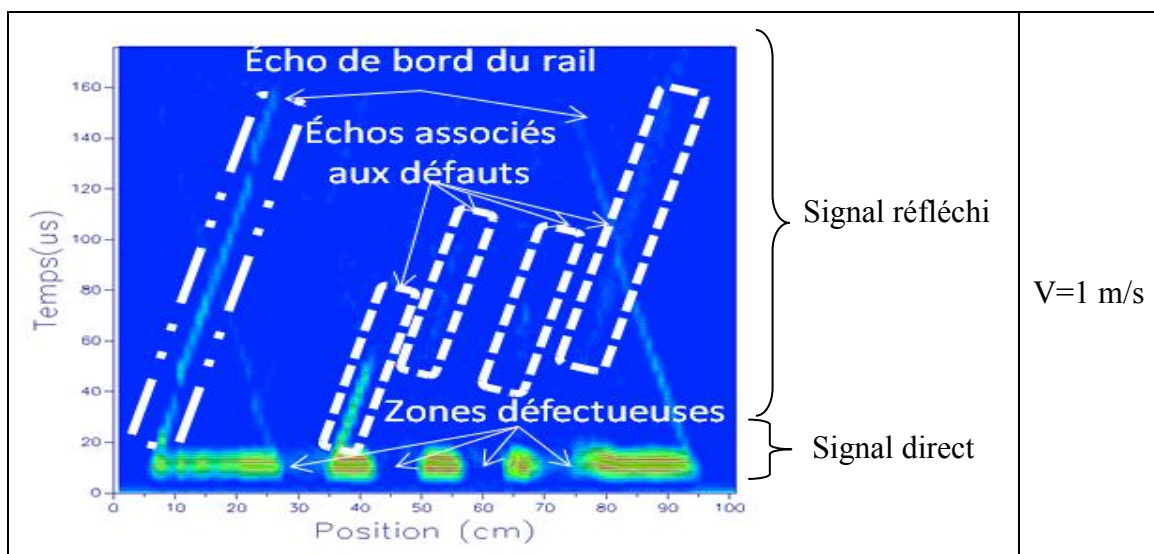
Nous avons montré la faisabilité de la détection des squats et des head-checks sur deux échantillons distincts jusqu'à une vitesse d'inspection de 22 km/h. Nous allons présenter les résultats sous forme d'une cartographie de la surface de chaque échantillon de rail. Cette représentation donne une vue d'ensemble de l'interaction des ondes de Rayleigh générées avec les défauts présents sur le champignon de rail.

Pour chaque acquisition, nous réglons le taux de répétition des excitations (PRF) de l'émetteur de telle sorte à ce qu'elles soient espacées de 1 cm.

Cette cartographie consiste à représenter l'ensemble des A-scan (signal temporel en fonction de l'amplitude) sur une même figure. L'amplitude des signaux sont données en échelle couleur normalisée, en ordonnée nous représentons le temps et en abscisse nous associons chaque A-scan à une position sur la surface du champignon.

Sur la figure 24, les quatre fissures présentes à la surface de l'échantillon d'un mètre sont observables en transmission et en réflexion jusqu'à 18 km/h.

L'analyse de la partie des signaux correspondante au signal direct permet de mettre en évidence la présence des quatre fissures présentes à la surface du champignon du rail, et cela pour différentes vitesses. Par contre, pour l'analyse des échos correspondants à la partie du signal réfléchi par les fissures, on note que la signature du squat est bien visible ce qui est moins évident dans le cas des head-checks, pour les différentes vitesses de déplacement.



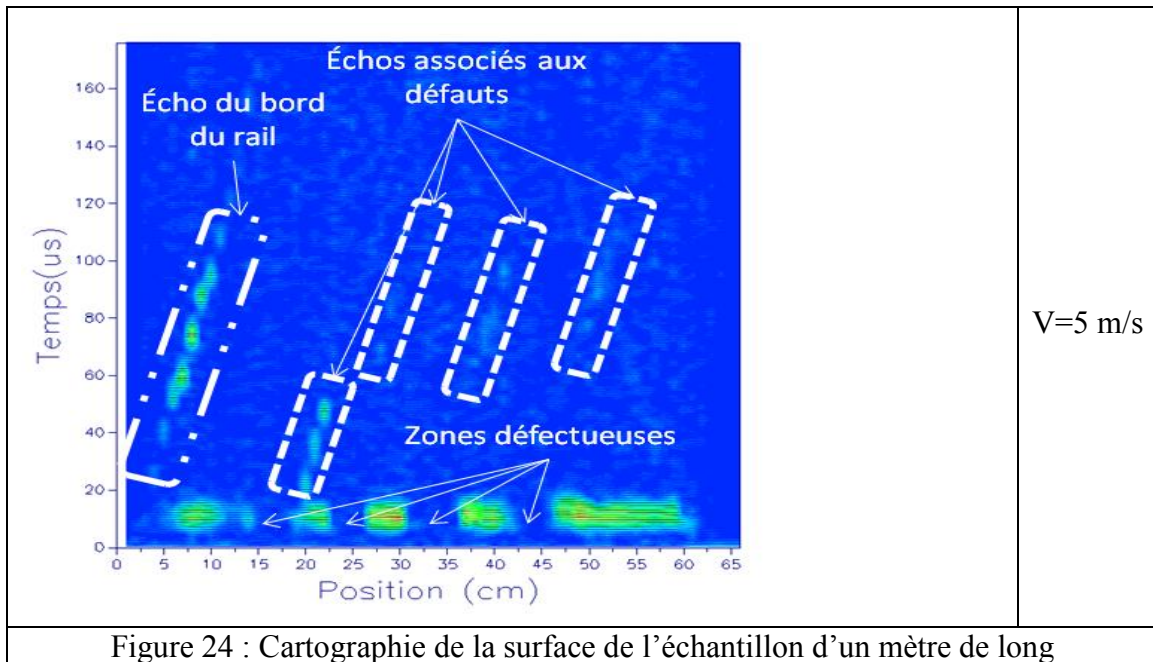


Figure 24 : Cartographie de la surface de l'échantillon d'un mètre de long

Les zones de fortes intensités sur la partie correspondante aux signaux directs (signal émis par l'émetteur) représentent les sections où il n'y a pas de fissures et les signaux associés aux réflexions des fissures. Les zones de faible intensité (proche de la couleur bleu) représentent les sections contenant au moins une fissure.

La présence d'une fissure entre l'émetteur et le récepteur a pour effet d'atténuer l'amplitude du signal proportionnellement à la profondeur de celle-ci [14].

La même procédure est effectuée sur l'échantillon de 0,7 m et les résultats sont présentés sur la figure 25.

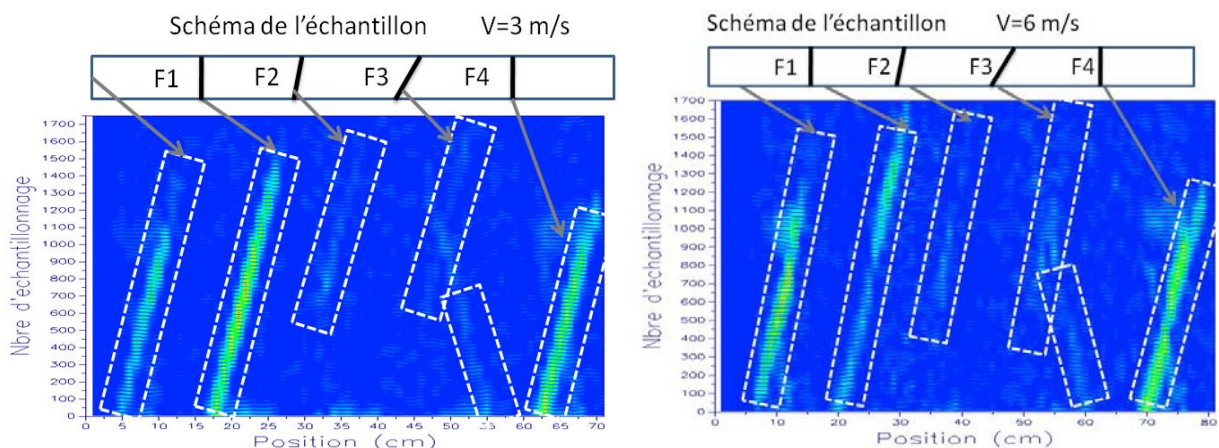


Figure 25 : Cartographie de la surface de l'échantillon contenant des fissures réalisées par électroérosion

Les zones de fortes intensités sur la partie correspondante aux signaux directs (signal émis par l'émetteur) ont été enlevées pour révéler plus facilement les signaux associés aux réflexions des fissures. Les zones de faible intensité (proche de la couleur bleu) représentent les sections contenant au moins une fissure. Les défauts F2 et F3 (fissures inclinées à 20°) renvoient moins d'énergie vers la sonde, ce qui est dû à la loi de Snell-Descartes.

4.6 Conclusion

Pour étudier la faisabilité de la détection des squats et de head-checks en mode dynamique, nous avons réalisé des démonstrateurs mécaniques qui permettent d'assurer le déplacement entre les échantillons et les capteurs. Pour chaque méthode de détection, une présentation du démonstrateur utilisé a été effectuée.

Les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'acquisition des signaux ont été présentés pour les deux méthodes utilisées : EMATs et Ultrasons-Laser.

Nous avons mis en œuvre la synchronisation du banc optique avec le démonstrateur en ce qui concerne les essais Ultrasons-Laser. Par ailleurs, nous avons aussi montré que les essais EMATs ne nécessitent pas une synchronisation automatique, mais néanmoins elle permettrait de réduire la taille des fichiers enregistrés pour chaque acquisition et d'améliorer le calage des excitations ultrasonores sur des positions bien définies à la surface du rail.

Pour les deux méthodes, nous avons montré la possibilité de détecter des défauts d'une profondeur supérieure ou inférieure à 5 mm.

Pour les essais Ultrasons-Laser, nous avons montré la faisabilité de la détection de squats en dynamique. Cependant, pour des vitesses supérieures à 0,2 m/s les signaux deviennent de plus en plus perturbés et inexploitable. Nous supposons que ces perturbations sont relatives au système de détection utilisé qui n'est pas adapté à la détection des défauts lorsque l'échantillon est en déplacement. D'autres systèmes comme les sondes interférométriques PI-EMF pourraient mieux convenir aux cas envisagés.

En ce qui concerne les essais par EMAT, les premiers ont été compromis par l'apparition des signaux parasites qui rendaient l'exploitation des résultats difficile. L'insertion d'un tore constitué en matériau nanocristallin a permis d'éliminer les parasites produits par le variateur de vitesse.

La détection de squats et de head-checks jusqu'à des vitesses de 22 km/h avec la méthode EMAT a été effectuée. Nous avons montré que le rapprochement de l'émetteur et du récepteur permet d'amplifier les signaux engendrés par les fissures afin d'augmenter leur détectivité.

Bibliographie

- [1] “BMD - Servomoteurs électriques CA à aimants permanents - Motoréducteurs Industriel | Bonfiglioli.” [Accessed: 15-Sep-2016].
- [2] “http://www.bonfiglioli.fr/media/filer_public/3a/db/3adbe6a5-a2b1-428d-a8f6-5b0d3ec227ba/acu_quickstartguide_vec515r4.pdf” [Accessed: 15-Sep-2016].
- [3] S. Fourez, “Caractérisation de couches minces par ondes de surface générées et détectées par sources lasers,” phdthesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.
- [4] F. Faëse, Génération d’ondes acoustiques de surface par différentes sources lasers : applications à la caractérisation sans contact de défauts. Valenciennes, 2013.
- [5] M. Lemaire, Caractérisation de structures du type couche sur substrat par ultrasons-lasers. Valenciennes, 2008.
- [6] F. Jenot, Génération et détection d’ondes élastiques par sources lasers : applications au contrôle non destructif. Valenciennes, 2003.
- [7] “HepcoMotion®”:www.hepcomotion.com/fr/wp-content/uploads/sites/2/2015/03/DLS-04-FR-Jul-13.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=fr&client [Accessed: 16-Sep-2016].
- [8] “acu_operating_instructions_vec521r4.pdf.” .
- [9] S. A. Nielsen, A. L. Bardenshtein, A. M. Thommesen, and B. Stenum, “automatic laser ultrasonics for rail inspection.” in *Proc. 16th WCNDT 2004 - WorldConference on NDT*.
- [10] M. Wanin, *Evaluation non Destructive de la Qualité des Matériaux (Partie 1)*. Ed. Techniques Ingénieur. Doc. M 4 130, France, Décembre 2001.
- [11] S. D. Rossi, “Etude et réalisation d’un vibromètre holographique,” phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2001.
- [12] R. K. Ing and J.-P. Monchalin, “Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal,” *Applied Physics Letters*, vol. 59, no. 25, pp. 3233–3235, Dec. 1991.
- [13] P. L. Ridgway, A. J. Hunt, M. Quinby-Hunt, and R. E. Russo, “Laser ultrasonics on moving paper,” *Ultrasonics*, vol. 37, no. 6, pp. 395–403, Sep. 1999.
- [14] R. S. Edwards, S. Dixon, and X. Jian, “Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves,” *NDT & E International*, vol. 39, no. 6, pp. 468–475, Sep. 2006.

Conclusion générale

L'étude de faisabilité de la détection en dynamique de fissures surfaciques en phase d'initiation, telles que les squats et les head-checks en utilisant des ondes de Rayleigh a fait l'objet de ce mémoire. Le choix de la méthode Ultrasons-Laser et de la méthode EMAT pour la génération et la détection de ces ondes ultrasonores a été privilégié aux méthodes ultrasonores traditionnelles basées sur l'utilisation des transducteurs piézoélectriques.

Nous avons commencé par réaliser un état de l'art portant dans un premier temps sur l'identification des défauts qui peuvent apparaître dans le rail, afin d'identifier ceux qui sont les plus nocifs. Ensuite notre analyse s'est portée sur les méthodes de contrôle des défauts concernant la structure de la voie ferrée. Cette étude nous a permis d'orienter notre recherche sur deux types de défauts qui présentent un réel intérêt dans le ferroviaire, car ils sont de plus en plus rencontrés et sont difficilement détectables par les méthodes habituelles. A cet effet, nous avons présenté l'intérêt des méthodes sans contact Ultrasons-Laser et EMAT pour ce type de défauts qui apparaissent à la surface du champignon du rail. L'utilisation des ondes de Rayleigh permet de détecter ces défauts qui présentent de faibles profondeurs ($\leq 5\text{mm}$) en phase d'initiation.

Dans le second chapitre, nous avons présenté la définition et les mécanismes de génération des ondes de Rayleigh dans le rail avec la méthode Ultrasons-Laser et la méthode EMAT. L'étude des diagrammes de directivité des ondes de Rayleigh générées dans un échantillon d'acier par Ultrasons-Laser, a permis de montrer que l'utilisation d'une source linéique permet de favoriser la propagation de ces ondes dans les deux directions perpendiculaires à l'axe de la source en son centre. Dans le cas des EMATs, la direction des ondes de Rayleigh est directement conditionnée par la superposition du champ magnétique statique (aimant permanent) et de la direction des courants induits dans le matériau. Pour ce qui est de la détection de l'onde, nous avons également décrit les principes de la détection des déplacements surfaciques engendrés par ces ondes de surface pour les deux méthodes utilisées. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode pour la détection de fissures surfaciques dans le rail ferroviaire ont été également présentés.

Le troisième chapitre a été consacré à la validation expérimentale de la faisabilité de la détection des squats et des head-checks avec les ondes de Rayleigh générées par Ultrasons-Laser et par EMAT. A défaut d'avoir des échantillons contenant des squats et des head-checks naturels, nous avons réalisé par usinage traditionnel et par électroérosion des fissures représentant ces défauts naturels sur des tronçons de rail. Les différents dispositifs expérimentaux utilisés pour les essais Ultrasons-Laser et EMAT ont été présentés. Nous avons commencé par déterminer expérimentalement la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh avec les deux méthodes. Nous avons constaté que les vitesses obtenues sont en bon accord avec celles de la littérature pour les ondes de Rayleigh se propageant dans l'acier. Dans ce chapitre, nous avons montré que les deux méthodes sans contact offraient la possibilité de détecter des fissures représentatives de squats et de head-checks dans le champignon du rail en statique. Dans le cas des head-checks, qui présentent une inclinaison

α° ($5^\circ \leq \alpha^\circ \leq 20^\circ$) par rapport à la direction de propagation des ondes de Rayleigh, la réflexion vers le capteur est moins bonne. Cependant on a pu montrer que l'association des signaux réfléchis et transmis par ces fissures permettait de confirmer leur présence ou pas à la surface du champignon.

Le dernier chapitre constitue la partie la plus originale de mes travaux de thèse, il a été consacré à la validation expérimentale en mode dynamique de l'étude réalisée dans le chapitre précédent. En effet, pour effectuer des essais permettant soit de déplacer des échantillons de rails (Ultrasons-Laser), soit les capteurs EMAT au-dessus du rail à des vitesses pouvant atteindre 36 km/h en laboratoire, il a fallu mettre en œuvre des démonstrateurs adéquats permettant d'assurer la sécurité du matériel et des utilisateurs. C'est dans cette optique que les bancs d'essais réalisés pour les mesures en dynamique, ont été présentés dans ce chapitre.

Pour les deux méthodes, nous avons validé la faisabilité de la détection de fissures surfaciques (squats et head-checks) de faibles profondeurs ($3\text{mm} \leq p \leq 6\text{mm}$) répondant ainsi à la problématique qui avait été posée.

Dans le cas de la méthode EMAT, la détection de squats et de head-checks a pu être effectuée jusqu'à une vitesse de 22 km/h. A noter que cette vitesse ne constitue pas la limite de détection de la méthode, mais plutôt une vitesse que nous nous sommes imposée pour des raisons de sécurité du dispositif de mesure en laboratoire. Nous avons notamment montré que le rapprochement de l'émetteur et du récepteur permet d'améliorer l'amplitude des signaux réfléchis par les fissures. Les résultats obtenus sont intéressants pour l'industrie ferroviaire, dans la mesure où ces types de défauts superficiels de faible profondeur sont difficilement détectables par les autres méthodes ultrasonores habituellement utilisées sur les systèmes embarqués pour le contrôle des rails.

Par ailleurs, pour la méthode Ultrasons-Laser, nous avons montré que la détection de défauts était possible jusqu'à 0,2 m/s. Pour des vitesses supérieures, les signaux de l'onde de Rayleigh générée dans l'échantillon ne sont plus détectés. Cette limitation de la détection lorsque l'échantillon se déplace, est liée au système de détection interférométrique utilisé qui n'est adapté dans ce contexte d'utilisation. Mais la méthode Ultrasons-Laser, comme celle des EMATs, a le potentiel d'atteindre des vitesses de détection importantes. C'est pourquoi nous avons présenté des interféromètres mieux adaptés pour les mesures en déplacement, permettant de détecter le passage de l'onde de Rayleigh générée par Ultrasons-Laser.

Les perspectives de ces travaux seront subdivisées en deux parties : d'une part nous présenterons celles concernant la méthode EMAT et d'autre part, celles concernant la méthode Ultrasons-Laser.

La détection des squats et des head-checks ayant été démontré en utilisant la méthode EMAT en statique comme en dynamique jusqu'à 22 km/h, l'étape suivante consistera à vérifier la vitesse limite à laquelle la détection reste possible avec le démonstrateur, en théorie 12m/s. Pour cela il faudra que toutes les pièces permettant d'assurer le guidage des câbles d'alimentation des capteurs soient installées sur le démonstrateur.

Pour que le dispositif mis en place soit capable de détecter, de donner la position et de caractériser les défauts, les essais sur des défauts étalons devront être complétés.

Afin de garantir un lift-off constant et un réglage plus facile et rapide à mettre en œuvre, la conception du charriot devra être modifiée, car en raison de l'attraction magnétique des capteurs, les résultats en début et à la fin de l'échantillon sont parfois faussés par les fluctuations du lift-off. Une étude concernant l'augmentation du lift-off devra être menée pour améliorer les conditions de mesures in situ.

Une étude permettant d'évaluer la profondeur des fissures comprise entre 1 et 5 mm pourra être effectuée en étudiant la réflexion et/ou la transmission de l'onde par le défaut. Il conviendra de vérifier l'influence de la vitesse de déplacement du système de mesure sur cette évaluation.

En ce qui concerne la méthode Ultrasons-Laser, cette étude a montré que la méthode Ultrasons-Laser était pertinente pour la détection de ces défauts superficiels. Les mesures en déplacement nécessitent cependant l'utilisation d'une autre sonde interférométrique. La sonde PI-EMF semble être la mieux adaptée, mais il sera nécessaire de faire une étude préliminaire afin de le confirmer.

Le transfert de ces deux technologies pour l'inspection de la voie ferrée serait très intéressant pour l'industrie ferroviaire du point de vue économique et sécuritaire.

Résumé

Les squats et les head-checks sont des défauts générés par l'endommagement des rails dû à la fatigue de contact de roulement, ils sont localisés à la surface du champignon du rail. La possibilité de les détecter en modes statique et dynamique lorsque leur profondeur se situe sous le seuil critique de 5 mm, constitue un challenge important pour l'industrie ferroviaire.

Les méthodes d'inspection existantes ne permettent pas de les déceler avec certitude. L'objectif de ce travail a été de développer des méthodes alternatives pour l'inspection automatique du rail permettant de détecter ces défauts superficiels.

Nous montrons que les méthodes sans contact : Ultrasons-Laser et EMATs (transducteurs électromagnétiques) sont très performantes pour la détection des défauts définis précédemment en utilisant des ondes acoustiques de surface, notamment dans le cas d'un contrôle dynamique.

Cette étude présente les deux méthodes utilisées pour la génération et la détection des ondes de Rayleigh. Des essais sont effectués en modes statique et dynamique. Les résultats obtenus montrent la faisabilité des méthodes de contrôle non destructives envisagées pour la détection de squats et de head-checks de différentes profondeurs. Les essais EMAT se sont notamment révélés satisfaisants pour des vitesses importantes de déplacement de l'échantillon.

Mots clés : Ultrasons-Laser – EMAT – Ondes de Rayleigh – CND – Rail – Squats – Head-checks

Abstract

Squats and head-checks are a form of near surface rolling contact fatigue damage found in rail heads. The ability to detect these defects in static and dynamic modes when their depth is under the critical threshold of 5 mm represents a major challenge for the rail industry.

Conventional inspection methods do not allow their detection with certainty. Therefore, the aim of this work was to develop alternative methods for automatic rail inspection leading to open cracks detection.

We show that non-contact methods: Laser-Ultrasonics and electromagnetic transducers (EMAT) are very efficient for the detection of the previously defined defects using surface acoustic waves, particularly in the case of a dynamic control.

This study presents two methods for the generation and detection of Rayleigh waves. Static and dynamic tests are performed. The experimental results show the feasibility of the envisaged methods for the detection of squats and head-checks of different depths. Especially, the EMAT tests were satisfactory for high speeds displacement of the sample.

Keywords: Laser-Ultrasonics – Rayleigh waves – NDT – Rail – Squats – Head-checks