Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de

VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

et de l'Université LIBANAISE DE BEYROUTH

Spécialité : **ÉLECTRONIQUE**

Présentée et soutenue par Karl, HOURANY.

Le 17/12/2015, à Beyrouth

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

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

Contribution à l'exploitation du bruit ambiant pour le Contrôle Santé Intégré passif des barres et des tubes

JURY

Président du jury :

- Doumit ZAOUK, Professeur, Université Libanaise

Rapporteurs :

- **Abdelaziz BENSRHAIR**, Professeur, INSA de Rouen
- **Joseph Al ASSAD**, Professeur, Université Saint-Esprit de Kaslik

Examinateurs :

- **Mounsif ECH-CHERIF-El-KETTANI**, Professeur, Université du Havre
- **Marwan BROUCHE**, Professeur, Université Saint Joseph

Directeur de thèse : **Jamal ASSAAD**, Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Co-directeur de thèse : **Youssef ZAATAR**, Professeur, Université Libanaise

Co-encadrant : Emmanuel MOULIN, Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Membres invités :

- **Farouk BENMEDDOUR**, Maître de Conférences, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
- **Mohamad El ZOGHBI**, Docteur, Université Libanaise

Remerciements

Je tiens à remercier en premier temps mes directeurs de thèse, Monsieur Youssef Zaatar, Professeur à l'Université Libanaise et Monsieur Jamal Assaad, Directeur du laboratoire IEMN-DOAE de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, pour m'avoir offert l'opportunité de faire une thèse au sein des laboratoires des deux universités, ainsi que pour leur encadrement tout au long de ma thèse.

J'adresse de chaleureux remerciements à Monsieur Emmanuel Moulin et Monsieur Farouk Benmeddour pour leurs aides précieuses, leurs attentions de tout instant, leurs enthousiasmes, leurs conseils concernant le travail évoqué dans ce rapport et pour l'expérience enrichissante que j'ai vécue durant ma thèse.

Je remercie également tous les membres de mon jury, surtout le président Monsieur Doumit Zaouk et particulièrement Monsieur Abdelaziz Bensrhair et Monsieur Joseph Al Assad pour avoir accepté d'être rapporteurs sur ce manuscrit. Je remercie aussi Monsieur Mounsif Ech-Cherif-el-Kettani et Monsieur Marwan Brouche en tant qu'examinateurs.

Je remercie également le Conseil National de la Recherche Scientifique libanais (CNRS-L) pour le financement de ma thèse, de même je remercie l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour la bourse de mobilité qui m'a été attribué.

Un grand merci à tous les membres et collègues des deux laboratoires, avec lesquels faire connaissance a été un grand plaisir. Que ce soit du côté scientifique ou du côté relationnel, les moments passés avec eux ont toujours été très agréables.

Enfin, je remercie mes parents ainsi que mes sœurs et mon frère pour leur soutien au cours de ces années, et sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui.

À mon père,

ma mère,

mon frère et mes sœurs,

et à toutes les personnes qui m’ont supporté.

« Nous lisons chaque jour avec étonnement des choses que nous voyons chaque jour sans surprise. »

CHESTERFIELD Philip

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE 5

I.1 INTRODUCTION 6
I.2 ONDES ULTRASONORES ET ONDES DE LAMB 6
I.3 CONTROLE NON DESTRUCTIF 8
I.4 CONTROLE SANTE INTEGRE 10
I.5 PASSAGE DU CONTROLE ACTIF AU CONTROLE PASSIF 10
I.5.1 Illustration de la méthode 10
I.5.2 Fonction de Green 11
I.5.2.1 Fonction de Green en espace libre 11
I.5.2.2 Fonction de Green en espace limité 12
I.5.2.3 Relation de réciprocité 13
I.5.3 La corrélation de champ acoustique 14
I.5.4 Contrôle santé intégré dans le cas d'un champ non diffus 15
I.6 CONCLUSION 17

CHAPITRE II: ALGORITHME DE COMPARAISON D'IMAGES MATRICIELLES SIMPLES 18

II.1 INTRODUCTION AU TRAITEMENT D'IMAGE 19
II.2 EXTRACTION DES MINIMUMS LOCAUX D'UNE IMAGE 20
II.2.1 Définition d'une image de seize pixels 20
II.2.2 Extraction des premières valeurs minimes 21
II.2.3 Regroupement des premières valeurs minimes dans des zones 22
II.2.4 Minimums locaux extraits 26
II.3 CALCUL DU TAUX DE RESSEMBLANCE ENTRE DEUX IMAGES 27
II.3.1 Calcul de la distance euclidienne entre les différents minimums locaux de deux images 27
II.3.2 Calcul de la moyenne des distances entre un minimum local d'une image et celui qui lui est voisin de l'autre image 30
II.4 VARIATION DU TAUX DE RESSEMBLANCE EN FONCTION DE LA VARIATION DES MINIMUMS LOCAUX 33
II.5 CONCLUSION 38

CHAPITRE III: LOCALISATION D'UNE POSITION INCONNUE D'UNE SOURCE ACOUSTIQUE 39

III.1 CORRELATION DES SIGNAUX ALEATOIRES ET DETERMINISTES 40
III.1.1 Corrélation des signaux déterministes 40
III.1.1.1 Cas de signaux à puissance moyenne finie - Définition 40
III.1.1.2 Cas de signaux à énergie finie - Définition 41
III.1.2 Corrélation des signaux aléatoires 41
III.1.2.1 Définition 41
III.1.2.2 Estimation de la fonction de corrélation 41

III.2 SIMULATION D'UNE PLAQUE REVERBERANTE 43
III.2.1 Simulation de la propagation d'un signal dans une plaque rectangulaire 44
III.2.2 Résultats de simulation de la propagation des signaux et image temps fréquence correspondante 46
III.3 VALIDATION NUMERIQUE DE L'ALGORITHME DE COMPARAISON 49
III.3.1 Variation de la moyenne des distances en fonction de la position de la source 50
III.3.2 Limitations 54
III.3.3 Sous-échantillonnage temps et fréquence 59
III.4 LOCALISATION DE LA SOURCE 61
III.5 CONCLUSION 68

CHAPITRE IV: CONVERGENCE DE L'INTERCORRELATION VERS LA FONCTION DE GREEN ET INFLUENCE DE LA PRESENCE D'UN DEFAUT 69

IV.1 INTRODUCTION 70
IV.2 VALIDATION EXPERIMENTALE 71
IV.2.1 Équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation 71
IV.2.2 Barre en aluminium 71
IV.2.2.1 Dispositif expérimental 71
IV.2.2.2 Cas actif 74
IV.2.2.3 Cas passif (estimation de l'intercorrélation) 75
IV.2.2.4 Comparaison entre le cas actif et le cas passif 77
IV.2.2.5 Estimation du nombre nécessaire de positions de la source 78
IV.3 TUBES EN ALUMINIUM ET EN ACIER 82
IV.3.1 Dispositif expérimental 82
IV.3.2 Comparaison entre le cas actif et le cas passif – Tube en aluminium 83
IV.3.3 Comparaison entre le cas actif et le cas passif – Tube en acier 88
IV.4 INTRODUCTION DE DEFAUT DANS LE TUBE EN ACIER 91
IV.5 ÉCOULEMENT TURBULENT DE L'EAU 94
IV.5.1 Nombre de Reynolds 94
IV.5.2 Pompe de débit 25 L/min 95
IV.5.2.1 Utilisation de transducteurs piézoélectriques (FT-27T) 96
IV.5.2.2 Utilisation de transducteurs R3α 100
IV.5.3 Pompe de débit 250 L/min 102
IV.6 FILTRAGE PASSE-BANDE 104
IV.7 CONCLUSION 108

CONCLUSION GENERALE 110

PERSPECTIVES 112

Introduction générale

Actuellement, le transport est un service nécessaire et utile pour de nombreuses activités de la vie courante. Parmi les différents modes de transport existants, le transport aéronautique, ferroviaire, et fluidique subissent une importante croissance, surtout dans les dernières années. Dans le cas du transport fluidique, les risques majeurs proviennent de la corrosion interne et externe des canalisations métalliques de transport. En effet les tuyaux enterrés, exposés à l'atmosphère ou immergés dans l'eau sont menacés d'être corrodés. Sans un entretien adapté, tous les systèmes de pipelines finissent par se détériorer. La corrosion peut affaiblir l'intégrité structurelle d'un pipeline et en faire un vecteur de danger, surtout lorsque ce tube transporte des matières potentiellement dangereuses. De ce fait, la sécurité de ce mode de transport reste un enjeu primordial.

Parmi les différentes méthodes permettant d'assurer la sécurité, le Contrôle Non Destructif (CND) et le Contrôle Santé Intégré (CSI) sont les plus répandus. Le Contrôle Santé Intégré est considéré comme une solution aux problèmes que le Contrôle Non Destructif ne permet pas de résoudre. En effet, le CSI permet le contrôle continu des structures en temps réel en intégrant des capteurs directement dans les structures à contrôler, permettant ainsi un contrôle permanent. Ce dernier se différencie du CND qui utilise des sondes mobiles.

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés à l'IEMN-DOAE (**I**nstitut d'**É**lectronique de **M**icroélectronique et de **N**anotechnologie – **D**épartement-**O**pto-**A**cousto-**É**lectronique) de Valenciennes au sein de l'équipe TRUST (**TR**ansduction **U**ltrasonore : Application à la **S**écurité du **T**ransport). Parmi ces recherches, citons les travaux de Moulin [1] qui a calculé les amplitudes des modes de Lamb en régime harmonique en développant une méthode hybride. L'optimisation du contrôle santé intégré a été étudiée par Grondel [2] pour les structures aéronautiques. Pour sa part, Paget [3] a développé une nouvelle technique basée sur les ondelettes, qui offrent un outil plus sensible pour détecter l'endommagement de faible dimension, et améliorent ainsi la performance des systèmes de détection de dommages. D'autre part, Duquenne [4] a développé une méthode d'estimation de la génération et de la réception transitoire d'ondes de Lamb par une méthode hybride, tout comme El Youbi [5] qui lui a développé un outil de traitement de signal capable d'identifier les modes de Lamb présents, et d'étudier leurs sensibilités à la présence de défauts. Par la suite, Benmeddour [6] a étudié l'interaction physique des ondes de Lamb avec les endommagements rencontrés dans les

structures en aluminium. Baouahi [7] a quant à lui étudié le phénomène physique de propagation des ondes de Lamb en trois dimensions par l'intermédiaire de transducteurs mono et multiéléments. Enfin, Abou Leyla [8] a étudié le contrôle santé intégré passif en aéronautique, par corrélation du champ acoustique pour les structures aéronautiques.

L'objectif général de la thèse est l'exploitation du bruit ambiant présent dans une structure pour faire du contrôle santé intégré. Dans nos travaux de recherche nous allons représenter cette structure par une barre en aluminium de section rectangulaire pleine (de 1m de longueur, de 3cm de largeur, et de 3 mm d'épaisseur) et deux tubes creux l'un en aluminium et l'autre en acier (de 50 cm de longueur, de 5,6 cm de diamètre interne, et de 1,5 mm d'épaisseur). Pour atteindre cet objectif nous avons envisagé plusieurs travaux. Une étude bibliographique a été le point de départ pour bien maitriser ce sujet et connaitre les différentes études réalisées dans ce domaine. Un algorithme de comparaison a été développé pour tester le degré de ressemblance entre les images. Ces images correspondent à des corrélations filtrées du bruit ambiant. Puis, des études expérimentales menées sur la barre étaient des post-traitements pour bien comprendre les effets intéressants et passer à l'application qui nous intéresse, le transport fluidique (études menées sur des tubes).

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, des définitions des ondes ultrasonores, des généralités sur le contrôle non destructif et le contrôle santé intégré seront mentionnées. Le passage du contrôle actif à celui passif sera discuté, et les différentes études menées dans ce domaine seront abordées.

Le deuxième chapitre est consacré à l'illustration d'une méthode (ou d'un algorithme de comparaison) permettant de tester le degré de ressemblance entre les images, d'une manière détaillée. Cette dernière est basée sur les minimums locaux présents dans ces images. Dans le troisième chapitre, on applique l'algorithme de comparaison expliqué dans le deuxième chapitre à des images issues de simulation (images temps fréquence). Ces images correspondent à des corrélations filtrées, et dont la manière de les obtenir sera détaillée au cours de ce chapitre.

Enfin dans le quatrième chapitre, une étude expérimentale est menée sur une barre et deux tubes pour mettre en évidence le fait que malgré les imperfections dues aux conditions réelles d'application (champ non diffus), la fonction d'intercorrélation peut toujours être

exploitée pour le contrôle santé intégré d'une structure. L'algorithme de comparaison décrit au chapitre 2 sera par la suite validé pour montrer l'influence de la présence d'un défaut sur la fonction de corrélation. L'utilisation de l'eau comme source de bruit sera aussi exposée.

Chapitre I: Étude bibliographique

I.1 Introduction

De nos jours, la sécurité des transports que ce soit le transport ferroviaire, l'aéronautique et même le transport fluidique, constitue un enjeu très important. Dans la plupart des domaines de transport, les méthodes de sécurité et d'inspection utilisées se butent à contrainte majeure : le coût élevé. Ce problème majeur a été l'objectif de plusieurs travaux de recherches au sein de l'équipe TRUST, comme l'étude de la propagation des ondes ultrasonores et l'interaction de ces dernières avec un endommagement présent dans les structures à contrôler. Le but est donc d'augmenter la fiabilité du contrôle en minimisant le coût, en exploitant le bruit ambiant présent dans le milieu. Ceci permet de se passer de l'utilisation d'une source d'émission, ce qui réduit le coût et induit donc le passage d'un contrôle actif à un contrôle passif.

D'autre part, l'autonomie énergétique des capteurs a aussi une grande importance dans le domaine de sécurité. Dans ce manuscrit on s'intéresse à des applications de types « ambiant noise imaging », permettant ainsi le contrôle et le suivi de l'évolution de l'état des structures, tout en exploitant le bruit généré par les sources naturelles de bruit. Parmi ces sources, citons le bruit généré par les turboréacteurs des avions dans le cas de vol et celui généré par l'écoulement turbulent du fluide dans les tuyaux. Dans ce manuscrit, la partie acoustique et les traitements reliés à cette dernière sont mis en évidence. Un principe acoustique développé dans des travaux précédents sera rappelé, et une méthode permettant de tester le degré de ressemblance entre les images sera illustré. Puis dans la partie expérimentale, on montre que la fonction d'intercorrélation peut toujours être exploitée pour le contrôle santé intégré, malgré les imperfections dues aux conditions réelles d'application (champ non diffus).

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques définitions sur les ondes acoustiques, le contrôle non destructif, et le contrôle-santé intégré. Le passage du contrôle actif à celui passif sera expliqué, et quelques travaux réalisés dans ce domaine seront abordés.

I.2 Ondes ultrasonores et ondes de Lamb

Les ondes ultrasonores sont généralement des ondes acoustiques qui disposent d'une fréquence supérieure à la gamme de fréquences audibles et qui s'étend de 20Hz à 20kHz. Il s'agit d'un mode de propagation de l'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière,

autrement dit, une onde de pression qui se propage ou encore une variation de pression qui se déplace. Ces ondes de matière résultent du mouvement de particules d'un milieu fluide ou solide. Il s'agit donc de la propagation d'une énergie mécanique dans un milieu matériel qui sera alors soumis à une succession de pressions et de dépressions.

Selon la géométrie et la nature des milieux de propagation, différents types d'ondes pourront être cités. Les ondes de volume, ce sont des vibrations ayant la propriété de se propager à l'intérieur d'un volume. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé, et augmente généralement avec la profondeur du milieu de propagation. On peut distinguer les ondes P (primaires) appelées aussi ondes longitudinales ou de compression. Ces ondes sont plus rapides que les ondes S (secondaires) appelées aussi ondes transversales ou de cisaillement. Les ondes secondaires ne se propagent pas dans des milieux liquides. Généralement les ondes de volume sont utilisées dans le domaine de séismologie.

Les ondes de surface, appelées aussi ondes de Rayleigh. Par opposition aux ondes de volumes, elles se propagent le long de la surface de tout milieu semi-infini [9], avec une amplitude qui décroit avec la profondeur. Ces ondes sont composées d'une partie longitudinale et d'une partie transversale. La vitesse de propagation des ondes de surface est plus petite que celle des ondes de volume. Ces ondes sont souvent utilisées dans des composants dits « SAW devices » (SAW : Surface Acoustic Wave) basés sur la transduction des ondes acoustiques.

Les ondes de Lamb, appelées aussi ondes guidées. Elles ne se propagent que dans des plaques et des disques minces dont l'épaisseur est plus petite que la longueur d'onde [10]. Contrairement aux types d'ondes déjà mentionnées précédemment, ces ondes se propagent sur des longues distances. Lorsque l'épaisseur du milieu de propagation devient relativement importante, la distinction entre les ondes de Lamb et celles de Rayleigh devient difficile [10]. Les ondes guidées sont multimodales et dispersives, et l'ordre des modes augmente en fonction de leur fréquence d'apparition. Il existe deux types d'ondes de Lamb, les ondes symétriques et les ondes antisymétriques.

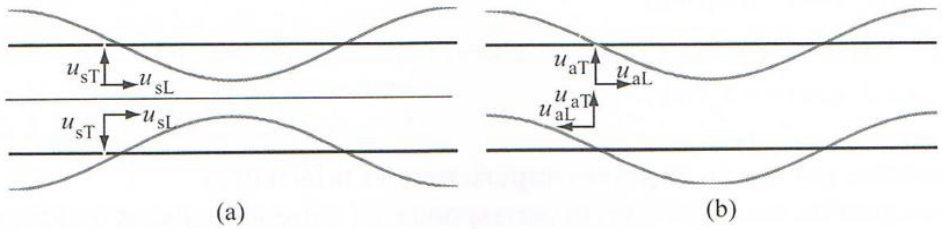


Figure 1- a) Onde de Lamb symétrique (partie longitudinale et partie transversale) b) Onde de Lamb antisymétrique (partie longitudinale et partie transversale). [11]

La maîtrise des propriétés de ce type particulier d'ondes est un enjeu principal dans beaucoup d'activités de recherche, surtout dans des applications de contrôle et de surveillance que l'on abordera par la suite, du fait que ces ondes permettent d'étudier l'état des structures sans les détériorer. D'autres types d'ondes ultrasonores peuvent également être distingués, comme les ondes de Love et les ondes de Stoneley…

Les ondes ultrasonores peuvent être générées [12] par source lumineuse de type laser, effet électromagnétique ou électrostatique, magnétostriction ou bien par effet piézoélectrique, qui est basé sur des matériaux piézoélectriques, et qui est le moyen le plus répandu. Les matériaux piézoélectriques ont l'avantage d'être utilisés en émission aussi bien qu'en réception.

I.3 Contrôle Non Destructif

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes permettant de déterminer l'état d'une structure sans la détériorer ou porter atteinte à son intégrité. L'idée est donc ici de détecter la présence d'un endommagement dans une structure, soit pendant sa fabrication pour le contrôle qualité, soit en cours d'utilisation pour le suivi et la maintenance. Il s'agira de plus de déterminer les caractéristiques de cet endommagement et de mesurer ses paramètres dimensionnels ou constitutifs. Rappelons qu'on peut aussi distinguer les essais ou les examens non destructifs (END).

Les différentes techniques de CND, leurs domaines d'applications, leurs avantages et inconvénients sont présentés dans le tableau ci-après.

Technique	Domaines d'applications	Avantages	Inconvénients
Ultrasons	Majorités des matériaux	Nombreuses méthodes d'auscultation	Couplant
Courant de Foucault	Matériaux conducteurs	Automatisation	Interprétations des signaux
Micro-ondes	Matériaux diélectriques	Automatisation	Interprétations des signaux
Rayonnements ionisants	Tous matériaux	Possibilité d'avoir une cartographie	Coût, protection
Ressuage	Tous produits à surface accessible	Simplicité	Uniquement défaut débouchant

Tableau 1- Techniques de CND [13]

Ces méthodes de CND sont généralement utilisées dans l'industrie pétrolière (pipelines, barres), l'aéronautique, le ferroviaire en fabrication et en maintenance, l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs), et l'aérospatiale.

Généralement, ce type de contrôle induit un coût de maintenance élevé puisqu'il est parfois nécessaire de démonter la pièce à contrôler, comme c'est souvent le cas en maintenance aéronautique. De plus, il se peut qu'un endommagement apparaisse entre deux inspections programmées, ce qui rend la technique moins fiable et moins sécurisé. D'où, la notion (et la nécessité) du contrôle santé intégré.

I.4 Contrôle Santé Intégré

Le contrôle santé intégré (SHM en anglais pour Structural Health Monitoring) a commencé à se développer depuis quelques années, et est considéré comme une solution aux problèmes rencontrés avec le CND (fiabilité et sécurité). En effet il a l'avantage de permettre le contrôle des structures en temps réel et d'une manière continue. L'idée est donc d'intégrer des capteurs directement dans les structures pour pouvoir les contrôler durant la totalité de leur service.

Donc le SHM peut être divisé en deux grandes parties : le diagnostic et le pronostic [14]. Dans la partie diagnostic, le contrôle santé intégré est très proche du contrôle non destructif (CND), tandis que dans la partie pronostic, le SHM doit fournir une estimation de la durée de vie résiduelle des structures à contrôler. Le champ d'application du SHM est similaire à celui du CND. Cela étant, l'aéronautique et le génie civil sont les deux domaines qui intègrent le plus le SHM.

I.5 Passage du contrôle actif au contrôle passif

I.5.1 Illustration de la méthode

À l'heure actuelle, les méthodes de contrôle reposent sur le contrôle actif, ce qui rend indispensable l'utilisation de sources actives (capteurs à piles). Cette approche nécessite toutefois d'accéder directement au capteur pour changer la pile lorsque ceci est nécessaire.

Cela étant, dans beaucoup de domaines comme l'acoustique sous-marine [15-17] et la séismologie [18,19], différentes études ont démontré qu'en exploitant le bruit acoustique naturel présent dans un milieu, il est possible d'extraire des informations relatives à ce milieu. Ceci est envisageable en aéronautique où le bruit généré par les moteurs des avions en vol est considéré comme une source acoustique naturelle. Il en est de même en transport fluidique où l'écoulement turbulent d'un fluide dans une conduite sera exploité. Ceci permet d'aboutir à une méthode de détection passive (récepteur en écoute passive uniquement (figure 2)).

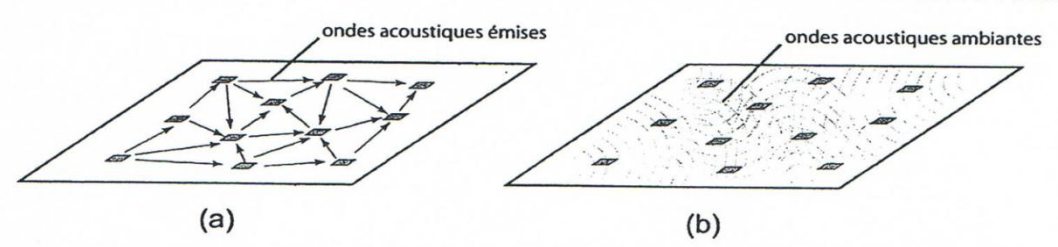


Figure 2- Système de contrôle Santé Intégré a) Système actif b) Système passif (pas d'émetteur).

Des travaux récents ont montré le potentiel promoteur de l'exploitation du bruit naturel basée sur la corrélation d'un champ acoustique non cohérent. L'avantage d'une telle technique est qu'elle permet de réaliser un contrôle sur site et en temps réel, dans toutes les situations où un bruit acoustique naturel existe. L'exploitation du bruit ambiant permet de se débarrasser des câbles coaxiaux et des capteurs à piles (capteurs actifs) respectivement, ce qui permet d'aboutir à une technique à basse consommation d'énergie.

Il a été démontré qu'en sismologie et en acoustique sous-marine, la recherche de la fonction de green entre deux points et qui permet de caractériser le milieu entre ces points peut se faire en mesurant la fonction de corrélation entre eux dans les conditions d'un champ diffus. En effet, la fonction de Green n'est autre que la réponse impulsionnelle en un point lorsque l'autre point est excité par une impulsion.

I.5.2 Fonction de Green

I.5.2.1 Fonction de Green en espace libre

Par définition, la fonction de Green permet de caractériser le milieu entre deux points quelconques de l'espace. Elle est la solution de l'équation suivante de Helmholtz dans le domaine temporel [20] :

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2}\frac{\partial}{\partial t^2}\right) G(\vec{r}, \vec{r_0}; t, t_0) = -\delta(\vec{r} - \vec{r_0})\,\delta(t - t_0) \qquad (1.1)$$

et la solution de l'équation ci-dessous de Helmholtz dans le domaine fréquentiel :

$$[\Delta + k^2] G(\vec{r}, \vec{r_0}) = -\delta(\vec{r} - \vec{r_0}) e^{-i\omega t_0} \qquad (1.2)$$

où $\vec{r_0}$ et $\vec{r}$ représentent respectivement les vecteurs positions du point où on applique une impulsion de Dirac et du point de calcul de la réponse impulsionnelle, t_0 l'instant où on applique cette impulsion, c représente la vitesse de propagation des ondes dans le milieu considéré, k le nombre d'ondes et Δ le laplacien.

Dans un espace illimité à trois dimensions, la fonction de Green (dans le domaine fréquentiel) est donnée par [21] :

$$G(R,\omega) = \frac{e^{-ikR}}{R} \tag{1. 3}$$

où $R = | r - r_0 |$.

Dans un espace illimité à deux dimensions, la fonction de Green (dans le domaine fréquentiel) est donnée par [21] :

$$G(\rho,\omega) = -i\pi H_0^-(k\rho) \tag{1. 4}$$

où $\rho = | r - r_0 |$ et H_0^- est la fonction de Hankel cylindrique d'ordre 0 de première espèce.

I.5.2.2 Fonction de Green en espace limité

Soit une source située en r_0 et un plan réflecteur en z=0 (figure 3). Dans le cas d'un espace semi-infini (plan z > 0) limité par un plan supposé parfaitement réfléchissant en z=0, le calcul de la fonction de Green en un point M situé en r est fait en utilisant la méthode de la source image. Il dépend des conditions décrites dans les paragraphes suivants.

i. Conditions de Neumann

$$\partial G / \partial z_0 = 0 \quad \text{en} \quad z_0 = 0 \tag{1. 5}$$

Les fonctions de Green dans le domaine fréquentiel sont données par [20] :

$$G(r/r_0;\omega) = \left(\frac{\exp[-ikR]}{R} + \frac{\exp[-ikR']}{R'} \right) \tag{1. 6}$$

où R et R' sont respectivement les distances entre M et la source, et entre M et la source image.

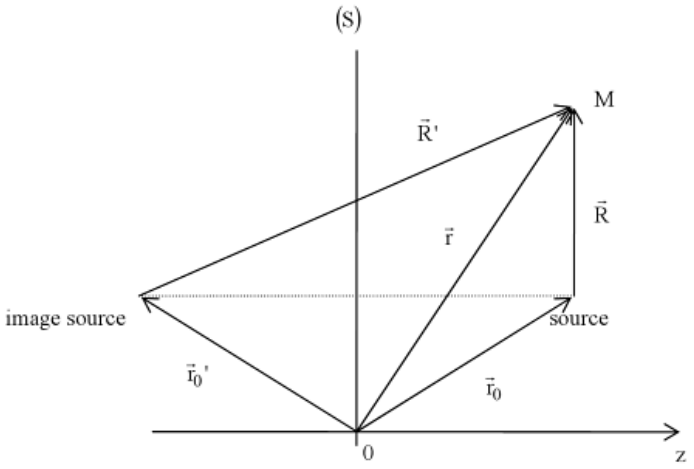


Figure 3 - Fonction de Green dans le demi-plan z > 0.

ii. Conditions de Dirichlet

$G = 0$ en $z_0 = 0$

Les fonctions de Green dans le domaine fréquentiel sont données par [20] :

$$G(r/r_0;\omega) = \left(\frac{\exp[-ikR]}{R} - \frac{\exp[-ikR']}{R'} \right) \tag{1. 7}$$

I.5.2.3 Relation de réciprocité

Cette relation est donnée par :

$$G(r_0, -t_0; r, -t) = G(r, t; r_0, t_0) \tag{1. 8}$$

Ceci signifie que l'effet au point r à un instant t d'une impulsion émise en r_0 à un instant t_0 ($t>t_0$) est identique à l'effet au point r_0 à l'instant ($-t_0$) d'une impulsion émise du point r à un instant antérieur (-t). Il s'agit ici du principe du retournement temporel [22-24].

I.5.3 La corrélation de champ acoustique

En 1968, Claerbout [25] a déclaré qu'en présence d'un champ parfaitement diffus dans un milieu de propagation, la convergence vers la fonction de Green entre deux points peut être atteinte en mesurant la corrélation entre les signaux enregistrés en ces deux points. Ce principe a été appliqué par la suite en sismologie [26,27], en acoustique sous-marine [28,29], et en ingénierie civile [30-32]. En effet les tremblements de terre et les mouvements des bateaux sont considérés comme un champ acoustique ambiant naturel.

Afin de mieux comprendre la notion d'un champ diffus, deux définitions existantes seront mentionnées [33]. La première présume qu'un ensemble d'ondes incidentes sont reçues en n'importe quel point d'une façon équiprobable suivant toutes les directions d'incidence. Cette situation intervient lorsqu'un ensemble de sources non corrélées entoure le volume considéré, ou encore lorsqu'un jeu de réflecteurs et de réfracteurs est disposé de sorte que les ondes qu'ils réfléchissent couvrent toute la surface du milieu considéré.

Dans le premier cas, l'hypothèse de champ diffus peut être prise en compte dès l'arrivée des premiers paquets d'ondes, tandis que dans le second cas, cette hypothèse ne sera valide qu'au-delà d'un certain temps, nécessaire à avoir un grand nombre de réflexions. Cette première définition a été utilisée par Snieder [34,35] qui a montré que les ondes qui ne s'annulent pas par interférences destructives dans la corrélation sont celles qui contribuent à la fonction de Green. Cette définition a été aussi utilisée par Larose [36] et Derode [37,38].

La deuxième définition revient à considérer que tous les modes propres sont excités de façon décorrélée, en d'autres termes que l'énergie totale est distribuée en moyenne sur tous les modes de façon uniforme: on parle alors d'équipartition. Cette deuxième définition a été utilisée par Weaver [39-43].

Le paragraphe suivant sera consacré à expliquer que malgré les conditions d'un champ non diffus (fonction de corrélation ne convergeant pas vers la fonction de Green), il est toujours possible de faire un contrôle santé intégré tout en exploitant le bruit ambiant présent dans la structure.

I.5.4 Contrôle santé intégré dans le cas d'un champ non diffus

Dans le cas théorique d'un champ parfaitement diffus, la fonction de corrélation dépend des propriétés de la structure en question et de la présence d'un éventuel défaut dans cette dernière. Mais dans le cas contraire, la fonction de corrélation dépend non seulement des propriétés de la structure, mais aussi des caractéristiques de la source, comme sa position et sa densité spectrale de puissance et qui peuvent varier d'une mesure à l'autre.

Parmi quelques travaux qui ont utilisé l'hypothèse d'un champ non diffus [44], on peut citer les travaux de N. Abou Leyla [45,46]. L'auteur propose l'utilisation d'un capteur nommé « capteur de référence » permettant d'identifier la configuration de la source en cours au moment de la mesure. Pour que la méthode déjà citée fonctionne correctement, ce capteur doit être le moins sensible possible à l'apparition d'un endommagement dans la structure.

Le système est donc constitué d'un ensemble de paires de récepteurs acoustiques. Le principe est donc de construire une base de données contenant les intercorrélations des signaux reçus sur deux capteurs de mesure dans le cas où la structure ne contient pas d'endommagement. La base contiendrait aussi les autocorrélations des signaux reçus sur le capteur de référence pour les configurations possibles et dans le même cas. Puis à chaque mesure, la procédure consiste à comparer l'intercorrélation obtenue (dans le cas avec endommagement) à sa référence (dans le cas sans endommagement) pour la configuration de source identifiée par le capteur de référence.

Cette comparaison a été faite sur les représentations temps fréquence permettant de tracer les autocorrélations et les intercorrélations en fonction du temps et de la fréquence au lieu de travailler sur des corrélations brutes, vu que les représentations temps fréquence sont meilleures pour mettre en évidence les effets intéressants.

La figure 4 illustre un exemple d'image temps fréquence. La façon d'obtenir cette représentation sera expliquée dans le chapitre 3.

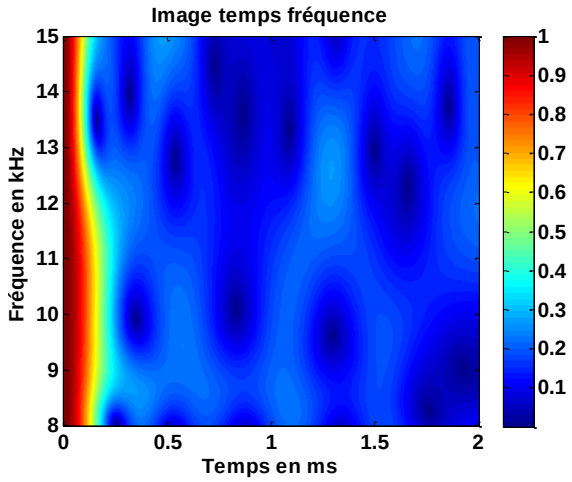


Figure 4 - Image temps fréquence.

D'autre part dans les travaux de N. Abou Leyla, la comparaison de ces images a été faite à l'œil nu. Le chapitre 2 suivant est consacré à la description d'une méthode permettant de faire une comparaison automatique de ces images.

Dans un premier temps, nous expliquons d'une manière détaillée la façon d'extraire les minimums locaux présents dans l'image. La figure 5 reprend la figure 4 en marquant de points rouges les minimums locaux identifiés.

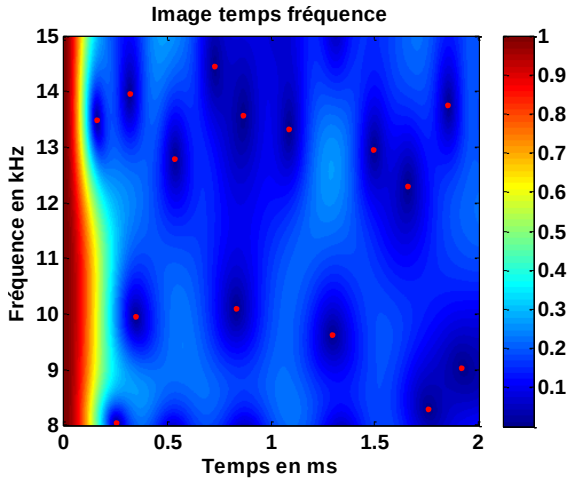


Figure 5 - Image temps fréquence et minimums locaux extraits.

Dans un deuxième temps, nous expliquons comment en se basant sur les minimums locaux extraits, le calcul du taux de ressemblance entre différentes images permet de les comparer automatiquement. Dans le chapitre 3 nous expliquons comment simuler la propagation

d'un signal dans une plaque rectangulaire ainsi que la démarche à suivre menant à l'extraction des images temps fréquence correspondant à des corrélations filtrées. Par la suite, la méthode (ou l'algorithme) expliquée au chapitre 2 sera validée sur ces images, cette méthode permettra l'identification automatique d'une configuration (ou bien position) inconnue de la source.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les définitions des ondes ultrasonores, ainsi que du Contrôle Non Destructif (CND) et du Contrôle Santé-Intégré (CSI). Le passage du contrôle actif à celui passif a été discuté, et les différentes études menées dans ce domaine ont été abordées.

Puis d'une manière plus succincte, nous avons discuté la démarche développée dans les travaux de N. Abou Leyla et qui permet le contrôle santé intégré même dans le cas d'un champ non diffus. Enfin, nous avons donné un aperçu d'une méthode (algorithme) pour comparer automatiquement des images.

Le chapitre suivant est consacré à décrire l'algorithme pour extraire les minimums locaux présents dans les images. En se basant sur ces minimums, nous y exposons le calcul du taux de ressemblance entre différentes images.

Chapitre II: Algorithme de comparaison d'images matricielles simples

L'objectif de ce chapitre est de présenter un algorithme de comparaison permettant de tester le degré de ressemblance entre les images, en se basant sur les minimums locaux présents dans ces dernières. Dans notre application, il s'agit des images temps fréquence correspondantes à des corrélations filtrées, et dont nous verrons en détail la démarche d'obtention de ces images dans le chapitre suivant. Mais en un premier temps, et afin de mieux comprendre cet algorithme, nous nous limiterons à des images correspondantes à des matrices simples.

Tout d'abord, une brève introduction au traitement d'image sera donnée, puis nous aborderons l'explication de l'algorithme de comparaison en deux grandes parties, l'extraction des minimums locaux d'une image et le calcul du taux de ressemblance entre deux images. Enfin, nous passerons à l'illustration de la variation du taux de ressemblance en fonction de la variation des minimums locaux.

II.1 Introduction au traitement d'image

Le traitement d'image est un domaine très vaste regroupant à la fois l'informatique et la mathématique appliquée. Cette discipline étudie l'amélioration et les transformations des images numériques pour en améliorer la qualité ou en extraire des informations.

Au vu de ses diverses applications surtout dans le domaine du contrôle et de la surveillance, la comparaison d'images numériques représente un enjeu très important. Par conséquent cette discipline a trouvé sa place dans plusieurs travaux de recherche. Le support informatique des images sert particulièrement à les comparer pour pouvoir par exemple distinguer les différences entre ces images et les quantifier automatiquement.

Les mesures de similarités entre les images sont utilisées dans de nombreux domaines comme la recherche d'image par le contenu [47], la classification d'images [48], ou encore l'évaluation de la qualité [49]. Dans la littérature, il existe différentes méthodes permettant de faire la comparaison entre les images. Ces méthodes sont divisées en deux grandes catégories. Des méthodes basées sur la comparaison de descripteurs des images [50]. En effet, les descripteurs représentent de l'information sur la couleur, la texture et les formes extraites de l'image. Ainsi que des méthodes basées sur la comparaison directe des images sans extractions de traits caractéristiques. On peut notamment citer la distance de Hausdorff [51].

La plupart de ces méthodes sont lourdes et nécessitent un temps de calcul et un espace mémoire importants. Dans ce qui suit, un algorithme de comparaison permettant de tester le degré de ressemblance entre les images sera décrit. Il présente l'avantage de réduire le temps de calcul et l'espace mémoire puisque seulement certains pixels spécifiques de l'image seront extraits et utilisés pour la comparaison. Ces points ne sont autres que les minimums locaux de l'image. Cet algorithme sera divisé en deux parties : dans la première partie, nous expliquons comment extraire les minimums locaux présents dans l'image, et dans la deuxième partie nous calculons le taux de ressemblance entre deux images.

II.2 Extraction des minimums locaux d'une image

L'objectif de cette section est de détailler l'extraction des minimums locaux d'une image. Cette méthode sera expliquée pour une image de seize pixels définie par une matrice (4 x 4) avant d'être généralisée par la suite à une image de taille quelconque.

II.2.1 Définition d'une image de seize pixels

Soit la matrice [I] (m x n) dont les indices sont représentés par « i » (i=1, 2, 3, .., m) et « j » (j=1, 2, 3, .., n) désignant les lignes et les colonnes, respectivement. Dans notre cas, m=4 et n=4 pour l'image de seize pixels.

$$[\,I\,] = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 1{,}1 \\ 4 & 3 & 1{,}2 & 1.3 \\ 2 & 2 & 2 & 5 \\ 1 & 1{,}1 & 1{,}2 & 1{,}3 \end{bmatrix} \qquad (2.1)$$

Cette matrice correspond à l'image donnée à la figure 6, obtenue par la commande « imagesc » sous Matlab. On note $I_{i,j}$ les valeurs de cette matrice. Chaque valeur de [I] représente un pixel.

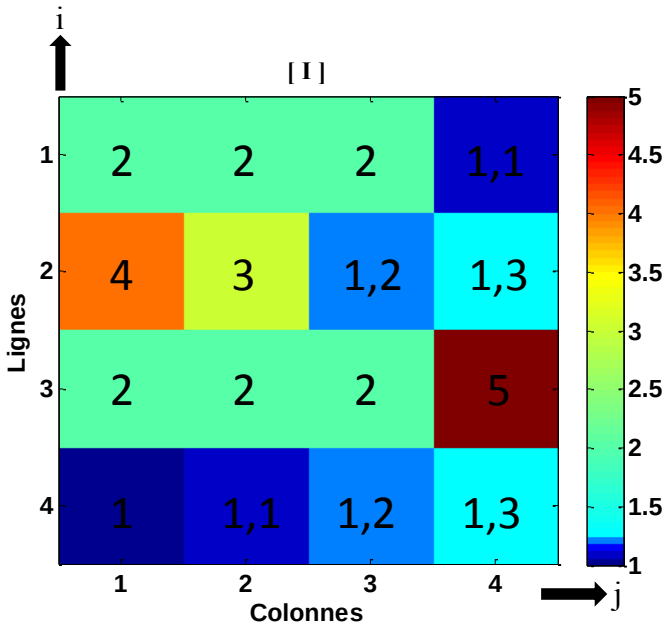


Figure 6 - Image de la matrice [I].

II.2.2 Extraction des premières valeurs minimes

Après avoir tracé l'image de la matrice [I], nous construisons le vecteur **t** qui regroupe les valeurs de la matrice [I] classées par ordre croissant.

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} 1 & 1{,}1 & 1{,}1 & 1{,}2 & 1{,}3 & 1{,}3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix} \quad (2.\,2)$$

Puis, les premières valeurs minimes de ce vecteur sont extraites, ce qui revient à associer un seuil à l'image de la figure 6 précédente. Ensuite, nous choisissons d'extraire les deux premières valeurs et les classons dans un vecteur nommé **x.** Ici la valeur « 1,1 » se répétant deux fois, les deux valeurs sont prises en considération.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & 1{,}1 & 1{,}1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{4,1} & I_{4,2} & I_{1,4} \end{bmatrix} \quad (2.\,3)$$

Par la suite nous allons voir quelles sont, parmi les valeurs du vecteur **x**, celles qui forment une zone dans l'image correspondante à la matrice [I]. En d'autres termes, il s'agit des valeurs voisines en ligne et en colonne dans [I], donc ayant une différence d'indices (i et/ou j) égale à « 1 ». Dans notre cas, nous avons deux zones et elles sont représentées sur la figure 7 suivante :

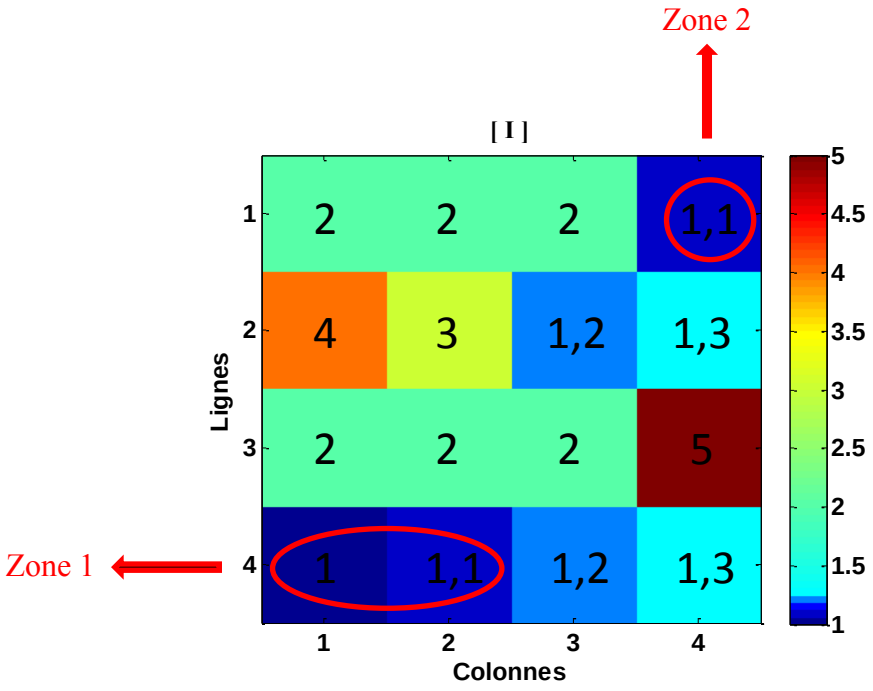


Figure 7 - Représentation des zones sur l'image de la matrice [I].

II.2.3 Regroupement des premières valeurs minimes dans des zones

Nous procédons à l'identification des zones 1 et 2 selon les étapes suivantes. Les indices « i » et « j » sont extraits des éléments du vecteur **x** dans la matrice [I], puis classés dans les vecteurs **r** et **c** qui correspondent aux lignes et aux colonnes respectivement.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= [4 \quad 4 \quad 1] \\ \mathbf{c} &= [1 \quad 2 \quad 4] \end{aligned} \tag{2. 4}$$

Ensuite, nous calculons la valeur absolue de la différence entre chaque élément du vecteur **r** et tous les autres éléments du même vecteur. Il est fait de même pour le vecteur **c**. La différence correspondante au vecteur **r** sera classée dans une matrice nommée [A], et celle correspondante au vecteur **c** dans une matrice nommée [B].

$$\left\| \begin{bmatrix} 4-4 & 4-4 & 4-1 \\ 4-4 & 4-4 & 4-1 \\ 1-4 & 1-4 & 1-1 \end{bmatrix} \right\| = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 3 \\ 3 & 3 & 0 \end{bmatrix} = [\,A\,] \tag{2. 5}$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 1-1 & 1-2 & 1-4 \\ 2-1 & 2-2 & 2-4 \\ 4-1 & 4-2 & 1-4 \end{bmatrix} \right\| = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 1 & 0 & 2 \\ 3 & 2 & 0 \end{bmatrix} = [\,B\,] \tag{2. 6}$$

Par la suite, nous classons les vecteurs **r** et **c** précédemment déterminés dans une nouvelle matrice nommée [Q].

$$[\,Q\,] = \begin{Bmatrix} r \\ c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \tag{2. 7}$$

À ce stade, les matrices [A] et [B] sont calculées, et nous les additionnons pour pouvoir déterminer quels pixels de l'image correspondant à la matrice [I] ont une différence d'indices égale à « 1 ». Soit la matrice [N] égale à la somme des matrices [A] et [B].

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 3 \\ 3 & 3 & 0 \end{bmatrix}}_{[\,A\,]} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 1 & 0 & 2 \\ 3 & 2 & 0 \end{bmatrix}}_{[\,B\,]} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 6 \\ 1 & 0 & 5 \\ 6 & 5 & 0 \end{bmatrix}}_{[\,N\,]} \tag{2. 8}$$

La matrice [N] affiche donc la distance entre les différents éléments du vecteur **x,** chaque élément de ce vecteur a comme indices, les vecteurs **r** et **c** définis précédemment. La valeur « 1 » de la matrice [N] ayant comme indice « 1ère ligne » et « 2ème colonne », désigne la distance entre le premier élément du vecteur **x** ayant comme indice « i=4 » (4ème ligne) et « j=1 » (1ère colonne) dans la matrice [I] et le deuxième élément du vecteur **x** ayant comme indice « i=4 » et « j=2 » dans la matrice [I]. De même pour toutes les autres valeurs de [N].

D'autre part, nous pouvons remarquer que la matrice [N] est une matrice symétrique, ce qui permet de travailler uniquement avec la partie triangulaire supérieure. De plus la diagonale de cette matrice est nulle puisque cette diagonale correspond à la distance entre le pixel et lui-

même (ou entre un élément du vecteur **x** et lui-même). Par conséquent, il est nécessaire de prendre ces éléments en considération.

Comme mentionné précédemment, nous focalisons notre intérêt sur les éléments de la matrice [N] ayant une valeur égale à « 1 ». En effet, cette dernière affiche la distance entre les différents éléments du vecteur **x**, et nous cherchons à voir parmi les valeurs de ce vecteur quelles sont celles formant une zone dans l'image correspondante à la matrice [I]. En d'autres termes, cela revient à identifier les valeurs ayant une différence entre leurs indices (i et/ou j) égal à « 1 ».

Du fait que les éléments de la diagonale de la matrice [N] doivent être pris en considération, la valeur « 1 » sera associée à cette diagonale. Alors la matrice [N] devient :

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 6 \\ 1 & 1 & 5 \\ 6 & 5 & 1 \end{bmatrix} \tag{2. 9}$$

Enfin, afin de seulement visualiser les « 1 » de la matrice [N], celle-ci est transformée en une matrice [G] en remplaçant par « 0 » les éléments différents de « 1 » et dont les indices sont représentés par « ii » (ii=1, 2, 3) et « jj » (jj=1, 2, 3).

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 6 \\ 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Longrightarrow [G] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \uparrow ii \\ \\ \\ \rightarrow jj \end{matrix} \tag{2. 10}$$

En ce qui concerne l'extraction des minimums locaux, une dernière étape consiste à rassembler les éléments du vecteur **x,** c'est-à-dire de chercher les éléments de ce vecteur qui forment une zone (zones encerclées en rouge sur la figure 7). Pour ce faire, nous extrayons les indices « ii » et « jj » des éléments non nuls de [G], avant de les classer dans les vecteurs **o** et **p** respectivement.

$$\begin{aligned} \mathbf{o} &= [1 \quad 1 \quad 2 \quad 3] \\ \mathbf{p} &= [1 \quad 2 \quad 2 \quad 3] \end{aligned} \tag{2. 11}$$

Puis **o** et **p** sont regroupés dans une matrice nommée [M].

$$[M] = \begin{Bmatrix} o \\ p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En prenant la première colonne de la matrice [M] et en la comparant aux autres colonnes de la même matrice (par exemple à la deuxième), nous identifions l'intersection de valeurs identiques (valeur « 1 » commune entre les deux premières colonnes), puis les regroupons ensemble.

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Puis, nous comparons les deux colonnes jointes (cercle rouge) aux autres colonnes, par exemple à la troisième. Là, il y a aussi intersection du fait de la valeur commune « 2 ». Nous les regroupons à nouveau ensemble.

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Cette procédure est répétée jusqu'à ce que l'intersection avec toutes les colonnes de la matrice [M] soit faite. Remarquons qu'il y a ici intersection entre les trois premières colonnes qui forment alors une zone (cercle vert), tandis que la quatrième forme une deuxième zone.

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Zone 1 Zone 2

La première zone contient des « 1 » et des « 2 » ce qui signifie que la première et la deuxième colonne de la matrice [Q] forment une zone.

$$[Q] = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Zone 1 1 2 3 Zone 2

La deuxième zone contient des « 3 » ce qui signifie que la troisième colonne de la matrice [Q] forme une deuxième zone.

Donc, en reprenant la matrice initiale [I], il est possible d'identifier les valeurs formant une zone, puisque la matrice [Q] est la matrice des indices « i » et « j » de ces valeurs représentées dans les vecteurs **r** et **c** respectivement.

$$[Q] = \begin{Bmatrix} r \\ c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \qquad (2.\ 17)$$

1 2 3

$$[S] = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 1,1 \\ 4 & 3 & 1,2 & 1,3 \\ 2 & 2 & 2 & 5 \\ 1 & 1,1 & 1,2 & 1,3 \end{bmatrix} \qquad (2.\ 18)$$

Pour mieux visualiser les zones, nous traçons une nouvelle matrice nommée [W] et qui n'est autre que la matrice [I] dans laquelle ont été mises à zéro toutes les valeurs autres que celles qui forment des zones (les éléments du vecteur **x**).

$$[W] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1,1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (2.\ 19)$$

Zone 2

Zone 1

II.2.4 Minimums locaux extraits

Après avoir fait le regroupement des éléments du vecteur **x** dans des zones, le minimum local à extraire est alors la valeur minimale dans chaque zone. Dans la première zone, la valeur « 1 » est le minimum local, tandis que dans la deuxième zone qui ne contient que la seule valeur « 1,1 », alors « 1,1 » est le minimum local.

La figure 8 représente les zones regroupées de la matrice [I] et ses minimums locaux extraits.

L’image correspondante à cette matrice est donnée à la figure 9 suivante :

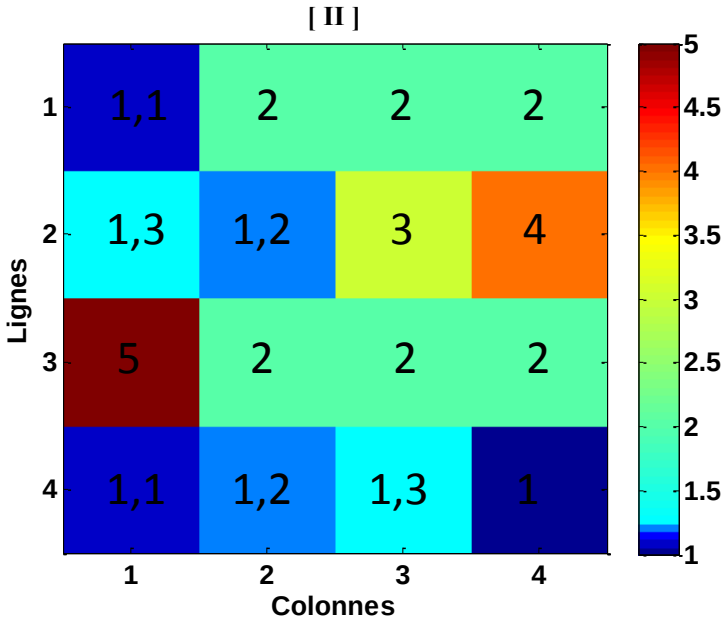


Figure 9 - Image de la matrice [II].

Après avoir appliqué la démarche expliquée à la section précédente, les minimums locaux extraits peuvent être représentés (voir figure 10).

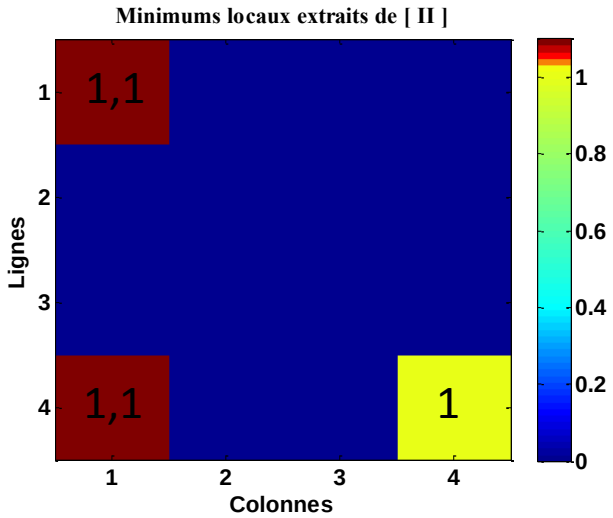


Figure 10 - Minimums locaux extraits de la matrice [II].

$$d_z^{z'} = \sqrt{(c(m_z^y) - c(n_{z'}^{y'}))^2 + (l(m_z^y) - l(n_{z'}^{y'}))^2} \quad (2.\ 21)$$

où « l » (lignes) et « c » (colonnes) représentent les indices des minimums locaux dans les matrices [I] et [II].

Les distances calculées sont représentées par la matrice [Dist] suivante :

$$[\,\text{Dist}\,] = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 3 \\ 3 & 4.2426 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 & d_1^3 \\ d_2^1 & d_2^2 & d_2^3 \end{bmatrix} \quad (2.\ 22)$$

où la première valeur « 3 » en première ligne et en première colonne représente la distance entre le premier minimum de la matrice [I] et le premier minimum de la matrice [II]. Cette valeur « 3 » est obtenue de la façon suivante :

$$\begin{aligned} d_1^1 &= \sqrt{(c(m_1^1) - c(n_1^2))^2 + (l(m_1^1) - l(n_1^2))^2} \\ &= \sqrt{(1-1)^2 + (4-1)^2} = 3 \end{aligned} \quad (2.\ 23)$$

Il en est de même pour toutes les autres valeurs de la matrice [Dist].

II.3.2 Calcul de la moyenne des distances entre un minimum local d'une image et celui qui lui est voisin de l'autre image

Dans un second temps, et après avoir calculé la matrice [Dist], il est nécessaire de calculer la moyenne des distances entre chaque minimum de l'image de la matrice [I] et son voisin le plus proche dans l'image de la matrice [II].

Pour cela, la plus petite valeur de la matrice [Dist] est recherchée, soit « 0 » dans ce cas (équation 2.24). Elle est ensuite classée dans un vecteur nommé **dist1** (équation 2.26), puis la ligne et la colonne reliées à cette valeur dans la matrice [Dist] sont éliminées (équation 2.25).

$$[\,\text{Dist}\,] = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 3 \\ 3 & 4,2426 & 3 \end{bmatrix} \quad (2.\ 24)$$

Une fois le vecteur **dist1** est déterminé, la moyenne des éléments de ce vecteur est calculée. Cette moyenne égale à 2,4142 est la moyenne des distances entre les minimums locaux de l'image de la matrice [I] et leurs voisins de l'image de la matrice [II].

La plus grande valeur que peut prendre cette moyenne est la valeur de la distance de la diagonale d'une image : ici 4,2426. Ceci signifie que chaque minimum d'une image est très éloigné de chaque minimum de l'autre image, ce qui permet de conclure que les deux images n'ont aucune ressemblance. Donc, le taux de ressemblance est égal à

$$100-\left(\frac{4,2426}{4,2426}\times 100\right)=0\% \tag{2. 31}$$

Tandis que la plus petite valeur que peut prendre cette moyenne est « 0 », la valeur pour deux images identiques sera alors égale à

$$100-\left(\frac{0}{4,2426}\times 100\right)=100\% \tag{2. 32}$$

Dans cette section, le calcul du taux de ressemblance entre les images a été détaillé. Ce dernier est basé sur le calcul de la moyenne des distances entre un minimum local d'une image et celui qui lui est voisin de l'autre image. Dans ce qui suit, quelques exemples seront donnés pour montrer la variation du taux de ressemblance lors de la variation des minimums locaux.

II.4 Variation du taux de ressemblance en fonction de la variation des minimums locaux

Dans cette section, quatre exemples sont détaillés. L'image de la matrice [II] sera prise comme référence et sera comparée à quatre images correspondant à quatre matrices différentes, dont un seul minimum de ces images se déplace.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé et détaillé un algorithme permettant de tester le degré de ressemblance entre les images, en se basant sur les minimums locaux présents dans ces images. Ce chapitre a été divisé en deux grandes parties, l'une dédiée à l'extraction des minimums locaux des images, l'autre au calcul du taux de ressemblance entre les images.

Le chapitre suivant est consacré à l'application de cet algorithme à des images issues de simulation. Des solutions sont présentées pour la résolution des problèmes rencontrés durant la simulation.

Chapitre III: Localisation d’une position inconnue d’une source acoustique

L'objectif du travail exposé dans ce chapitre est de valider l'algorithme de comparaison sur des images issues de simulation. Ces images correspondent à des corrélations filtrées dont l'obtention sera également détaillée.

Tout d'abord un rappel sur la fonction de corrélation sera effectué, et quelques notions sur les signaux aléatoires et déterministes seront mentionnées. Puis la simulation de la propagation d'un signal dans une plaque rectangulaire sera abordée. Enfin nous passons à l'obtention de l'image temps fréquence de l'enveloppe d'autocorrélation du signal reçu par un récepteur pour une position donnée de la source. Cette démarche est répétée jusqu'à obtention de plusieurs images relatives à différentes positions de la source, dont une est considérée comme image de référence.

Dans un second lieu, on applique l'algorithme de comparaison permettant l'extraction des minimums locaux de chaque image et le calcul du taux de ressemblance entre l'image référence et toutes les autres images. Cet algorithme nous permettra la localisation d'une position inconnue de la source.

III.1 Corrélation des signaux aléatoires et déterministes

Généralement la corrélation est une mesure énergétique de la similitude de forme et de position entre deux signaux décalés. La définition dépend du type du signal.

III.1.1 Corrélation des signaux déterministes

III.1.1.1 Cas de signaux à puissance moyenne finie - Définition

Dans le cas où x et y sont des signaux réels déterministes continus à puissance moyenne finie, la fonction d'intercorrélation $\varphi_{x,y}(\tau)$, prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \varphi_{x,y}(\tau) &= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_T x(t)\, y(t+\tau)\, dt \\ &= x(-\tau) \otimes y(\tau) \end{aligned} \tag{3. 1}$$

où $\otimes$ représente le produit de convolution. Mais dans le cas de signaux discrets, cette dernière s'écrit comme suit :

$$\varphi_{x,y}(k) = \lim_{M\to\infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{-M}^{M} x(n)\, y(n+k) \tag{3. 2}$$

Lorsque x et y sont supposés stationnaires :

$$E[\varphi_{x,y}(\tau)] = R_{x,y}(\tau) \tag{3. 3}$$

où E représente l'espérance mathématique.

III.1.1.2 Cas de signaux à énergie finie - Définition

Pour des signaux réels à énergie finie, la fonction d'intercorrélation s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \varphi_{x,y}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\, y(t+\tau)\, dt \\ &= x(-\tau) \otimes y(\tau) \end{aligned} \tag{3. 4}$$

III.1.2 Corrélation des signaux aléatoires

III.1.2.1 Définition

Dans le cas de signaux aléatoires x et y supposés stationnaires, la fonction d'intercorrélation $R_{x,y}(\tau)$ s'écrit, en continu, de la façon suivante :

$$R_{x,y}(\tau) = E[x^*(t)\, y(t+\tau)] \tag{3. 5}$$

tandis qu'en discret, elle est donnée par :

$$R_{x,y}(m) = E[x^*(n)\, y(n+m)] \tag{3. 6}$$

III.1.2.2 Estimation de la fonction de corrélation

La fonction de corrélation étant une espérance mathématique sur un nombre infini de termes, le calcul de cette dernière est impossible. Il est donc préférable de faire une estimation qui peut être effectuée avec deux types d'estimateurs : l'estimateur biaisé et l'estimateur non biaisé.

En utilisant l'estimateur biaisé, la corrélation est estimée par la formule suivante :

$$C_{x,y}(m) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n)\, y(n+m) & m \geq 0 \\ C_{y,x}(-m) & m < 0 \end{cases} \quad (3.\ 7)$$

tandis qu'en utilisant l'estimateur non biaisé, l'estimation de la corrélation s'écrit comme suit:

$$C_{x,y}(m) = \begin{cases} \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n)\, y(n+m) & m \geq 0 \\ C_{y,x}(-m) & m < 0 \end{cases} \quad (3.\ 8)$$

où $C_{x,y}$ représente l'estimation de $R_{x,y}$.

Généralement, on caractérise un estimateur par son biais et sa variance. Le biais est ici la différence entre la valeur de l'espérance et la valeur de la variable aléatoire à estimer. Donc, en considérant une variable aléatoire z avec ẑ son estimateur, le biais est donné par :

$$B_{\hat{z}} = E[\hat{z}] - z \quad (3.\ 9)$$

Dans le cas d'un estimateur non biaisé, l'espérance de l'estimateur est égale à la variable aléatoire et le biais est donc nul.

La variance d'un estimateur s'écrit de la manière suivante :

$$\sigma_{\hat{z}}^2 = E[(\hat{z} - E[\hat{z}])^2] \quad (3.\ 10)$$

Un bon estimateur doit être précis, et il l'est d'autant plus que son erreur quadratique est faible : biais et variance les plus faibles possibles. Ce qui est le cas pour l'estimateur biaisé dont l'erreur quadratique est généralement inférieure à celle de l'estimateur non biaisé. L'erreur quadratique moyenne est alors donnée par la formule suivante :

$$E_{qm}(\hat{z}) = E[(z - \hat{z})^2] = \sigma_{\hat{z}}^2 + B_{\hat{z}}^2 \quad (3.\ 11)$$

D'autre part, l'influence de la longueur du signal réel utilisé sur la variance de l'intercorrélation est quantifiée en calculant la variance de l'estimateur biaisé [52] selon la formule suivante :

$$Var[C_{x,y}(m)] = \frac{1}{N^2} \sum_{n=-(N-m)}^{N-m} (N - m - |\, n\,|)[R_{x,x}(n)R_{y,y}(n) + R_{x,y}(n+m)R_{x,y}(n-m)] \quad (3.\ 12)$$

où N représente la longueur du signal. Or lorsque la longueur N est très grande devant m, l'équation précédente devient :

$$Var[C_{x,y}(m)] \cong \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [R_{x,x}(n)R_{y,y}(n) + R_{x,y}(n+m)R_{x,y}(n-m)] \quad (3.\ 13)$$

Lorsque N tend vers l'infini, la variance tend vers zéro, donc l'estimation est meilleure lorsque la longueur des signaux augmente.

D'autre part et pour améliorer cette estimation, il convient d'ajouter à cet estimateur biaisé un estimateur moyenné. Ceci consiste à calculer une moyenne sur plusieurs estimateurs indépendants. Soit M le nombre de moyennes, l'estimateur moyenné peut alors être mis sous la forme suivante :

$$C_{x,y}(m) = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^{M} C_{x,y}^{l}(m) \quad (3.\ 14)$$

où $C_{x,y}^{l}(m)$ désigne le l$^{\text{ième}}$ estimateur. Donc lorsque la longueur des signaux et le nombre d'estimateurs augmentent, cet estimateur obtenu grâce à l'équation précédente permettra une diminution supplémentaire de la variance.

III.2 Simulation d'une plaque réverbérante

Dans le chapitre précédent, nous avons appliqué l'algorithme de comparaison sur des images relatives à des matrices simples. Comme déjà discuté précédemment, l'objectif de ce chapitre est d'appliquer notre algorithme à des images issues de simulation (plaque rectangulaire) correspondantes aux autocorrélations des signaux des reçus. Cette section consacrée au détail de l'obtention de ces images temps fréquence sera divisée en deux étapes. La première étape consiste à simuler le signal reçu sur un récepteur, et la deuxième étape comporte

le calcul de l'autocorrélation de ce signal en expliquant l'obtention de l'image temps fréquence relative à une position donnée du récepteur.

III.2.1 Simulation de la propagation d'un signal dans une plaque rectangulaire

Soit une plaque rectangulaire de 1 m de longueur et de 0.5 m de largeur représentée à la figure 18 ci-dessous.

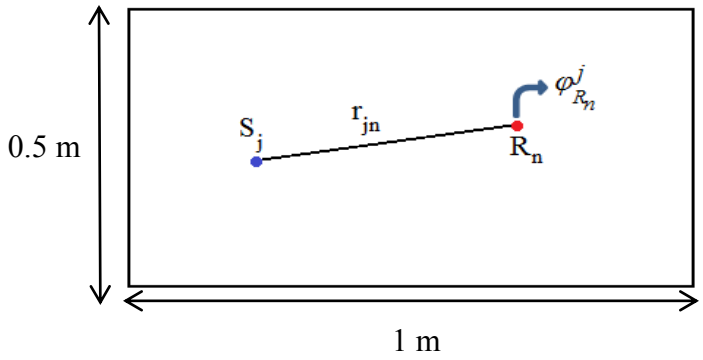


Figure 18 - Schéma descriptif de la simulation.

S_j représente une source et R_n un récepteur. Pour une position quelconque « j » de la source et « n » une position quelconque du récepteur, nous mesurons le signal reçu au récepteur R_n pour ensuite calculer l'autocorrélation de ce dernier. r_{jn} étant la distance entre S_j et R_n.

Soit $s_{f_0}(t)$ une impulsion sinusoïdale à bande étroite centrée sur la fréquence f_0, émise par la source S_j (quelle que soit sa position) et dont l'expression est donnée par l'équation suivante :

$$s_{f_0}(t) = w(t)\sin(2\pi f_0 t) \tag{3. 15}$$

w(t) représente une fenêtre de Hanning ayant l'expression suivante :

$$w(t) = \begin{cases} \dfrac{1-\cos\left(\dfrac{2\pi f_0 t}{N_c}\right)}{2} & si \quad 0 \le t \le T \\ 0 & si \quad t > T \end{cases} \tag{3. 16}$$

où N_c est le nombre de cycles de sinusoïde et $T=N_cT_0=N_c/f_0$ est la durée de la fenêtre.

Un exemple du signal d'excitation est donné à la figure 19 suivante :

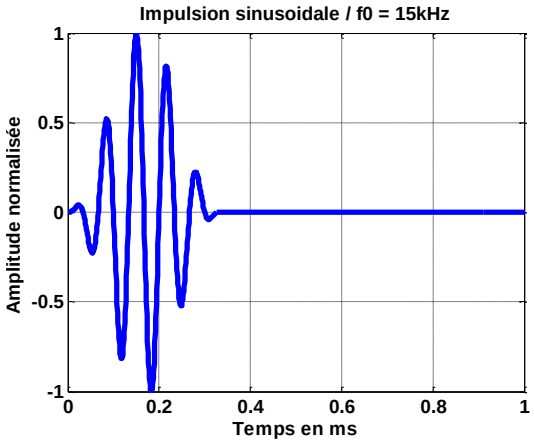


Figure 19 – Impulsion sinusoïdale de fréquence centrale f0 = 15 kHz.

Le signal reçu sur le récepteur R, après réflexions sur les bords de la plaque, est calculé en utilisant la méthode des sources images (plus de détail sur le calcul du signal reçu sont donnés dans la thèse de Najib Abou Layla [8]).

Dans notre cas, la structure utilisée est une plaque rectangulaire possédant quatre plans de réflexions. La source initiale possède donc quatre sources images, chacune étant l'image par rapport à l'un de ces plans. Alors à l'ordre 1, le récepteur R reçoit cinq ondes (une directe de S vers R et quatre réfléchies par les quatre bords de la plaque). L'ordre 2 est ainsi les images des sources images à l'ordre 1 par rapport aux plans et ainsi de suite. La figure 20 suivante donne un exemple d'une source image à l'ordre 1 où Sji représente la source image de S_j et r_{jin} la distance entre S_{ij} et R_n.

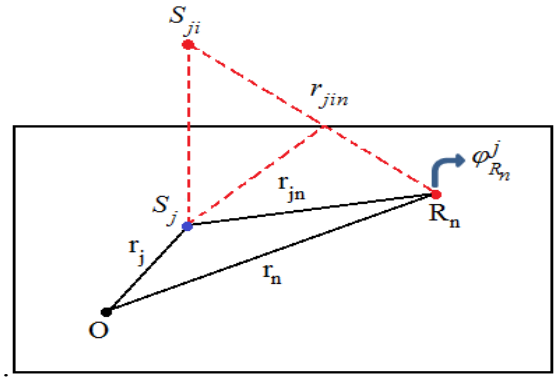


Figure 20 - Source image à l'ordre 1.

L'autocorrélation du signal reçu par le récepteur R_n est faite en utilisant la commande « xcorr » sous Matlab. En effet pour un vecteur de taille N représentant le signal reçu, la commande « xcorr » calcule l'autocorrélation sur une taille 2N-1.

D'autre part, plutôt que de travailler sur des corrélations brutes, une représentation temps fréquence est plus judicieuse pour mettre en évidence les effets intéressants. L'image temps fréquence permettant de visualiser l'enveloppe de l'autocorrélation en fonction du temps et de la fréquence sera tracée. La fréquence f_0 du signal d'excitation sera variée dans une bande de fréquence bien déterminée et dont un exemple sera vu dans la sous-section suivante. Pour chaque fréquence, nous aurons alors un signal d'autocorrélation tout en gardant la même échelle de temps.

Dans la sous-section suivante, des résultats de simulation de la propagation des signaux et de l'obtention des images temps fréquence sont illustrés.

III.2.2 Résultats de simulation de la propagation des signaux et image temps fréquence correspondante

Le signal d'excitation est une impulsion sinusoïdale (équation 3.15) de cinq cycles (N_c=5). Sa fréquence centrale f_0 varie dans une plage de fréquence allant de 8 kHz à 15 kHz avec un pas de 5 Hz. Les signaux sont simulés sur une durée de 0.04 s. Du fait de la plage de fréquences en question, l'étude sera limitée seulement au mode A_0, alors il n'existe que le mode A_0 et le mode S_0 et pour une impulsion appliquée en surface, c'est surtout le mode A_0 qui est excité. La vitesse de propagation est de 800 m/s et la longueur d'onde λ varie de 0,05 m à 0,1 m. Le signal reçu par le récepteur R est simulé en choisissant un ordre de réflexion égal à 40.

La position j=1 de la source et la position n=1 du récepteur sont représentées à la figure 21 suivante :

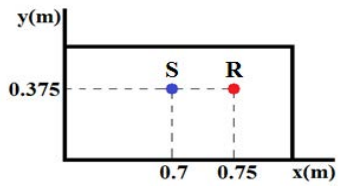
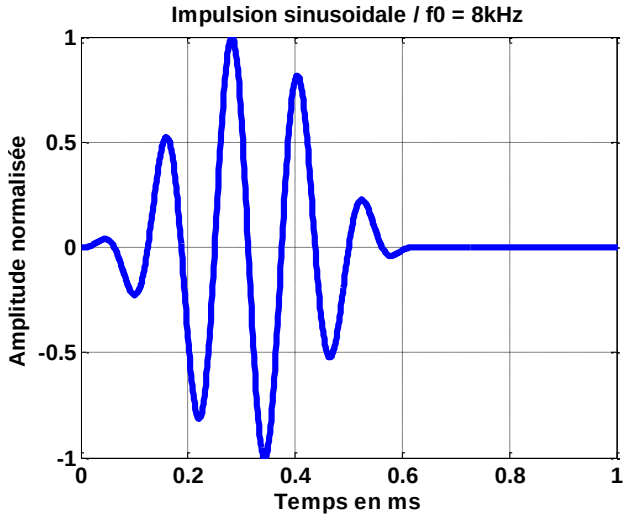
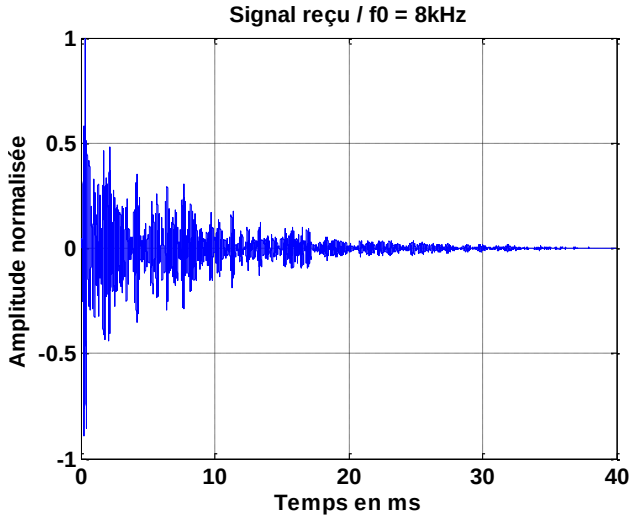


Figure 21 - Position de la source et du récepteur.

La figure 22 ci-dessous représente le signal d'excitation (sur une durée 1 ms) émis par la source S pour une fréquence $f_0 = 8$ kHz ainsi que le signal reçu par le récepteur R.



a)

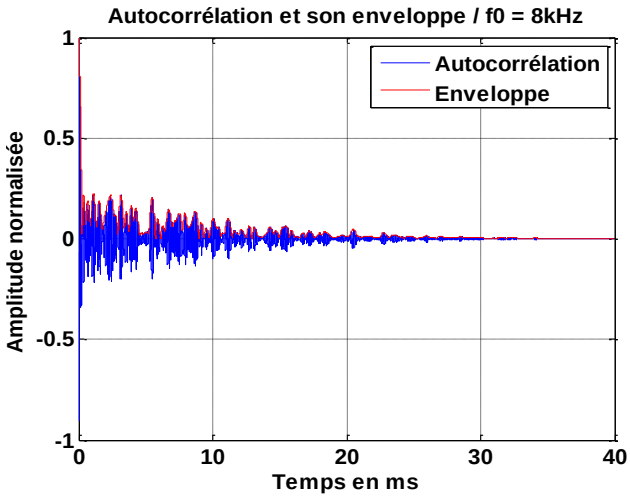


b)

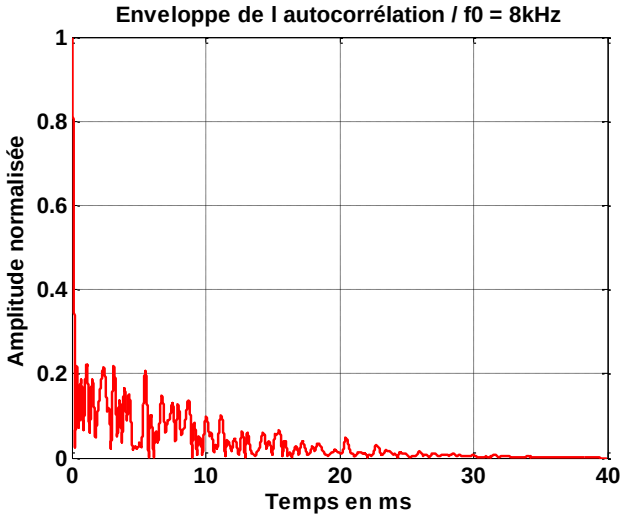
Figure 22 - a) Signal d'excitation émis par la source S pour une fréquence f0=8KHz, b) Signal reçu au récepteur R.

Après avoir simulé le signal reçu, l'autocorrélation de ce dernier est calculée. La figure 23 ci-après représente le signal d'autocorrélation ainsi que son enveloppe. À noter que nous avons choisi de travailler avec l'enveloppe de l'autocorrélation et non pas avec l'autocorrélation

elle-même, car utiliser l'enveloppe permet de réduire le nombre de minimas dans le signal d'autocorrélation. Ainsi, les minimums locaux présents dans l'image temps fréquence seront réduits et mieux visualisables.



a)



b)

Figure 23 – a) L'autocorrélation et son enveloppe, b) L'enveloppe toute seule.

Nous répétons cette même simulation pour des fréquences f_0 allant de 8 kHz à 15 kHz, pour aboutir au tracé de l'image temps fréquence des enveloppes d'autocorrélations des signaux

reçus par le récepteur R, lorsque l'émetteur S émet une sinusoïde fenêtrée par la fenêtre de Hanning de 5 cycles de sinusoïdes.

La figure 24 donne une partie de l'image temps fréquence pour les positions de l'émetteur S et du récepteur R données à la Figure 21. En d'autres termes, et pour mieux visualiser les minimums locaux présents dans cette image (points sombres cerclés en rouge sur la figure), le calcul se limite à 2 ms seulement au lieu de toute la durée des signaux qui est de 40 ms.

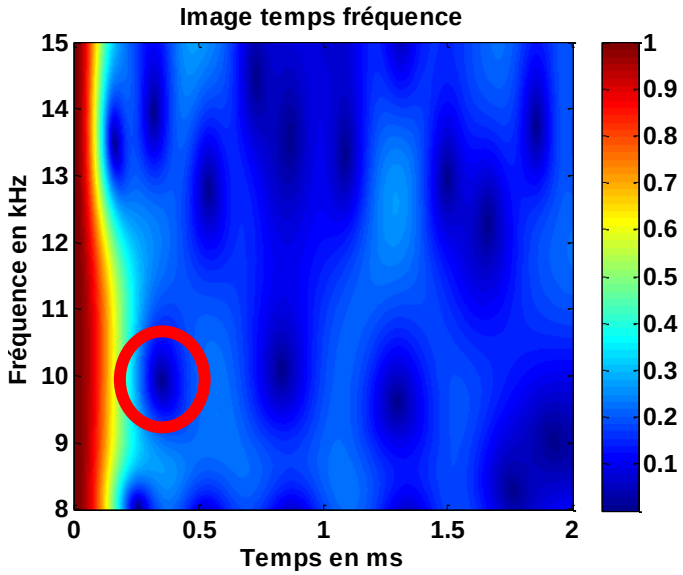


Figure 24 - Image temps fréquence.

Dans cette section, nous avons exposé la simulation de la propagation d'un signal dans une plaque rectangulaire ainsi que l'extraction des images temps fréquence correspondantes. Des résultats de simulations ont été donnés pour une position fixe de l'émetteur et du récepteur. Dans la section suivante, l'extraction des minimums locaux et le calcul du taux de ressemblance en faisant varier la position de la source seront abordés.

III.3 Validation numérique de l'algorithme de comparaison

Dans un premier temps, nous appliquons l'algorithme à l'image temps fréquence de la figure 24 précédente. Cela a pour objectif de prouver que l'extraction des minimums locaux se

fait correctement. Dans un deuxième temps le récepteur sera fixé dans une position donnée, et la source sera déplacée.

Pour chaque position de la source, nous simulons l'enveloppe de l'autocorrélation des signaux reçus au récepteur R pour la même bande de fréquence définie précédemment. Puis, l'application de l'algorithme de comparaison permet d'extraire les minimums locaux des images temps fréquence obtenues. Enfin, il devient possible de calculer le taux de ressemblance entre l'image correspondante à la nouvelle position de la source, et celle de référence.

III.3.1 Variation de la moyenne des distances en fonction de la position de la source

Une fois que l'image temps fréquence de la figure 24 est extraite, la méthode décrite dans le chapitre précédant est appliquée pour extraire les minimums locaux présents dans cette image. La figure 25 représente l'image de la figure 24 sur laquelle ont été marqués par des points rouges les minimums locaux extraits.

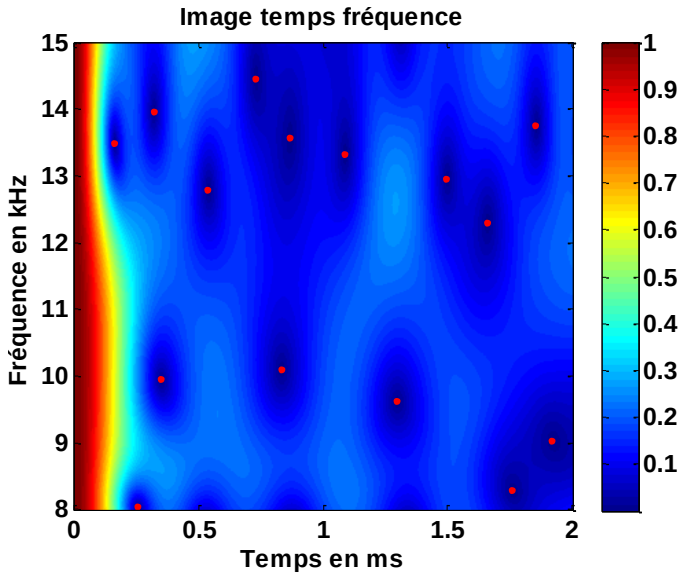


Figure 25 - Image temps fréquence avec la superposition des minimums locaux.

Le résultat permet de voir que les minimums locaux sont correctement extraits. Considérons maintenant d'autres positions de la source S et du récepteur R comme indiqué à la figure 26 ci-après.

Le calcul du taux de ressemblance entre les images des différentes positions de S et celle de référence (S1) permet d'obtenir le tableau suivant, tout en sachant que la distance de la diagonale d'une image est égale à $\sqrt{(1000-1)^2+(1401-1)^2} = 1719,88$.

IMAGES	MOYENNES DES DISTANCES	TAUX DE RESSEMBLANCE
S1	0	[1 – (0 /1719,88)] % = 100 %
S2	879,51	[1 – (879,51 /1719,88)] % = 48.87 %
S3	519,12	[1 – (519,12 /1719,88)] % = 69,82 %
S4	722,04	[1 – (722,04/1719,88)] % = 58,02 %
S5	684,42	[1 – (684,42 /1719,88)] % = 60,21 %
S6	669,63	[1 – (669,63/1719,88)] % = 61,07 %
S7	234,72	[1 – (234,72/1719,88)] % = 86,36 %
S8	708,14	[1 – (708,14/1719,88)] % = 58,83 %

Tableau 2 - Récapitulatif des taux de ressemblance entre toutes les images des positions de S et celle de référence (S1)

Si on trace les moyennes des distances en fonction de la position de la source (en fonction de l'abscisse, car l'ordonnée est toujours égale à 0,375), on obtient la figure 28 suivante :

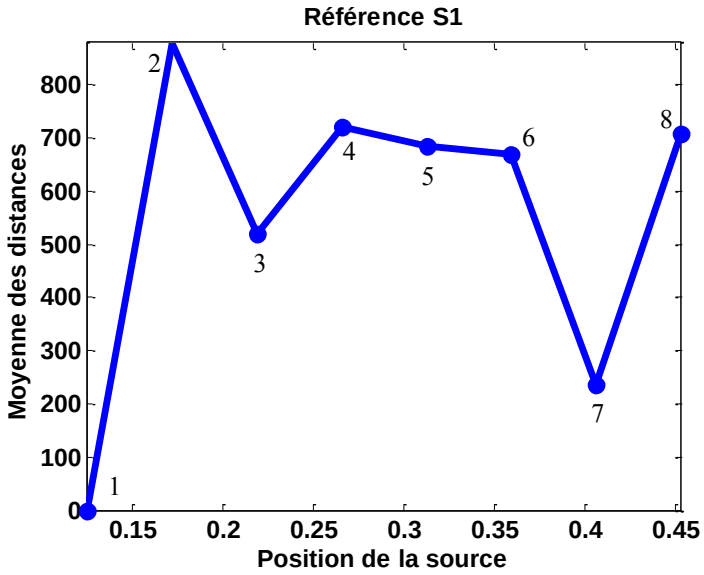


Figure 28 - Moyenne des distances en fonction de la position de la source.

Normalement lorsque la source s'éloigne de sa position de référence, la moyenne des distances doit augmenter donnant à un taux de ressemblance qui diminue. Or dans ce cas, nous remarquons que cette moyenne varie d'une façon aléatoire. La figure 27 montre également que la distribution des minimums locaux dans les images correspondantes à chaque position peut être aléatoire. Dans ce qui suit, une solution à ce problème est proposée ainsi que des améliorations aux résultats obtenus seront données.

III.3.2 Limitations

La variation aléatoire de la moyenne des distances rencontrée précédemment vient du fait que la structure utilisée possède deux plans de symétrie. Dans ce cas de structure, une source qui située en (1) et (1') (voir figure 29) possèdera les mêmes sources images que lorsqu'elle se situe en (2) et (2') respectivement. L'outil de simulation qui modélise la propagation du signal est également incriminé dans cette variation. En effet il est très approché puisqu'il modélise les bords de la plaque comme des miroirs parfaits sans prendre pas en considération les coefficients de réflexion, de réfraction et de transmission.

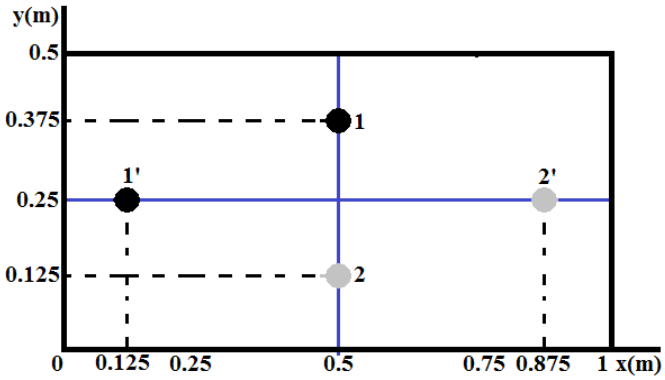


Figure 29 - Symétrie de la plaque rectangulaire.

Dans l'exemple suivant, nous divisons la plaque en quatre quadrants pour considérer les nouvelles positions de la source et du récepteur uniquement dans l'un d'entre eux. La figure 30 suivante illustre la distribution de ces positions.

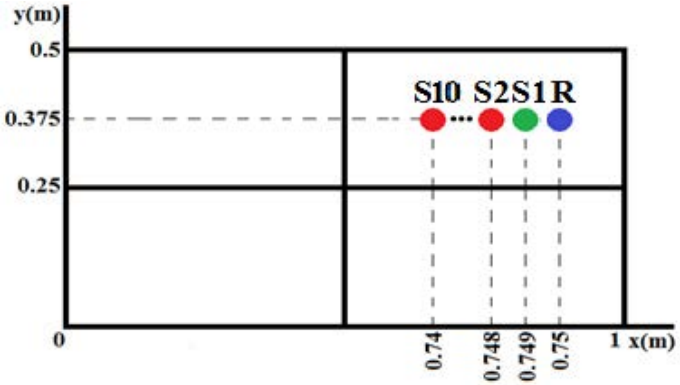


Figure 30 - Positions de la source S et du récepteur R.

Le récepteur est fixé à une position ayant comme coordonnées (0,75 cm ; 0,375 cm) et la source se déplace d'une position S1 (0,749 cm ;0,375 cm) à une position S10 (0,74 cm ;0,375 cm) avec un pas de 1 mm. La position S1 est considérée comme référence pour être comparée aux images des autres positions (S1 à S10). Puis le taux de ressemblance (moyenne des distances entre les minimums locaux) entre les images de S1 et S1, S1 et S2 …, S1 et S10 est calculé.

De même, l'image temps fréquence relative à chaque position de la source S est extraite. Puis l'algorithme sera appliqué permettant ainsi l'extraction des minimums locaux et le calcul du taux de ressemblance. La figure 31 représente les différentes images temps fréquence.

$$\text{Taux de ressemblance} = 100\% - \left(\frac{\text{moyenne des distances obtenues}}{\text{moyenne des distances maximales}} \right)\% \qquad (3.\ 17)$$

où la moyenne des distances maximales est obtenue lorsque les deux images comparées n'ont aucune ressemblance. Il s'agit de la distance maximale possible entre deux minimums locaux, donc cette dernière n'est autre que la distance de la diagonale de l'image.

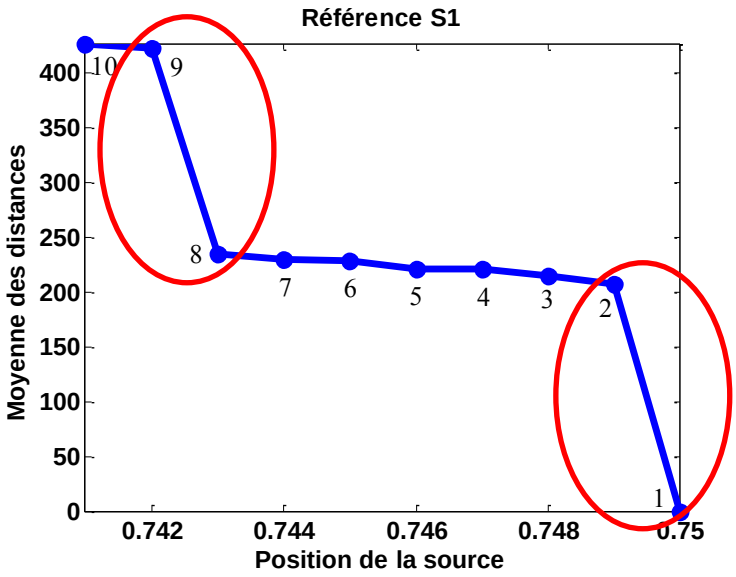


Figure 32 - Moyenne des distances en fonction des positions de la source.

Dans ce cas, il apparaît bien que cette variation est quasi-linéaire, ce qui est le résultat attendu. Cela étant, des sauts existants entre les positions S1 et S2 et entre les positions S8 et S9 (zone encerclée en rouge) apparaissent clairement. Ceci est dû à la disparition d'un minimum local lors du passage de S1 à S2 et de S8 à S9 (voir figure 31). D'autre part, en continuant d'augmenter le nombre de positions de la source (à ordonnée identique de 0,375) pour arriver à la position S36 de coordonnées (0,714 cm, 0,375 m), nous obtenons la figure 33 ci-après.

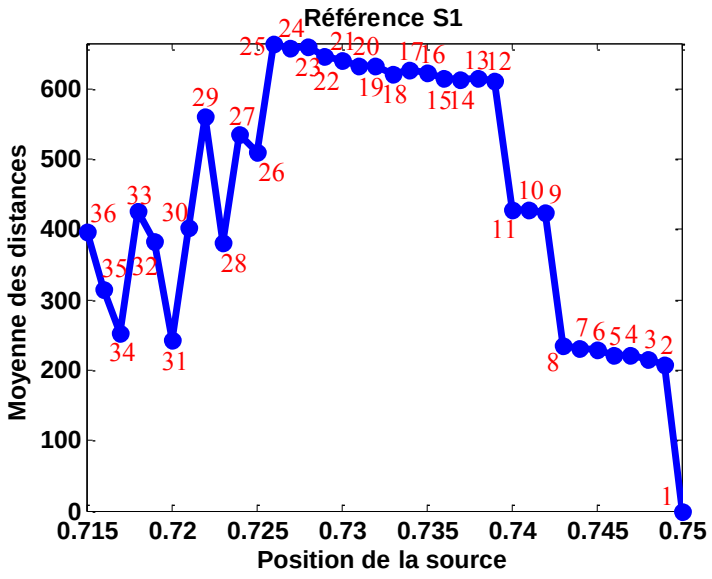


Figure 33 - Moyenne des distances en fonction de la position de la source.

Ce graphe montre qu'à partir de la position 25, le résultat obtenu n'est plus linéaire. Ceci s'explique par le fait qu'à partir d'une distance plus grande que la moitié de la plus petite longueur d'onde entre une position quelconque et celle de référence (S1), le résultat obtenu n'est plus cohérent. En effet, dans notre cas, la longueur d'onde varie entre 0.05 m à 0.1 m. La plus petite longueur d'onde étant de 0.05 m, c'est donc à partir d'une distance excédant 0.025 m que le résultat devient incohérent ; et cette distance n'est autre que celle entre S25 et S1.

Pour conclure, tant que la distance source - référence est inférieure à la moitié de la plus petite longueur d'onde, nous obtenons toujours une linéarité en traçant la moyenne des distances en fonction de position de la source. Dans la sous-section suivante, et dans l'objectif de gagner en temps de calcul et en espace mémoire, un sous-échantillonnage en temps et en fréquence sera abordé.

III.3.3 Sous-échantillonnage temps et fréquence

Dans un système d'échantillonnage numérique, le sous-échantillonnage désigne le procédé de réduction du nombre d'échantillons prélevés sur un signal analogique par rapport au nombre de pixels disponibles dans l'image numérique. De manière générale, le sous-

échantillonnage permet de réduire la quantité de données utilisées pour former une image. Ceci permet donc de gagner en temps de calcul et en espace mémoire.

Dans notre cas, on fait un sous-échantillonnage d'un facteur de deux. Si nous reprenons l'exemple de la figure 32 et nous appliquons le sous-échantillonnage (SE) aux signaux avant de calculer les images temps fréquence correspondante, nous obtenons une nouvelle variation de la moyenne des distances en fonction de la position de la source. La figure 34 illustre cette nouvelle variation en rouge en la comparant à la variation obtenue à la figure 32 en bleu (cas sans appliquer le sous-échantillonnage).

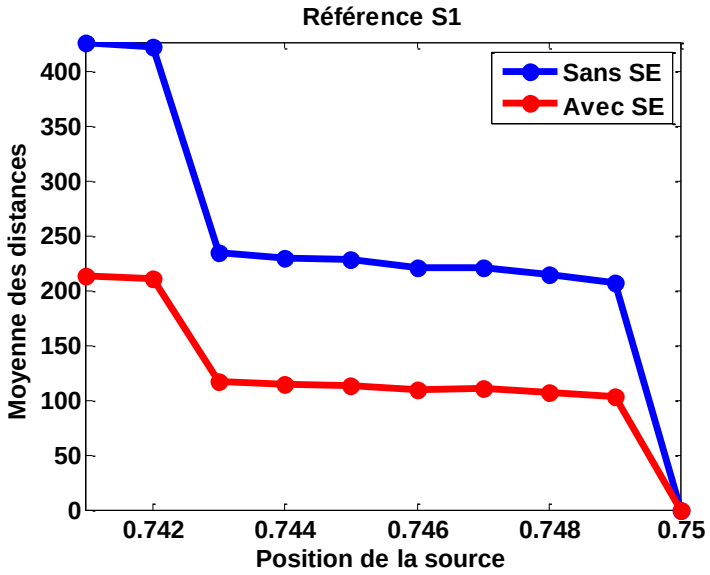


Figure 34 - Comparaison entre les deux cas, avec et sans sous-échantillonnage.

On remarque clairement que les deux courbes ont presque la même variation et sont quasi- identiques, sauf que l'amplitude est divisée par deux. Ceci est normal vu le sous-échantillonnage utilisé est d'un facteur de deux.

Pour mieux visualiser la différence entre ces courbes, nous les ramenons à la même amplitude. On obtient la figure 35 suivante.

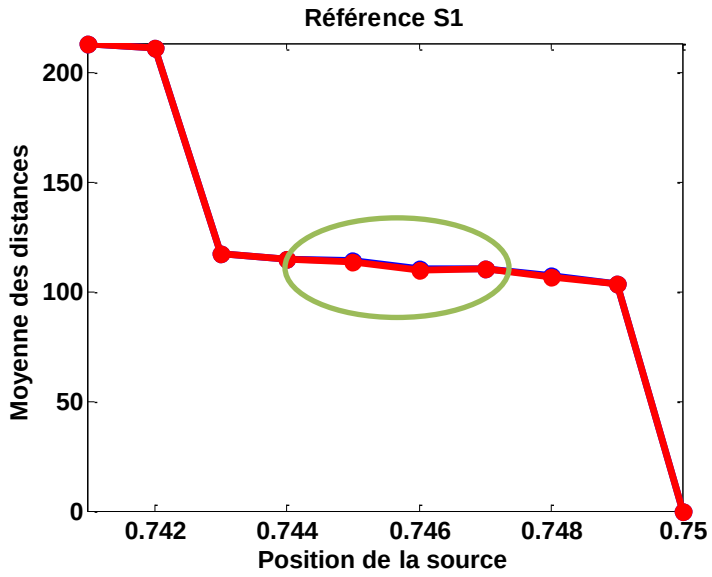


Figure 35 - Comparaison entre moyennes avec et sans sous-échantillonnage.

Les courbes sont alors presque confondues avec toutefois a une différence très minime (zone encerclée en vert) due à l'erreur causée par le sous-échantillonnage qui affecte les pixels de l'image et cause une erreur très faible sur le calcul de la moyenne des distances.

Donc en faisant un sous-échantillonnage en temps et en fréquence donne quasiment le même résultat que sans échantillonnage. Ainsi, il est possible de gagner en temps de calcul et en espace mémoire.

III.4 Localisation de la source

Comme vu précédemment, tant que la distance entre la position de la source en question et celle de référence est inférieure à la moitié de la plus petite longueur d'onde, la courbe représentant la moyenne des distances en fonction de la position de la source présente toujours une linéarité. Dans cette section, le problème des sauts vu précédemment (voir figure 32) sera résolu en utilisant la pondération par la fenêtre de Hanning, ce qui nous permettra par la suite de localiser une position inconnue de la source.

La pondération d'un indice ou d'une statistique consiste à affilier aux valeurs qui les composent un poids différent, en fonction des divers critères qui rendent compte de l'importance relative de chacun des éléments. D'autre part, lors de passage d'une position à l'autre (voir figure

La démarche de la pondération s'effectue selon les étapes suivantes. Tout d'abord nous traçons les minimums locaux correspondants aux positions S1 et S2 et on va pondérer la moyenne des distances entre ces deux positions. La figure 38 représente ces minimums locaux.

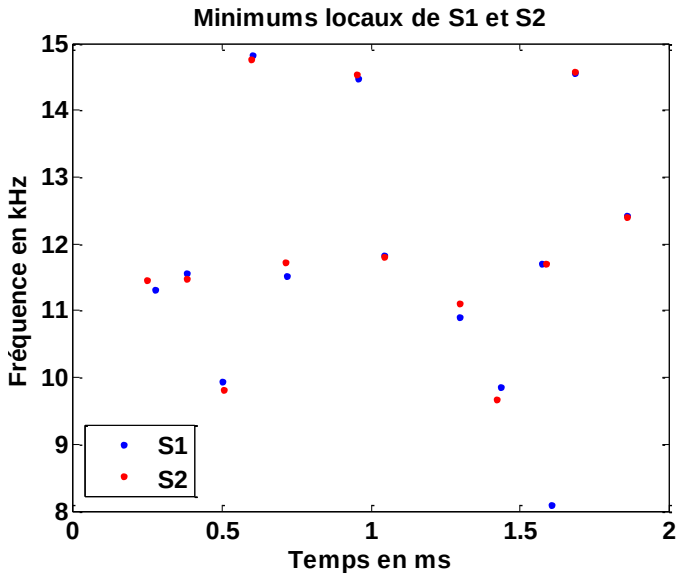


Figure 38 - Minimums locaux correspondants aux positions S1 et S2.

Puis, nous cherchons le point moyen entre un minimum de l'image correspondante à S1 et son plus proche voisin de l'image correspondante à S2. Dans le cas où un point n'a pas un point voisin, alors on le considère lui-même comme étant un point moyen. La figure 39 donne le résultat obtenu où les points verts représentent les points moyens.

Après avoir déterminé les points moyens, nous multiplions chaque distance (entre un minimum et son voisin) par la valeur α (correspondante à la fenêtre de Hanning en temps) et par la valeur β (correspondante à la fenêtre de Hanning en fréquence). Ces valeurs correspondent au point moyen relatif à cette distance (voir figure 40).

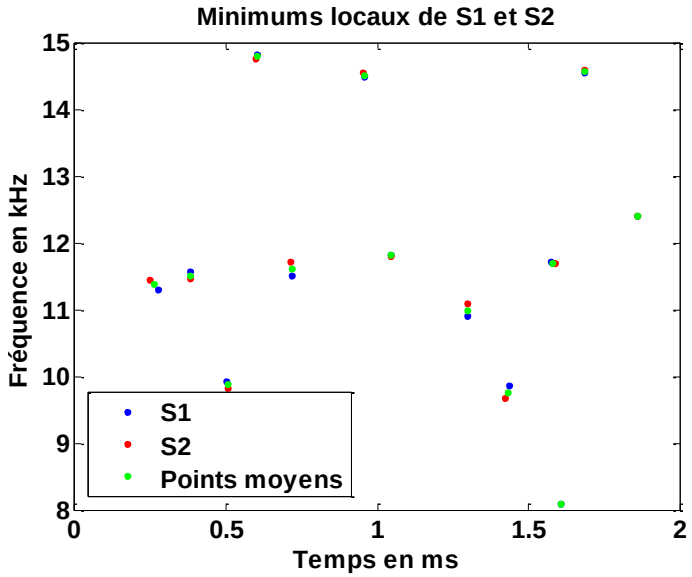


Figure 39 - Minimums locaux correspondant aux positions S1 et S2 avec les points moyens en vert.

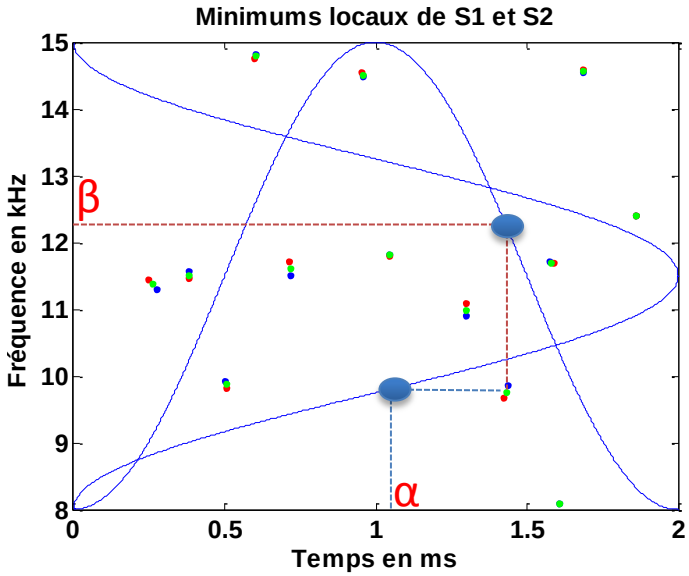


Figure 40 - Exemple de la démarche de la pondération.

Après avoir pondéré toutes les distances entre les minimums locaux des images de S1 et ceux de S2, la moyenne de ces dernières permet d'avoir la moyenne pondérée entre les images de S1 et S2. Donc, le même calcul de la moyenne des distances expliqué avant est refait, mais la différence ici est que la pondération est appliquée aux distances avant de faire la moyenne.

Enfin, après avoir appliqué cette démarche pour toutes les positions (S1 à S10), la moyenne pondérée des distances est tracée en fonction de la position de la source S. La figure 41 donne une comparaison entre le cas avec et sans pondération. Les deux courbes y ont été normalisées pour pouvoir être comparées sur la même échelle.

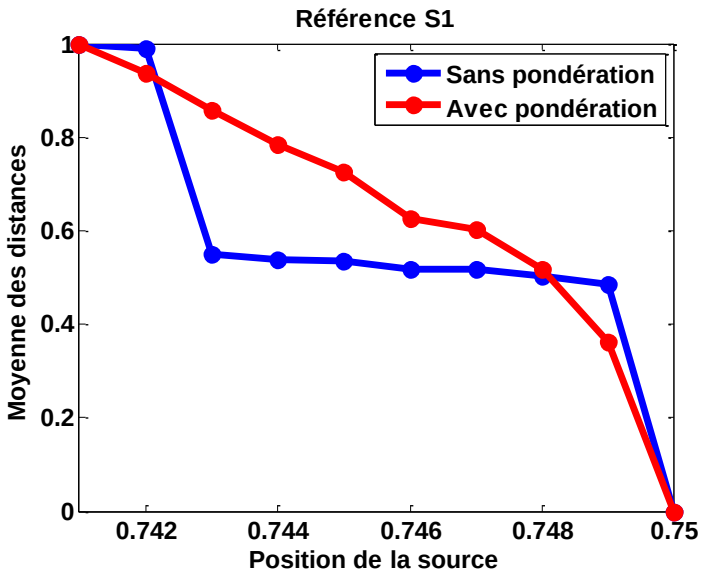


Figure 41 - Comparaison entre avec et sans sous-échantillonnage.

Après pondération, les sauts ont disparu et la courbe est devenue à peu près linéaire. Donc une source de position inconnue peut être localisée après avoir calculé la moyenne des distances entre les minimums locaux de l'image relative à la position inconnue et celle de la position de référence.

D'autre part, comme déjà mentionné, pour que le résultat obtenu soit cohérent, la distance entre une position quelconque et celle de référence (position S1) doit être inférieure ou égale à la moitié de la plus petite longueur d'onde. Pour ce faire, en utilisant les trente-six positions de la simulation précédente (S1 (0,749 m ; 0,375 m) à S36 (0,714 m ;0,375 m)), nous décidons de déplacer la position de référence chaque 9 mm, et de voir le résultat obtenu en traçant la variation de la moyenne des distances en fonction de la position de la source, et en comparant le cas avec et sans pondération pour les quatre configurations suivantes :

- S se déplace de S1 à S10 avec S1 la référence

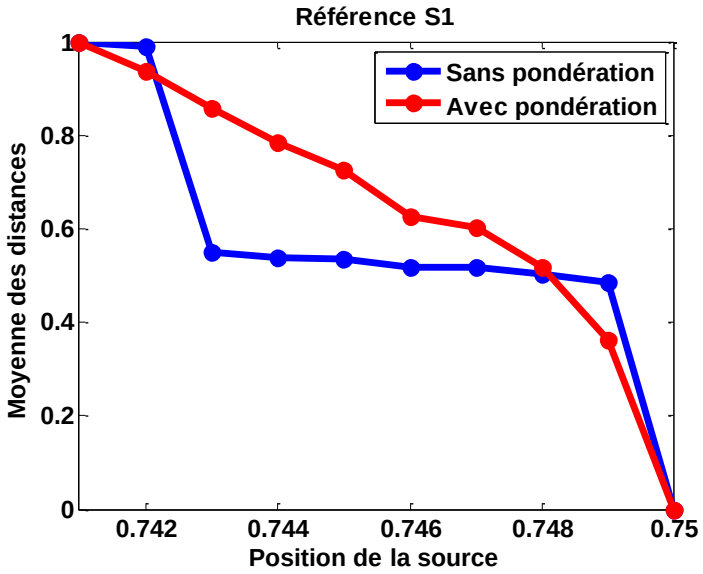


Figure 42 - Comparaison entre avec et sans sous-échantillonnage.

- S se déplace de S10 à S19 avec S10 la référence

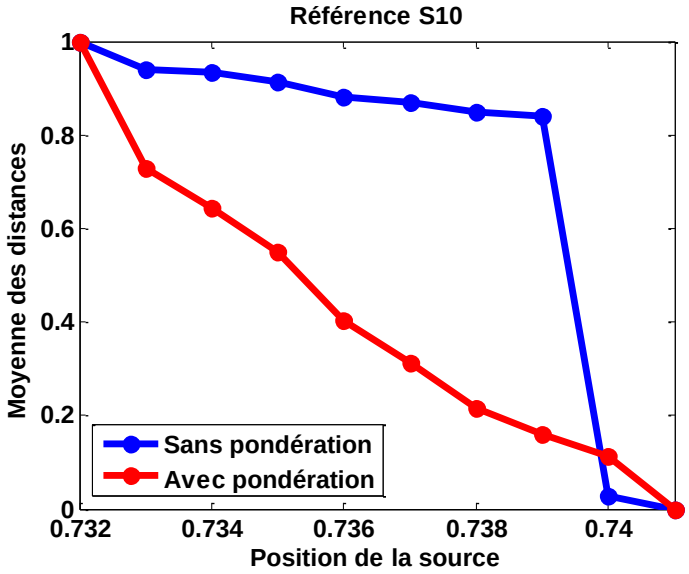


Figure 43 - Comparaison entre cas avec et sans sous-échantillonnage.

- S se déplace de S19 à S28 avec S19 la référence

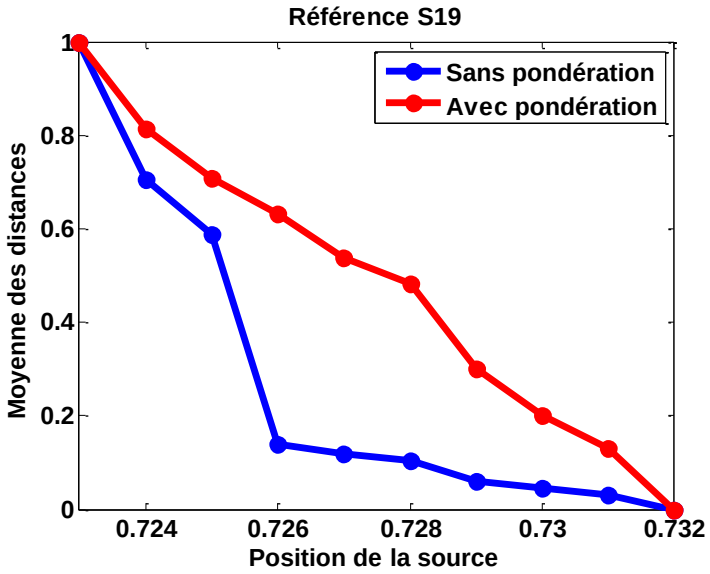


Figure 44 - Comparaison entre avec et sans sous-échantillonnage.

- S se déplace de S28 à S36 avec S28 la référence

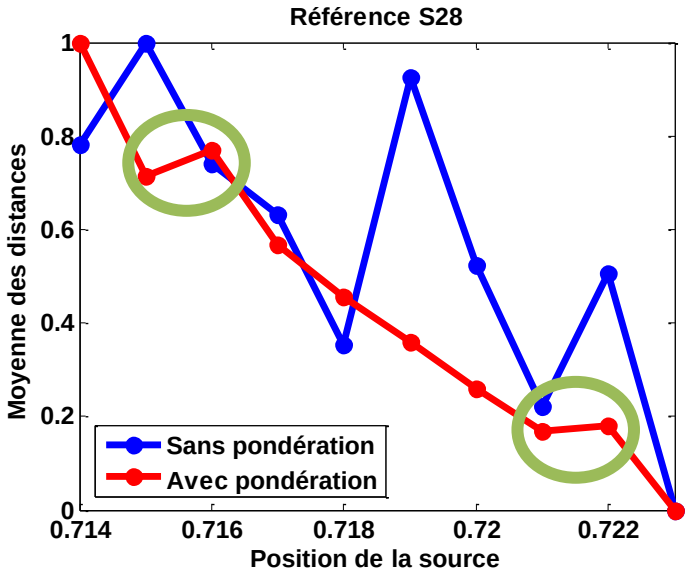


Figure 45 - Comparaison entre des avec et sans sous-échantillonnage.

Dans les trois premiers cas (S se déplace de S1 à S10, S10 à S19, S19 à S28), on remarque bien qu'après la pondération, la courbe représentant la variation de la moyenne des

distances en fonction de la position de la source est presque devenue linéaire. Pourtant dans le dernier cas (S se déplace de S28 à S36), bien qu'il y ait plusieurs sauts qui correspondent à des apparitions et des disparitions successives des minimums lors du passage d'une position à une autre, et c'est pour cela qu'on a cette petite erreur (zones encerclées en vert) dans le cas avec pondération, la courbe rouge est toujours presque linéaire et le résultat est toujours cohérent.

La pondération par la fenêtre de Hanning a donc permis résoudre le problème de non-linéarité rencontré. En effet cette dernière réduit l'effet des minimums locaux sur les bords de l'image, causant ainsi des sauts successifs dans la courbe représentant la variation de la moyenne des distances en fonction de la position de la source. Il est alors toujours possible de faire la localisation de la source.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur la fonction de corrélation et mentionné quelques notions sur les signaux aléatoires et déterministes. Puis des résultats de simulation concernant l'application de l'algorithme de comparaison ont été illustrés. Dans un premier temps la manière de simuler la propagation d'un signal a été expliquée. Puis nous avons appliqué l'algorithme de comparaison aux images temps fréquence extraites. Ensuite, nous avons mis en évidence que la symétrie due à la méthode des sources images a impliqué de travailler dans un seul quadrant de la plaque.

Aussi, dans un second temps nous avons remarqué que les sauts présents dans les courbes représentant la variation de la moyenne des distances selon la position de la source sont dus à l'apparition et la disparition des minimums locaux lors du passage d'une position de la source à une autre. Donc la pondération par une fenêtre de Hanning en temps et en fréquence a permis de traiter ce problème permettant ainsi la localisation d'une position inconnue de la source.

Dans le chapitre suivant, une étude expérimentale est menée pour montrer que malgré les conditions d'un champ non diffus (dans la pratique, l'hypothèse d'un champ diffus n'est plus valable), la fonction d'intercorrélation peut toujours être exploitée pour le contrôle santé intégré d'une structure.

Chapitre IV: Convergence de l'intercorrélation vers la fonction de Green et influence de la présence d'un défaut

L’objectif de ce chapitre est de vérifier expérimentalement qu’il est toujours possible de faire un Contrôle Santé Intégré (CSI) dans un milieu en étudiant le bruit ambiant présent dans ce dernier. Tout d’abord, un petit rappel sur le principe du champ diffus sera donné. Puis l’équivalence entre la fonction de Green et l’intercorrélation sera abordée, avant de passer à des études expérimentales. Ces dernières seront menées sur une barre et deux tubes de natures différentes. L’algorithme de comparaison sera validé, permettant ainsi de montrer l’influence de la présence d’un défaut dans la structure sur la fonction de corrélation. Enfin, l’utilisation de l’eau comme source de bruit sera exposé.

À noter que dans le cas d’une plaque, il est facile de simuler un champ ambiant (méthode des sources images) contrairement au cas d’un tube. C’est pourquoi le chapitre précédent a été consacré à la validation de l’algorithme seulement sur une plaque. De même dans le cas d’une barre, cette dernière présente peu de réflexions (deux côtés) contrairement à une plaque qui présente des réflexions multiples (4 côtés).

IV.1 Introduction

Comme déjà mentionné au chapitre I, le principe du champ diffus a été utilisé dans plusieurs domaines comme la séismologie, l’acoustique sous-marine et aéronautique où un champ acoustique ambiant naturel existe (effet de tremblements de terre, mouvement des bateaux, moteurs d'avions…). Il a été aussi utilisé dans le transport fluidique (ou tubulaire). En effet le bruit généré dans les canaux de transport et causé par l’écoulement turbulent du fluide est considéré comme une source acoustique naturelle.

Ce principe prédit qu’en présence d’un champ parfaitement diffus dans un milieu de propagation, la fonction de corrélation entre les signaux enregistrés en deux points converge vers la fonction de Green entre eux. L’intérêt de chercher la fonction de Green entre deux récepteurs est qu'elle permet de caractériser le chemin entre eux. Il devient donc possible de détecter la présence d’un défaut. En effet, l’extraction de la fonction de Green entre deux points à partir de la fonction d'intercorrélation d'un champ diffus permet de remonter à la même information qu'avec une méthode active, mais sans avoir besoin d'une source. Autrement dit, nous passons du contrôle actif au contrôle passif.

IV.2 Validation expérimentale

IV.2.1 Équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation

La figure 46 suivante illustre l'équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation. D'une part dans le cas actif, la réponse impulsionnelle (entre R1 et R2) peut être mesurée en appliquant un Dirac au niveau d'un émetteur E. D'autre part, dans le cas passif, l'intercorrélation du bruit au sein de deux récepteurs R1 et R2 aux mêmes endroits que E et R permet de remonter à la même information que dans le cas actif. L'estimation de la fonction de Green à partir de la fonction d'intercorrélation est meilleure quand le champ ambiant dans la structure est proche d'un champ parfaitement diffus.

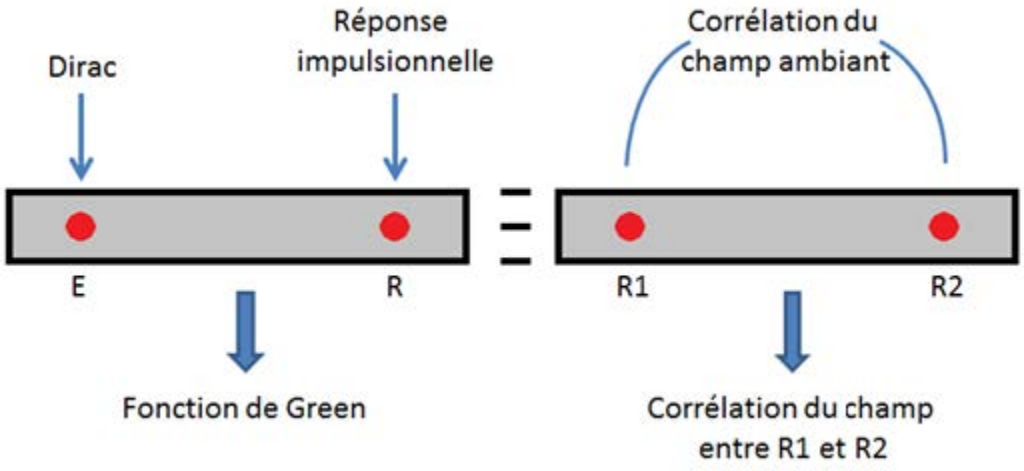


Figure 46 - Équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation, a) cas actif, b) cas passif.

IV.2.2 Barre en aluminium

IV.2.2.1 Dispositif expérimental

La barre utilisée dans cette manipulation est une barre d'aluminium à une dimension, de 1m de longueur, de 3cm de largeur, et de 3 mm d'épaisseur. Un générateur de bruit est utilisé pour générer un champ aléatoire dans la barre à l'aide d'un transducteur piézoélectrique (FT-27T) de diamètre 2 cm, d'épaisseur 0,16 mm représenté sur la figure 47. Pour l'extraction des signaux, deux récepteurs piézoélectriques identiques à celui utilisé pour le signal d'excitation sont utilisés.



Figure 47 - Transducteur piézoélectrique (FT-27T).

Ces récepteurs sont couplés sur la barre avec de la colle à prise rapide pour trois raisons : avoir une meilleure surface de contact entre ces derniers et la barre, assurer une bonne transmission des ondes acoustiques donc assurer une bonne adaptation d'impédance, enfin, préserver les conditions de l'expérience en maintenant ces récepteurs toujours aux mêmes endroits. Puis, pour la partie acquisition, les signaux reçus sur l'oscilloscope (HP-33120A) sont transmis à un ordinateur via un bus GPIB. Le dispositif de mesure est représenté à la figure 48.

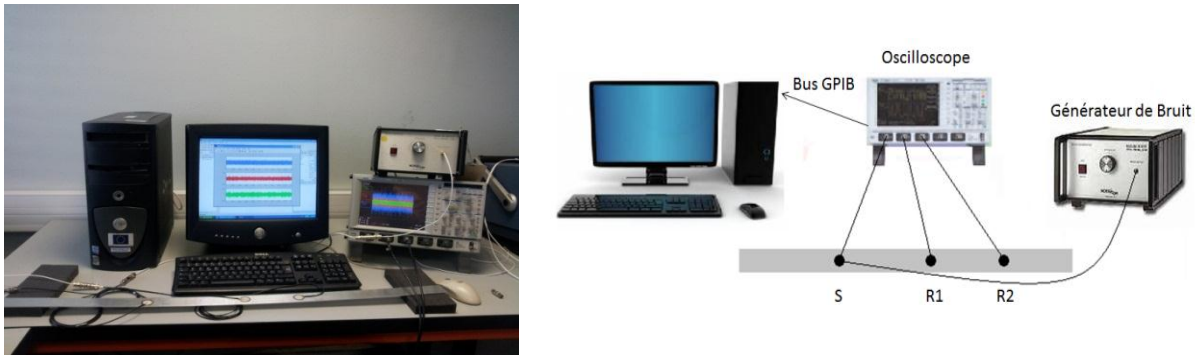


Figure 48 - Dispositif de mesure.

La figure 49, montre un exemple du signal bruit généré par l'émetteur S pour une durée de 50 ms, cet émetteur est relié à un générateur de bruit (amplitude égale à 10 V). La figure 50 illustre un exemple des signaux reçus en R1 et R2.

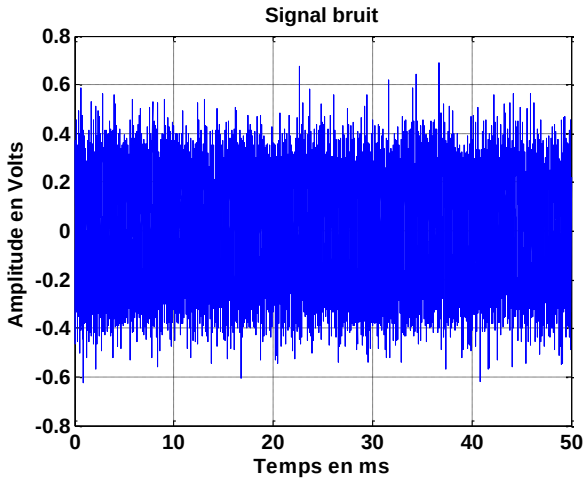
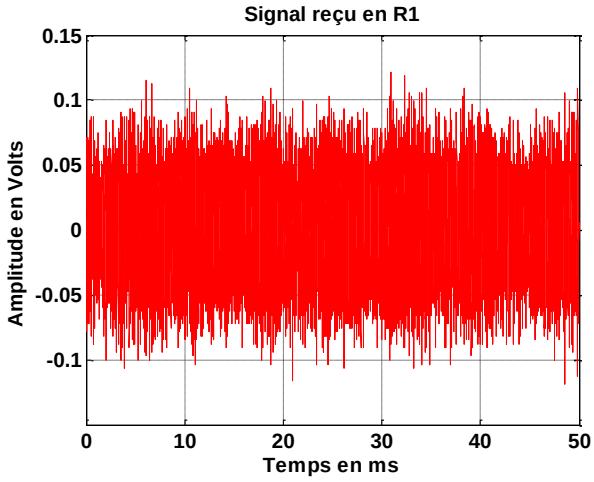
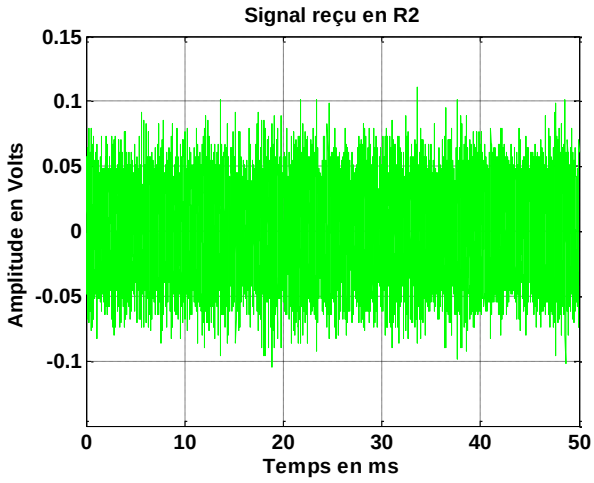


Figure 49 - Amplitude du signal émis par l'émetteur S.



a)



b)

Figure 50 - Amplitude du signal: a) reçu en R1, b) reçu en R2.

IV.2.2.2 Cas actif

Dans le cas actif, le récepteur R1 émet une impulsion sinusoïdale qui n'est autre qu'une sinusoïde pondérée par la fenêtre de Hanning de cinq cycles de sinusoïde. Le laboratoire ne dispose pas d'un générateur d'impulsion, et le signal représenté à la figure suivante est de courte durée, donc il peut être considéré comme une impulsion.

La figure 51 ci-dessous représente une impulsion sinusoïdale (représentée sur une durée de 1 ms pour que le signal soit visible) de fréquence centrale f_0=24 kHz.

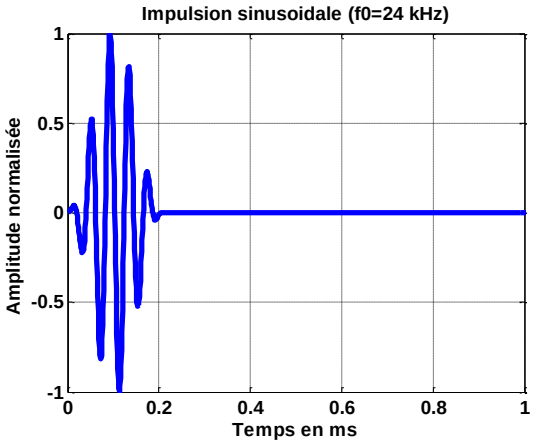


Figure 51 - Impulsion sinusoïdale de fréquence centrale f_0=24 kHz.

La figure 52 suivante représente le signal reçu au niveau du récepteur R2 (sur une durée de 10 ms). Ce signal est la réponse impulsionnelle (ou fonction de Green) entre R1 et R2.

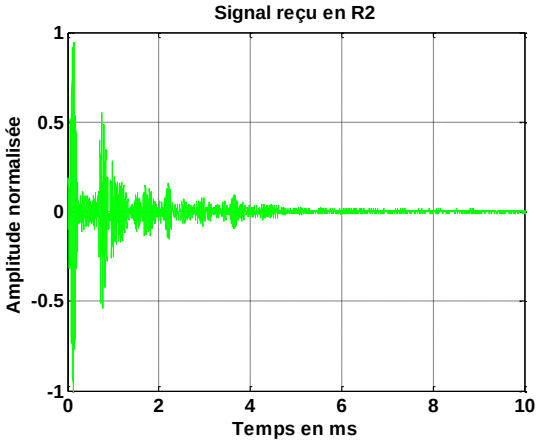


Figure 52 - Signal reçu au récepteur R2.

IV.2.2.3 Cas passif (estimation de l'intercorrélation)

En ce qui concerne le cas passif, nous calculons l'intercorrélation des signaux de bruit reçus sur les deux récepteurs R1 et R2. Et comme déjà mentionné dans le chapitre 3 (équation 3.14), pour améliorer l'estimation de la fonction de corrélation, il est préférable de calculer une moyenne sur plusieurs estimateurs indépendants (M est le nombre de moyennes). Les signaux représentés à la figure 50 et obtenus pour une position donnée de la source sont repris, et leur intercorrélation est calculée. D'après les expériences faites, le nombre de moyennes suffisant pour obtenir une bonne estimation de l'intercorrélation est égal à vingt (M=20) et c'est à partir de ce nombre que l'intercorrélation moyenne ne change plus. La figure 53 représente directement l'intercorrélation moyenne pour M égal à vingt.

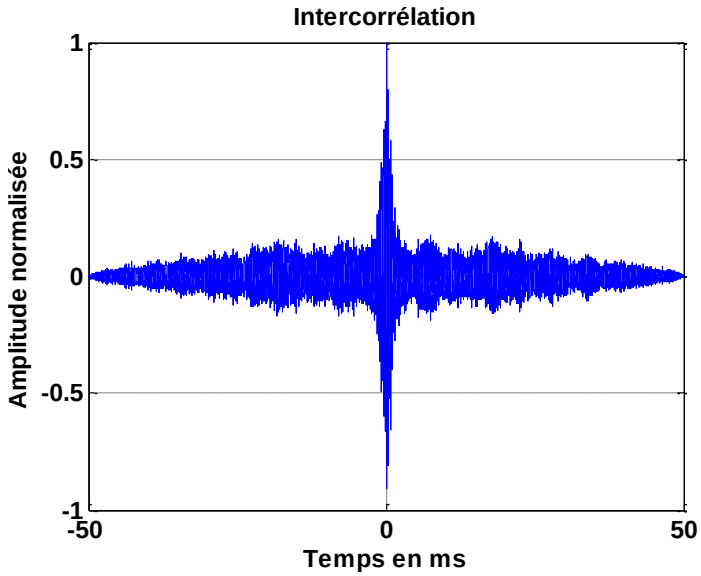


Figure 53 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation des signaux reçus en R1 e R2.

Pour qu'une comparaison entre le cas actif et le cas passif soit efficace, l'intercorrélation obtenue doit être la plus symétrique possible. Afin de pouvoir mieux visualiser la symétrie de l'intercorrélation obtenue à la figure 53 précédente, on représente la superposition de la partie causale et la partie anticausale à la figure 54 suivante :

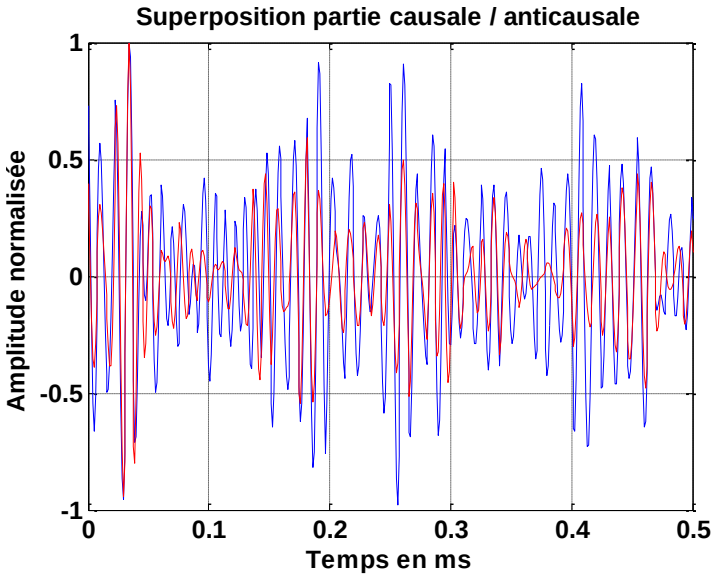


Figure 54 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Il ressort clairement que l'intercorrélation obtenue n'est pas tout à fait symétrique, ce qui va induire une mauvaise proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation.

La figure 55 représente le spectre de l'intercorrélation obtenue à la Figure 53.

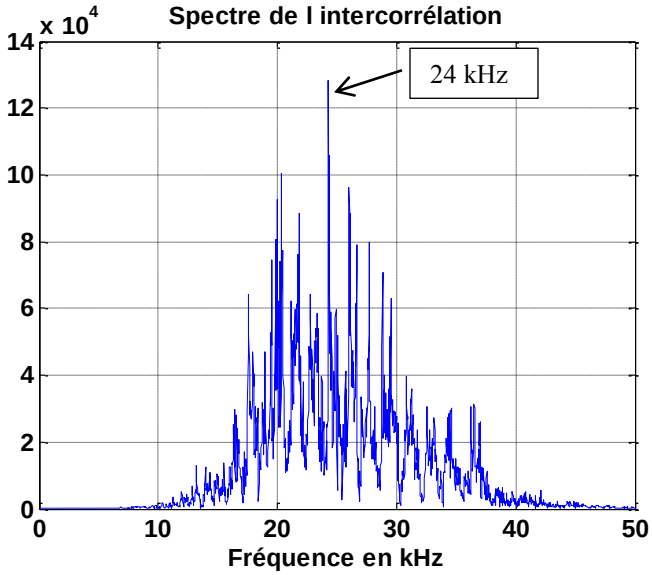


Figure 55 - Spectre de l'intercorrélation.

Cette figure montre que les fréquences contenues dans l'intercorrélation varient sur une plage allant de 10kHz à 40 kHz et. Cette plage de fréquences correspond à l'intervalle que nous allons utiliser par la suite.

IV.2.2.4 Comparaison entre le cas actif et le cas passif

Pour pouvoir faire la comparaison entre le cas actif et celui passif, l'intercorrélation obtenue précédemment doit être filtrée puis être par la suite comparée avec la fonction de Green (cas actif) fréquence par fréquence. Vu que la fréquence f_0 du signal d'émission est de 24 kHz (voir figure 51), nous décidons d'appliquer à l'intercorrélation un filtre de Hanning dont la réponse impulsionnelle est identique au signal utilisé dans le cas actif. Cette comparaison est représentée à la figure 56 ci-après.

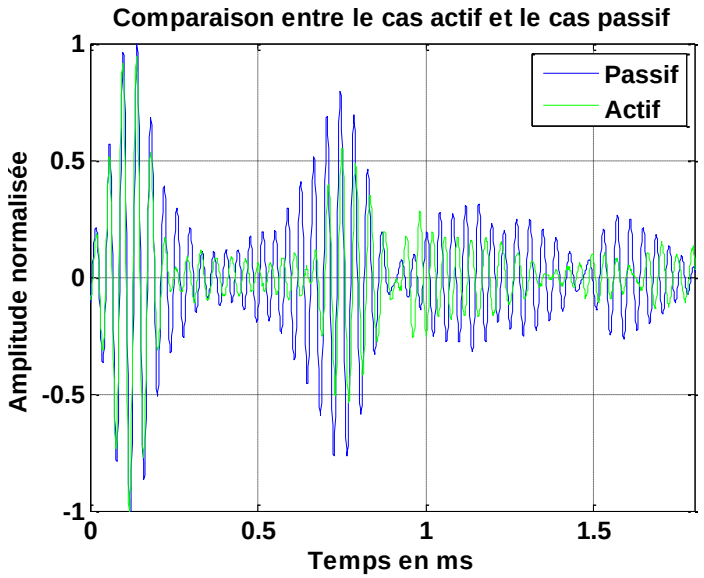
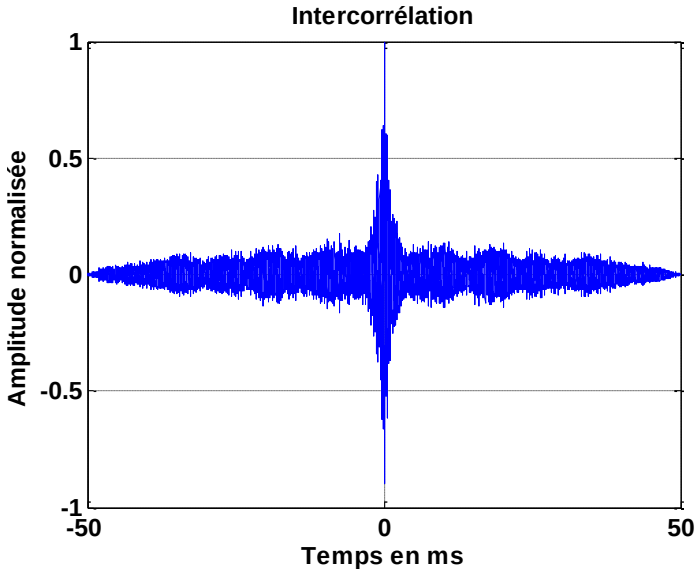


Figure 56 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=24 kHz.

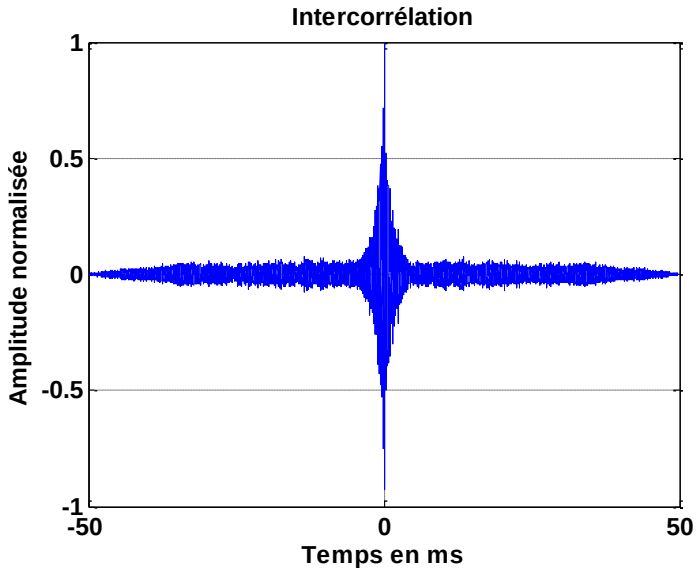
Ici, il apparaît clairement que l'intercorrélation n'est pas proportionnelle à la fonction de Green. Pour nous rapprocher de la notion de champ diffus, nous déplaçons la source à plusieurs emplacements quelconques sur la barre. Pour chacune de ces positions, nous calculons l'intercorrélation des signaux reçus sur les récepteurs R1 et R2 (M est toujours égal à vingt) pour finalement calculer la moyenne de toutes les intercorrélations obtenues.

IV.2.2.5 Estimation du nombre nécessaire de positions de la source

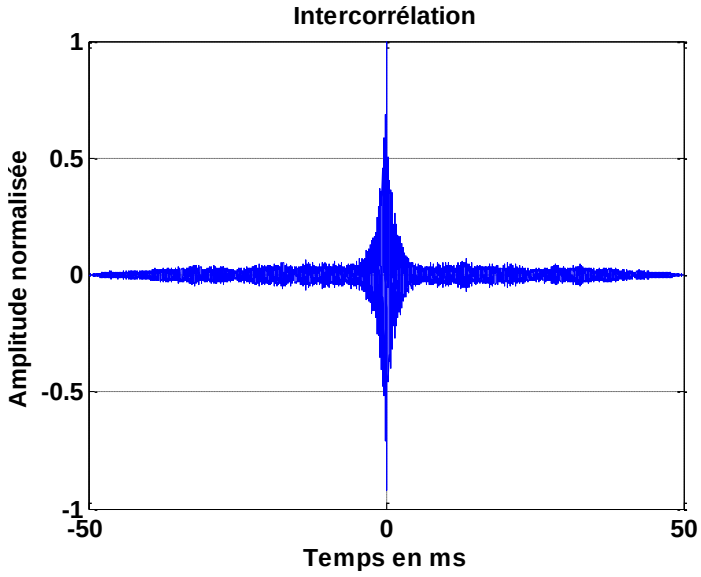
Plusieurs expériences ont été faites jusqu'à obtenir la convergence de l'intercorrélation moyenne, ce qui survient à partir de dix positions quelconques de la source. Par la suite, nous utiliserons cette intercorrélation moyenne stabilisée. La figure 57 suivante représente l'intercorrélation moyenne obtenue pour deux, cinq, neuf et dix positions différentes de la source.



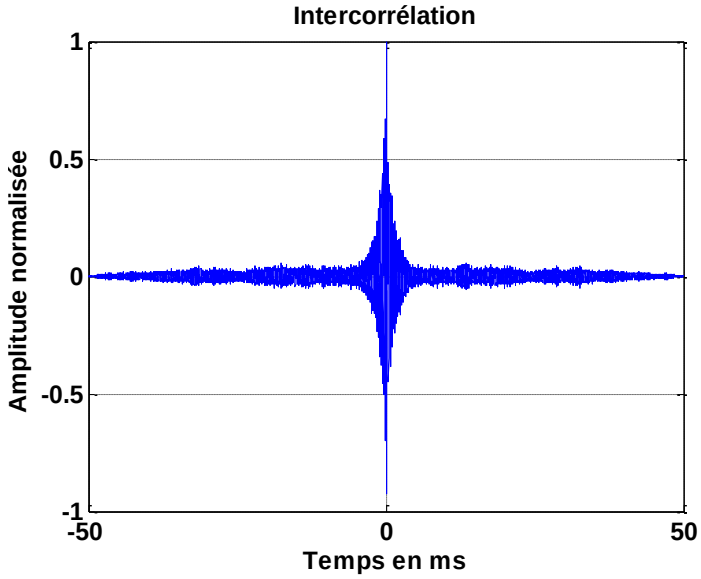
a)



b)



c)



d)

Figure 57 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation moyenne obtenue pour : a) deux positions, b) cinq positions, c) neuf positions, d) dix positions.

Comme précédemment, la superposition des parties causale et anticausale de la nouvelle intercorrélation obtenue permet de mieux en visualiser la symétrie. En toute logique, la symétrie obtenue doit être meilleur que celle obtenue précédemment. Cette superposition est représentée à la figure 58 suivante sur un intervalle de 0,5 ms.

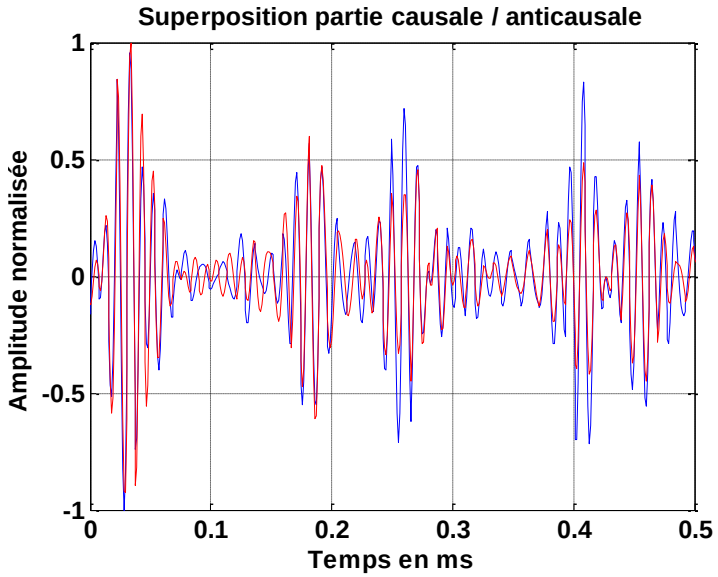


Figure 58 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Ici, nous remarquons que l'intercorrélation obtenue est presque parfaitement symétrique, ce qui rend plus efficace la comparaison entre le cas actif et celui passif. La figure 59 donne cette comparaison pour la même fréquence que celle d'avant (24 kHz).

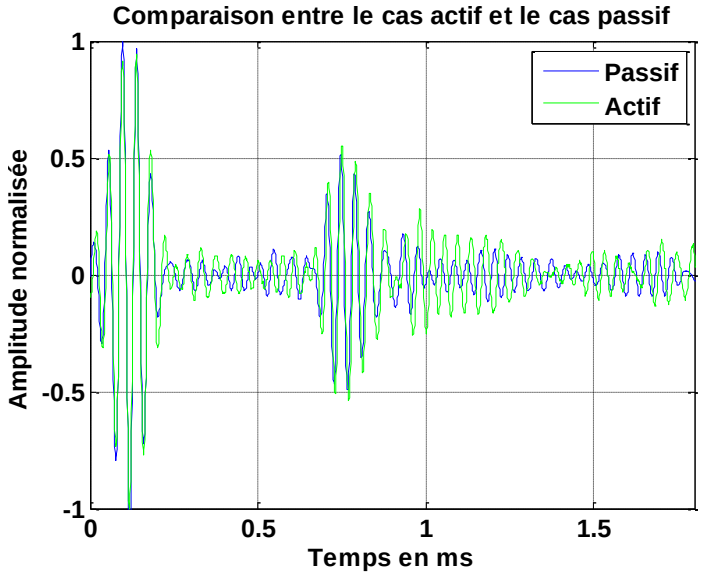


Figure 59 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=24 kHz.

Que ce soit du côté amplitude ou du côté distribution des paquets d'ondes, une bonne comparaison apparaît entre le cas actif et celui passif, ce qui permet d'avancer que la proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation est améliorée. Il est logique que

les deux signaux ne soient pas tout à fait identiques. En effet dans le cas réel, la condition d'un champ parfaitement diffus n'est pas vérifiée. Par ailleurs, le signal d'excitation n'est pas une impulsion de Dirac (c'est une sinusoïde fenêtrée), ce qui explique le léger déphasage entre les deux signaux au niveau des réflexions ainsi qu'une petite différence au niveau de l'amplitude. Mais malgré cela, la distribution des paquets d'ondes des deux signaux est quant à elle presque identique.

D'autre part, pour visualiser cette comparaison sur toutes les fréquences entre 15 kHz et 30 kHz (voir le spectre de l'intercorrélation à la figure 55), il est plus pertinent de tracer les images temps fréquence correspondantes au cas actif et passif. Pour le cas passif, nous répétons la démarche du filtrage décrite précédemment, tout en variant sa fréquence centrale f0 entre 15 kHz et 30 kHz. De même, pour le cas actif, nous réitérons la même démarche permettant d'obtenir la réponse impulsionnelle ou fonction de Green (figure 52), en variant toutefois la fréquence centrale du signal d'émission dans la même bande que celle du filtrage. La figure 60 donne l'image temps fréquence relative au cas passif, tandis que la figure 61 donne l'image temps fréquence relative au cas actif.

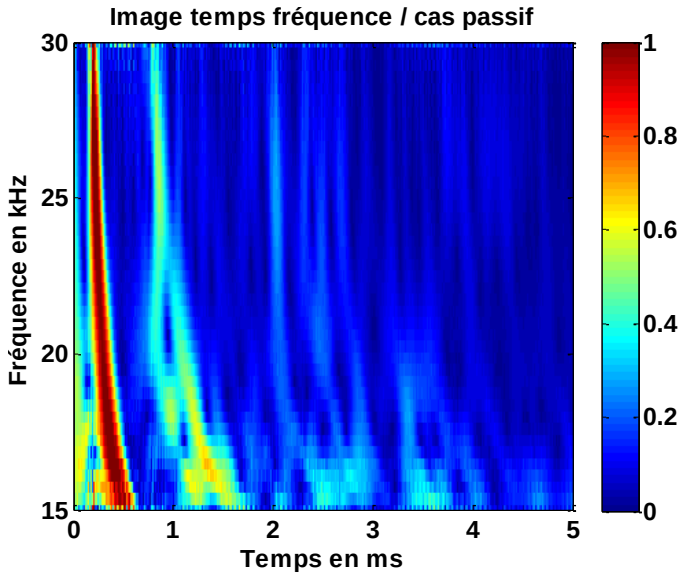


Figure 60 - Image temps fréquence relative au cas passif.

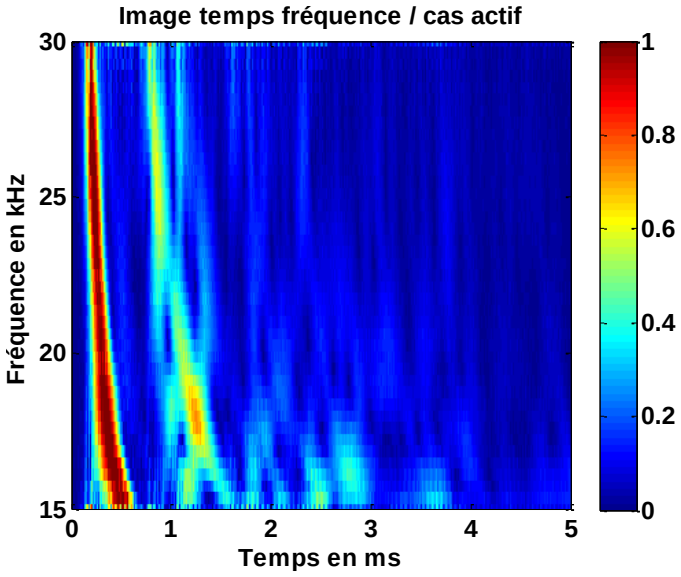


Figure 61 - Image temps fréquence relative au cas actif.

Les figures 60 et 61 montrent une bonne ressemblance surtout au niveau des deux premiers paquets d'ondes. Donc en s'approchant de la notion d'un champ diffus (en augmentant le nombre de positions de la source), l'intercorrélation moyenne tend à être symétrique. Ainsi nous améliorons la proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation.

Jusqu'à présent, les études faites sur la barre étaient des post-traitements. Elles avaient pour objectif de nous aider à comprendre et à s'approprier les études expérimentales. Or notre application appartenant au domaine du transport fluidique, ces études doivent être menées sur des tubes. La section suivante est consacrée à l'application du principe décrit et validé précédemment sur des tubes en aluminium et en acier.

IV.3 Tubes en aluminium et en acier

IV.3.1 Dispositif expérimental

Dans cette expérience deux types de tubes sont utilisés, l'un en aluminium et l'autre en acier. Ces tubes sont de 50 cm de longueur, de 5,6 cm de diamètre interne et de 1,5 mm d'épaisseur. De même que précédemment, un générateur de bruit est utilisé pour générer un champ aléatoire. Les transducteurs piézoélectriques utilisés pour l'émission et l'extraction des signaux sont identiques à ceux utilisés pour la barre, mais de 1 cm de diamètre. Ces récepteurs

sont collés sur les tubes avec la colle à prise rapide. De même, pour la partie acquisition, les signaux reçus sur l'oscilloscope (HP-33120A) sont transmis vers un ordinateur via un bus GPIB.

IV.3.2 Comparaison entre le cas actif et le cas passif – Tube en aluminium

Les transducteurs piézoélectriques sont distribués sur le tube de façon linéaire. Le paramétrage de leurs positions est représenté sur la figure suivante (figure 62):

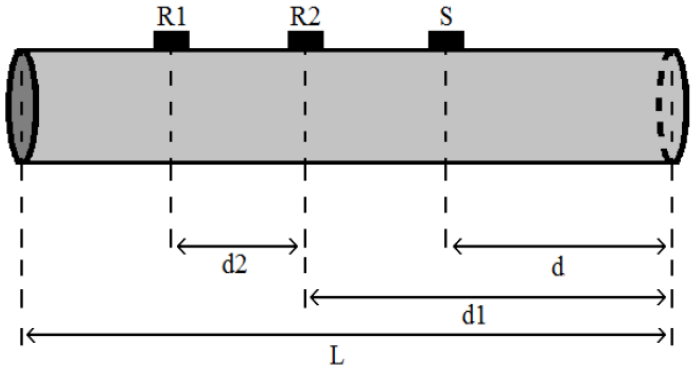


Figure 62 - Positionnement des transducteurs sur le tube en aluminium.

Ici L=50 cm, d1=28,2 cm, d2=5 cm. Dans cet essai, nous commençons directement par dix positions de la source. Celle-ci est déplacée linéairement d'une distance d qui varie de 5,5 cm à 14,5 cm, avec un pas de 1 cm. Pour chaque position de S, les signaux reçus sur les récepteurs R1 et R2 sont extraits et leurs intercorrélations sont calculées (M=20, voir équation 3.14) puis moyennées. La figure 63 ci-dessous représente la superposition de la partie causale et anticausale de l'intercorrélation moyenne obtenue, sur une durée de 0.5 ms.

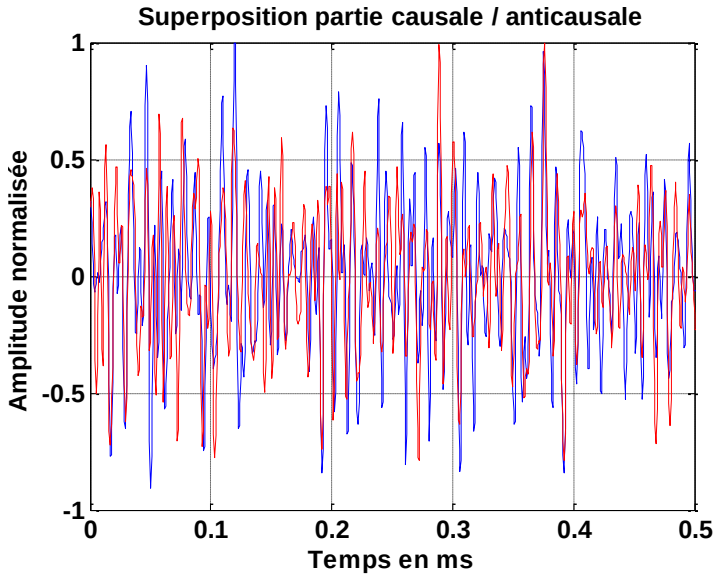


Figure 63 - Superposition de la partie causale et anticausale.

L'intercorrélation obtenue n'est pas symétrique, donc la comparaison du cas actif à celui passif ne sera pas fructueuse. Pour savoir pour quelles fréquences la comparaison doit être faite, nous traçons le spectre de l'intercorrélation obtenue (voir figure 64).

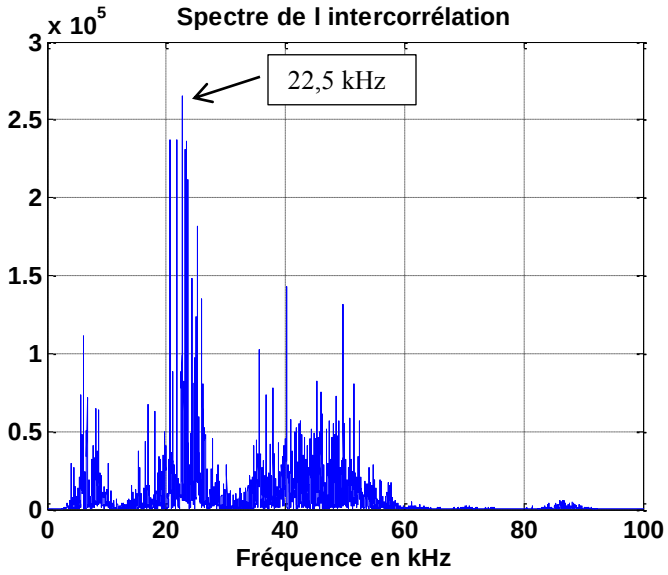


Figure 64 - Spectre de l'intercorrélation.

Les fréquences contenues dans l'intercorrélation varient majoritairement entre 5kHz à 60 kHz. Donc pour mener la comparaison entre le cas actif et celui passif, nous filtrons l'intercorrélation obtenue avec le même signal que celui d'émission en actif et ayant comme

fréquence centrale entre 5 kHz et 60 kHz. La figure 65 représente cette comparaison pour une fréquence de 22,5 kHz.

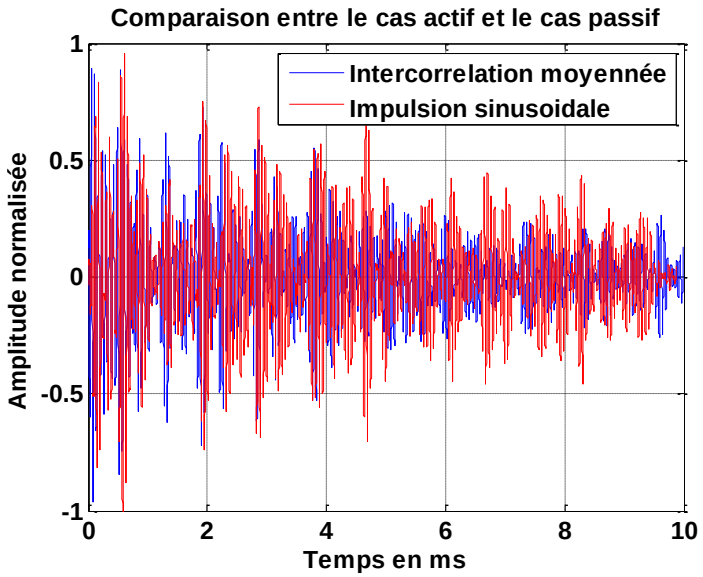


Figure 65 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=22.5 kHz.

La comparaison obtenue n'est pas satisfaisante puisque l'intercorrélation obtenue ne converge pas vers la fonction de Green. Normalement plus la structure est grande, plus la corrélation se fait sur une durée plus importante. Donc, en mélangeant les paquets d'ondes, nous aurons tous les trajets possibles d'ondes qui se propagent (trajets directs + séries de réflexions), ce qui donne une meilleure convergence vers la fonction de Green. Or étant donné que la dimension du tube n'est pas tellement suffisante, la solution est donc d'augmenter le nombre d'acquisitions en déplaçant la source partout sur le tube de sorte à engendrer presque tous les trajets possibles.

Pour ce faire, nous remplaçons la source S par un jet d'air comprimé assimilé à une source de bruit. Ce jet d'air comprimé est ainsi déplacé de façon à balayer toute la surface extérieure du tube, tout en gardant les mêmes positions des récepteurs R1 et R2. Les mesures faites ont montré qu'à partir de cent cinquante acquisitions (équivalentes à cent cinquante positions aléatoires de la source), l'intercorrélation moyenne devient constante. Pour chaque acquisition, nous calculons alors l'intercorrélation des signaux reçus par les récepteurs R1 et R2, puis la moyenne de toutes les intercorrélations obtenues pour les cent cinquante acquisitions. La figure 66 représente le spectre de l'intercorrélation moyenne obtenue, et la figure 67 représente

la superposition de ses parties causale et anticausale. La comparaison entre le cas actif et passif est représentée à la figure 68.

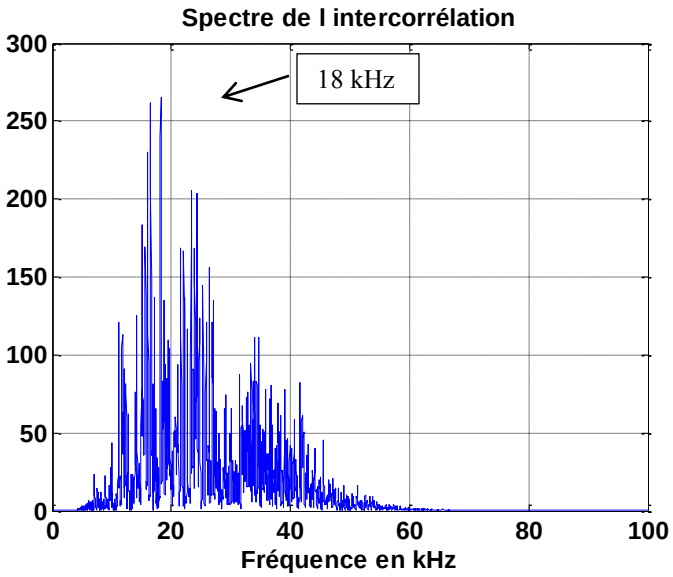


Figure 66 - Spectre de l'intercorrélation.

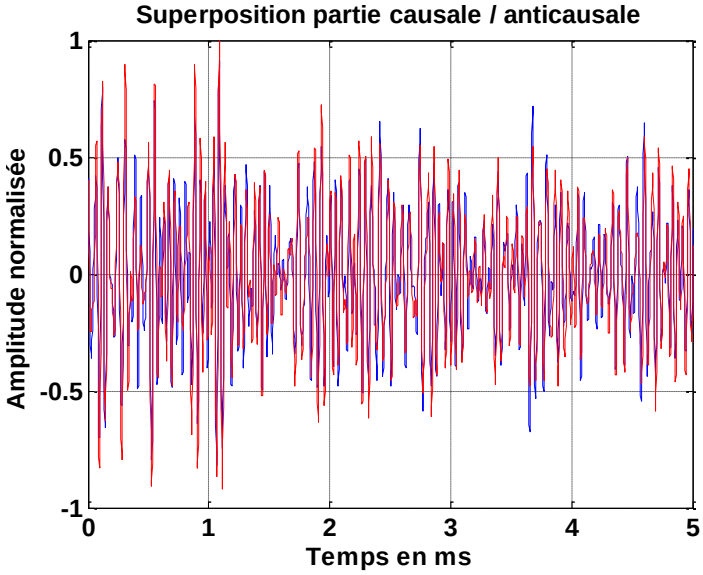


Figure 67 - Superposition de la partie causale et anticausale.

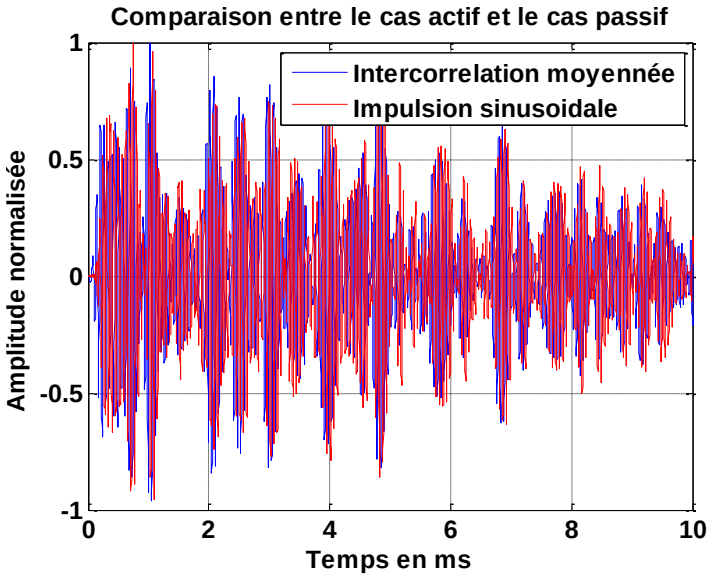


Figure 68 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=18 kHz.

Dans ce cas-là, l'intercorrélation obtenue est symétrique. Même une très bonne ressemblance apparaît clairement entre le cas actif et le cas passif. D'autre part les images temps fréquence correspondantes à ces deux cas permettent de voir cette comparaison sur toutes les fréquences entre 10 kHz et 30 kHz (zone riche en fréquence, voir figure 71). Les figures 69 et 70 donnent ces images relatives au cas passif et actif respectivement.

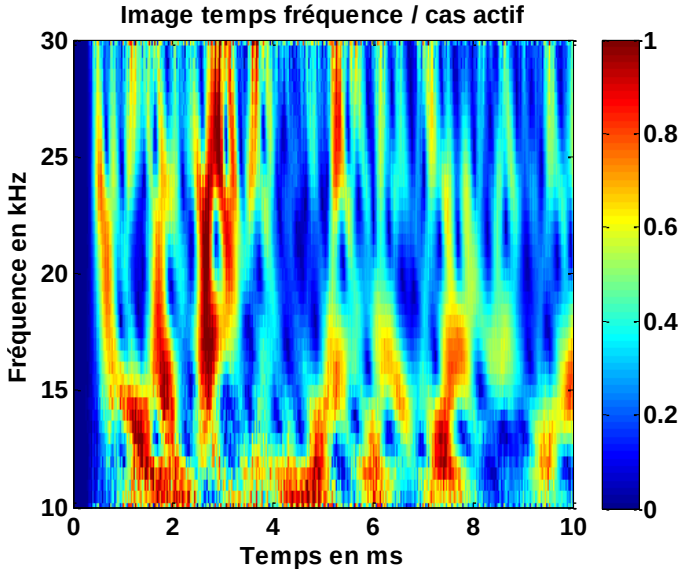


Figure 69 - Image temps fréquence relative au cas actif.

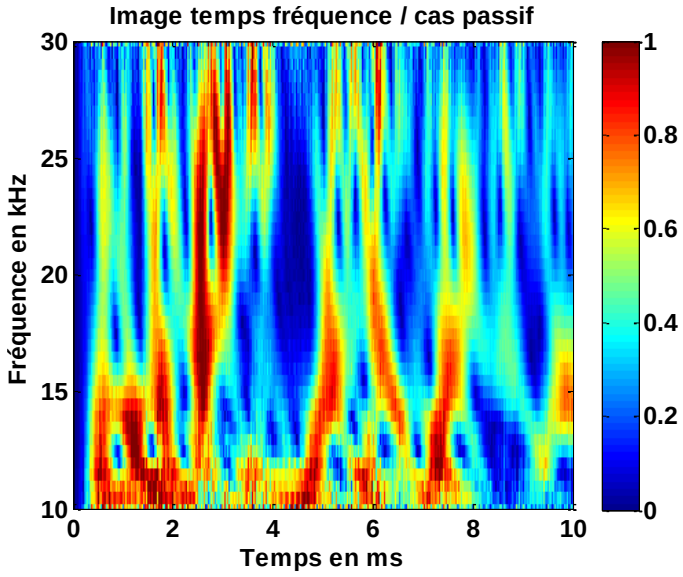


Figure 70 - Image temps fréquence relative au cas passif.

De même, on remarque une grande ressemblance entre les graphes des figures 69 et 70 surtout au niveau de la distribution des paquets d'ondes, avec toutefois à quelques différences au niveau de l'amplitude. Donc comme déjà mentionné auparavant, le rapprochement de la notion de champ diffus améliore la convergence vers la fonction de Green.

IV.3.3 Comparaison entre le cas actif et le cas passif – Tube en acier

Dans le cas du tube en acier, et pour ne pas répéter les mêmes démarches que celles menées pour le tube en aluminium pour une seule position de la source et pour dix positions de la source, nous réutilisons directement le jet d'air comprimé. Ici seul le matériau du tube a été changé à isodimensions et à isopositions des récepteurs R1 et R2. Dans ce cas, cent acquisitions sont suffisantes (en sachant que M est aussi égale à vingt dans ce cas-là, voir équation 3.14). La figure 71 représente le spectre de l'intercorrélation et la figure 72 illustre la superposition de la partie causale et anticausale.

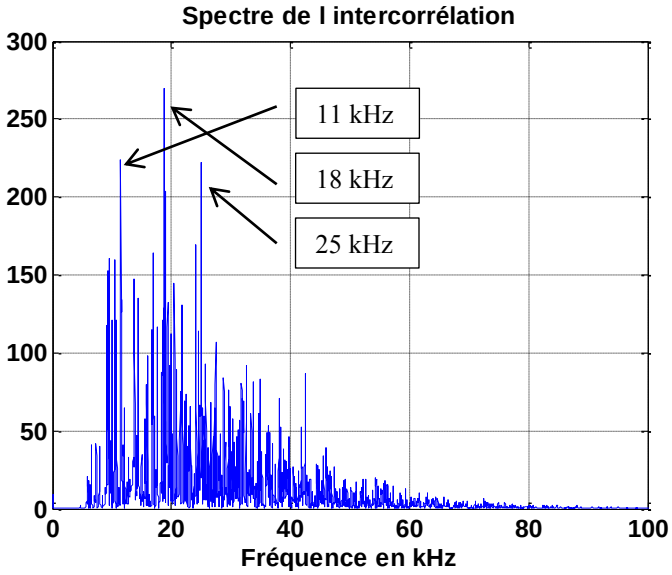


Figure 71 - Spectre de l'intercorrélation.

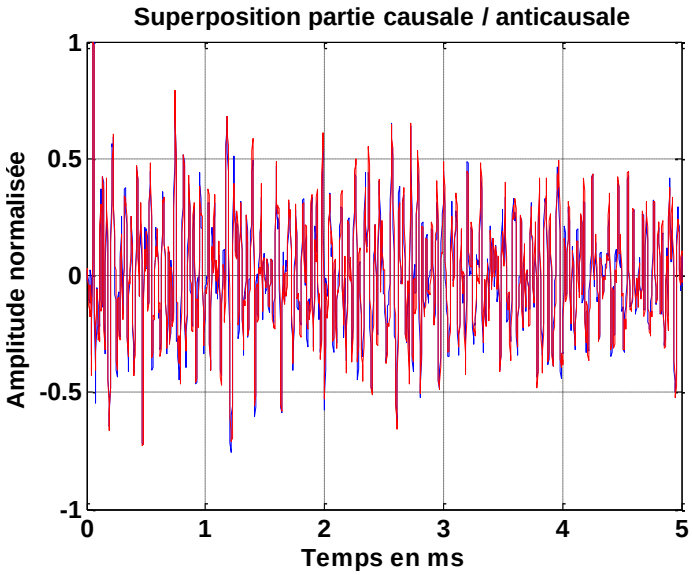


Figure 72 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Cette intercorrélation obtenue est symétrique, ce qui va donner une très bonne proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation, donc une très bonne comparaison entre le cas actif et celui passif. La figure 73 donne cette comparaison pour une fréquence de 11 kHz.

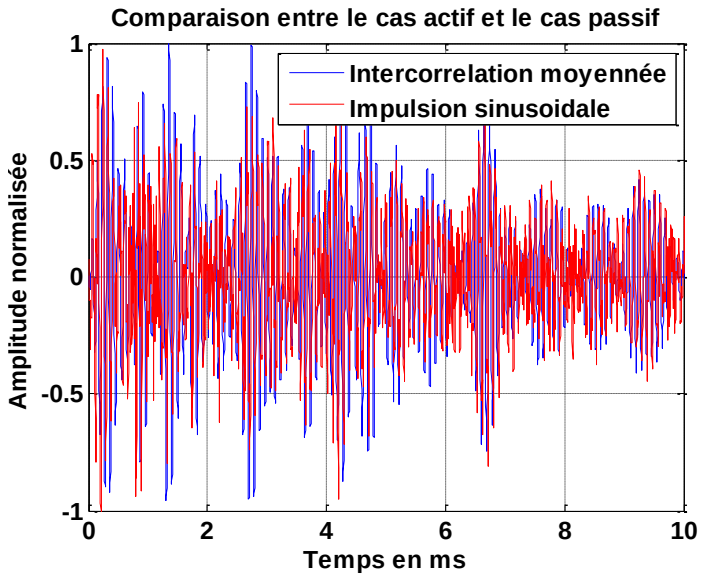


Figure 73 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=11 kHz.

De même, nous remarquons cette très bonne ressemblance entre les deux cas : actif et passif. Pour enrichir nos résultats, les deux figures suivantes illustrent une comparaison entre le cas actif et celui passif pour d'autres fréquences 18 kHz sur la figure 74 et 25 kHz sur la figure 75.

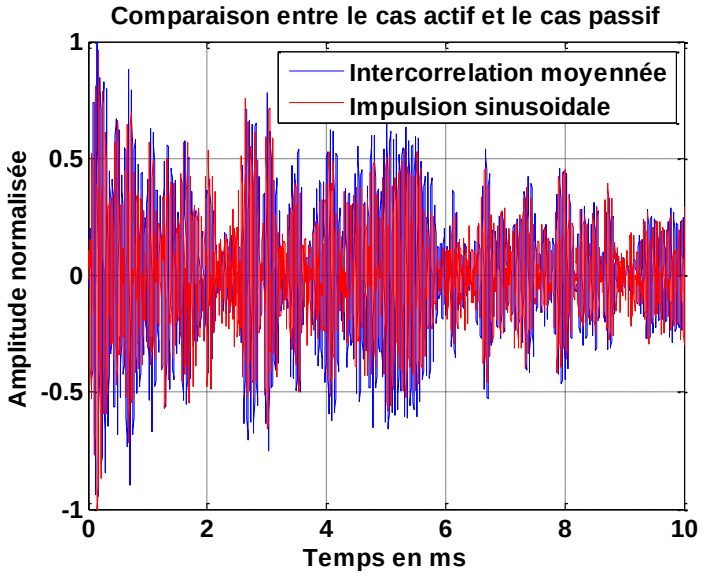


Figure 74 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=18 kHz.

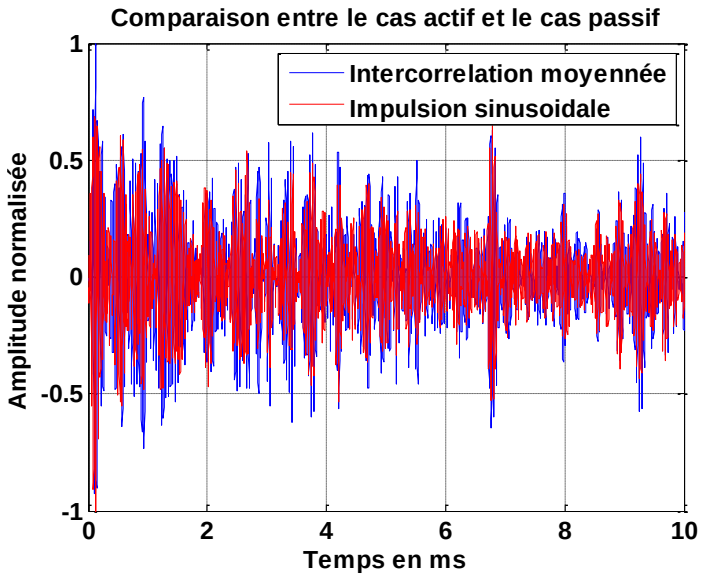


Figure 75 - Comparaison entre le cas actif et celui passif pour f0=25 kHz.

Nous pouvons tirer la même conclusion qu'avec le tube en aluminium : il existe une très étroite ressemblance entre le cas actif et celui passif surtout au niveau de la distribution des paquets d'ondes, avec là également, quelques différences au niveau de l'amplitude.

Dans la suite, nous décidons de continuer avec le tube en acier qui nécessite moins d'acquisitions que le tube en aluminium.

IV.4 Introduction de défaut dans le tube en acier

Dans cette section, le même tube en acier est utilisé. Un défaut est introduit entre les deux récepteurs en gravant le tube par tournage. Trois défauts de largeurs w1=2,1 mm, w2=5,7 mm et w3=9,2 mm ont été considérées.

Puis, pour étudier l'influence de la largeur du défaut sur l'intercorrélation obtenue, l'image temps fréquence correspondante est extraite, puis y est appliqué l'algorithme de comparaison expliqué au chapitre 2. Ici, l'image obtenue dans le cas sans défaut est prise comme image de référence. À noter que dans les trois cas suivants, cent acquisitions sont faites (M est toujours égal à vingt, voir équation 3.14).

La figure 76 suivante donne les positions des récepteurs et du défaut.

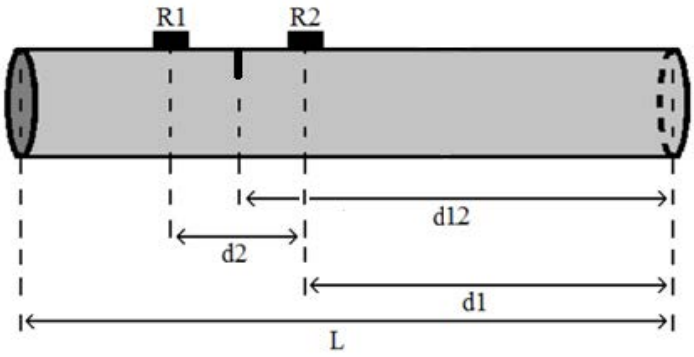


Figure 76 - Positionnement des transducteurs et du défaut sur le tube en acier.

Ici, L= 50 cm, d1= 28,2 cm, d2= 5 cm et d12, et la distance entre l'extrémité gauche du tube et l'extrémité gauche du défaut et est égale à 30,7 cm.

La figure 77 représente le spectre de l'intercorrélation obtenue dans le cas sans défaut.

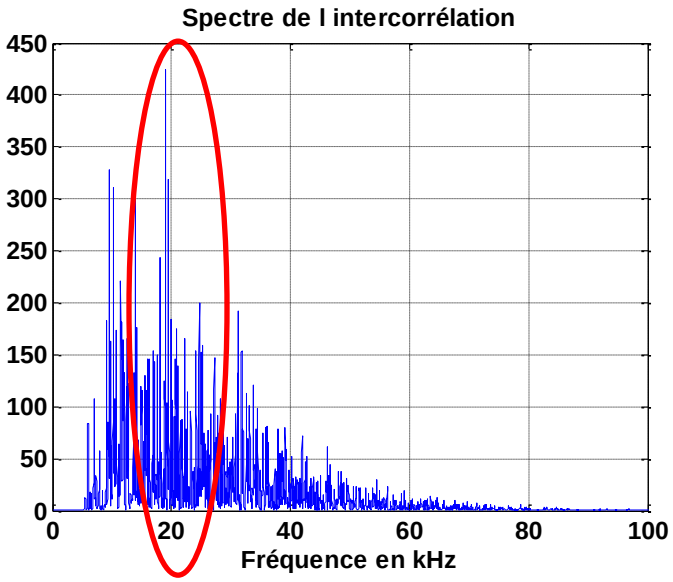


Figure 77 - Spectre de l'intercorrélation.

Notre choix s'est orienté vers la bande de fréquence allant de 13 kHz à 27 kHz (zone encerclée en rouge). La figure 78 illustre les images temps fréquences sans et avec des défauts de largeurs différentes.

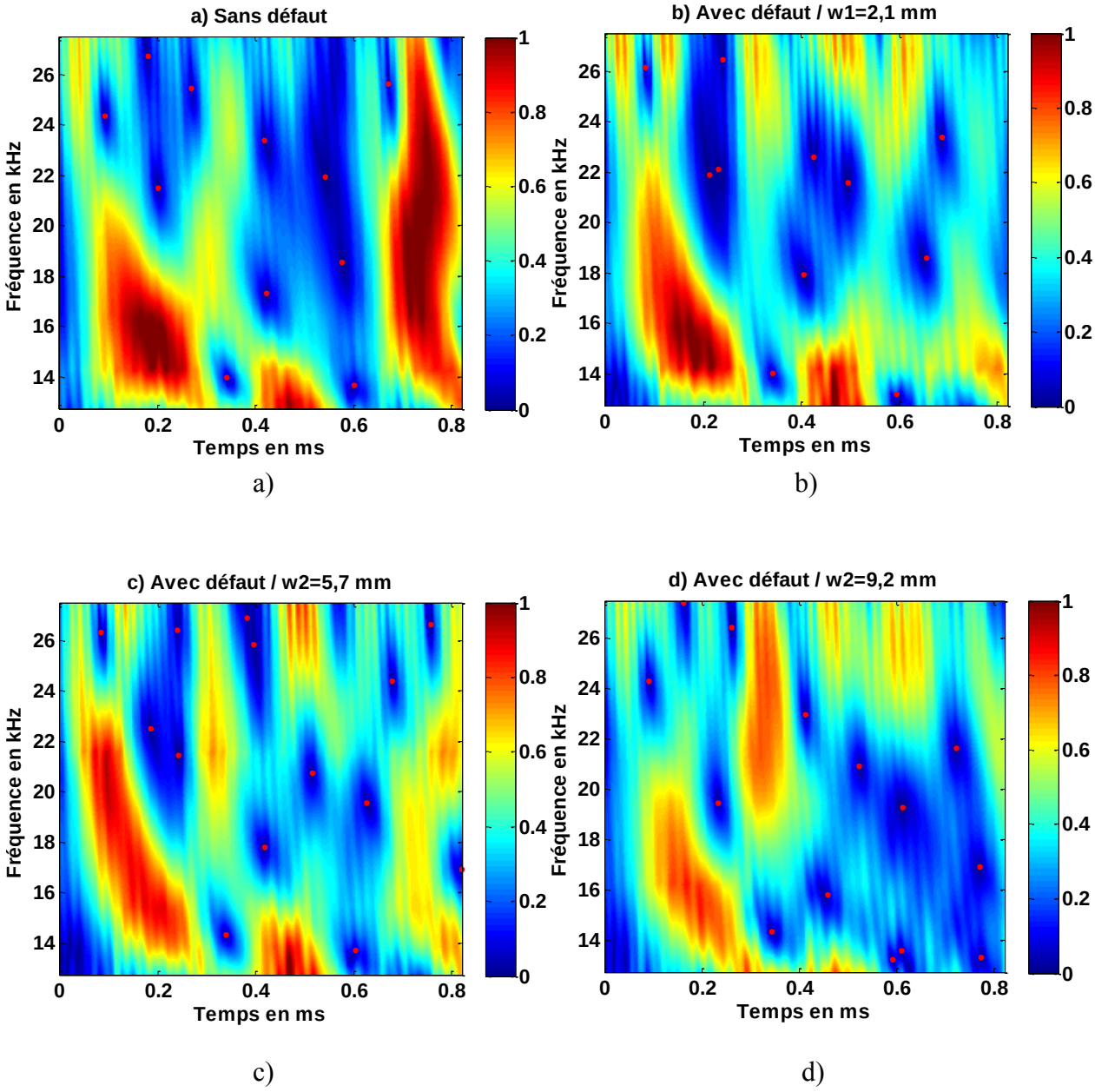


Figure 78 - Images temps fréquence, a) sans défaut, b) w1=2,1 mm, c) w2=5,7 mm, d) w3=9,2 mm.

Une fois les images temps fréquence sont prélevées, l'algorithme de comparaison extrait les minimums locaux et calcule le taux de ressemblance entre les différentes images de la figure 78 avec l'image de la figure 78 a) comme référence. Ce calcul est représenté dans le tableau 3 suivant.

Images	Sans défaut	w1	w2	w3
Taux de ressemblance	100 %	76,16 %	71,32 %	68,08 %

Tableau 3 - Tableau récapitulatif des taux de ressemblance entre toutes les images des largeurs du défaut et celle de référence

D'après le tableau précédant, nous voyons que le taux de ressemblance diminue lorsque la largeur du défaut augmente, ce qui signifie que la ressemblance entre les images devient de plus en plus mauvaise.

Dans la section suivante, l'écoulement turbulent de l'eau dans les tubes sera utilisé comme source de bruit. Tout d'abord une brève introduction sur le nombre de Reynolds sera donnée avant d'aborder l'illustration des résultats expérimentaux obtenus.

IV.5 Écoulement turbulent de l'eau

IV.5.1 Nombre de Reynolds

Pour un écoulement fluide à une vitesse caractéristique U, de dimension caractéristique L, de masse volumique μ et de viscosité η, le nombre de Reynolds caractéristique est représenté par la formule suivante :

$$\mathrm{Re} = \frac{\mu UL}{\eta} = \frac{UL}{\nu} \qquad (4.\ 1)$$

où $\nu = \frac{\eta}{\mu}$ est la viscosité cinématique du fluide et la longueur caractéristique L le diamètre de la conduite.

La plupart des écoulements couramment rencontrés dans la vie quotidienne sont caractérisés par Re >>1. Les écoulements à faible nombre de Reynolds correspondent aux vitesses très faibles, aux dimensions très petites, ou aux fluides très visqueux.

Pour un écoulement turbulent de fluide, le nombre de Reynolds est supérieur à 3000. Lorsque ce dernier est inférieur à 2000, l'écoulement est dit laminaire. Pour un nombre de

Reynolds entre ces deux valeurs, on parle d'un régime de transition où l'écoulement fluctue entre régime laminaire et turbulent.

IV.5.2 Pompe de débit 25 L/min

Dans cette section, une étude expérimentale menée sur le tube en acier précédant, en utilisant l'écoulement turbulent de l'eau comme une source acoustique naturelle, sera discutée. Une pompe ayant comme débit, 25 L/min est utilisée pour écouler l'eau dans le système. Pour la partie acquisition, les signaux reçus sur une carte d'acquisition (NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6251) sont transmis vers un ordinateur via un câble USB. La figure suivante représente le dispositif de mesure.



Figure 79 - Dispositif de mesure.

Cette section sera divisée en plusieurs parties, où les mesures sont faites avec deux types de transducteurs et des préamplificateurs avec et sans filtre.

IV.5.2.1 Utilisation de transducteurs piézoélectriques (FT-27T)

i. Utilisation de préamplificateurs avec filtres

Dans un premier temps, les transducteurs piézoélectriques (FT-27T) de 1 cm de diamètre utilisés précédemment sont utilisés. Le placement de ces récepteurs est identique à celui sur le tube sans défaut précédant.

Trois cents acquisitions de signaux reçus sur les récepteurs R1 et R2 sont effectuées, et pour chacune, l'intercorrélation est calculée (avec toujours M égale à vingt) puis moyennée. La figure 80 ci-dessous représente l'intercorrélation moyenne obtenue et la figure 81 représente la superposition de sa partie causale et anticausale sur une durée de 50 ms.

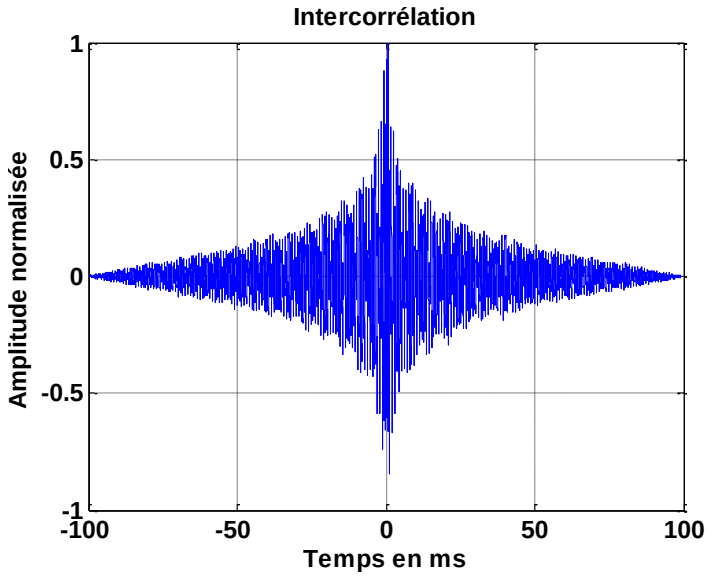


Figure 80 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation des signaux reçus en R1 et R2.

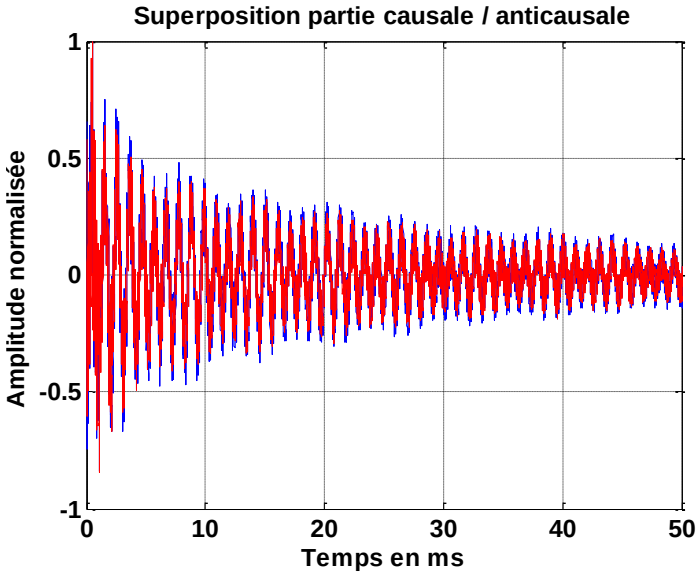


Figure 81 - Superposition de la partie causale et anticausale.

La figure 81 montre qu'il existe une fréquence dominante et quelques fréquences de faibles puissances. Pour visualiser ces fréquences, nous traçons le spectre de l'intercorrélation précédente (figure 82).

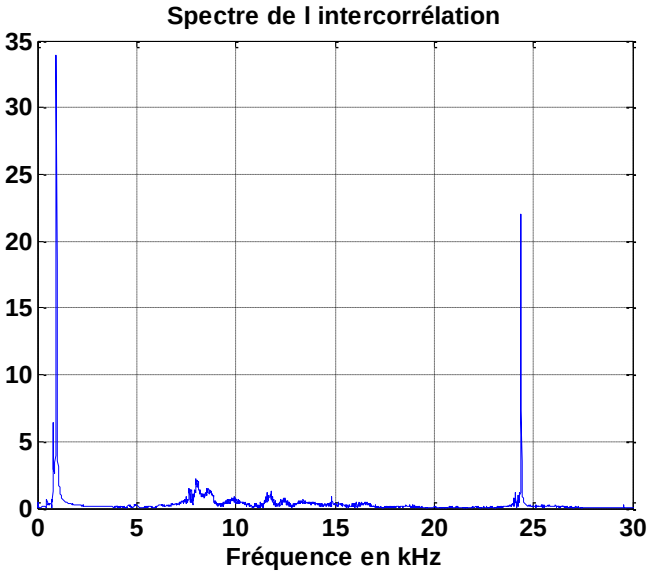


Figure 82 - Spectre de l'intercorrélation.

Deux fréquences dominent à 960 Hz et 24 kHz, avec quelques fréquences intermédiaires. Dans la sous-section suivante, le filtre qui se trouve dans les préamplificateurs est désactivé pour estimer son impact sur le contenu fréquentiel du spectre de l'intercorrélation.

ii. Utilisation de préamplificateurs sans filtres

L'essai précédent est repris en utilisant l'écoulement turbulent de l'eau comme source de bruit, et en débranchant le filtre passe-bas qui se trouve dans les préamplificateurs. Ces derniers sont des filtres passe-bas de fréquence de coupure égale à 10 kHz.

Les mêmes transducteurs sont utilisés (FT-27T) pour trois cents nouvelles acquisitions (M est toujours égale à vingt). La figure 83 ci-dessous représente l'intercorrélation moyenne obtenue tandis que la figure 84 représente la superposition de la partie causale et anticausale de cette dernière.

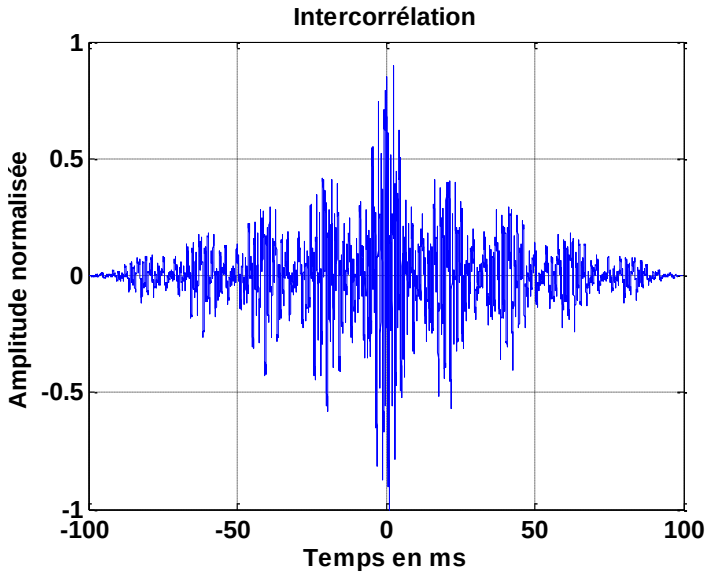


Figure 83 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation des signaux reçus en R1 et R2.

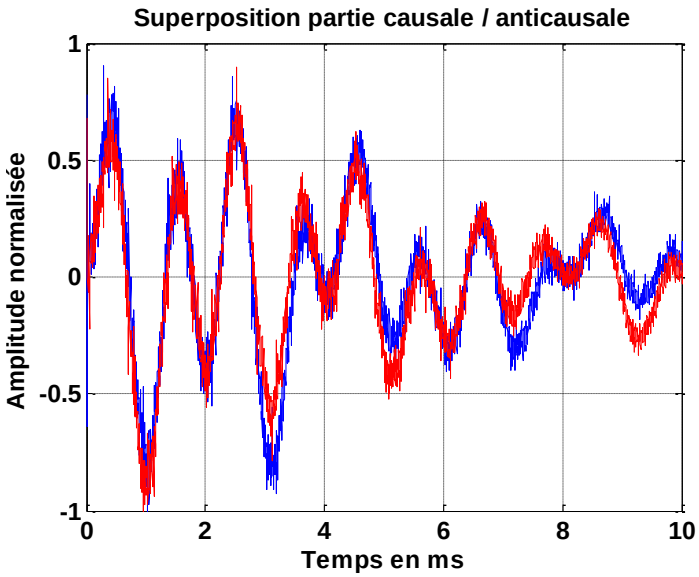


Figure 84 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Là, une fréquence est dominante avec quelques fréquences de faible puissance dans le signal d'intercorrélation. Ceci est visualisable à la figure 85 ci-dessous représentant le spectre de l'intercorrélation moyenne obtenue.

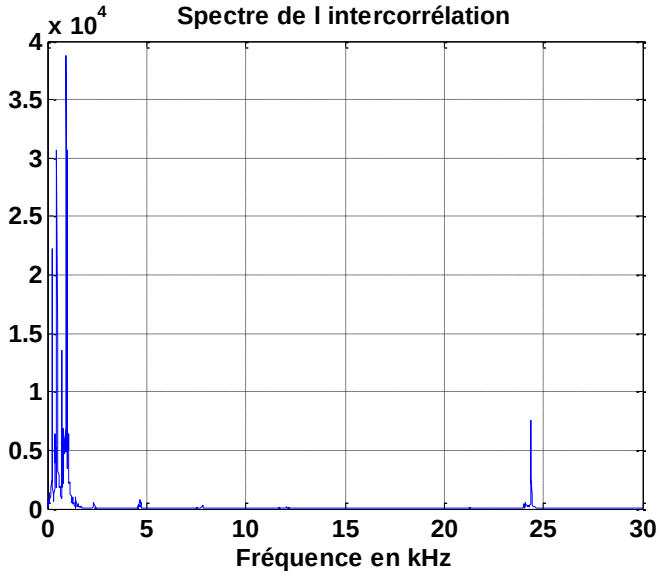


Figure 85 - Spectre de l'intercorrélation.

IV.5.2.2 Utilisation de transducteurs R3α

Les récepteurs utilisés sont des transducteurs R3α représentés à la figure 86 ci-dessous. Ces derniers résonnent à une fréquence égale à 22,46 kHz.



Figure 86 - Transducteur R3α.

Nous plaçons ces transducteurs aux mêmes endroits que ceux utilisés précédemment et trois cents nouvelles acquisitions sont effectuées (M est toujours égale à vingt). Les figures 87 et 88 ci-après représentent respectivement l'intercorrélation moyenne et la superposition de sa partie causale et anticausale agrandie sur 1 ms.

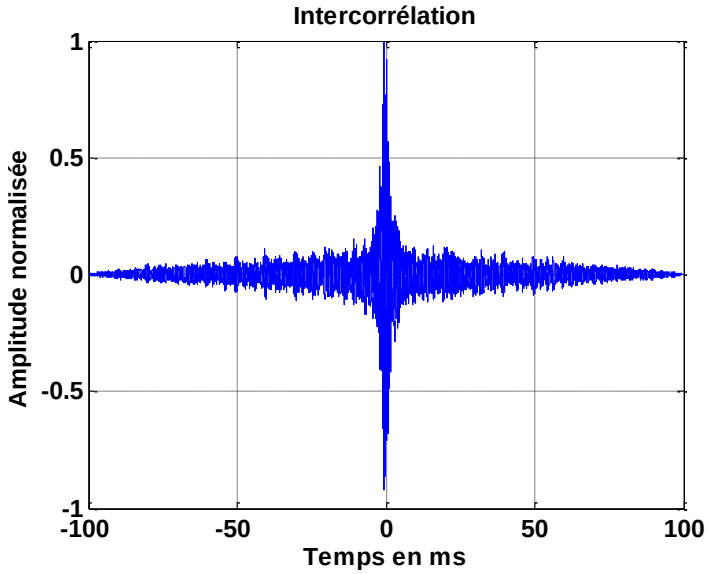


Figure 87 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation des signaux reçus en R1 et R2.

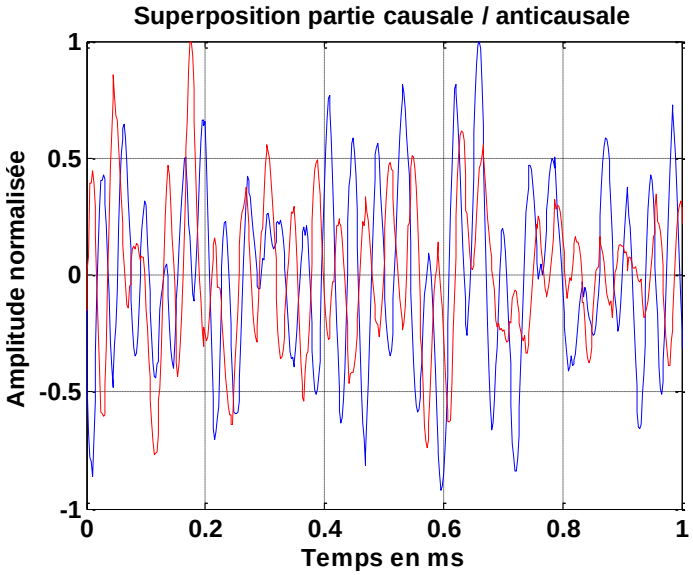


Figure 88 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Dans ce cas, le nombre de fréquences contenues dans cette intercorrélation a augmenté. Cela étant, cette dernière n'est pas symétrique. La figure 89 représente le spectre correspondant.

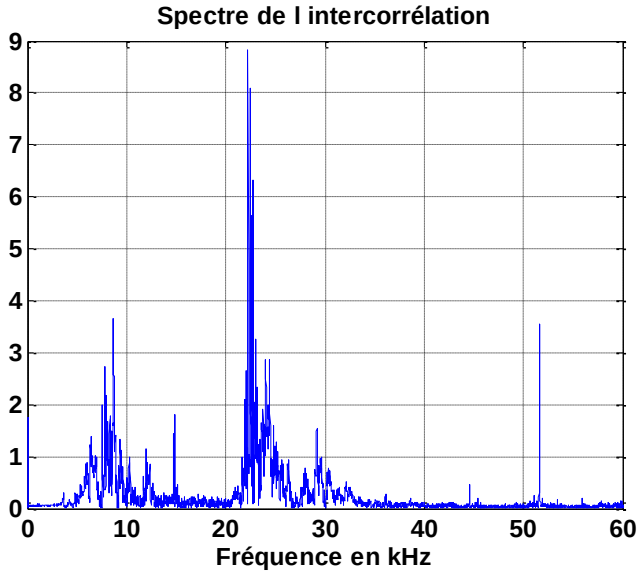


Figure 89 - Spectre de l'intercorrélation.

Nous remarquons qu'en utilisant les transducteurs R3α, le contenu fréquentiel a augmenté bien que dans tous les cas ces spectres sont faibles.

Les essais précédents ont montré qu'avec les transducteurs R3α, les résultats sont meilleurs qu'avec les pastilles (FT-27T), mais pourtant, ces résultats ne nous permettent pas de faire un contrôle santé fiable, vu que les intercorrélations obtenues ne sont pas du tout symétriques, et leurs spectres sont pauvres en fréquence. L'étape suivante a été de travailler avec une pompe au débit plus grand, pour voir ce qu'on obtient comme résultat.

IV.5.3 Pompe de débit 250 L/min

Cette sous-section présente une extension de l'étude expérimentale précédente menée sur le tube en acier, en utilisant l'écoulement turbulent de l'eau comme une source acoustique naturelle. Une pompe assurant un débit 250 L/min est utilisée pour écouler l'eau dans le système. Le même tube est utilisé ainsi que les mêmes transducteurs R3α. Ces derniers sont toujours aux mêmes endroits sur le tube.

De même, trois cents acquisitions des signaux reçus sur les récepteurs R1 et R2 sont effectuées et pour chaque acquisition, les intercorrélations de ces signaux sont calculées avant d'être moyennées (M est égale à vingt). La figure 90 ci-dessous représente l'intercorrélation moyenne obtenue et la figure 91 représente la superposition de sa partie causale et anticausale agrandie sur 1 ms.

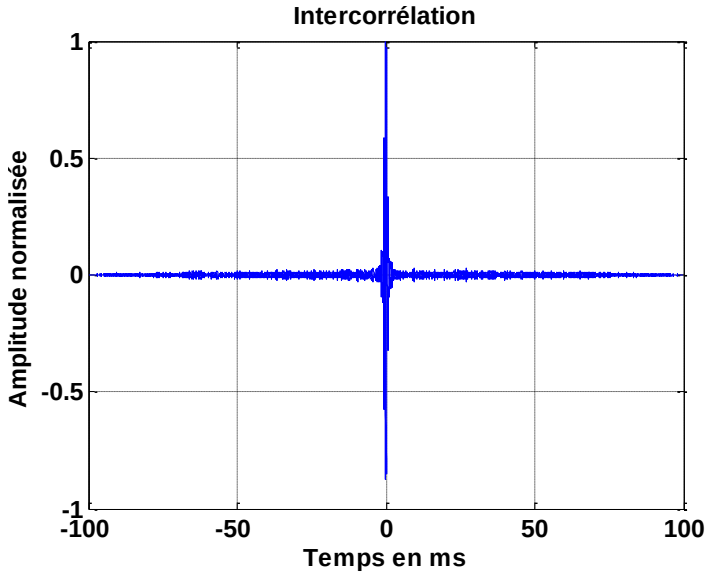


Figure 90 - Amplitude normalisée de l'intercorrélation des signaux reçus en R1 et R2.

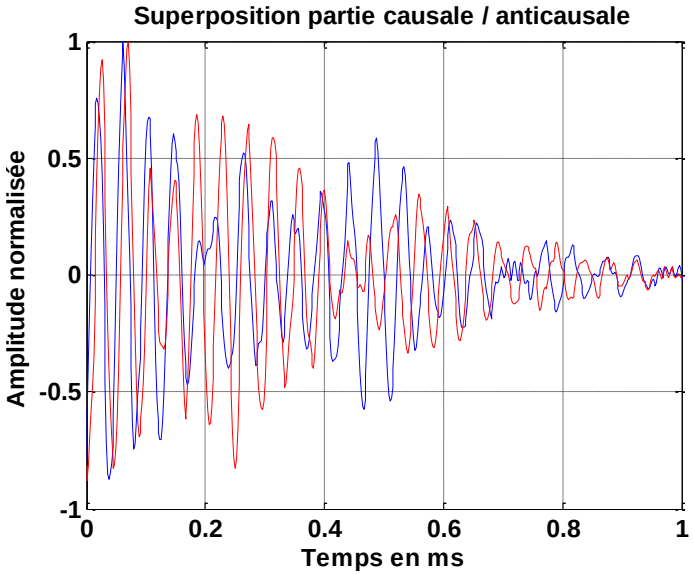


Figure 91 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Ici, il existe deux fréquences dominantes et d'autres de faible puissance. Pour visualiser ces fréquences, nous traçons le spectre de l'intercorrélation précédente. Ce spectre est représenté à la figure 92 suivante.

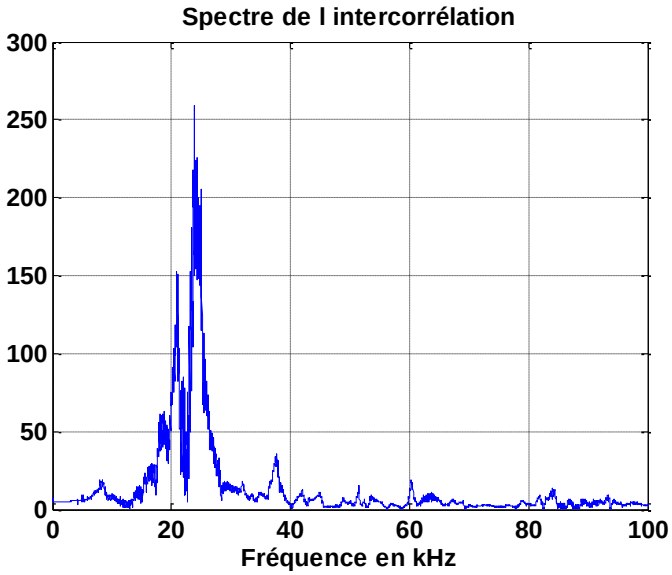


Figure 92 - Spectre de l'intercorrélation.

On remarque deux fréquences dominantes à 20 et 24 kHz et d'autres minoritaires ces deux valeurs.

Toutes les mesures ont été faites avec les transducteurs disponibles au laboratoire, et les résultats obtenus étaient inexploitables avec l'eau comme source de bruit. En effet, les fréquences contenues dans le signal du bruit généré dans le tube et celles de résonnance des transducteurs sont inadaptées.

D'autre part dans les quatre expériences précédentes, un pic de fréquence à 24 kHz est toujours présent dans le spectre de l'intercorrélation. Celui-ci est dû à la vibration mécanique causée par la pompe tandis que les autres fréquences sont dues à l'écoulement turbulent de l'eau. Partant de ce constat, et dans la sous-section suivante, un filtre de Butterworth sera utilisé comme filtre passe-bande pour pouvoir travailler avec les zones de fréquence intéressantes du spectre de l'intercorrélation.

IV.6 Filtrage passe-bande

En un premier temps, l'intercorrélation obtenue à la Figure 80 est filtrée à l'aide du filtre de Butterworth possédant f1=6420 kHz et f2= 9380 kHz comme fréquences de coupure. La figure 93 représente le spectre de l'intercorrélation obtenu après le filtrage et la figure 94 représente la superposition de la partie causale et anticausale.

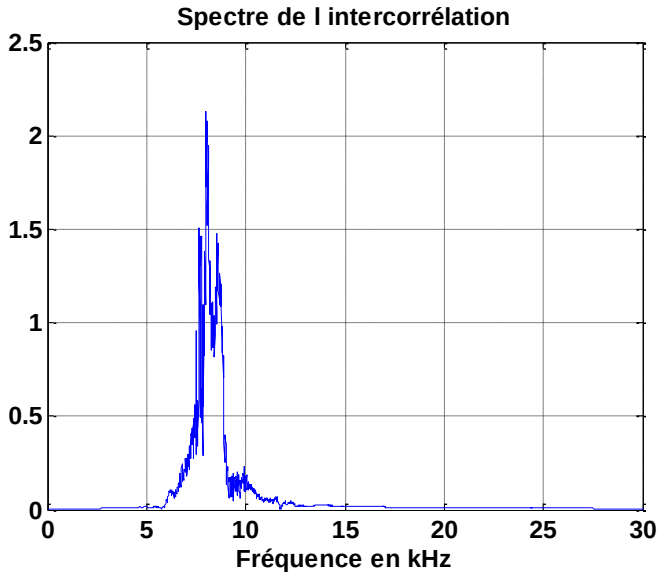


Figure 93 - Spectre de l'intercorrélation.

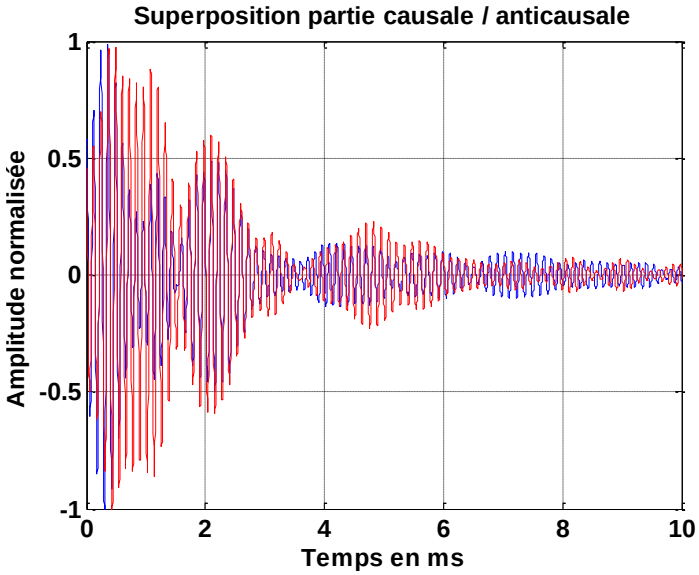


Figure 94 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Dans un deuxième temps, le filtrage est appliqué à l'intercorrélation obtenue à la figure 83. Les fréquences de coupure sont f1=150 kHz et f2= 1150 kH. La figure 95 illustre le spectre de l'intercorrélation obtenu après le filtrage et la figure 96 représente la superposition de la partie causale et anticausale.

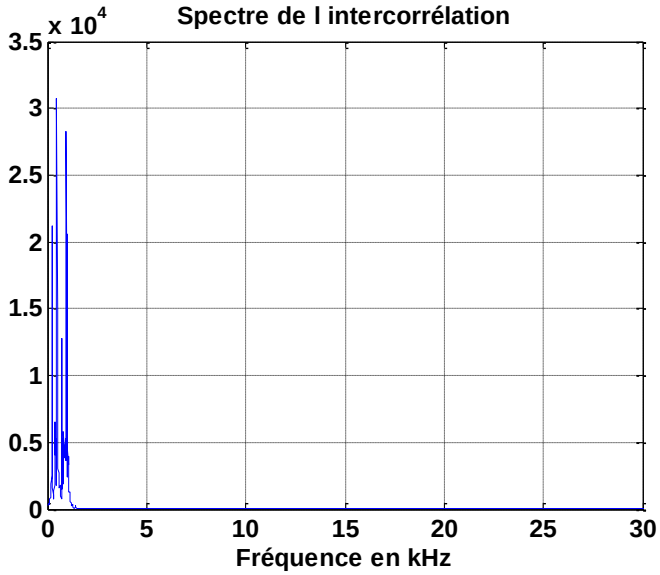


Figure 95 - Spectre de l'intercorrélation.

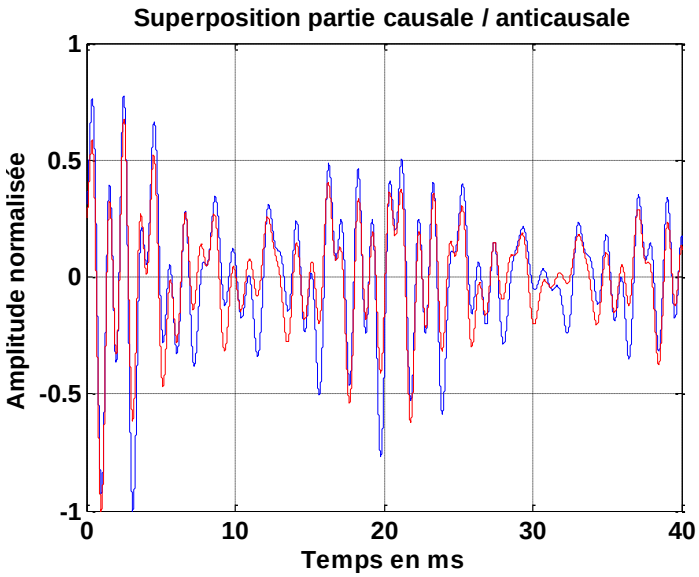


Figure 96 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Dans un troisième temps, le filtre de Butterworth ayant f1=8500 kHz et f2= 9000 kHz comme fréquences de coupure est appliqué à l'intercorrélation obtenue à la figure 87. Le spectre de l'intercorrélation obtenu après le filtrage est représenté à la figure 97 et la figure 98 illustre la superposition de la partie causale et anticausale.

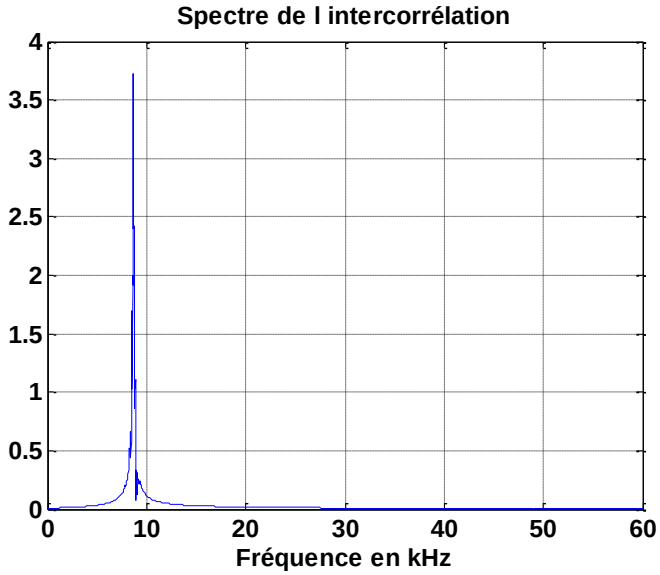


Figure 97 - Spectre de l'intercorrélation.

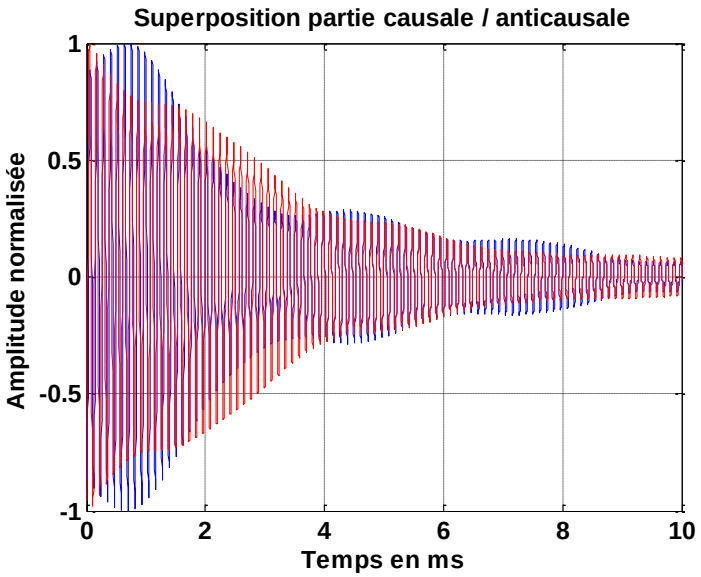


Figure 98 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Enfin, l'intercorrélation obtenue à la figure 90 est filtrée comme précédemment avec des fréquences de coupure f1=22500 kHz et f2= 28000 kHz. Le spectre de l'intercorrélation obtenue après le filtrage et la superposition de sa partie causale et anticausale sont illustrées respectivement par les figures 99 et 100.

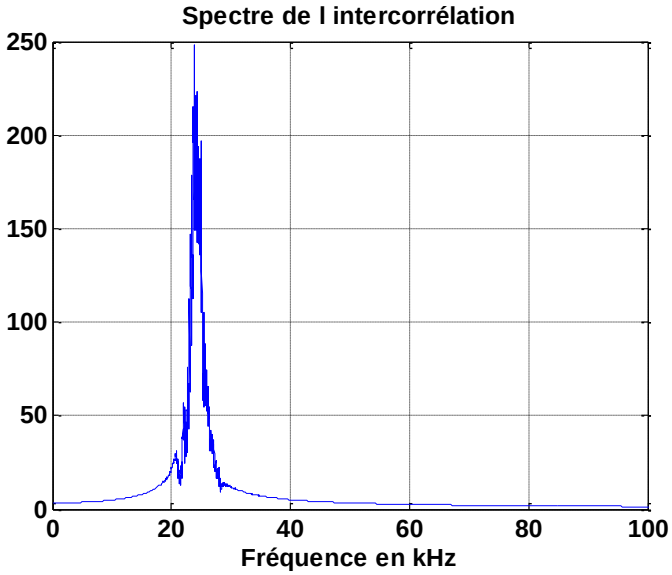


Figure 99 - Spectre de l'intercorrélation.

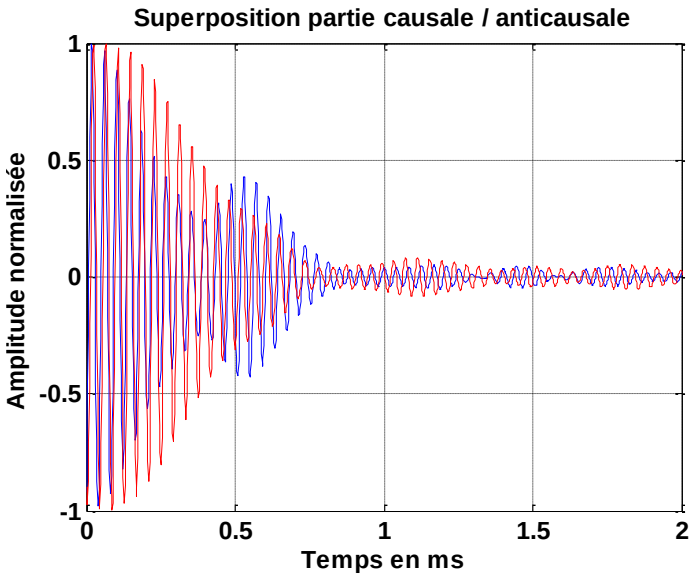


Figure 100 - Superposition de la partie causale et anticausale.

Dans le cas où le filtrage passe-bande est appliqué à l'intercorrélation obtenue à la figure 88, et ayant comme fréquences de coupure f1=150 kHz et f2= 1150 kHz, l'intercorrélation obtenue (après filtrage) est plus symétrique en comparaison aux trois autres cas.

Dans le cas de la figure 96, l'intercorrélation est obtenue après avoir enlevé le filtre passe-bas de l'amplificateur d'une part, et après avoir appliqué un filtrage passe-bande d'autre part. Ceci implique le besoin de travailler avec des capteurs de très basse fréquence et ayant une fréquence de résonnance adaptée avec celles contenues dans le signal bruit.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un rappel sur le principe du champ diffus a été donné, et l'équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation a été illustrée. Dans la partie expérimentale, des études ont été menées sur une barre et considérées comme des post-traitements pour bien identifier et cerner les phénomènes intéressants. Ces études ont été menées sur des tubes pour se rapprocher du transport fluidique. L'obtention d'une bonne proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation a été expliquée, tout comme l'effet de l'introduction d'un défaut sur l'intercorrélation, tout en appliquant l'algorithme de comparaison décrit au chapitre 2. D'autre part, dans le cas l'écoulement turbulent de l'eau est utilisé comme source de bruit, les résultats

obtenus permettent de conclure que les capteurs utilisés n'étaient pas adaptés à notre expérience, d'où le besoin de capteurs de très basse fréquence.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était la réalisation d'un contrôle santé intégré d'une structure en exploitant le bruit ambiant présent dans cette structure qui, dans notre travail, a été une barre et deux tubes de natures différentes l'un en aluminium et l'autre en acier.

Le contrôle-Santé Intégré a été le point constitutif des travaux évoqués dans ce manuscrit. Dans un premier temps, après l'illustration de quelques définitions et théories fondamentales et primordiales pour notre application ainsi quelques rappels sur des travaux réalisés précédemment, un algorithme permettant de tester la ressemblance entre les images a été détaillé. Ce dernier est divisé en deux grandes parties, l'extraction des minimums locaux présents dans les images et le calcul du taux de ressemblance entre différentes images en se basant sur ces minimums extraits.

Dans un deuxième temps, les signaux aléatoires et déterministes ont été brièvement rappelés. La manière de simuler la propagation d'un signal a été mentionnée. Puis des résultats de simulation concernant l'application de l'algorithme de comparaison aux images temps fréquence extraites ont été illustrés. De plus, nous avons exposé comment obtenir une variation presque linéaire du taux de ressemblance après avoir pondéré par une fenêtre de Hanning, permettant ainsi de localiser une position inconnue de la source.

Enfin, une étude expérimentale a été menée pour montrer que même dans le cas d'un champ qui n'est pas parfaitement diffus (cas réel) la fonction d'intercorrélation peut toujours être exploitée pour faire un contrôle santé intégré. Un rappel sur le principe du champ diffus a été illustré, et l'équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation a été signalée. Des études expérimentales considérées comme des post-traitements ont été menées sur une barre en aluminium, permettant donc de passer à l'application qui nous intéresse : le transport fluidique. Pour ce faire, deux tubes l'un en aluminium et l'autre en acier ont été étudiés. En utilisant le jet d'air comprimé comme source de bruit, une bonne proportionnalité entre la fonction de Green et l'intercorrélation a été obtenue. D'autre part, l'effet de l'introduction d'un défaut sur l'intercorrélation a été signalé tout en appliquant l'algorithme de comparaison décrit au chapitre 2. Mais, dans le cas où l'écoulement turbulent de l'eau est utilisé comme source de bruit, les

capteurs utilisés n'étaient pas adaptés à notre expérience d'où la nécessité de travailler avec des capteurs de très basse fréquence.

Perspectives

Dans le chapitre 3 les travaux se sont butés au problème de symétrie dû à l'outil de simulation qui modélise les bords de la plaque comme des miroirs parfaits et ne prend pas en considération les coefficients de réflexions, de réfraction et ceux transmissions. Or, étant donné que ne nous nous intéressons qu'à la comparaison des images temps fréquence (qui est l'objectif du chapitre 3), il n'a pas été envisagé de développer cet outil. Cela étant, ce développement pourra être l'objet d'une première perspective en continuité du travail évoqué au chapitre 3, en prenant en considération les coefficients négligés.

Une deuxième perspective intéressante serait de répéter la partie expérimentale du chapitre 4 où l'eau est utilisée comme source de bruit, en utilisant des capteurs aux fréquences de résonnance adaptées avec le spectre de l'intercorrélation, pour valoriser les résultats obtenus dans le cas du jet d'air comprimé. D'autre part il sera aussi intéressant de regarder la limite de la largeur du défaut (seuil de détection) utilisé dans la partie expérimentale.

Enfin, étant donné que la conception d'un réseau de capteurs est l'objectif majeur du contrôle santé intégré, il est nécessaire de se préoccuper de la partie télécommunication : regarder par exemple le protocole de haut niveau et déterminer l'architecture optimale pour notre application acoustique.

RÉFÉRENCES

1. Moulin, E., Contribution à l'étude de la génération d'ondes de Lamb par transducteurs piézoélectriques intégrés. Application à la modélisation de matériaux sensibles, Thèse de doctorat, 1999, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 99-32.

2. Grondel, S., Contribution à l'optimisation du contrôle santé intégré par ondes de Lamb: Application à la surveillance de structures aéronautiques, Thèse de doctorat, 2000, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 00-34.

3. Paget, C., Contribution au contrôle actif de santé de structures composites aéronautiques par transducteurs piézoélectriques insérés, Thèse de doctorat, 2001, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 01-17.

4. Duquenne, L., Développement d'une méthode d'estimation de la génération transitoire d'ondes de Lamb: Application à la modélisation d'un système de contrôle santé intégré, Thèse de doctorat, 2003, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 03-32.

5. El Youbi, F., Étude de transducteurs multiéléments pour le contrôle santé intégré par ondes de Lamb et développement du traitement de signal associé, Thèse de doctorat, 2005, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 05-18.

6. Benmeddour, F., Étude expérimentale et numérique de l'interaction des ondes de Lamb en présence d'endommagements dans des structures d'aluminium, Thèse de doctorat, 2006, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 06-40.

7. Baouahi, M., Modélisation 3D de la génération des ondes de Lamb par des transducteurs piézoélectriques mono et multiéléments, Thèse de doctorat, 2007, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 07-311.

8. Abou Leyla, N., Contrôle santé intégré passif par corrélation de champ acoustique ambiant: Application aux structures aéronautiques, Thèse de doctorat, 2010, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, N. d'ordre : 10-11.

9. ROYER, D. and E. DIEULESAINT, Ondes élastiques dans les solides, Tome 1. Propagation libre et guidée, Enseignement de la Physique, 1996, Masson.

10. Viktorov, I.A., Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications1970: Plenum Press.

11. Brissaud, M., Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration2007: PPUR presses polytechniques.

12. Royer, D. and E. Dieulesaint, Elastic Waves in Solids II: Generation, Acousto-Optic Interaction, Applications. Vol. 2. 2000: Springer.

13. Bihan, Y.L., Modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault : approche basée sur la méthode des éléments finis: Laboratoire de Génie Electrique de Paris Gif-sur-Yvette CNRS UMR 8507 – Supelec – Université Pierre et Marie Curie – Université Paris-Sud 11.

14. Balageas, D. (2006) Introduction to Structural Health Monitoring, in Structural Health Monitoring (eds D. Balageas, C.-P. Fritzen and A. Güemes), ISTE, London, UK. doi: 10.1002/9780470612071.ch1.

15. Roux, P., W.A. Kuperman, and t.N. Group, Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. 116(4): p. 1995-2003.

16. Fried, S.E., et al., Extracting the local Green's function on a horizontal array from ambient ocean noise. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008. 124(4): p. EL183-EL188.

17. Sabra, K.G., P. Roux, and W.A. Kuperman, Arrival-time structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005. 117(1): p. 164-174.

18. Shapiro, N.M. and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. Geophysical Research Letters, 2004. 31(7): p. L07614.

19. Sabra, K.G., et al., Surface wave tomography from microseisms in Southern California. Geophysical Research Letters, 2005. 32(14): p. L14311.

20. Michel, Manuel d'acoustique fondamentale. Chap.6, ed. Hermes1998.

21. Michel, Manuel d'acoustique fondamentale. Chap.3, ed. Hermes1998.

22. Draeger, C. and M. Fink, One-channel time-reversal in chaotic cavities: Theoretical limits. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999. 105(2): p. 611-617.

23. Draeger, C. and M. Fink, One-channel time reversal of elastic waves in a chaotic 2D-silicon cavity. Physical Review Letters, 1997. 79(3): p. 407.

24. Draeger, C., J.-C. Aime, and M. Fink, One-channel time-reversal in chaotic cavities: Experimental results. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999. 105(2): p. 618-625.

25. Claerbout, J., SYNTHESIS OF A LAYERED MEDIUM FROM ITS ACOUSTIC TRANSMISSION RESPONSE. GEOPHYSICS, 1968. 33(2): p. 264-269.

26. Snieder, R., J. Sheiman, and R. Calvert, Equivalence of the virtual-source method and wave-field deconvolution in seismic interferometry. Physical Review E, 2006. 73(6): p. 066620.

27. Shapiro, N.M., et al., High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 2005. 307(5715): p. 1615-1618.

28. Sabra, K.G. and D.R. Dowling, Blind deconvolution in ocean waveguides using artificial time reversal. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. 116(1): p. 262-271.

29. Sabra, K.G., P. Roux, and W. Kuperman, Emergence rate of the time-domain Green's function from the ambient noise cross-correlation function. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005. 118(6): p. 3524-3531.

30. Farrar, C. and G. James III, System identification from ambient vibration measurements on a bridge. Journal of Sound and Vibration, 1997. 205(1): p. 1-18.

31. Nagayama, T., et al., Structural identification of a nonproportionally damped system and its application to a full-scale suspension bridge. Journal of structural engineering, 2005. 131(10): p. 1536-1545.

32. Snieder, R. and E. Şafak, Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006. 96(2): p. 586-598.

33. Bruneau, M., Manuel d'acoustique fondamentale1998: Hermes.

34. Snieder, R., Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. Physical Review E, 2004. 69(4): p. 046610.

35. Snieder, R., Extracting the Green's function of attenuating heterogeneous acoustic media from uncorrelated waves. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007. 121(5): p. 2637-2643.

36. Larose, E., Diffusion multiple des ondes sismiques et expériences analogiques en ultrasons, 2005, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

37. Derode, A., et al., Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L). The Journal of the Acoustical Society of America, 2003. 113(6): p. 2973-2976.

38. Derode, A., et al., How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves. Applied Physics Letters, 2003. 83(15): p. 3054-3056.

39. Weaver, R.L., On diffuse waves in solid media. The Journal of the Acoustical Society of America, 1982. 71(6): p. 1608-1609.

40. Weaver, R.L. and O.I. Lobkis, Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L). The Journal of the Acoustical Society of America, 2004. 116(5): p. 2731-2734.

41. Weaver, R.L. and O.I. Lobkis, Fluctuations in diffuse field–field correlations and the emergence of the Green's function in open systems. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005. 117(6): p. 3432-3439.

42. Weaver, R. and O. Lobkis, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: pulse-echo using thermal phonons. Ultrasonics, 2002. 40(1): p. 435-439.

43. Weaver, R.L. and O.I. Lobkis, Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003. 113(5): p. 2611-2621.

44. Moulin, E., et al., Applicability of acoustic noise correlation for structural health monitoring in nondiffuse field conditions. Applied Physics Letters, 2009. 95(9): p. 094104-094104-3.

45. Leyla, N.A., et al., Structural Health Monitoring using cross-correlation of an ambient noise field. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008. 123(5): p. 3698-3698.

46. Leyla, N.A., et al., Parameter study for Structural Health Monitoring based on ambient noise cross-correlation. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009. 125(4): p. 2635-2635.

47. Smeulders, A.W.M., et al., Content-based image retrieval at the end of the early years. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2000. 22(12): p. 1349-1380.

48. Baudrier, E., et al. A new similarity measure using Hausdorff distance map. in Image Processing, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference on. 2004.

49. Wang, Z., et al., Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. Image Processing, IEEE Transactions on, 2004. 13(4): p. 600-612.

50. Bigand, A. and O. Colot, Fuzzy filter based on interval-valued fuzzy sets for image filtering. Fuzzy Sets and Systems, 2010. 161(1): p. 96-117.

51. Huttenlocher, D.P., G.A. Klanderman, and W.J. Rucklidge, Comparing images using the Hausdorff distance. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1993. 15(9): p. 850-863.

52. G. M. Jenkins, D. G. Watts, Spectral Analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1969.

Résumé

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont basés sur des études précédentes réalisées à l'Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC). Ils concernent le développement d'un système de surveillance embarqué destiné au contrôle des matériaux et des structures utilisés dans différents domaines de transport (fluidique, tubulaire, aéronautique, ferroviaire…). Il s'agit du principe de Contrôle Santé Intégré CSI (ou SHM en anglais pour Structural Health Monitoring). L'idée est d'intégrer des capteurs sur les surfaces des structures à contrôler pour aboutir à un système de contrôle non destructif de ces dernières durant la totalité de leurs fonctionnements. Tout d'abord, les travaux réalisés à l'IEMN dans ce domaine sont illustrés, quelques définitions comme celles des ondes ultrasonores, du Contrôle Non Destructif et du Contrôle Santé Intégré sont rappelées, avant d'aborder l'explication du passage d'un contrôle actif à un contrôle passif.

Dans un deuxième temps, un algorithme de comparaison d'images basé sur les minimums locaux présents dans ces images a été proposé et testé sur des images simples de seize pixels, et a permis de tester le degré de ressemblance entre elles. L'explication de l'algorithme développé est divisée en deux grandes parties. Dans la première nous expliquons comment extraire les minimums locaux d'une image. La deuxième partie expose la procédure pour déterminer le taux de ressemblance entre les images. La simulation de la propagation d'un signal dans une plaque réverbérante et l'obtention des images temps-fréquence correspondantes à des corrélations filtrées (autocorrélation) ont été décrites. L'algorithme proposé a été validé sur ces images, permettant ainsi la localisation d'une position inconnue de la source.

Enfin, nous vérifions expérimentalement qu'il est toujours possible d'effectuer un Contrôle Santé Intégré(SHM) dans un milieu en étudiant le bruit ambiant présent dans ce dernier. Une illustration de l'équivalence entre la fonction de Green et l'intercorrélation est donnée. L'avantage de la recherche de la fonction de Green entre deux récepteurs placés sur une structure réside dans le fait que cette fonction permet la caractérisation du trajet entre les deux récepteurs. Il devient ainsi possible de détecter la présence d'un défaut. Des études expérimentales ont été menées sur une barre puis étendues à deux tubes (l'un en aluminium et l'autre en acier) en vue de se rapprocher de la réalité de notre application: le transport fluidique. Une proportionnalité satisfaisante entre la fonction de Green et l'intercorrélation a été obtenue dans le cas où le jet d'air comprimé est utilisé comme bruit. D'autre part, l'introduction d'un défaut dans la structure a été étudiée et expérimentée. Son effet sur l'intercorrélation a été signalé en appliquant l'algorithme de comparaison.

Dans le cas où l'écoulement turbulent de l'eau est utilisé comme source de bruit, les capteurs utilisés n'étaient pas adaptés à notre expérience, d'où la nécessité de travailler avec des capteurs de très basse fréquence.

Mots-Clés : Contrôle-Santé Intégré, Fonction de Green, Images Temps Fréquence, Taux de ressemblance, Transport fluidique, Corrélation de Champ Ambiant.

Summary

The works presented in this manuscript are based on previous studies conducted at the Institute of Electronics Microelectronics and Nanotechnology of the University of Valenciennes and Hainaut Cambrésis. They concern the development of an embedded monitoring system for the control of materials and structures used in different transport domains (pipeline, aerospace, railway ...). This is the Structural Health-Monitoring principle. The idea is to integrate sensors into the surfaces of the controlled structures in order to achieve a non-destructive control system for the control of the latter during their entire lifetime. First the work done at the laboratory in this domain, are illustrated, some definitions such as ultrasonic waves, the Non Destructive Testing and the Structural Health Monitoring are recalled, to switch later to the explanation of the passage from an active control to a passive control.

In a second step, an images comparison algorithm based on the local minima present in these images has been proposed and tested on simple images of sixteen pixels and was used to test the degree of resemblance between them. The explanation of the developed algorithm is divided into two parts. In the first one, we explain how to extract the local minima of an image. The second part describes the procedure for determining the rate of resemblance between the images. The simulation of the propagation of a signal in a reverberant plate and the obtaining of the frequency time images corresponding to filtered correlation (autocorrelation) has been described. The algorithm was validated on those images allowing the localization of an unknown source position.

Finally, we verify experimentally that it is always possible to perform a structural health monitoring (SHM) in a medium by exploring the ambient noise present in the latter. An illustration of the equivalence between the Green's function and the crosscorrelation is given. The advantage of seeking the Green's function between two receivers placed on a structure is that it permits the characterization of the path between the two receivers. It thus becomes possible to detect the presence of a defect. Experimental studies were conducted on a bar and then extended to two pipes (aluminum and steel) to be closer to the reality of our application: the fluid transportation. A good proportionality between the Green's function and the crosscorrelation has been obtained in the case where the compressed air jet is used as a noise. On the other hand, the introduction of a defect in the structure has been studied and experimented. Its effect on the crosscorrelation has been notified using the comparison algorithm.

Where the turbulent flow of water is used as a noise source, the sensors used were not suitable for our experience hence the necessity of dealing with a very low frequency sensors.

Keywords : Structural Health Monitoring, Green's Function, Frequency Time Images, Similarity Rate, Fluid Transportation, Ambient Noise Correlation.