Tomographie passive des ondes acoustiques : Prédiction et identification à partir du bruit ambiant

Olfa Chaouch

▶ **To cite this version:**

Olfa Chaouch. Tomographie passive des ondes acoustiques : Prédiction et identification à partir du bruit ambiant. Acoustique [physics.class-ph]. Université du Maine, 2016. Français. NNT : 2016LEMA1035 . tel-01558904

HAL Id: tel-01558904
https://theses.hal.science/tel-01558904

Submitted on 10 Jul 2017

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

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

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Université du Maine

Thèse de Doctorat

Olfa CHAOUCH

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université du Maine
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

École doctorale : *SPIGA*

Discipline : 60
Spécialité : Acoustique
Unité de recherche : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

Soutenue le 28 Octobre 2016

Tomographie passive des ondes acoustiques : Prédiction et identification à partir du bruit ambiant

JURY

Rapporteurs :	**Iyad DAYOUB**, Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis
	François GUILLET, Professeur, Université Jean Monnet
Directeur de Thèse :	**Kosai RAOOF**, Professeur (LAUM), Université du Maine
Encadrant :	**Mathieu CHEKROUN**, Maître de conférences (LAUM), Université du Maine

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Université du Maine

Thèse de Doctorat

Olfa CHAOUCH

Tomographie passive des ondes acoustiques : Prédiction et identification à partir du bruit ambiant

Résumé

Les travaux réalisés se situent dans le cadre de CSI. Une méthode d'identification de défauts se basant sur les fonctions d'inter-corrélations a été proposée et a donné naissance à deux critères d'identifications. Le premier est un critère visuel, ce critère est basé sur la superposition des enveloppes des fonctions d'inter-corrélation obtenues par transformée de Hilbert pour deux configurations dont l'une est sans défaut et l'autre est avec défaut. Le deuxième critère est numérique, il s'agit de la moyenne des écarts entre deux enveloppes que l'on appelle CEI. Les performances de ces critères ont été testées premièrement sur une plaque en aluminium en conditions libres, en utilisant une source localisée en espace ayant une intensité non contrôlée. Les résultats de la première expérience ont montré certes la sensibilité de ces critères à l'apparition des défauts, mais également une forte sensibilité aux changements de la position de la source, c'est pour cette raison qu'une deuxième expérience utilisant une source non localisée en espace à été effectuée. Les critères proposés ont d'abords été testé en utilisant un signal sinus mono fréquence comme source, et en utilisant un bruit blanc filtré par la suite. Grâce aux critères proposés, le défaut est certes identifié, néanmoins, il reste à trouver un moyen pour le localiser et pour le caractériser.

Mots clés :
CSI, identification, inter-corrélation, bruit, plaque

Abstract

The work presented is in the domain of SHM. An identification method based on the inter-correlations functions between piezoelectric sensors was proposed and gave birth to two criterion of identification. The first is a visual criterion, it is based on the superposition of the envelopes of the cross-correlation functions obtained by Hilbert transform for two configurations, the first is a defect-free configuration of reference and the other is with defect. The second criterion is numerical; it is the mean of the differences between two envelopes. The performance of these criterions was tested first on an aluminum plate in free edges conditions, using a source located in space; the intensity of this source was not controlled. The results of the first experiment has certainly shown the sensitivity of these criterion to the appearance of defects despite the randomness of the source, but also highly sensitivity to changes in the position of the source was found. In the second experiment a source not localized in space was used, and the plate was in clamped edges conditions. The proposed criterions have been tested using a single frequency sine signal as a source first and using a white noise filtered signal secondly. With the proposed criterion, the defect was certainly identified; however, it remains to find a way to locate and to characterize the defect.

Key Words:
SHM, identification, cross correlation, noise, plate

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury professeur Iyad Dayoub et professeur François Guillet d'avoir accepter de rapporter et d'examiner ce travail. Votre participation à la soutenance ainsi que vos commentaires, questions et remarques valorisent mon travail.

je voudrais exprimer toute ma reconnaissance pour mes encadreurs Raoof Kosai, Professeur des Universités, membre du LAUM, ENSIM (Université du Maine), et Mathieu Chekroun, Maître de Conférences, membre du LAUM, IUT (Université du Maine), pour leurs encouragements et pour m'avoir fait confiance en tant que doctorant, Merci d'avoir cru en mes capacités, les précieux conseils que vous m'avez donné m'ont été très utiles durant mes travaux de thèse.

Je remercie notamment Laurent Simon, Professeur des Universités, membre du LAUM, (Université du Maine), pour son encadrement durant la première année de thèse et pour sa franchise. Je n'oublie pas de remercier Olivier Michel, Professeur à l'université de Grenoble et membre du comité de suivi extérieur de la thèse, pour son jugement enrichissant apporté à mes travaux tous les ans.

Je voudrais également remercier le personnel de l'ENSIM de m'avoir accueilli au sein de leur établissement durant ma thèse, spécialement Mathieu Secail-Geraud, ingénieur de recherche CNRS, pour son aide dans la réalisation des manips dans la salle GTV et la mise en place rapide de l'expérience. Une pensée à la souriante Khadija pour les chocolats qu'elle nous offre à nous les doctorants.

Je remercie le personnel administratif du laboratoire du LAUM, Stéphane Letourneur ingénieur de recherche CNRS LAUM pour la préparation rapide des capteurs. Je n'oublie pas de remercier les personnes du LAUM qui m'ont aidée : Charfeddine Mechri, Post-Doc au LAUM, Vincent Tournat, Chargé de Recherche CNRS, membre du LAUM, et Mourad Bentaher pour son aide lors de la conférence internationale à Los Angeles.

Un grand merci à mes collègues doctorants, Thibault le roi du Matlab, Charlie le roi du Comsol, Yosra, Océane, Justine, Sylvain, Mariem, Omar, Ludovic, Vivien, Charly, Julien, Antoine, pour la bonne ambiance et la bonne humeur au travail, j'ai passé de bons moments

pendant les pauses cafés, les pauses déjeuner, les parties de babyfoot… Merci pour tous ces moments agréables.

Enfin, je remercie mon cher époux Walid pour sa patience et son amour dévoué, sans toi à mes cotés toujours encourageant, je n'en saurais pas là aujourd'hui. Je dédie ce travail à mon cher papa Maouia qui rêve de voir sa petite fille docteur, je suis si reconnaissante aux sacrifices que vous avez fait toi et maman pour m'offrir une belle vie pleine de réussite, je remercie également ma grande sœur Wafa et mes deux frères Nabil et Zied pour le soutien moral.

Je remercie Dieu de m'avoir entouré de personnes si agréables, veuillez accepter Mesdames et Messieurs l'expression de ma sincère gratitude et mon respect le plus profond…

Table des matières

Introduction générale 8

Chapitre 1 : Présentation générale et état de l'art 10

Introduction 10

1. Vue d'ensemble sur le CND et le SHM 11
2. Quelques méthodes de CND et/ou SHM 12
   - 2.1. Méthodes d'impédances 13
   - 2.2. Méthodes fréquentielles 14
   - 2.3. Ondes guidées, ondes de Lamb 17
3. Intérêt des techniques SHM en mode passif 18
4. Les techniques de corrélation pour SHM passif 19
   - 4.1. Relation entre fonction de Green et fonction d'inter-corrélation 20
   - 4.2. État de l'art sur les études expérimentales des techniques de corrélations .. 21
   - 4.3. Bruit ambiant et bruit blanc 22
5. Etude théorique 23
6. Contexte des travaux de thèse 25

Chapitre 2 : Expérience avec une source localisée 27

Introduction 27

1. Description de l'expérience 28
   - 1.1. Propriétés de la plaque 28
   - 1.2. Caractéristiques de la source 29
   - 1.3. Différents types d'ondes ultrasonores dans une plaque 29
   - 1.4. Caractéristiques des capteurs 31

2. Traitement des signaux 33
2.1. Proposition d'un critère visuel : Enveloppe par transformée de Hilbert 37
2.2. Proposition d'un critère numérique 38
3. Résultats et discussions 39
3.1. Reproductibilité du critère visuel d'identification 39
3.2. Sensibilité des critères aux changements de la position de la source 40
3.3. Sensibilité des critères au défaut 44
Conclusion 46
Chapitre 3 : Expérience avec une source non localisée 49
Introduction 49
1. Description du dispositif expérimental 50
2. Optimisation de la méthode avec une source mono fréquence 51
2.1. Objectifs de l'étude 51
2.2. Sensibilité du *CEI* à la fréquence d'excitation 52
2.3. La normalisation des fonctions d'inter-corrélation 53
2.4. Méthode de calcul du *CEI* 55
2.5. Description de la source large bande 61
2.6. Nombre d'échantillons par acquisition 62
2.7. Nombre d'acquisitions par mesure 64
2.8. Vérification de la reproductibilité des enveloppes 66
2.9. Synthèse de la méthode d'identification 67
3. Évaluation de l'efficacité de la méthode avec une source type bruit 69
3.1. Sensibilité au défaut 69
3.2. Sensibilité du *CEI* à la position du défaut 70

4. Recherche de la position optimale des capteurs 73
4.1. Sensibilité des *CEI* à la distance entre capteurs 73
4.2. Sensibilité à la position et à l'orientation des capteurs..... 75
5. Sensibilité des *CEI* à la bande fréquentielle de la source 79
6. Vérification de la symétrie des résultats 82
Conclusion 83
Conclusion générale et perspectives 86
Références..... 90

Table des figures

Figure 1 : Principe de détection et de localisation de défauts par ondes guidées 17
Figure 2 : L'équivalence entre la fonction d'inter-corrélation (source en O et A et B deux récepteurs) en mode passif et la fonction de Green en mode actif (pour un Dirac envoyé en A et reçu en B) dans le cas d'un champ diffus 20
Figure 3 : Photo de l'expérience 28
Figure 4 : Vitesse de phase en fonction de la fréquence pour une plaque en Aluminium d'épaisseur 5 mm 30
Figure 5 : Courbes expérimentales de l'amplitude et de la phase de l'impédance du PZ27 en fonction de la fréquence 32
Figure 6 : *placement des capteurs, défaut et source sur la plaque* 33
Figure 7 : Allure temporelle des signaux acquis, en bleu : Signal source marteau d'impact, en rouge : Signal capté par R1 34
Figure 8 : Contenu fréquentiel du signal source marteau d'impact et du signal reçu par le capteur 35
Figure 9 : Reproductibilité de la fonction d'inter-corrélation pour plusieurs mesures avec une amplitude de source aléatoire 36
Figure 10 : Exemple de critère visuel : superposition de deux enveloppes, une de référence en bleu et une avec défaut en rouge 38
Figure 11 : Enveloppes des fonctions d'inter-corrélation pour 2 mesures identiques sans défaut, pour la paire de capteurs R1 R2 39
Figure 12 : Placement des capteurs et position de la source pour différentes configurations 40
Figure 13 : Influence du changement de la position de source (quelques centimètres) sur le critère visuel, pour la paire R1 R2 42
Figure 14 : Influence du changement de la position de source (quelques millimètres) sur le critère visuel, pour la paire R1 R2 42

Figure 15 : Influence du changement de la position de la source sur le critère numérique CEI 43
Figure 16 : Sensibilité du critère enveloppe à l'apparition de défaut placé en D1, enveloppe correspondante à la paire des capteurs R1 R2 44
Figure 17 : Valeurs de CEI pour différentes positions de défaut 45
Figure 18 : Dispositif expérimental avec une source non localisée en espace 50
Figure 19 : Disposition des capteurs et du défaut sur la plaque encastrée 51
Figure 20 : Variation des valeurs CEI pour différentes fréquences d'excitation 53
Figure 21 : CEI en fonction de l'amplitude de la source, (a) avec normalisation, (b) sans normalisation 54
Figure 22 : Superposition d'enveloppes sans et avec défaut, Signal source sinus 4,7kHz 56
Figure 23 : Comparaison des méthodes du calcul de CEI_SD et CEI_AD, signal sinus comme source 57
Figure 24 : Disposition des capteurs et des défauts sur la plaque encastrée 58
Figure 25 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, excitation avec signal sinusoïdal 59
Figure 26 : CEI_AD pour différentes positions de défaut, signal sinus de 4,7 kHz comme source 60
Figure 27 : Partie du signal source : Bruit gaussien filtré et amplifié 61
Figure 28 : CEI en fonction du nombre d'échantillons par acquisition (N) pour un signal source bruit filtré [3 6] kHz 62
Figure 29 : CEI en fonction du nombre d'échantillons par acquisition, pour un signal source sinus de 4,7 kHz 64
Figure 30 : Placement des capteurs et du défaut pour le test des critères en fonction de Nacq 65
Figure 31 : CEI en fonction du nombre d'acquisitions par mesure Nacq dans le cas d'une source de bruit filtré 65

Figure 32 : Reproductibilité du critère visuel en mode passif, 2 enveloppes sans défaut correspondant aux inter-corrélations entre R2 et R3, positions des capteurs en figure 30 66
Figure 33 : Description de la méthode d'identification de défauts 68
Figure 34 : Sensibilité du critère visuel à la présence de défaut, critère correspondant à la paire des capteurs R2 R3 70
Figure 35 : Les différentes positions de défaut testées sur la plaque 71
Figure 36 : CEI_AD pour différentes positions de défaut, configuration avec une distance minimale entre capteurs de 45 cm 72
Figure 37 : CEIM_AD pour différentes positions de défaut 73
Figure 38 :CEI_AD pour différentes positions de défaut, configuration avec une distance minimale entre capteurs de 11 cm 74
Figure 39 : Sensibilité du critère numérique CEIM_AD à la distance entre capteurs, (a) capteurs distants de 45 cm, (b) capteurs distants de 11 cm 75
Figure 40 : Sensibilité du critère numérique à la position du défaut, capteurs placés coté source avec différentes orientations, verticale pour R1 R2, oblique pour R1 R3 et horizontale pour R2 R3 76
Figure 41 : Sensibilité du critère CEI_AD à la position du défaut, capteurs placés coté droite de la plaque 77
Figure 42 : CEIM_AD pour deux positionnements de capteurs, (a) capteurs coté gauche (emplacement du haut parleur), (b) capteurs coté droite 78
Figure 43 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, avec une source de bruit ayant une bande de fréquence de [1 4] kHz 79
Figure 44 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, avec une source de bruit ayant une bande de fréquence de [5 8] kHz 80
Figure 45 : Influence de la bande fréquentielle du bruit sur le CEIM_AD, (a) une bande de 1 à 4 kHz, (b) une bande de 3 à 6 kHz et (c) de 5 à 8 kHz 81
Figure 46 : Sensibilité du CEI_AD à la position de défaut, pour une configuration symétrique des capteurs R1 et R2 82

Introduction générale

La dégradation au cours du temps des constructions en génie civil, en aéronautique, ou en secteur automobile est un problème majeur pouvant causer des accidents graves. Cette dégradation, qu'elle soit liée aux propriétés mécaniques, physiques ou chimiques du matériau a plusieurs origines (intérieures et extérieures), et il est indispensable de pouvoir contrôler les structures en continu afin d'en assurer la sécurité.

Le Contrôle et l'Evaluation Non Destructive (CND/END) interviennent à plusieurs niveaux dans le processus de suivi de ces structures [1, 2, 3, 4].

On peut également parler de deux types de contrôle, liés à la nature de l'excitation, le contrôle actif et le contrôle passif. Le CND est souvent de type actif. En effet, la structure est excitée en envoyant des signaux connus, et on observe à la réception une déformation de ces derniers en présence de défaut. Mais il existe également un autre type de contrôle connu sous le nom de Contrôle de Santé Intégré (CSI ou SHM pour Structural Health Monitoring en anglais), qui est souvent de type passif. La source consiste en un bruit ambiant ou vibrations ambiantes, elle est non contrôlée par l'opérateur, seule la réception des signaux est gérée. En géophysique par exemple, on relève les sismogrammes qui peuvent révéler les propriétés des couches terrestres traversées par les signaux sismiques naturels [5] en mode passif. En mode actif, ces signaux sismiques sont remplacées par de la dynamite [6], et ceci nécessite une dépense supplémentaire en terme d'énergie.

En génie civil, les méthodes de contrôle initialement actives, utilisent désormais les vibrations ambiantes (vent, pluie, vagues, trafic routier, trafic ferroviaire, activité humaine, …) pour obtenir des informations sur la structure. Ces techniques, dites de SHM passif, sont généralement basées sur une instrumentation déployée en surface [7], elle peut être également enfouie.

C'est dans le cadre de SHM en mode passif que se situe cette thèse de doctorat. L'objectif est l'identification des défauts, par l'analyse et le traitement des signaux vibro-acoustiques captés avec une instrumentation en surface. La source sollicitant la structure consiste en un bruit ambiant, ce bruit jouant ainsi le rôle d'une excitation naturelle passive. Afin d'extraire les informations nécessaires à l'identification des défauts, des techniques de corrélation de signaux seront employées. En effet, de nombreuses études, dans des domaines d'application aussi variés que les sous-marins acoustiques [8] et la sismologie [9], ont montré le potentiel de ces techniques pour l'exploitation du bruit ambiant naturel présent dans un milieu [10]. En particulier, les structures aéronautiques sont de bonnes candidates pour une telle application, car elles sont soumises à d'intenses sources de bruit acoustique pendant les vols.

On s'intéresse aux techniques de corrélations pour le contrôle de santé intégré en mode passif. Le premier chapitre de cette thèse consiste en un état de l'art sur les techniques existantes de CND et de SHM, en particulier les techniques de corrélations. Le deuxième chapitre décrit une expérience préliminaire sur une plaque en aluminium, cette expérience sert à vérifier la reproductibilité des fonctions d'inter-corrélation ainsi que leurs sensibilités à l'apparition des défauts. Un marteau d'impact a été utilisé pour exciter la plaque, il s'agit d'une source localisée en temps et en espace et dont l'intensité était non contrôlée et non prédictible. Une méthode d'identification de défaut se basant sur les inter-corrélations entre les différents récepteurs est proposée et testée sur cette plaque. Le troisième chapitre décrit une autre expérience sur une plaque utilisant cette fois une source non localisée en espace. Les étapes de la méthode d'identification proposée sont paramétrées en utilisant un sinus comme signal source. Une fois vérifiée, la méthode est testée dans la seconde partie en utilisant un bruit large bande comme signal source.

Chapitre 1 : Présentation générale et état de l'art

Introduction

Ce premier chapitre place les travaux de la thèse dans leur contexte. Un état de l'art sur les techniques de Contrôle Non Destructif ainsi que celles de Contrôle de Santé Intégré (en anglais Structural Health Monitoring SHM) est effectué en premier lieu. Plusieurs méthodes d'identification de défaut sont présentées, en particulier les techniques de SHM en mode passif. Enfin, une recherche approfondie sur les techniques de corrélations de champs ambiants est détaillée.

1. Vue d'ensemble sur le CND et le SHM

Les méthodes de contrôle traditionnelles sont généralement destructives. L'étude des caractéristiques des matériaux est souvent effectuée sous différentes sollicitations, sous des essais de mises en charge successives par exemple [11] ou des essais de flexion [12]. L'essai de traction est un outil expérimental bien adapté à la surveillance des processus de rupture [13]. Ces types de contrôle sont intéressants pour l'industrie de fabrication des pièces par exemple, ainsi le constructeur peut fixer les caractéristiques de cette dernière comme la résistance à la rupture. Néanmoins ces méthodes ne peuvent pas être utilisées pour vérifier les caractéristiques d'une pièce en cours de son utilisation sans la détruire, d'où l'intérêt des techniques de Contrôle Non Destructif (CND). Il s'agit d'un ensemble de méthodes permettant d'ausculter l'intégrité d'une structure sans la détruire. Ces techniques permettent de détecter des défauts en cours de production de la structure ou en cours de son utilisation en effectuant des inspections périodiques. La structure est généralement mise hors service afin d'effectuer le contrôle et d'en vérifier la qualité en détectant les défauts mais également en déterminant les caractéristiques de ce dernier (position, forme, dimension…).

L'inconvénient est que ces méthodes immobilisent la structure et nécessitent des planifications d'interventions, en particulier dans le cas des structures aéronautiques, qui demandent des contrôles assez fréquents en fonction du nombre de vols effectués. Ces opérations de contrôle sont très couteuses. En outre, il arrive parfois qu'un dégât surgisse entre deux inspections, pouvant engendrer des coûts importants qui auraient pu être évités si le dégât avait été identifié en temps réel.

Le Structural Health Monitoring (SHM), ou contrôle de santé intégré (CSI), consiste à surveiller en temps réel l'intégrité d'une structure afin de détecter des anomalies. Les techniques de SHM sont principalement issues de celles du CND. Le principe est de contrôler la structure permettant ainsi d'identifier le défaut et parfois même de le

localiser et de le caractériser à l'aide de capteurs et d'appareils d'instrumentation généralement déployés en surface. Lors d'une détection de dommage, une alarme est déclenchée [14]. En géophysique, les travaux de M.Carmona ont permis d'illustrer quelque unes des possibilités offertes par une instrumentation qui serait enfouie [7].

En effet, le dommage dans une structure peut conduire à des singularités dans le signal de réponse de celle ci [15] quelle que soit la nature du signal utilisé. On peut distinguer deux types de contrôle selon la nature de la source. Le premier type est le contrôle en mode actif, ou la structure est excitée par des signaux connus. En mode passif, la source n'est pas connue ni contrôlée (bruit ambiant ou vibrations ambiantes). Plusieurs méthodes d'identification sont présentées dans les paragraphes suivants.

2. Quelques méthodes de CND et/ou SHM

Les méthodes de contrôle non destructif les plus couramment employées peuvent être classées en deux familles principales en fonction du type d'anomalie recherchée dans la structure; les méthodes de surfaces et les méthodes de volume.

On distingue d'une part les méthodes de surface, comme la magnétoscopie, les courants de Foucault [16] (pour les matériaux conducteurs de l'électricité), le contrôle d'étanchéité (détection de fuites dans des canalisations en utilisant un gaz traceur) et des méthodes optiques comme l'interférométrie holographique et l'interférométrie de Speckle. Parmi les méthodes de surfaces on peut aussi citer le ressuage [17], il s'agit d'une technique d'évaluation pour les matériaux non absorbants pour la détection des fissures, un liquide d'imprégnation appelé « pénétrant » est appliqué sur la surface d'une pièce, ce liquide pénètre dans les discontinuités ou fissures présentes sur la pièce, ensuite un autre liquide dit « révélateur » est appliqué, ainsi les discontinuités deviennent visibles.

D'autre part on distingue les méthodes volumétriques pour la détection d'anomalies au sein du matériau, comme les techniques d'inspection par ultrasons émis au moyen de capteurs (fonctionnant le plus souvent par effet piézoélectrique), notons que ces

techniques peuvent également être utilisées pour la détection des défauts en surface. La méthode la plus connue est l'échographie, cette méthode est souvent utilisée pour des applications médicales (imagerie des calculs, des tumeurs ou des bébés…), notons également la méthode d'impact écho [18]. En génie civil on peut depuis longtemps mesurer des épaisseurs par temps de vol, méthode connue sous le nom de TOFD (time of flight diffraction) [19]. Citons également les techniques d'émission acoustique EA, les ondes élastiques générées à partir d'une source peuvent être mesurées et traitées en utilisant des techniques d'analyse et de traitement de signal. Cette méthode consiste à analyser la propagation d'ondes mécaniques de haute fréquence au sein du matériau. L'intérêt des techniques de mesure par EA réside en sa capacité à surveiller les dommages microscopiques survenant à l'intérieur du matériau. Néanmoins, elles ne peuvent pas être utilisées pour quantifier ou caractériser ces derniers.

Outre les ultrasons, on peut citer la méthode des rayonnements ionisants connue également sous le nom de radiographie [20], elle consiste à émettre un rayonnement (Rayon X ou gamma) par une source qui traverse la pièce et interagit avec celle-ci avant d'être recueilli par un dispositif détecteur [21]. Il existe également d'autres méthodes globales comme la thermographie [22], méthode qui consiste à solliciter une structure par un flux thermique et à observer les anomalies dues à l'interruption de la chaleur (donc à un écart de température sur une image thermique de la surface opposée).

Quelques méthodes de CND ou de SHM seront présentées ci-dessous, on s'intéresse particulièrement aux méthodes à ondes mécaniques et/ou acoustiques.

2.1. Méthodes d'impédances

Les capteurs piézo-électriques PZT ont la capacité de produire une charge électrique quand ils sont soumis à une charge mécanique. Inversement, ils peuvent également produire des vibrations mécaniques quand ils sont soumis à un champ électrique. La technique d'impédance pour le SHM utilise ces deux propriétés des PZTs pour la détection des dommages locaux, en effet les capteurs sont excités avec un signal

électrique faible, donnant ainsi naissance à une excitation mécanique de très haute fréquence qui peut atteindre les 40 kHz (selon le capteur et le signal électrique) [23]. L'impédance électrique du PZT est couplée à l'impédance mécanique de la structure auscultée. Par conséquent, les changements éventuels de la structure peuvent être identifiés simplement en contrôlant la variation des signaux d'impédance mesurés par les PZTs [24]. Il s'agit donc plutôt d'une méthode active.

Cette technique peu couteuse et simple à mettre en œuvre peut être appliquée à des structures complexes [25] et permet de détecter les défauts les plus petits. Elle a été testée dans le domaine du génie civil pour l'identification des défauts d'étanchéité dans des murs en béton armé [26]. Elle peut être utilisée dans le cadre d'un contrôle en temps réel. Cependant, il a été montré qu'un signal d'impédance peut également être modifié par d'autres variations ambiantes telles que les changements de température, ce qui l'expose aux fausses alarmes dues à ces variations [27, 28]. Plusieurs études ont été réalisées pour compenser l'effet du changement de température en contrôlant la bande fréquentielle d'excitation [29, 30].

2.2. Méthodes fréquentielles

La réponse fréquentielle également appelée la fonction de transfert d'un système est calculée en effectuant le rapport entre la transformée de Fourier du signal reçu sur celle du signal d'excitation. Cette fonction permet d'identifier les caractéristiques de vibration d'un milieu indépendamment de l'excitation et par conséquent d'en identifier les dommages [31]. Le contenu fréquentiel donne accès à plusieurs informations dans une structure. La présence d'un défaut modifie les fréquences propres du système. Quelques méthodes fréquentielles seront décrites dans cette partie.

2.2.1 Identification modale, fréquence propre

Dans le domaine de génie civil, le SHM consiste à identifier et surveiller les propriétés modales, qui incluent les fréquences propres, les ratios d'amortissement, les facteurs de qualité de résonance et les déformées modales d'une structure. En effet, l'observation

d'un changement dans les propriétés modales ou dans la réponse fréquentielle d'une structure, peut aider à surveiller celle-ci ou même à détecter des dommages. Ceux-ci entrainent un changement des propriétés modales, ces changements sont donc les paramètres les plus couramment utilisés pour la détection des défauts [32]. Par contre le placement des capteurs peut influencer ces paramètres. En théorie de l'information, de nombreuses approches [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39] ont été développés pour résoudre le problème du choix de la configuration optimale de capteurs pour l'identification modale et l'estimation des paramètres structurels. Une approche probabiliste de l'emplacement optimal des capteurs pour le SHM a été proposée dans [38], utilisant une connaissance antérieure des emplacements probables de dommages dans la structure. L'entropie a été également appliquée pour l'optimisation du placement des capteurs à l'aide des vibrations ambiantes [39].

Les systèmes acoustiques non linéaires présentent un phénomène de variation de fréquence de résonance appelé « softening » [40, 41], la fréquence de résonance de ces systèmes diminue lorsque l'amplitude de la source change. Cependant, les fréquences propres sont également influencées par les effets environnementaux en mode passif, comme la température, l'humidité ou le vent, et par des facteurs opérationnels, comme par exemple l'intensité du trafic dans le cas des ponts. Par conséquent, il est très important d'éliminer l'influence de ces facteurs, pour que les changements dus à des dommages petits puissent être détectés [42].

Il existe différentes méthodes pour éliminer les effets des facteurs environnementaux et opérationnels sur les fréquences propres, telles que présentées dans [43]. Il s'agit de différents types d'analyses de régression et d'interpolations pour filtrer les effets des facteurs environnementaux. Une approche possible consiste à la mise en place d'un modèle capable de représenter les phénomènes physiques à l'origine des changements de fréquence [44]. Cette procédure est intéressante pour mieux comprendre les principaux facteurs influençant le comportement dynamique observé de la structure, mais elle n'est pas adéquate dans le contexte SHM, car il faudrait développer un modèle très complexe

pour chaque nouvelle application et ceci n'impliquera pas forcément la bonne présentation de certains effets.

2.2.2 Analyse en ondelettes

Parmi les techniques temps-fréquence pour le SHM, l'analyse en ondelettes a été l'une des plus reconnue [45, 2] dans les trente dernières années. La transformée en ondelettes est une méthode de Fourier à fenêtre adaptative, pour le traitement des signaux non stationnaires des systèmes linéaires. La technique de l'ondelette est capable de résoudre des changements graduels entre les fréquences instantanées. Bien qu'elle offre une résolution temps-fréquence uniforme, cette dernière est généralement faible, en raison de la taille limitée de l'ondelette mère. Indépendamment de ces lacunes, l'analyse en ondelettes reste l'une des meilleures techniques disponibles et a été utilisée pour l'identification des paramètres modaux de structures civiles excitées par les charges ambiantes [46, 47], donc en mode passif.

Une caractéristique importante de la transformée en ondelettes est sa capacité à capter la fréquence des informations temporelles et à analyser une portion d'un signal [48]. De nombreux auteurs ont utilisé la transformée en ondelettes pour identifier la présence de singularités dans le signal de réponse et donc localiser les dommages [49, 50, 51]. En 2000, Hou et al. [52] ont détecté des dommages irréversibles dans une structure se composant de plusieurs ressorts cassables en utilisant la transformée en ondelettes discrète. Un certain nombre d'auteurs a utilisé la transformée en ondelettes continue pour localiser des fissures ouvertes dans une poutre en analysant la forme de ses modes [53, 54]. Dans une étude [55], en 2010, il a été montré que l'utilisation de l'énergie des signaux d'accélération décomposés en ondelettes comme une caractéristique des dommages pour le SHM est une approche efficace. L'impact du bruit de mesure en mode actif a également été étudié [56] et il est généralement indiqué que la singularité due aux dommages est difficile à établir dans les scénarios avec de petits dommages et/ou interférence de bruit.

Les représentations temps-fréquence, telles que la transformée de Fourier à court terme et la transformée en ondelettes, ont été utilisées pour obtenir des caractéristiques temps-fréquence qui peuvent être corrélées à la présence de défauts [57].

2.3. Ondes guidées, ondes de Lamb

Parmi les méthodes de SHM, existent celles basées sur la génération et la réception d'ondes guidées ultrasonores [58, 59, 60, 61, 3]. Cette appellation est due à la limitation de propagation des ondes élastiques par les bords d'une structure. Par exemple, lorsque les ondes élastiques sont générées à l'intérieur d'une plaque, les surfaces supérieures et inférieures de la plaque guident les ondes élastiques à se propager le long de la plaque, produisant ainsi un type spécifique d'onde guidée appelée onde de Lamb. Les dégâts sont généralement identifiés en comparant les trajets directs aux trajets diffractés par un défaut c'est-à-dire en comparant les caractéristiques de mode de conversion des ondes guidées à proximité du défaut [62, 63, 64, 65] à ceux d'une structure sans défaut. L'avantage de cette technique repose dans la capacité de ces ondes à se propager sur de longues distances [66]. Cependant, l'application de la technique à ondes guidées est souvent limitée à des structures simples comme des poutres ou des plaques [67]. La figure 1 illustre le principe de fonctionnement du contrôle par ondes guidées.

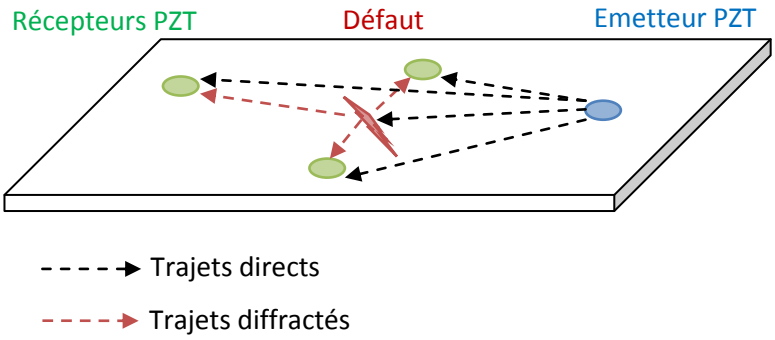


Figure 1 : Principe de détection et de localisation de défauts par ondes guidées

3. Intérêt des techniques SHM en mode passif

Le SHM est devenu un domaine populaire dans les domaines de l'ingénierie [68]. Dans le domaine de génie civil par exemple, le SHM a attiré une attention considérable avec de nombreux systèmes construits dans le monde entier [69, 70, 71, 72, 73].

Il s'agit d'un processus d'observation ou de traçage de performances d'une structure en temps réel. Le but est d'établir des priorités dans la planification et l'ordonnancement des travaux d'inspection et d'entretien. Le SHM permet surtout de détecter les zones et les moments où une inspection plus précise (par exemple par CND) doit être effectuée, la précision du diagnostic étant souvent plus limitée.

En SHM, la structure est instrumentée par des capteurs, permettant ainsi une surveillance suivie et reproductible, pouvant s'effectuer éventuellement en service et sans nécessiter d'intervention humaine.
Outre le fait de réduire le temps de la mise hors service d'une structure et d'apporter une sécurité supplémentaire, le SHM permet surtout de simplifier la maintenance d'une structure en l'intégrant et en l'automatisant. L'apport du SHM est également économique. Il permet, par exemple, d'utiliser des structures plus fines, plus légères, sans sacrifier la sécurité grâce à la mise en place d'une maintenance préventive [74]. D'autre part, si le contrôle se fait en mode passif, en utilisant le bruit ambiant ou les vibrations ambiantes comme source d'excitation, il n'y aura pas besoin d'énergie pour l'émission, les capteurs sont tous des récepteurs, et le gain sera par conséquent plus important. Notons à titre d'exemple le gain dans le domaine de la géophysique, qui nécessite d'effectuer des explosions pour ausculter les sols en mode actif, ces explosions sont remplacées par les vibrations sismiques naturelles en mode passif [75].

Un autre avantage de ces techniques de SHM en mode passif est le fait de contourner les problèmes liés au bruit ambiant. En effet dans de nombreuses études, l'identification de dommages en mode actif est toujours erronée par la présence du bruit ambiant. De

nombreux algorithmes complexes sont mis au point afin d'augmenter le rapport signal à bruit (rapport entre le signal actif source et le bruit).

4. Les techniques de corrélation pour SHM passif

Dans certains cas d'applications, en mode passif, il n'y a pas d'émetteurs localisés en espace, l'identification se fait par simple écoute des signaux acquis par des récepteurs. L'inter-corrélation est donc un outil adapté pour effectuer l'identification passive dans le sens où c'est une mesure de "ressemblance" entre deux champs aléatoires [7]. En mesurant la fonction d'inter-corrélation entre 2 points arbitraires de l'espace dans un champ d'ondes diffus, on fournit les mêmes informations qu'une configuration source en un point et récepteur en un autre point. Par définition, un champ diffus est caractérisé par des ondes sonores incidentes provenant de toutes les directions. Ces ondes ont la même intensité et des phases relatives aléatoires quelle que soit leur position dans le volume. Dans le cas d'une cavité ergodique, le champ réverbéré est le même quelle que soit la position dans le volume [76]. Notons que l'obtention d'un champ parfaitement diffus est assez rare en pratique. Ainsi, par simple écoute passive du bruit ambiant et par l'application d'une corrélation, on obtient les mêmes informations que celles obtenues dans une expérience contrôlée à l'aide d'une source impulsive. Dans le cas du bruit ambiant, on parle donc de source virtuelle [77] ou passive.

L'un des points faibles des techniques de corrélation de bruit ambiant est leur extrême sensibilité aux conditions réelles acoustiques. Si, dans le cas d'un champ parfaitement diffus, les fonctions de corrélation ne dépendent que des propriétés structurelles du milieu, dans d'autres cas, les corrélations sont influencées par les caractéristiques des sources acoustiques, qui peuvent fluctuer d'une mesure à l'autre [78]. Dans d'autres travaux, ce problème spécifique est généralement contourné, soit en contrôlant les sources acoustiques, soit en augmentant artificiellement le caractère diffus du champ [79]. À noter que seul un faible nombre d'études [80, 81] a directement mis l'accent sur la nature non diffuse du champ.

4.1. Relation entre fonction de Green et fonction d'inter-corrélation

En présence d'un champ parfaitement diffus (uniformité spatiale et temporelle) dans un milieu, la corrélation entre les signaux acoustiques prélevés simultanément en deux points converge vers la fonction de Green entre ces deux points [82, 83]. Ce principe a été mis en évidence par Claerbout [84] en 1986, et a été souvent appliqué au SHM [85], en particulier en géophysique pour la reconstruction de cartes de vitesses de propagation [86, 87].

Dans la littérature, la relation entre fonction de Green et corrélation d'un champ ambiant n'est pas évidente à établir, car elle change en fonction des hypothèses et des conditions d'application. Dans certaines publications [88, 89, 90, 91], la fonction de Green est liée à la dérivée temporelle de la fonction de corrélation. Alors que pour d'autres études [92, 93], la fonction de Green est liée directement à la fonction de corrélation.

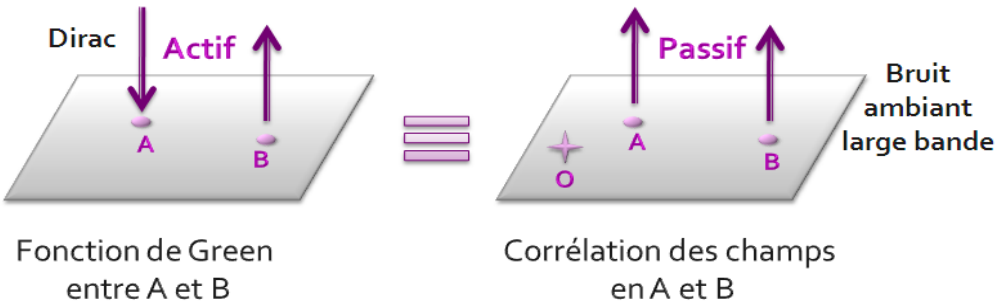


Figure 2 : L'équivalence entre la fonction d'inter-corrélation (source en O et A et B deux récepteurs) en mode passif et la fonction de Green en mode actif (pour un Dirac envoyé en A et reçu en B) dans le cas d'un champ diffus

4.2. État de l'art sur les études expérimentales des techniques de corrélations

Le bruit ambiant a des propriétés difficiles à cerner et des concentrations de sources très variables. Ceci rend l'extraction de la fonction de Green à partir des corrélations des champs ambiants difficile. De plus, la fonction de Green permet de caractériser en particulier le chemin entre deux capteurs, ainsi l'identification de défauts se positionnant loin de ce chemin n'est pas garantie. Cette démarche demande également des calculs importants. Dans ses travaux de thèse [94], N. A. Leila a cerné ce problème et a proposé une méthode d'identification basée sur la comparaison des fonctions d'inter-corrélations de références (sans défaut sur une plaque saine) à d'autres fonctions obtenues en ajoutant un défaut. Sa méthode est fonctionnelle à deux conditions, la première condition est la reproductibilité de la fonction d'inter-corrélation pour différentes mesures sous les mêmes conditions, et la seconde condition est la sensibilité de l'inter-corrélation à la présence de défauts. Les deux conditions sont vérifiées en moyennant sur 150 mesures mais l'inconvénient est que les fonctions d'inter-corrélations sont également influencées par la position de la source. C'est ainsi qu'il a donc proposé une solution se basant sur l'utilisation d'une "référence" capteur [95] afin d'identifier les caractéristiques des sources acoustiques à l'instant de la mesure. Le principe consiste à comparer la fonction d'auto-corrélation mesurée à un ensemble de fonctions d'auto-corrélation de référence stockées dans une base de données et correspondant à des configurations de sources les plus fréquentes. C'est le principe du "dictionnaire" de signaux, cette méthode est employée dans plusieurs domaines (comme la séparation de sources ou la compression) [96, 97] où les solutions sont difficiles à obtenir. Enfin, le point crucial de cette application est de savoir où placer le capteur de référence afin qu'il soit aussi insensible que possible à un défaut apparaissant dans la zone d'inspection. Cette solution est inspirée par la technique de localisation d'impact basée sur une chaine de retournement temporel [98].

La méthode est intéressante, l'identification se fait par la comparaison visuelle des courbes d'inter-corrélations fenêtrées par des fenêtres de Hanning de 5 cycles avant et

après l'ajout de défaut. Néanmoins, la solution proposée pour palier le problème de l'influence de la position de la source demande une base de données importante, surtout si la structure à contrôler est de grandes dimensions. De plus elle ne permet pas de stocker toutes les positions possibles de sources. Le nombre d'acquisitions nécessaires pour avoir une seule mesure est également très important (150). Ceci augmente encore le temps de calcul et nécessite une mémoire encore plus importante.

4.3. Bruit ambiant et bruit blanc

On appelle bruit ambiant toute source non contrôlée excitant un milieu. Par exemple, le vent, la pluie, le trafic routier, le passage d'un train, sont des sources de bruit ambiant pour un pont. Le bruit océanique et le bruit terrestre servent à explorer les couches terrestres en géophysique [99]. Un avion est soumis à diverses sources de bruit ambiant telles que le bruit des moteurs. Les propriétés du bruit ambiant telles que la puissance et la bande fréquentielle ont toujours une influence sur l'identification passive. C'est pour cette raison qu'il faut faire une étude sur ces propriétés pour fixer les paramètres identifiables de la structure.

Un bruit blanc au sens strict n'a pas de réalité physique car il possède une énergie infinie. En pratique, la blancheur temporelle est seulement nécessaire dans la bande de fréquence d'intérêt, elle est limitée par l'instrumentation et surtout par le spectre du bruit ambiant. L'approche classique [100] pour justifier que le bruit ambiant converge vers une source blanche temporelle, spatiale et isotrope est de voir le milieu comme un système dynamique chaotique. Selon le théorème d'équipartition (un théorème selon lequel l'énergie totale d'un système à l'équilibre thermodynamique est répartie en parts égales en moyenne entre ses différentes composantes) [101], il existe un temps après lequel toute source cohérente piégée dans le milieu devient blanche. Ce temps, appelé temps de mélange en acoustique [102] ou plus généralement temps de Thouless [103], dépend de la bande de fréquence, de la géométrie du milieu et des hétérogénéités. Avec ces conditions, le bruit ambiant converge vers un bruit blanc lorsque l'on moyenne pendant un temps suffisamment long [104]. Les chercheurs ne sont pas tous d'accord sur la

convergence du bruit ambiant vers un bruit blanc avec ce théorème, en effet, il a été montré dans une étude [105] que l'équipartition pouvait ne pas suffire pour obtenir un bruit blanc. En revanche, elle peut suffire à l'identification du milieu.

5. Etude théorique

Dans cette partie, une étude partant de l'équivalence entre la fonction de Green et la fonction d'inter-corrélation mènera vers une méthode simple d'identification de défauts. Considérons une source ponctuelle en *O* émettant un signal stationnaire aléatoire $s(t)$, le signal $u_A(t)$ reçu au point *A* de la structure peut s'exprimer par :

$$u_A(t) = s(t) * g_{OA}(t) \tag{1}$$

Où $g_{OA}(t)$ est la fonction de Green entre *O* et *A*, * est le produit de convolution. Ainsi, pour des signaux réels à énergie finie la fonction d'inter-corrélation entre deux signaux reçus en deux points *A* et *B* est donnée par :

$$r_{AB}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_A(t)\, u_B(t-\tau)\, dt = u_A(-\tau) * u_B(\tau) \tag{2}$$

Un changement de variables permet d'écrire la fonction sous la forme

$$r_{AB}(t) = g_{OA}(-t) * g_{OB}(t) * r_{ss}(t) \tag{3}$$

$r_{ss}(t)$ étant l'auto-corrélation du signal émis $s(t)$.
Dans le cas ou $s(t)$ est un bruit blanc, son auto-corrélation $r_{ss}(t)$ est un Dirac et sa densité spectrale est constante, l'équation (3) devient :

$$r_{AB}(t) = g_{OA}(-t) * g_{OB}(t) \tag{4}$$

Par conséquent, l'influence de la densité spectrale de la source peut être facilement éliminée [106].

Si on note $g'_{OA}(t)$ la fonction de Green dans le domaine temporel quand un défaut apparait, et quand la source est localisée au point *O*, la fonction d'inter-corrélation en présence d'un défaut peut s'écrire comme suit

$$r'_{AB}(t) = g'_{OA}(-t) * g'_{OB}(t) = r_{AB}(t) + \Delta r_{AB}(t) \quad (5)$$

$\Delta r_{AB}(t)$ représente la variation induite par le défaut et/ou la source dans la fonction d'inter-corrélation. Grâce à ce terme additif, le défaut sera détecté et dans le meilleur des cas localisé et identifié.

L'équation (5) montre un résultat très important; en effet même si la fonction de Green ne peut pas être extraite par les corrélations en champ ambiant, comme dans le cas d'un champ non parfaitement diffus par exemple, ces fonctions restent sensibles à l'apparition de défauts et peuvent être utilisées pour la vérification de la présence de ces derniers.

Les travaux d'E. Moulin et al. [107] de 2009 montrent également cette sensibilité à l'existence d'un défaut. Ce dernier agit particulièrement sur l'amplitude des signaux d'inter-corrélation entre deux récepteurs. De ce fait, il semble intéressant de tracer l'enveloppe des signaux d'inter-corrélation et de s'en servir comme critère de comparaison et d'identification de défaut. Ainsi la détermination de $\Delta r_{AB}(t)$ serait plus facile grâce aux enveloppes en particulier dans le cas ou la phase ne change pas. Néanmoins, il faut s'assurer que ce terme est bien lié à l'existence d'un défaut et non à des changements des caractéristiques de la source par exemple.

D'autre part, pour une identification réussie, il faut une bonne estimation des fonctions d'inter-corrélations. En effet, le calcul exact de cette fonction est impossible car les signaux ont toujours une énergie finie. Il existe deux types d'estimateurs, biaisé ou non biaisé. Un estimateur est plus performant si son biais (la différence entre son espérance mathématique et la vraie valeur cherchée) et sa variance sont faibles, mais souvent la

diminution de l'un provoque l'augmentation de l'autre et inversement. C'est pour cela que l'on s'intéresse souvent à l'erreur quadratique moyenne qui lie les deux. Il a été montré [108] que l'erreur quadratique moyenne de l'estimateur non biaisé est plus grande que celle de l'estimateur biaisé. C'est donc avec un estimateur biaisé que les fonctions d'inter-corrélations seront calculées. Cette estimation est donnée par l'équation (6) :

$$\hat{r}_{AB}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} u_A(n)\ u_B\ (n+m) \tag{6}$$

Où u_A et u_B sont respectivement les signaux acquis par les récepteurs aux points *A* et *B,* ayant une longueur *N*. La longueur des signaux joue également un rôle important dans l'estimation des fonctions d'inter-corrélation, cette estimation est meilleure quand la longueur augmente.

6. Contexte des travaux de thèse

Les travaux de recherche menés durant cette thèse se situent dans le contexte de CSI ou SHM en mode passif. Le but étant l'identification de défauts dans une structure en utilisant le bruit ambiant comme source. Dans le laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine, plusieurs travaux de recherche en CND et en SHM en mode actif [109, 110, 111] ont été menés, mais pas en mode passif. L'originalité du sujet dans le laboratoire est un grand challenge.

L'objectif à long terme étant le traitement des données en temps réel, une méthode simple d'identification de défauts doit être mise au point. Cette méthode ne doit ni prendre un temps considérable de calcul ni consommer une mémoire importante pour les données. Elle doit être insensible à la nature aléatoire de la source et elle doit également permettre de détecter un défaut par simple écoute passive des signaux reçus. L'étude bibliographique menée montre l'intérêt des techniques de corrélations pour ce genre de détection. En effet, la fonction d'inter-corrélation entre deux récepteurs est sensible à l'apparition d'événements marquants dans une structure pouvant être causée

par un défaut. Les travaux de N. A. Leila [10, 85] vérifient cette conclusion. En effet, le défaut agit sur l'amplitude de la fonction d'inter-corrélation et les corrélations semblent influençables par la nature aléatoire d'une source de bruit.

Une méthode d'identification de défauts se basant sur les fonctions d'inter-corrélations entre les récepteurs est présentée dans cette thèse, les récepteurs étant soumis à différents types de sources. Le champ n'étant pas parfaitement diffus dans notre cas d'étude, l'estimation de la fonction de Green à partir des corrélations est donc difficile à établir. Néanmoins, la sensibilité de la fonction d'inter-corrélation aux défauts peut être utilisée pour l'identification.

Chapitre 2 : Expérience avec une source localisée

Introduction

Ce chapitre décrit une expérience académique sur une plaque en aluminium en conditions libres. La plaque est excitée avec un marteau d'impact. La source est localisée en espace, mais l'intensité n'est pas contrôlée. Les signaux issus des capteurs positionnés sur la structure sont analysés en estimant les fonctions d'inter-corrélation entre chaque paire de capteurs du réseau, sans et avec défaut. La reproductibilité des fonctions d'inter-corrélation ainsi que leurs sensibilités aux défauts seront vérifiés pour ce cas d'étude.

1. Description de l'expérience

Le but de cette expérience est d'évaluer la sensibilité de la fonction d'inter-corrélation (entre deux récepteurs) à des changements dans une plaque. Ces changements pouvant être provoqués par l'apparition de défauts, par les quelques changements dans les caractéristiques de la source (localisation, intensité...), par des propriétés du matériau ou des changements de température.

1.1. Propriétés de la plaque

La structure est une plaque d'aluminium, de dimensions $100\times100\times0.5$ cm^3 contenant deux petits trous d'un diamètre de 6 mm aux extrémités servant à suspendre la plaque à l'aide de deux fils comme le montre la figure 3, et laissant ainsi la plaque en conditions de bords libres.

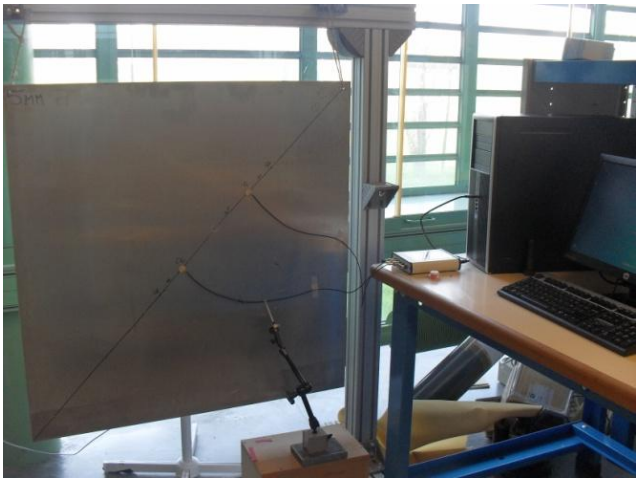


Figure 3 : Photo de l'expérience

1.2. Caractéristiques de la source

Il s'agit ici d'une expérience qui vise à vérifier les capacités des techniques de corrélations pour l'identification des défauts en mode passif. Ici la source n'est pas tout à fait passive, mais sert à vérifier que ces techniques ne dépendent pas d'un caractère aléatoire d'une source. La plaque est excitée avec un marteau d'impact. Cet outil est constitué d'une masse, d'un capteur de force et d'un embout. L'énergie d'impact dépend de la masse du marteau et de la vitesse d'impact au carré. Cette source a la particularité d'exciter une large gamme de fréquence, de 0.1-30 kHz pour le marteau utilisé dans cette expérience. L'amplitude des coups varie aléatoirement car la manœuvre d'excitation est manuelle. Seuls les coups du marteau dont la force est comprise dans un intervalle de 20-50 N seront considérés. Cette source a été choisie pour sa large gamme fréquentielle, ainsi que pour l'aspect non contrôlable et non prédictible de son amplitude. L'acquisition se fait à partir d'un seuil de déclanchement de 2N, pour avoir des signaux synchrones. Chaque acquisition dure 10 ms, et se fait avec un système d'acquisition 24 bits, avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz.

1.3. Différents types d'ondes ultrasonores dans une plaque

Les principaux modes de propagation d'ondes ultrasonores guidées que l'on peut générer dans une plaque dans le vide sont ceux relatifs aux ondes SH et Lamb.

La première famille de modes correspond aux ondes transversales (T) ou de cisaillement (ondes S en anglais pour shear waves) dont la polarisation et le déplacement des particules est perpendiculaire au plan de propagation de l'onde. Les ondes polarisées dans le plan horizontal sont des ondes TH (en anglais SH). On ne verra pas ces ondes dans notre plaque car l'excitation est perpendiculaire à la surface de la plaque.

La seconde famille de modes correspond aux ondes dites de Lamb, dont la polarisation est contenue dans le plan de propagation. Ces ondes résultent du couplage entre les ondes longitudinales (L) et les ondes transverses verticales (TV), ce couplage est du à la

présence de bords. Ces modes de Lamb sont classés en deux familles relatives aux symétries du champ de déplacement dans l'épaisseur de la plaque. On distingue donc les modes symétriques S_n et antisymétriques A_n dont les déformations sont respectivement symétriques et antisymétriques dans l'épaisseur du guide [112]. L'indice *n* est un nombre entier qui correspond à l'ordre du mode de propagation. Si l'épaisseur de la plaque est inférieure ou égale aux longueurs d'ondes des ondes de volume (ce qui est notre cas), les ondes de Lamb vont mettre en mouvement la totalité de la plaque [112].

Les courbes de dispersion des modes A_n (courbe rouge) et S_n (courbe bleue), correspondant à une plaque d'aluminium de 5 mm d'épaisseur, sont présentées ci dessous (figure 4). Les vitesses de phase C_ϕ en fonction de la fréquence sont représentées avec une vitesse longitudinale C_L=6300 m/s et une vitesse transversale C_T=3000 m/s.

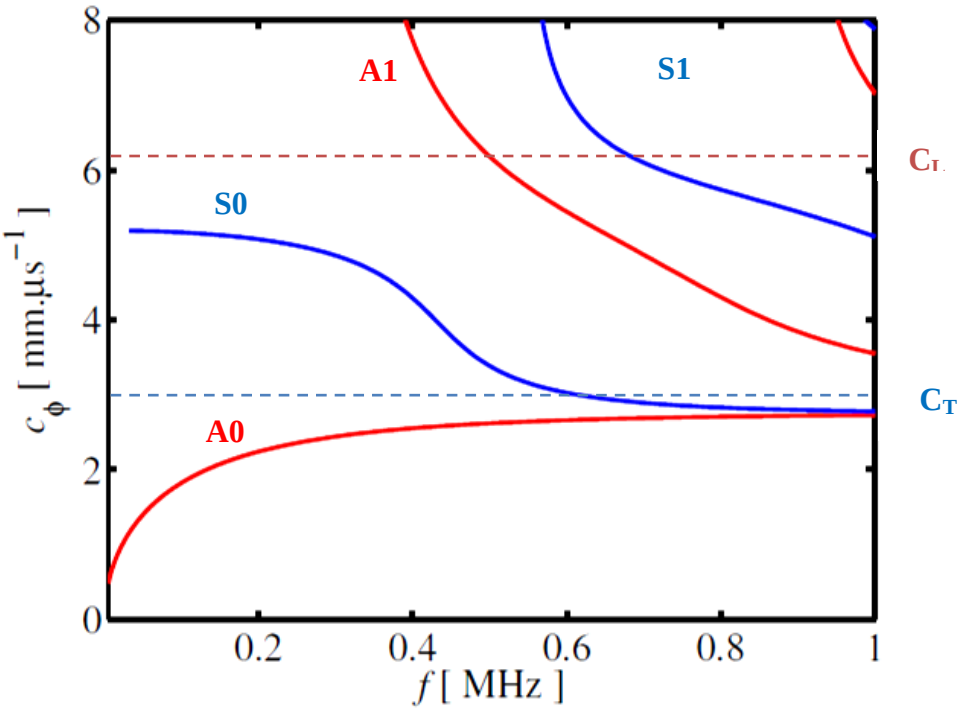


Figure 4 : Vitesse de phase en fonction de la fréquence pour une plaque en Aluminium d'épaisseur 5 mm

Les modes de Lamb fondamentaux antisymétrique A_0 et symétrique S_0, se propagent dans la plaque quelle que soit la fréquence. Les modes d'ordre supérieur, notés A_n et S_n, possèdent quant à eux une fréquence de coupure au delà de laquelle ils peuvent se propager [113].

Puisque la gamme de fréquences du marteau d'impact utilisé peut aller jusqu'à 30 kHz maximum, et que l'excitation se fait perpendiculairement à la surface de la plaque, le mode de flexion A0 est prédominant, et la longueur d'onde minimale qui peut être générée est d'environ 3 cm.

1.4. Caractéristiques des capteurs

La structure est instrumentée par 3 pastilles piézoélectriques PZ27 de diamètre 20 mm et d'épaisseur 2mm. Le comportement des capteurs ne doit pas influencer les mesures, il est important de tracer la courbe d'impédance des PZ27 en fonction de la fréquence pour avoir une idée de l'influence des capteurs sur les signaux mesurés. La courbe d'impédance du PZ27 en fonction de la fréquence en figure 5 nous montre que le comportement des capteurs piézoélectriques est linéaire jusqu'à 40 kHz. Notons que la première fréquence de résonance est de 220 kHz, la deuxième fréquence est de 1000 kHz.

La source allant jusqu'à 30 kHz, les mesures ne seront donc pas influencées par la fonction de transfert des capteurs car elles se feront dans la zone linéaire.

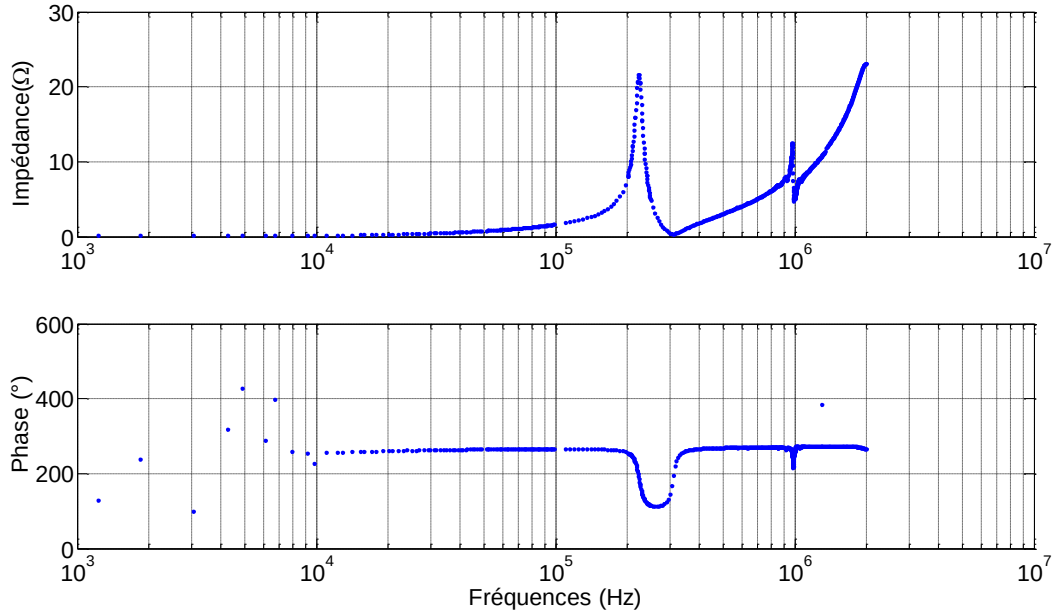


Figure 5 : Courbes expérimentales de l'amplitude et de la phase de l'impédance du PZ27 en fonction de la fréquence

Au lieu de générer un défaut dans la plaque, ce qui est irréversible, une pièce en aluminium rectangulaire de dimensions 27×35×2 mm^3 avec une masse de 5.5 g, sera collée sur la structure avec de la pâte. La taille de ce défaut est de l'ordre de la plus petite longueur d'onde. La position du défaut pourra être changée pour voir son effet sur les signaux. En effet, l'ajout de masse (ou la perte de masse) avec une discontinuité locale dans l'épaisseur du matériau agit également comme une source de dispersion en présence d'ondes ultrasonores, comme dans un cas de dommages de corrosion [114]. Des études antérieures ont observé la dispersion d'ondes ultrasonores aux bords de dommages de délaminage dans des structures composites [115]. À basses fréquences, la même dispersion d'ondes est également observée dans le cas d'addition de masse [116].

Les positions des capteurs, de la source et du défaut montrées dans la figure 6, sont placées loin des bords de la plaque pour minimiser les effets de bord. Les points D1, D2

et D3 correspondant aux positions de défaut testées sont alignés avec la paire de capteurs R1 R3.

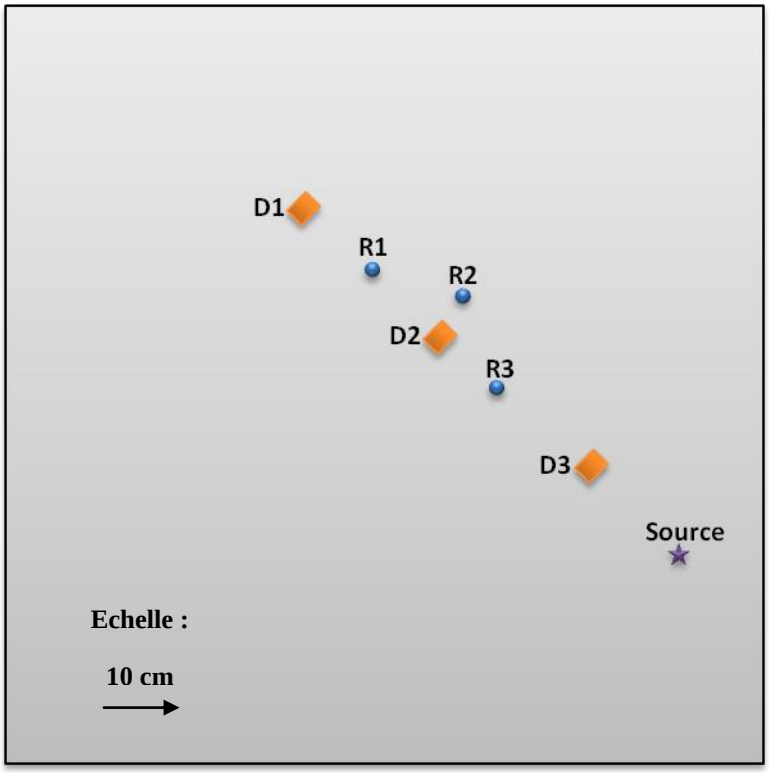


Figure 6 : *placement des capteurs, défaut et source sur la plaque*

2. Traitement des signaux

L'acquisition de signaux se fait simultanément pour les 3 capteurs, quand le seuil de 2 N est atteint par la source. Un nombre d'acquisitions *Nacq* de référence est effectué, ces acquisitions dites de référence correspondent à une plaque saine sans défaut et à une source placée en une position fixe dite de référence.

La figure 7 montre l'allure temporelle du signal source et récepteur pour un exemple d'acquisition. Il s'agit d'une impulsion type choc qui excite la plaque, le signal acquis

par le capteur est composé de plusieurs impulsions, il contient l'onde directe et plusieurs autres ondes réfléchies par les bords de la plaque.

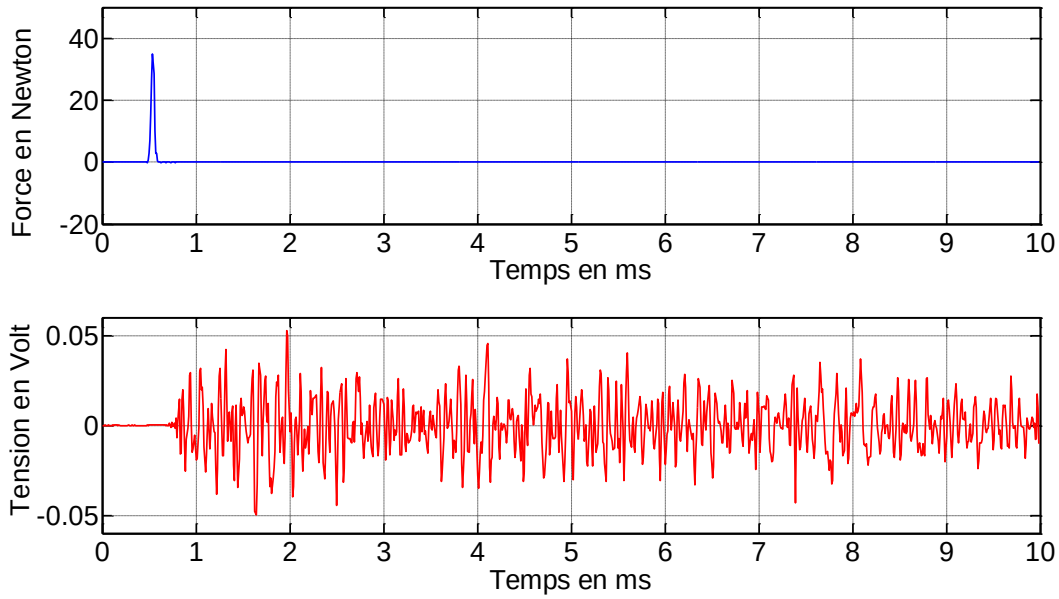


Figure 7 : Allure temporelle des signaux acquis, en bleu : Signal source marteau d'impact, en rouge : Signal capté par R1

Le contenu fréquentiel de ces signaux est montré en figure 8, en effet, puisqu'il s'agit d'une source impulsionnelle, la bande de fréquence excitée est très large. Ceci est un point intéressant dans le contexte de cette expérience, l'objectif étant de se rapprocher d'une source de bruit qui est souvent large bande. Le contenu fréquentiel du signal capteur présenté en rouge dans la figure 8, est semblable à celui du signal source, l'amplitude des signaux capteurs est très faible devant l'amplitude du signal source. Les petites variations d'amplitude dans le contenu fréquentiel du capteur sont dues aux différentes impulsions provenant de différents chemins.

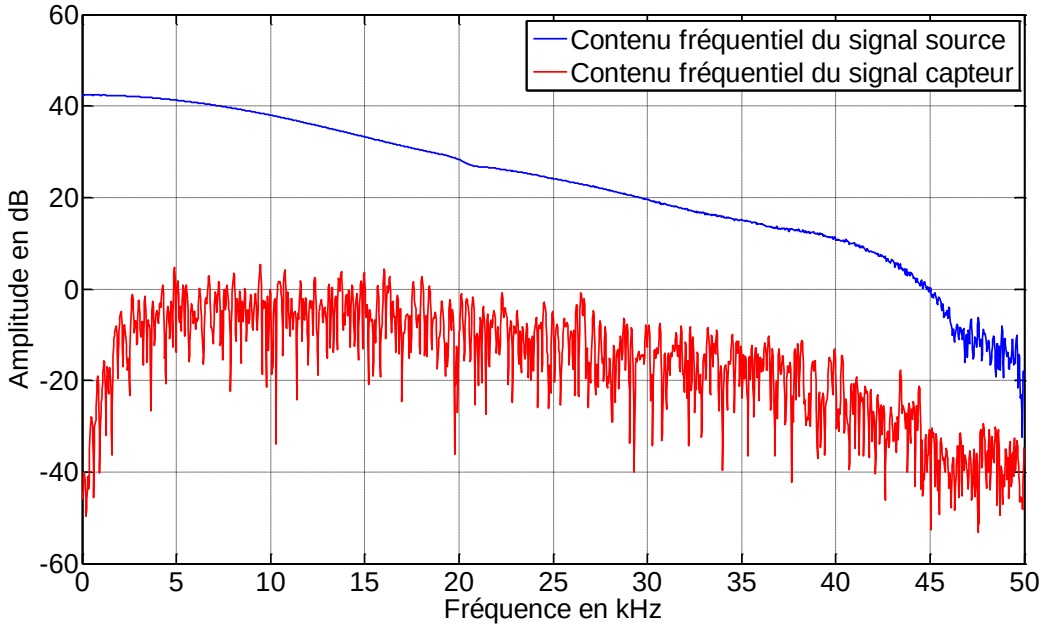


Figure 8 : Contenu fréquentiel du signal source marteau d'impact et du signal reçu par le capteur

L'énergie des signaux acquis par les différents capteurs est plus faible pour les fréquences en dessous de 3 kHz. Les résonances de la plaque sur ses premiers modes propres sont donc éliminées, ces modes ayant des grandes longueurs d'ondes.

Par la suite, une estimation biaisée de la fonction d'inter-corrélation est effectuée entre deux capteurs récepteurs.

La fonction d'inter-corrélation peut être exploitée pour détecter l'existence d'un défaut uniquement si elle dépend de l'intégrité de la structure. Autrement dit, pour différentes mesures faites dans les mêmes conditions, la même fonction d'inter-corrélation doit être obtenue en dépit de la nature non reproductible de la source [117].

Les courbes d'inter-corrélation entre deux récepteurs sont tracées pour plusieurs acquisitions, c'est-à-dire en répétant plusieurs fois la même mesure dans les mêmes conditions. L'amplitude de la source variant aléatoirement dans l'intervalle [20 50] N.

Malgré l'aspect aléatoire et non contrôlable de l'amplitude de la source, la fonction d'inter-corrélation est bien reproductible sur la partie du signal zoomé représentée en figure 9 mais également sur la totalité du signal d'inter-corrélation.

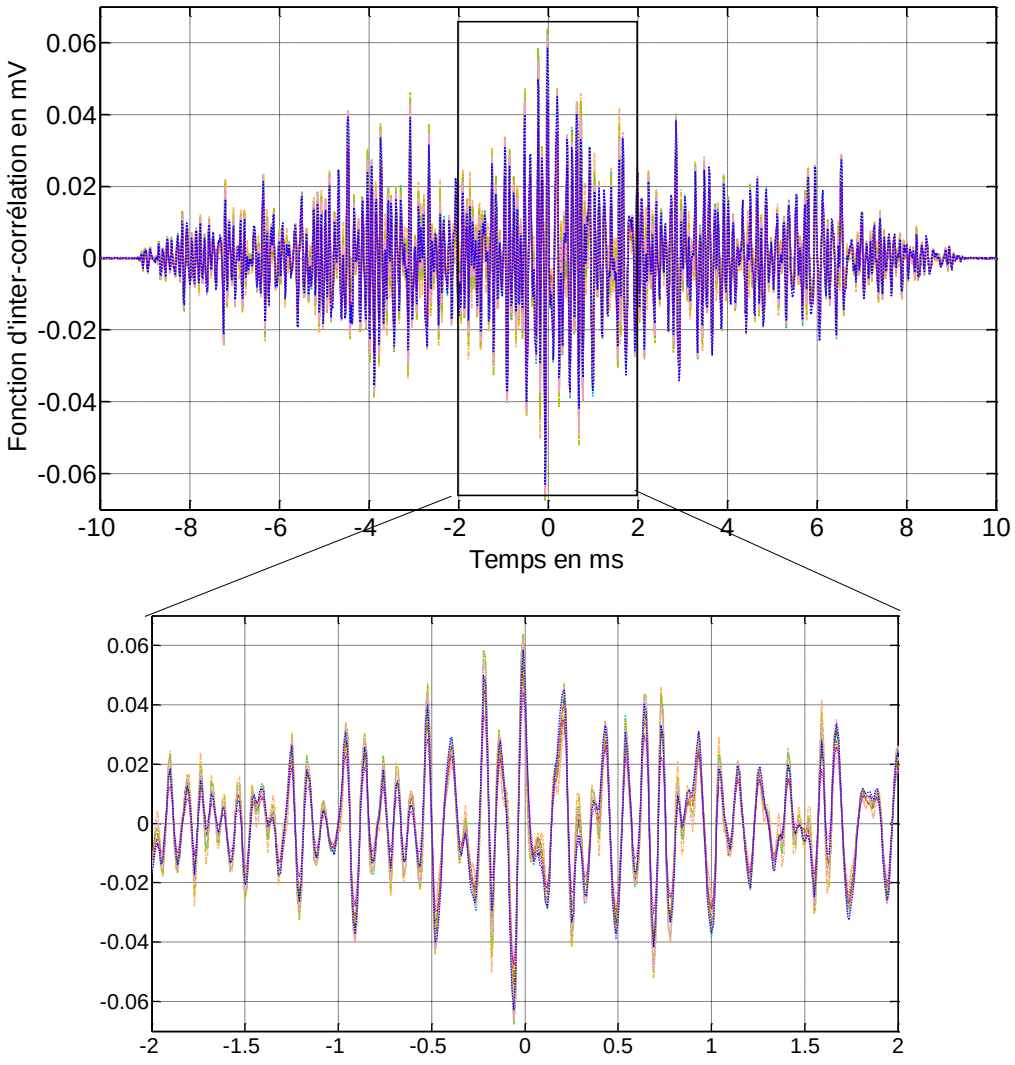


Figure 9 : Reproductibilité de la fonction d'inter-corrélation pour plusieurs mesures avec une amplitude de source aléatoire

2.1. Proposition d'un critère visuel : Enveloppe par transformée de Hilbert

Les fonctions d'inter-corrélations sont sensibles à l'existence d'un défaut, ce dernier agit principalement sur l'amplitude de ces fonctions [107]. Il est donc intéressant d'extraire les enveloppes des fonctions d'inter-corrélations pour étudier cette sensibilité. L'enveloppe des signaux d'inter-corrélation est extraite en utilisant la transformée de Hilbert. Les signaux ayant une bande étroite et une faible modulation, la condition de séparation entre les fréquences est donc vérifiée et le choix de l'utilisation de la transformée de Hilbert justifié. On définit un signal analytique complexe $z(t)$ ayant comme partie réelle le signal $r_{AB}(t)$ (qui représente le signal d'inter-corrélation entre deux signaux) et comme partie imaginaire sa transformée de Hilbert. Le signal analytique associé est :

$$z(t) = r_{AB}(t) + j\,\hat{r}_{AB}(t) \tag{7}$$

La définition mathématique de la transformée de Hilbert est la suivante :

$$TH(r_{AB}(t)) \;=\; r_{AB}(t) * \frac{1}{\pi\, t} \;= \frac{1}{\pi}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} r_{AB}(t)\,\frac{1}{(\mathrm{t}-\tau)}\,\mathrm{d}\tau\right] \tag{8}$$

L'enveloppe $e_i(t)$ n'est autre que la norme du signal analytique $z(t)$. L'extraction de l'enveloppe s'applique sur les *Nacq* fonctions d'inter-corrélations obtenues. Une moyenne sur les *Nacq* enveloppes est ensuite effectuée donnant ainsi naissance à une enveloppe dite de *référence* si les signaux sont issus d'une configuration sans défaut, et à une enveloppe *avec défaut* dans le cas d'une configuration avec défaut. Ici *Nacq* est égal à 20.

La superposition de l'enveloppe de *référence* et de celle *avec défaut* après la normalisation par rapport au maximum des deux, constitue le critère visuel de comparaison et d'identification de défaut. Un exemple de critère visuel est présenté en figure 10, l'enveloppe *référence* est tracée en bleu tandis que celle *avec défaut* est tracée

en rouge. Sur cet exemple, il est clair que le défaut agit sur l'amplitude des enveloppes, mais il n'est pas évident de mesurer visuellement le taux de ressemblance entre les enveloppes des fonctions d'inter-corrélation. De ce fait, il est nécessaire de proposer un critère objectif pour résoudre ce problème.

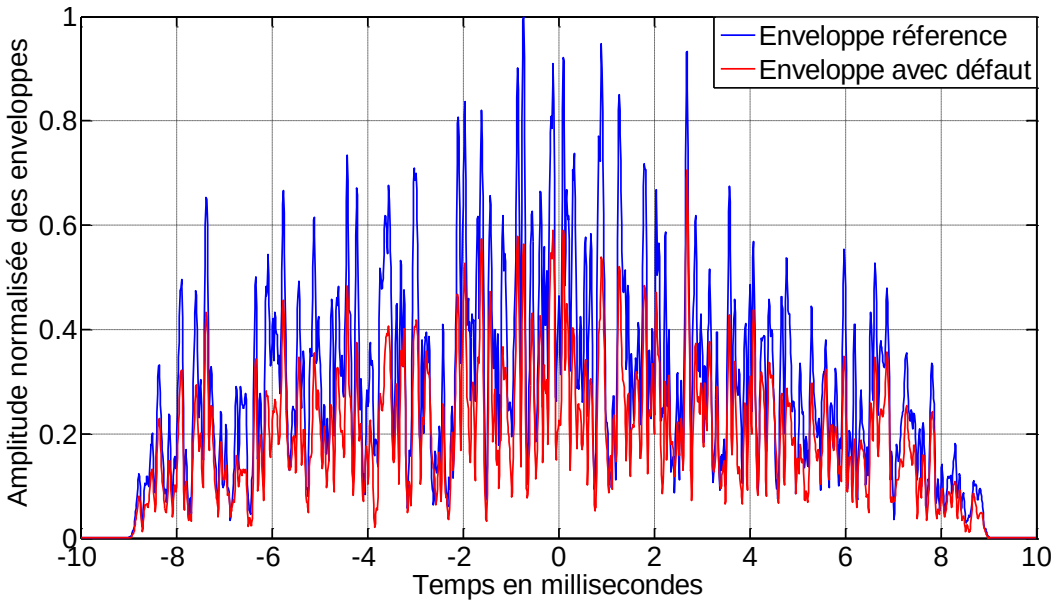


Figure 10 : Exemple de critère visuel : superposition de deux enveloppes, une de référence en bleu et une avec défaut en rouge

2.2. Proposition d'un critère numérique

Un critère numérique objectif appelé Critère Enveloppe d'Inter-corrélation *CEI* est proposé. Ce critère correspond à la moyenne des sécarts entre deux enveloppes. Si on nomme $e_i(m)$ (respectivement $e_j(m)$), l'enveloppe normalisée en amplitude correspondant à une configuration i (respectivement j), *CEI* sera donnée par l'équation (9).

$$CEI = \frac{100}{M} \sum_{m=0}^{M} \left| e_i(m) - e_j(m) \right| \qquad (9)$$

Le nombre de points de l'enveloppe *M* est égal à *2N+1* car il correspond au nombre de points de la fonction d'inter-corrélation, *N* étant le nombre d'échantillons acquis par un capteur. Le facteur d'échelle 100 est choisi parce que le critère est souvent faible, ainsi le critère numérique pourrait être mieux comparé. La stabilité du *CEI* a été testée, le critère a été calculé en répétant plusieurs fois une même configuration. À l'issue de ce test, le *CEI* sera obtenu avec une incertitude de mesure de ±1.

3. Résultats et discussions

3.1. Reproductibilité du critère visuel d'identification

La vérification de la reproductibilité du critère visuel est nécessaire. Deux enveloppes *références* (sans défaut) sont tracées dans la figure suivante, ces enveloppes correspondent à différentes acquisitions mais ayant été faites dans la même configuration (en gardant la même position des capteurs et de la source).

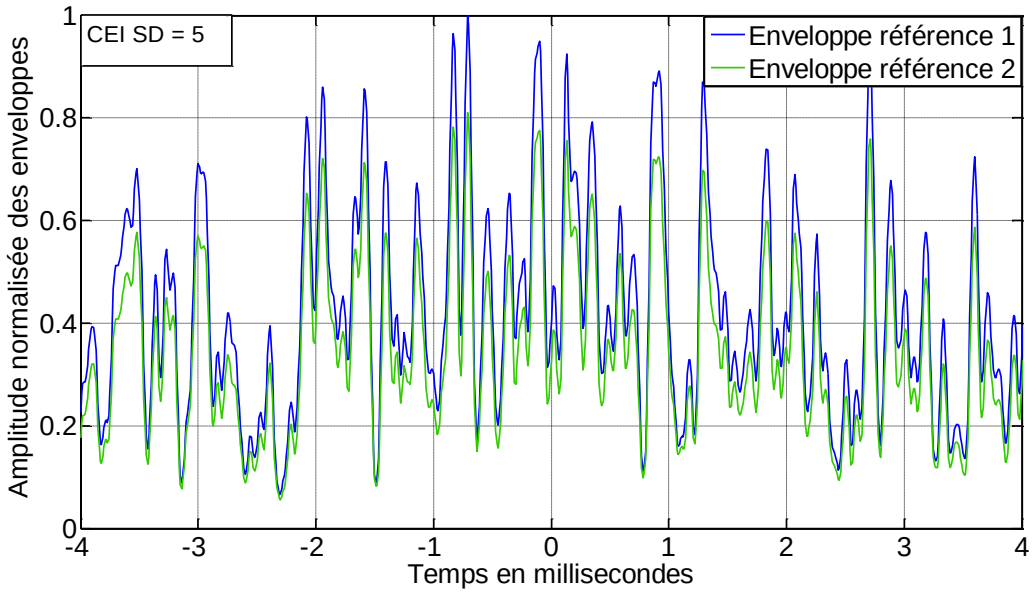


Figure 11 : Enveloppes des fonctions d'inter-corrélation pour 2 mesures identiques sans défaut, pour la paire de capteurs R1 R2

Le critère visuel illustré dans la figure 11 montre une bonne ressemblance entre les deux enveloppes, les courbes sont en phase avec une différence en amplitudes. Ces variations en amplitudes sont dues à l'aspect aléatoire de l'amplitude de la source.

Ce critère visuel correspond à un critère numérique *CEI* sans défaut (*CEI_SD*) de 5. Théoriquement la valeur de *CEI_SD* devrait être proche de zéro, il est possible que ceci soit du à la variation de l'amplitude de la source, celle ci étant non contrôlable. Il est donc nécessaire de comparer ce résultat avec la sensibilité du critère aux changements de la position de source ainsi qu'à l'apparition de défaut.

3.2. Sensibilité des critères aux changements de la position de la source

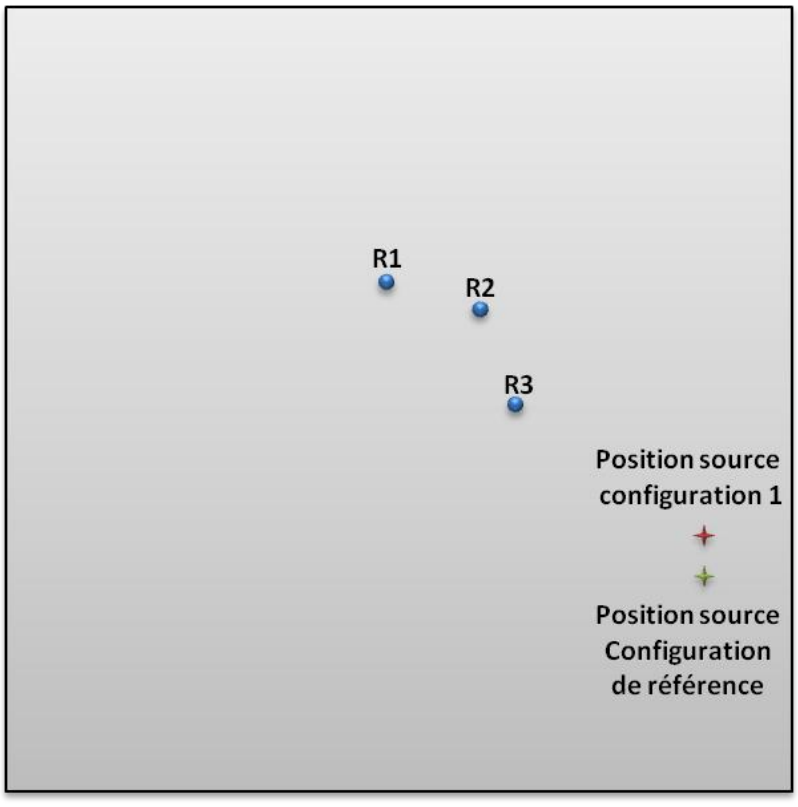


Figure 12 : Placement des capteurs et position de la source pour différentes configurations

Il est très important de distinguer des variations provenant d'un défaut à celles issues d'un changement de position de source.

La figure 12 montre le positionnement des capteurs R1, R2 et R3 par rapport à la position de référence de la source, mais également par rapport à une autre position de source à 5 cm de la position de référence. Plusieurs acquisitions ont été faites pour ces deux positions de source, ainsi que pour d'autres points dans le segment les séparant.

La figure 13 montre que les enveloppes correspondantes à deux positions de source sont totalement différentes en phase et en amplitude (la courbe bleue correspond à la position de référence, tandis que la courbe rouge correspond à l'enveloppe obtenue avec une source positionnée à 32 mm de la référence). Dans les autres cas (figures 11, 14), les courbes sont en phase et seule l'amplitude change. Ce critère visuel correspond à un *CEI* de 13 calculé sur la totalité des signaux d'inter-corrélation. La figure 14 montre le résultat pour un changement de l'ordre de quelques millimètres, les courbes se ressemblent mais pas parfaitement, l'influence d'un changement de position de l'ordre de quelques mm est moins importante que celle observée précédemment en figure 13, la valeur de *CEI* est de 5. Et en particulier, cette valeur est la même que celle correspondant à la superposition de deux enveloppes *référence* pour la même position de source.

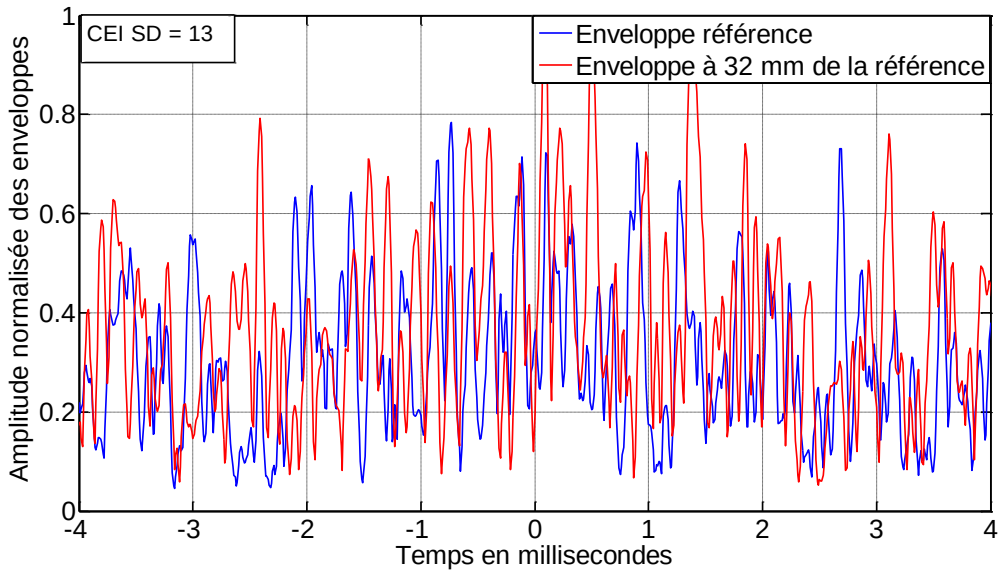


Figure 13 : Influence du changement de la position de source (quelques centimètres) sur le critère visuel, pour la paire R1 R2

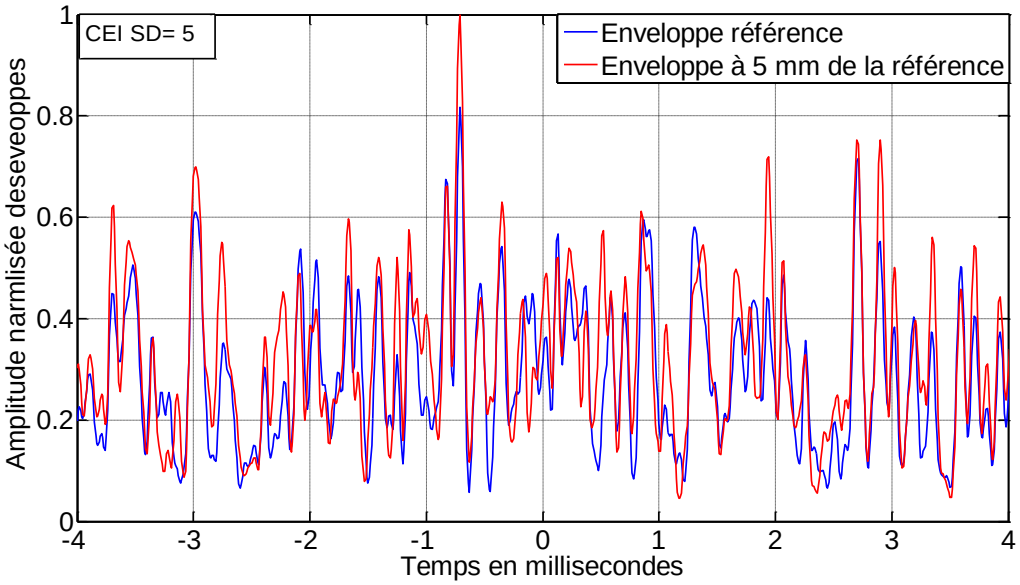


Figure 14 : Influence du changement de la position de source (quelques millimètres) sur le critère visuel, pour la paire R1 R2

L'enveloppe *référence* est par la suite comparée aux différentes enveloppes correspondantes à des sources de plus en plus distantes de la référence (toutes placées dans le segment séparant la position de référence et la position de source configuration 1, voir figure 12). CEI_{12} (respectivement CEI_{13} et CEI_{23}) sont les critères calculés à partir des fonctions d'inter-corrélation entre les capteurs R1 R2 (respectivement R1 R3 et R2 R3). Les valeurs de *CEI* sont tracées en fonction de la distance par rapport à la position de référence en figure 15. Les critères varient entre 3 et 14. Plus la distance entre la référence et la source est grande, plus la valeur de *CEI* augmente. La source ne doit donc pas bouger de plus de 2 mm de sa position initiale, pour que la méthode proposée puisse déterminer l'existence d'un éventuel défaut. Ceci est une limitation majeure de la méthode, la position de la source sera donc maintenue fixe pour les prochaines mesures.

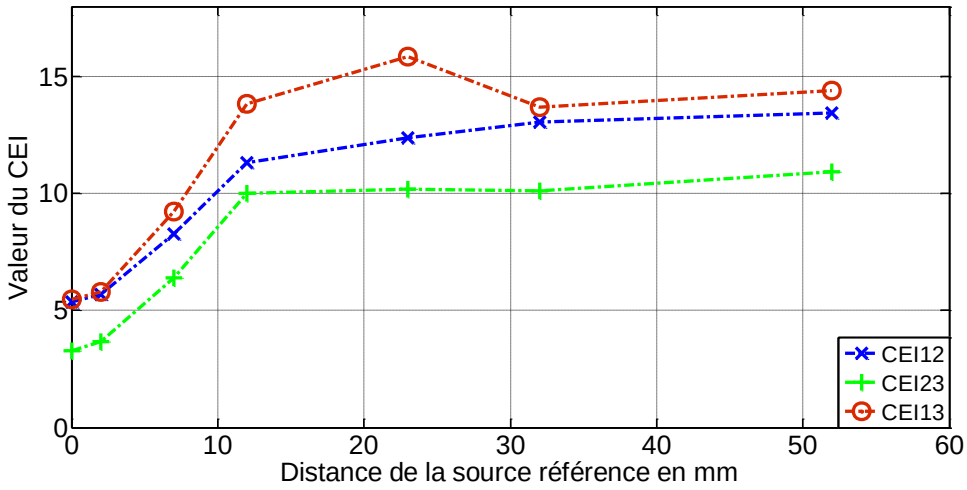


Figure 15 : Influence du changement de la position de la source sur le critère numérique CEI

3.3. Sensibilité des critères au défaut

Tout en gardant une position de source fixe, la sensibilité des critères à l'apparition des dommages sera vérifiée. La procédure est toujours comme ce qui suit : une première mesure sur une plaque sans défaut est réalisée et maintenue comme une référence, puis une seconde mesure est effectuée dans les mêmes conditions mais avec l'addition d'un défaut. Les deux configurations sont ensuite comparées.

Dans la figure 16, l'influence de la présence d'un défaut sur le critère visuel est montrée. Comme attendu, le critère nous montre une variation de l'amplitude d'inter-corrélation en présence d'un défaut. La courbe bleue sur la figure correspond à une configuration sans défaut, tandis que la courbe rouge correspond à une configuration avec défaut, les deux courbes sont en phase, et les amplitudes sont très différentes si on compare avec la figure 11. La valeur de *CEI* avec défaut (*CEI_AD*) correspondante est de 9,4.

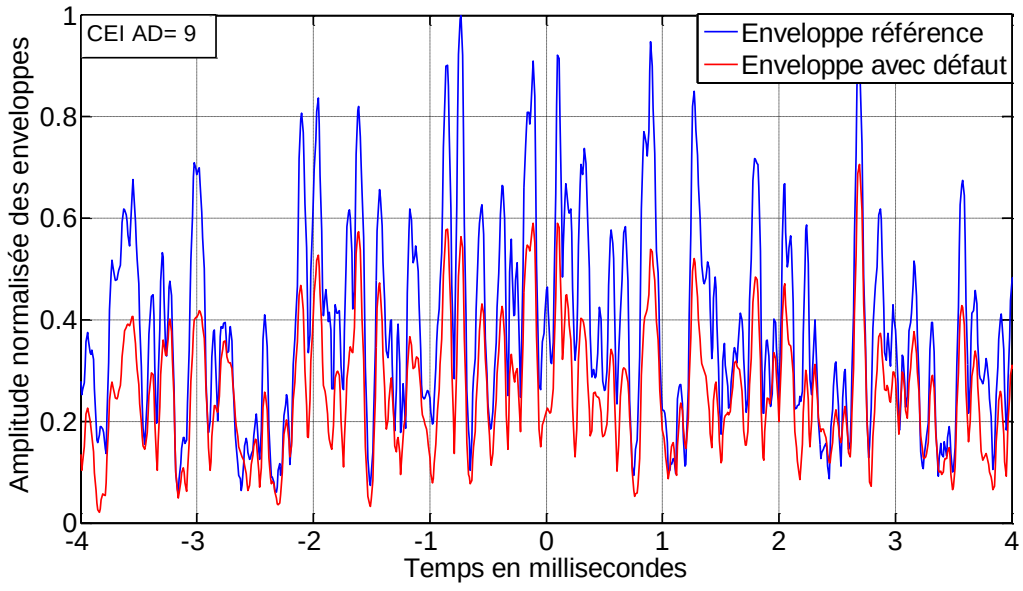


Figure 16 : Sensibilité du critère enveloppe à l'apparition de défaut placé en D1, enveloppe correspondante à la paire des capteurs R1 R2

Pour le critère visuel correspondant à l'apparition d'un défaut, seule l'amplitude du signal varie, la phase semble la même. Dans le cas d'une variation de la position de la source de l'ordre de quelques centimètres (figure 13), la phase et l'amplitude variaient toutes les deux. Ceci pourrait être une piste pour distinguer entre les deux cas, néanmoins, les critères proposés ne tiennent pas compte de la variation de phase des signaux d'inter-corrélation.

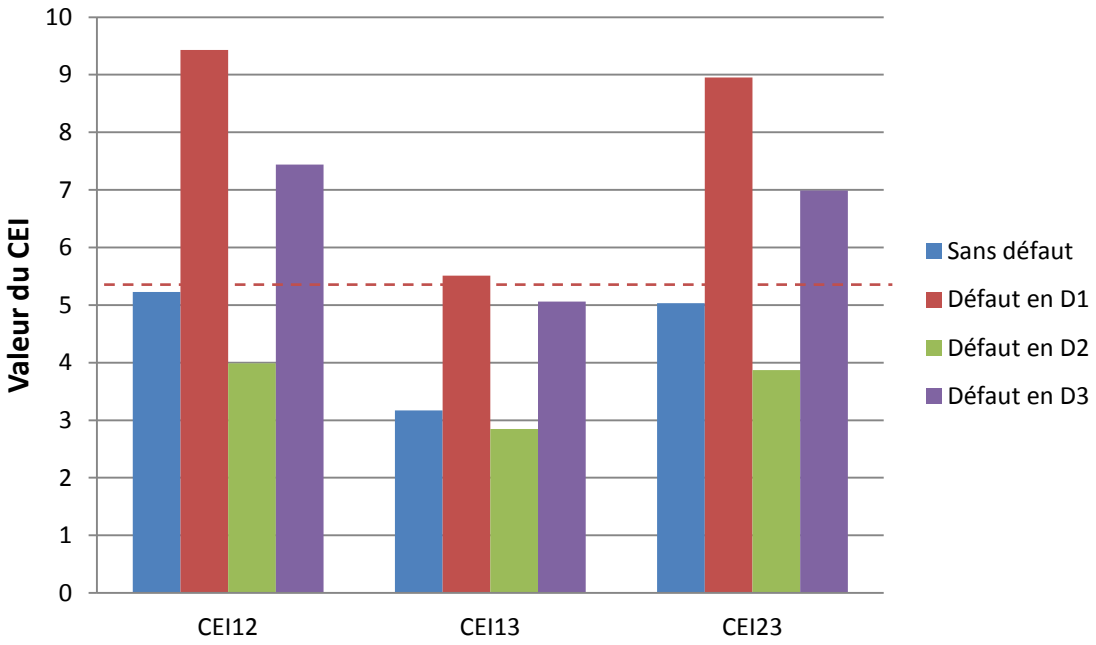


Figure 17 : Valeurs de CEI pour différentes positions de défaut

Les valeurs de *CEI_AD* sont calculées pour les 3 positions de défaut D1, D2 et D3 (figure 6), ces valeurs sont présentées dans l'histogramme en figure 17. Elles varient entre 3 et 10 selon l'emplacement du défaut par rapport à la paire de capteurs étudiée. Dans le paragraphe précédant (4.2), nous avons vu que les valeurs *CEI* correspondant au changement de la position de source varient entre 3 et 14, d'où la complexité d'interprétation. D'autre part, les critères *CEI_SD* peuvent atteindre des valeurs supérieures à 3, ce qui signifie que pour une valeur de CEI égale à 5 par exemple, trois

scenarios sont possibles : la position de source a bougé, un défaut est présent ou même rien à signaler.

En cas de source fixe, seulement deux scénarios sont possibles, mais si en plus la valeur de *CEI_SD* est fixée à une valeur maximale de 5 (présentée par un trait interrompu rouge sur la figure 17), dans ce cas toutes les valeurs de *CEI_AD* supérieure à *5* correspondent à une détection de défaut. Placé en D1 ou D3, le défaut est bien détecté par au moins 2 paires de capteurs. Par contre, placé en position D2, aucune paire n'a détecté ce dernier. L'identification de défaut est donc possible mais non garantie.

Les valeurs maximales constatées de *CEI* sont celles concernant la paire des capteurs R1 et R2 (CEI_{12}), ces capteurs sont les plus éloignés de la source, la paire R1 R3 qui est alignée avec la source et les positions des défauts a donné les valeurs minimales de *CEI* pour les 3 positions de défaut et ne détecte jamais le défaut. Notons également que la position de défaut la mieux captée est la position D1 (présentée par la barre rouge sur l'histogramme), c'est la position la plus éloignée de la source. Positionné en D2 (barre verte), le défaut n'est même pas identifié, les *CEI_AD* correspondant sont mêmes inférieures aux valeurs de *CEI_SD*, présentées par la barre Bleue.

Les barres au dessus de la ligne rouge dans l'histogramme de la figure 17, correspondent à une détection de défaut, l'écart entre le *CEI_SD* et le *CEI_AD* est de 4 dans le meilleur des cas, le *CEI* peut donc être sensible au défaut ainsi qu'à la position de ce dernier mais pas toujours.

Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'intérêt d'exploiter encore les techniques de corrélations pour le SHM passif. Il a été montré que la fonction d'inter-corrélation est non seulement reproductible mais également sensible aux défauts dans certains cas. L'inconvénient de cette méthode est sa sensibilité très forte à la position de la source.

Un critère visuel pour l'identification des défauts a été proposé, il s'agit de la superposition de deux enveloppes d'inter-corrélation obtenues par transformée de Hilbert, chaque enveloppe correspondant à une configuration donnée. Un critère numérique a été également proposé, obtenu en calculant la moyenne des écarts entre les enveloppes du critère visuel, ce critère est appelé *CEI*. Les premières mesures effectuées ont permis de tester en partie les capacités de ce critère numérique. Néanmoins, nous devons tester encore plusieurs configurations de mesure. De nombreuses configurations peuvent être proposées en guise de perspective, notamment le changement de l'emplacement de la source référence et l'étude de son effet sur les *CEI_AD*. Le défaut utilisé peut être remplacé par un défaut plus volumineux pour vérifier si la valeur de *CEI_AD* augmente. Enfin, le changement du positionnement des capteurs récepteurs peut certainement révéler d'autres résultats intéressants.

Par ailleurs, dans un contexte passif, les formes d'onde et les positions des sources ne sont pas contrôlées. Pour le cas présenté dans ce chapitre, la source est toujours située au même endroit et l'excitation est toujours de type choc avec des amplitudes variables. Le critère proposé est très sensible au changement de la position de la source, cela implique des limitations d'applications. Cette méthode ne peut pas être appliquée dans le cas d'une source ayant une localisation imprévisible, comme les gouttes de pluie sur une aile d'avion ou l'impact de grêlons par exemple. Il faut que la position de source reste fixe. Il est donc important de palier ce problème et de trouver un moyen qui permettrait d'éliminer cette sensibilité à la position de source. La variation de la phase du signal d'inter-corrélation observée uniquement dans le cas d'un changement de position de source peut nous mener vers une solution à ce problème, en effet, dans une configuration avec défaut la phase ne change pas, il n'y a que l'amplitude des signaux d'inter-corrélations qui est modifiée. Par conséquent, il est peut être possible de distinguer une modification de la position de source de l'apparition d'un défaut, en proposant un autre critère tenant compte des variations de phase.

D'autre part, il est nécessaire de tester les performances de ces critères en utilisant d'autres types de sources, en particulier le cas d'une source non localisée en espace.

Le travail expérimental effectué a permis de mettre en évidence les capacités d'une méthode de détection de défauts dans une structure académique en aluminium. Il serait intéressant de tester cette méthode sur des structures plus complexes avec d'autres types de matériaux comme les matériaux composites par exemple. Cette méthode pourrait mieux marcher sur des structures complexes, car le caractère diffus des champs est plus facile à obtenir dans ces cas.

Chapitre 3 : Expérience avec une source non localisée

Introduction

Les critères d'identification de défaut proposés dans le chapitre 2 seront testés sur une plaque en aluminium couplée à une cavité résonante. La plaque est donc sollicitée avec une source non localisée en espace cette fois afin d'éviter les influences de la position de la source sur les critères *CEI*. Dans la première partie de ce chapitre, l'efficacité de la méthode d'identification sera vérifiée et quelques paramètres de la méthode seront fixés en utilisant un signal sinus mono fréquence comme source. Dans la seconde partie de ce chapitre, la plaque sera sollicitée par un signal de type bruit blanc. Dans les deux cas la source est non localisée en espace. L'efficacité des critères d'identification sera vérifiée pour différentes positions de défaut. L'influence de la position des capteurs sur les valeurs de *CEI* sera aussi étudiée.

1. Description du dispositif expérimental

Le problème de l'influence de la position de la source sur le critère *CEI* va être contourné en travaillant avec un dispositif expérimental ayant une source non localisée en espace. La photo en figure 18 montre ce dispositif.

Figure 18 : Dispositif expérimental avec une source non localisée en espace

Il s'agit d'un haut parleur qui excite une cavité parallélépipédique de dimensions intérieures 1505×245×250 mm^3. La face supérieure de cette cavité est une plaque en aluminium de dimensions 1500×244×1 mm^3 vissée sur les faces qui lui sont adjacentes (conditions de bords encastrés). Les autres faces sont en plexiglas d'épaisseur 2 et 1,5 cm et servent de bâti, elles peuvent être considérées comme des parois rigides. La face opposée à celle contenant le haut parleur est trouée. Le haut parleur est alimenté

par un générateur de signaux et un amplificateur. Notons que ce dispositif sert initialement pour démonstration des modes propres aux visiteurs du laboratoire. Cependant, dans cette expérience, le dispositif sera excité avec des fréquences bien supérieures aux premiers modes propres.

2. Optimisation de la méthode avec une source mono fréquence

2.1. Objectifs de l'étude

Afin de vérifier l'efficacité de la méthode d'identification des défauts, le dispositif expérimental sera excité avec un signal sinus dont on choisira la fréquence et l'amplitude à l'aide du générateur des signaux et de l'amplificateur. La plaque est instrumentée par 3 pastilles piézoélectriques PZ27 ; R1, R2 et R3. Les signaux ont une longueur de 20 ms, avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz. Une mesure est obtenue avec un nombre d'acquisitions *Nacq* de 10. La procédure sera toujours la suivante : une première mesure sur une plaque considérée saine sera faite et gardée comme référence, ensuite une deuxième mesure sous les mêmes conditions (même fréquence, même amplitude et même position de capteurs) est effectuée avec l'ajout de défaut. Ces deux configurations seront ensuite comparées et donneront comme résultat le *CEI_AD*. Le *CEI_SD* est issu lui de deux configurations références sans défaut.
Les emplacements des capteurs et du défaut sont décrits en figure 19.

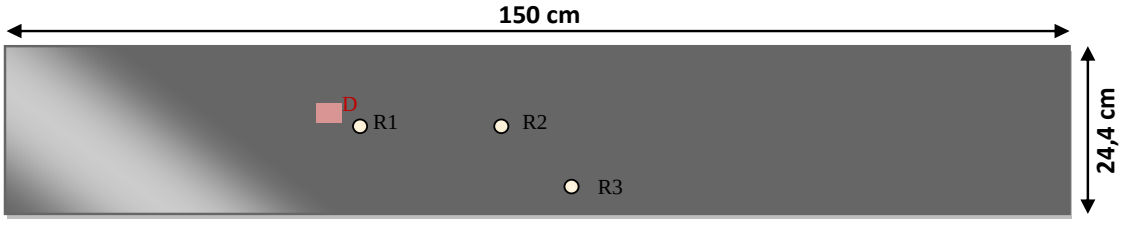


Figure 19 : Disposition des capteurs et du défaut sur la plaque encastrée

Plusieurs étapes de la méthode d'identification seront étudiées, l'objectif étant d'avoir un *CEI_SD* faible et un *CEI_AD* important. Ces critères seront donc notre repère pour régler les différents paramètres de la méthode d'identification (comme le nombre d'acquisitions par mesure, le nombre d'échantillons par acquisition…) et ceci pour différentes amplitudes et différentes fréquences du signal source.

2.2. Sensibilité du *CEI* à la fréquence d'excitation

La sensibilité de la fonction d'inter-corrélation au défaut dépend de la fréquence de la source. Il a été montré dans une étude faite avec des sources ayant des fréquences de l'ordre de quelques kHz [85], que ces fonctions subissent des variations d'amplitudes en présence d'un défaut. Ceci a été également montré dans le chapitre précédant.

Un balayage de fréquences entre 1 et 10 kHz a été effectué, seules les fréquences correspondant à des modes de vibrations où la plupart des capteurs se retrouvaient sur un ventre de vibration ont été choisies. En effet, en changeant la fréquence les nœuds et ventres de vibration du mode propre de la plaque se déplacent et les capteurs parfois se retrouvent sur un nœud de vibration d'où l'obtention d'un signal très faible.

La figure 20 montre les variations des valeurs *CEI_SD* et *CEI_AD* en fonction de la fréquence du signal sinus source. Les valeurs *CEI_SD* sont plutôt stables, elles sont toujours faibles quelle que soit la fréquence. Les valeurs de *CEI_AD* ne sont pas stables, il est difficile de dire si le critère est plus sensible aux basses ou hautes fréquences. Néanmoins il y a toujours un écart minimum de 15 entre les *CEI_SD* et les *CEI_AD*, ce qui n'était pas le cas pour le chapitre 2 avec la source localisée. L'écart le plus important est de 40, il correspond à la fréquence de 4,7 kHz. C'est donc avec ce choix de fréquence que la suite de ces tests sera effectuée.

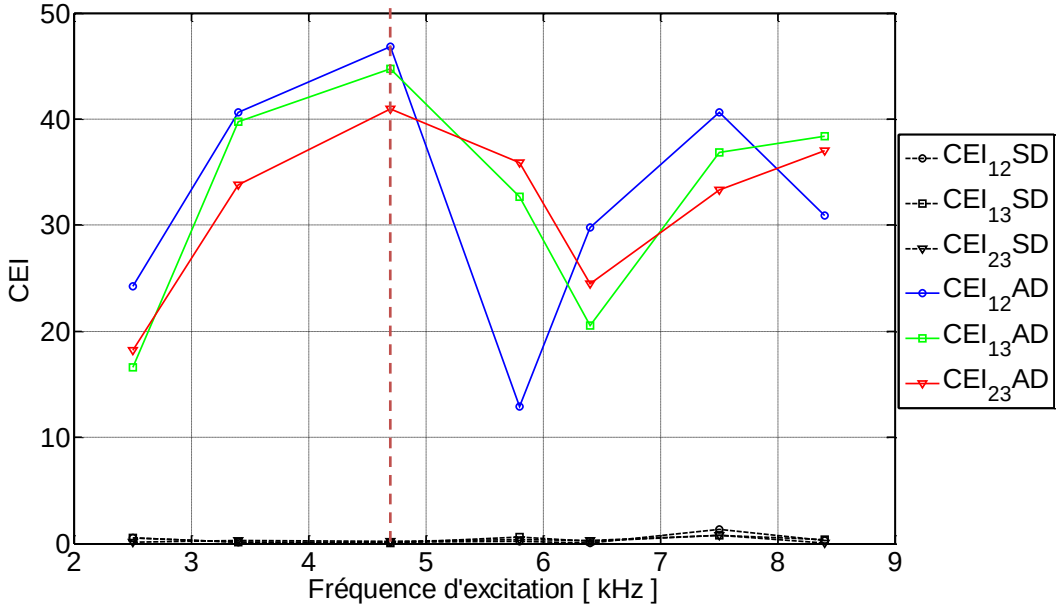


Figure 20 : Variation des valeurs CEI pour différentes fréquences d'excitation

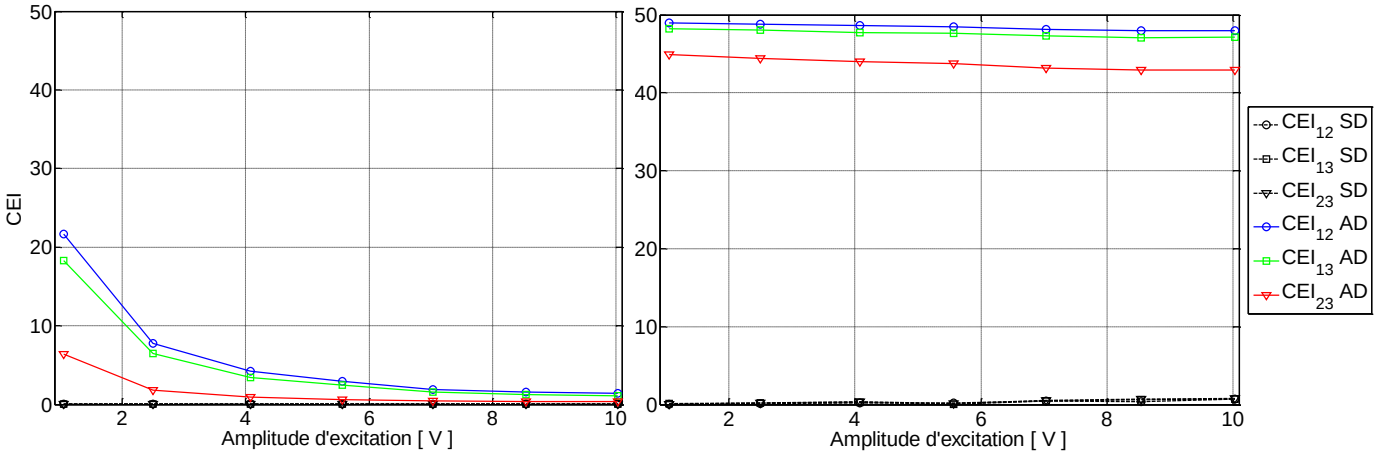
2.3. La normalisation des fonctions d'inter-corrélation

Dans cette partie, on cherche à trouver l'influence de la normalisation des fonctions d'inter-corrélation par rapport à l'énergie des signaux (équation (10)), sur le critère *CEI*. Cette étude n'a pas été effectuée dans le chapitre 2 car l'influence n'était pas claire dans le cas d'une source localisée (marteau d'impact).

$$\hat{r}_{AB}(m) = \frac{1}{N} \frac{\sum_{n=0}^{N-m-1} u_A(n)\ u_B\ (n+m)}{\sum {u_A}^2 \sum {u_B}^2} \tag{10}$$

Plusieurs mesures sans et avec défaut ont été faites en variant à chaque fois l'amplitude de la source et en travaillant avec une fréquence de 4.7 kHz.

La figure 21 montre la dégradation frappante qu'apporte la normalisation sur les résultats quelle que soit l'amplitude du signal.



(a) *(b)*

Figure 21 : CEI en fonction de l'amplitude de la source, (a) avec normalisation, (b) sans normalisation

En normalisant les inter-corrélations par rapport aux énergies des signaux nous obtenons des valeurs *CEI_SD* presque nulles, mais l'écart entre celles ci et les valeurs de *CEI_AD* n'est pas suffisamment grand surtout quand l'amplitude d'excitation augmente (un écart de 1 pour 10 Volt), d'où la difficulté d'interprétation. Néanmoins, une bonne distinction est observée pour les faibles amplitudes (un écart allant de 7 à 23 selon la paire de capteurs prise en compte).

Les résultats sans normalisations sont plus prometteurs, un écart minimal de 40 est observé entre les *CEI_SD* et les *CEI_AD* et ceci quelle que soit l'amplitude de la source. Le critère est insensible au niveau de l'excitation et garde presque la même valeur, ceci est un point très important car l'objectif est de trouver un critère insensible aux changements de la source. Ici, il est insensible à l'amplitude.

Même si les valeurs de *CEI_SD* avec normalisation sont plus proches de zéro, il faut également tenir compte de l'écart par rapport à *CEI_AD*, celui ci est plus important sans normalisation. D'autre part les valeurs *CEI_AD* calculées avec normalisation sont

sensibles à l'intensité de la source, ce qui n'est pas un avantage pour l'identification. Le calcul de *CEI* se fera donc sans normalisation des fonctions d'inter-corrélations.

2.4. Méthode de calcul du *CEI*

Le *CEI* est obtenu en calculant la moyenne des écarts entre deux enveloppes correspondant chacune à une configuration donnée. Ces enveloppes sont obtenues en appliquant une transformée de Hilbert sur les fonctions d'inter-corrélations entre les différents signaux récepteurs. Dans la figure 22, la superposition d'une enveloppe avec défaut et d'une autre enveloppe sans défaut présente le critère visuel de comparaison. L'écart entre les deux enveloppes est bien évident ici dans le cas d'un signal sinus de 4,7 kHz comme source.

Le calcul de *CEI* s'effectue comme l'indique l'équation (9) sur la totalité des signaux enveloppes. Or en observant la figure 22, l'écart est maximum quand les enveloppes sont au maximum (autour de zéro millisecondes), et diminue ensuite au fur et à mesure en s'éloignant des deux cotés jusqu'à atteindre 0 aux extrémités des signaux.

L'idée est de calculer le *CEI* sur la partie maximale des enveloppes (limité par 2 droites pointillées sur la figure 22). La méthode d'identification proposée se base sur la comparaison des inter-corrélations sans et avec défaut. Il est donc intéressant de considérer la partie où les signaux se ressemblent le plus, afin de mener au mieux cette comparaison.

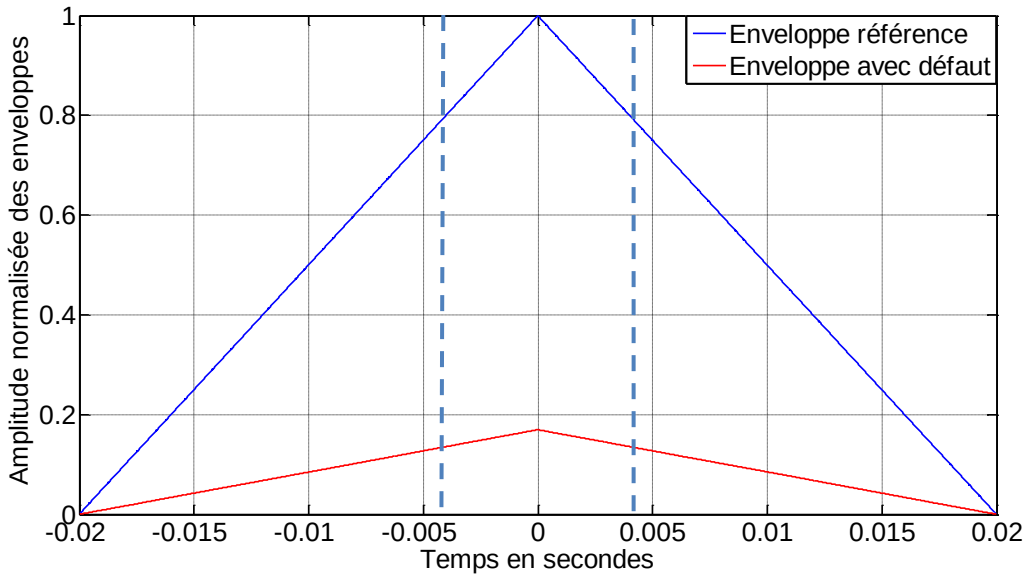


Figure 22 : Superposition d'enveloppes sans et avec défaut, Signal source sinus 4,7kHz

Les valeurs de *CEI* sont présentées dans le diagramme en figure 23, dans un premier temps, la moyenne des écarts est calculée sur la totalité des signaux et dans un deuxième temps, seulement la partie des enveloppes entre -4 ms et 4 ms est considérée.

Pour la première méthode de calcul, l'écart minimum entre les *CEI_SD* et *CEI_AD* est de 40, l'écart maximum est de 47 à peu près. Pour la deuxième méthode, l'écart est de 71 minimum et 82 au maximum pour le même cas d'étude, c'est presque le double des écarts calculés sur la totalité des signaux, tout en gardant un *CEI_SD* très proche de zéro. La valeur *CEI_SD* présentée dans le diagramme est la valeur maximale sur les trois paires des capteurs. Calculée sur la totalité des enveloppes, elle vaut 0,2 et calculée sur la partie maximale des enveloppes, elle est de 0,3. En vu des valeurs trouvées, l'efficacité du critère *CEI* pour l'identification des défauts est bien vérifiée grâce à l'utilisation de signal sinus comme source.

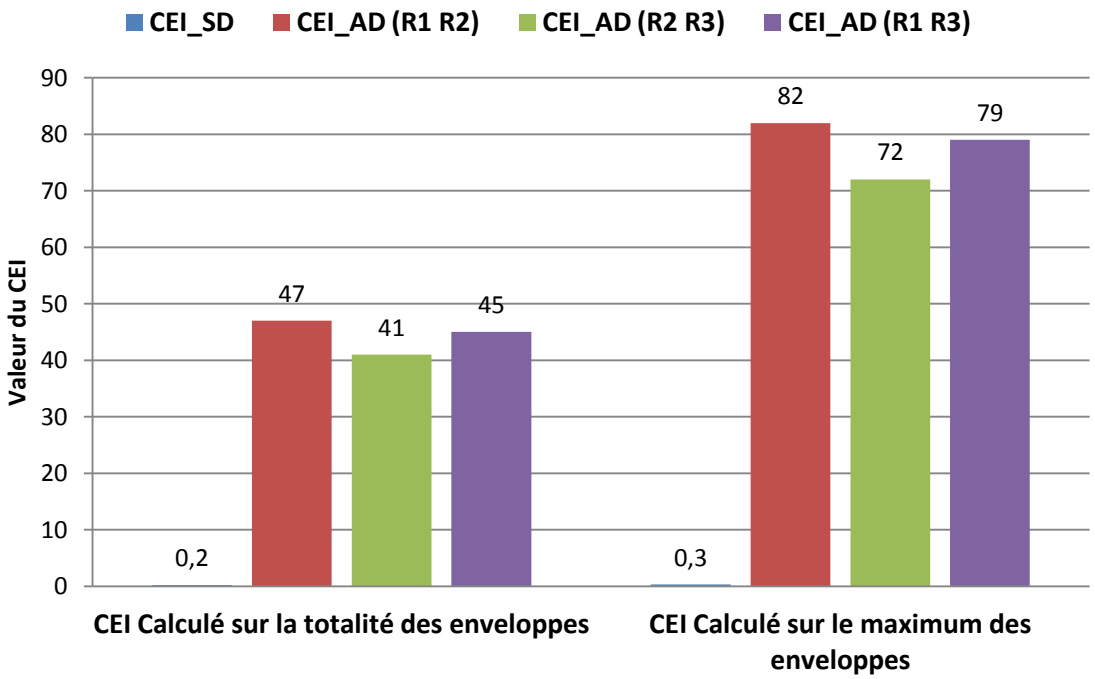


Figure 23 : Comparaison des méthodes du calcul de CEI_SD et CEI_AD, signal sinus comme source

Il est préférable d'avoir un écart maximum pour mieux identifier les défauts, c'est donc sur la partie maximale des enveloppes que le *CEI* sera calculé.

Notons aussi que pour les deux méthodes de calcul la relation entre les *CEI* pour différentes paires de capteurs n'a pas changé, dans les deux cas, le *CEI_AD* correspondant à la paire R1 R2 est toujours le plus sensible au défaut, le critère pour la paire R1 R3 est en seconde position et enfin celui correspondant à la paire R2 R3 (présenté en vert) est le moins sensible. Le défaut semble donc mieux détecté par la paire R1 R2 et moins par la paire R2 R3, rappelons qu'il est placé proche du capteur R1 (figure 19).

Cette sensibilité à la position du défaut sera vérifiée en plaçant le défaut dans deux positions différentes D1 et D2 comme le montre la figure 24. Positionné en D1 (à coté du capteur R1), le défaut serait logiquement mieux détecté par les paires R1 R2 et R1

R3, tandis qu'en le positionnant en D2 (à coté du capteur R3), celui-ci serait mieux détecté par les paires R1 R3 et R2 R3.

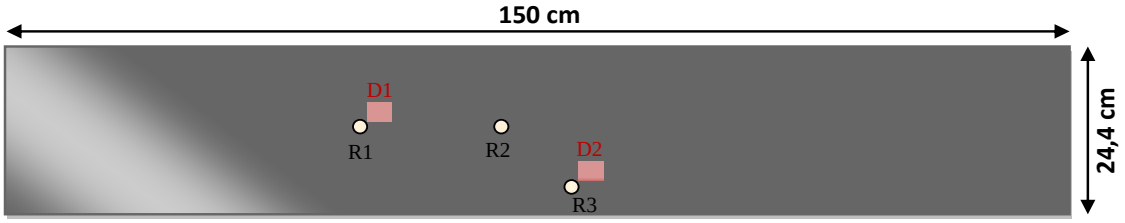


Figure 24 : Disposition des capteurs et des défauts sur la plaque encastrée

Les différentes mesures effectuées ont permis de fixer un seuil pour les valeurs *CEI_AD* à partir duquel la détection du défaut est possible. Le *CEI_SD* peut atteindre une valeur de 2 dans le cas d'un signal sinus, nous estimons donc qu'à partir d'une valeur de *CEI_AD* égale à 5 la détection est possible sans aucun doute.

Les deux positions de défaut ont été testées. Le *CEI_AD* a été calculé pour les différentes paires de capteurs et dressé dans l'histogramme en figure 25. Toutes les valeurs *CEI_AD* dépassent le seuil de détection, le défaut est parfaitement détecté dans toutes les configurations testées sans ambigüité.

D'autre part, le *CEI* semble sensible à la position du défaut. En effet, lorsque le défaut est positionné à coté d'un des capteurs, automatiquement les paires incluant ce capteur donnent les valeurs de *CEI* les plus grandes. Notons aussi que la position D2 est mieux captée par les 3 paires, la proximité de cette position aux bords de la plaque pourrait en être la cause.

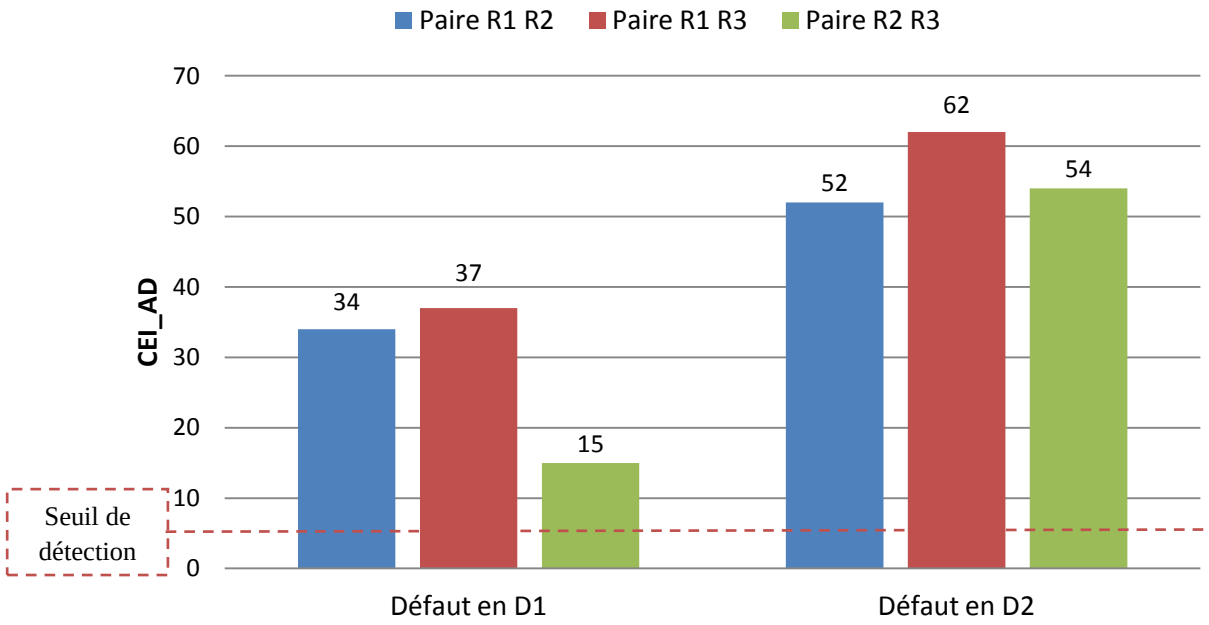


Figure 25 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, excitation avec signal sinusoïdal

Dans le cas d'un signal mono fréquence, un seul mode de la plaque sera excité, ceci pourrait engendrer des vibrations différentes des points de la plaque, et pourrait éventuellement empêcher la détection d'un défaut se situant sur un nœud de vibration.

Le défaut a donc été déplacé sur différentes positions de la plaque, ces positions sont marquées par un petit point noir en figure 26 (et suivantes). Les résultats de *CEI_AD* obtenus en déplaçant le défaut sur la plaque pour chaque paire de capteurs sont présentés sous forme d'un code couleur en figure 26. Lorsque la valeur de *CEI_AD* est inférieure à 5, couleur verte, on estime que le défaut n'est pas détecté. Ce seuil est déduit à partir des valeurs *CEI_SD* qui sont toujours inférieures à 3 en ajoutant une marge de sécurité de 2. Les valeurs *CEI_AD* au dessus de 5 sont très élevées, il est donc préférable de trier ces valeurs dans 2 intervalles. Si la valeur est comprise entre 5 et 10 (couleur jaune), nous considérons que le défaut est à peine détectable, la valeur de 10 est choisie comme limite pour avoir des intervalles égaux. Enfin, si le *CEI_AD* est supérieure à 10 (couleur rouge et rouge foncée), le défaut est parfaitement détecté.

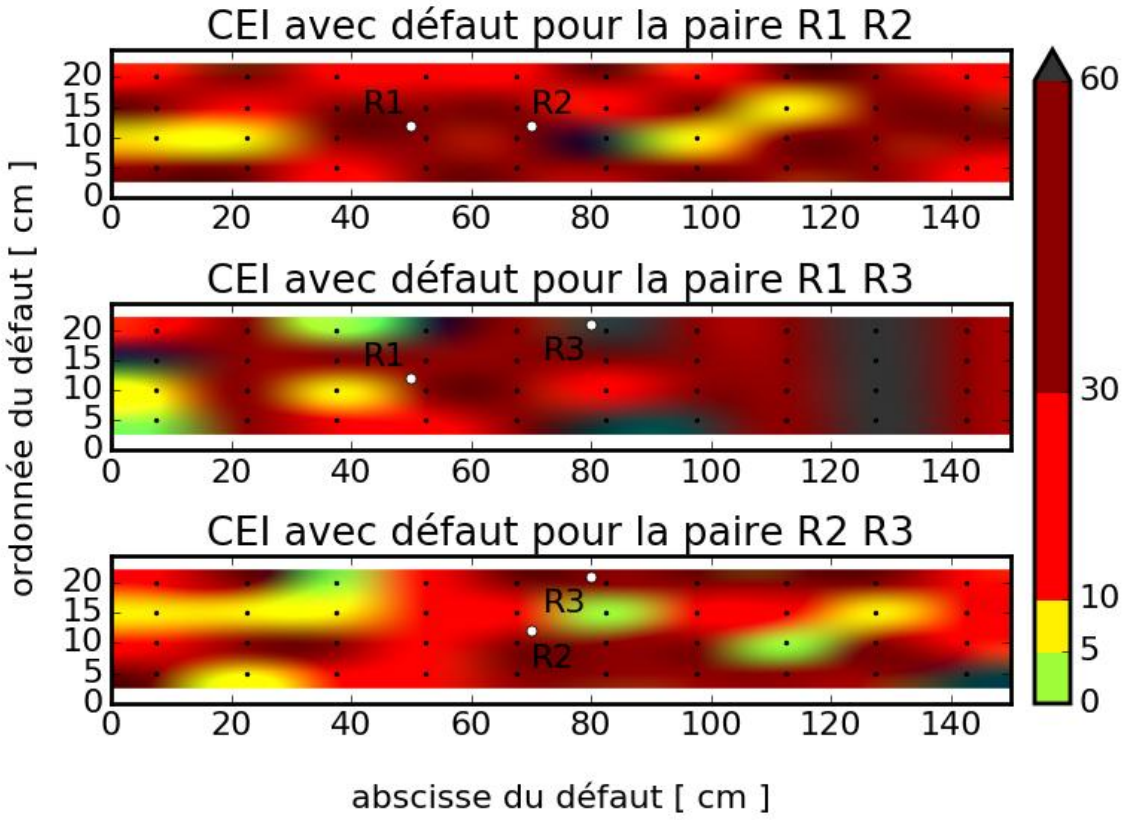


Figure 26 : CEI_AD pour différentes positions de défaut, signal sinus de 4,7 kHz comme source

L'écart entre les valeurs de *CEI_SD* et celles avec défaut dans le cas d'un signal source sinus peut aller jusqu'à 65. En effet, le défaut est mieux détecté quand les capteurs sont distants les uns des autres, les meilleures valeurs de *CEI_AD* concernent la paire R1 R3, alors que les valeurs les plus petites de *CEI_AD* sont celles des capteurs R2 et R3. Notons également le cas de quelques positions, où le défaut n'est pas détecté avec un *CEI_AD* entre 0 et 5 (couleur verte), ou à peine détectable avec des valeurs entre 5 et 10 (couleur jaune).

La variété des valeurs de *CEI_AD* selon la position du défaut, avec un énorme écart entre celles-ci, prouve que les vibrations dans la plaque ne sont pas les mêmes en tout point. Ceci est lié au contenu fréquentiel de la source. En travaillant avec une seule

fréquence, un seul mode propre est excité. Pour avoir des vibrations équivalentes en tout point de la plaque, il faudrait travailler avec un signal large bande, ainsi plusieurs modes seraient présents dans la plaque.

2.5. Description de la source large bande

Le problème de la distribution non uniforme des vibrations dans la plaque causée par l'aspect mono fréquentiel de la source sera remédié en utilisant un signal bruit large bande comme source. Un signal de bruit blanc gaussien est créé, ensuite un filtre Butterworth d'ordre 10 est appliqué sur ce bruit avec une bande passante de 3 à 6 kHz, ce filtre sert à garder un maximum d'énergie dans la bande de fréquences utile tout en travaillant avec une source de type bruit.

Ce bruit filtré est ensuite généré en utilisant la sortie de la carte d'acquisition, la tension de sortie maximale de cette carte est de 3,5 Volt, un amplificateur est donc lié au haut parleur excitant la cavité. Un extrait du signal résultant est présenté dans la figure 27.

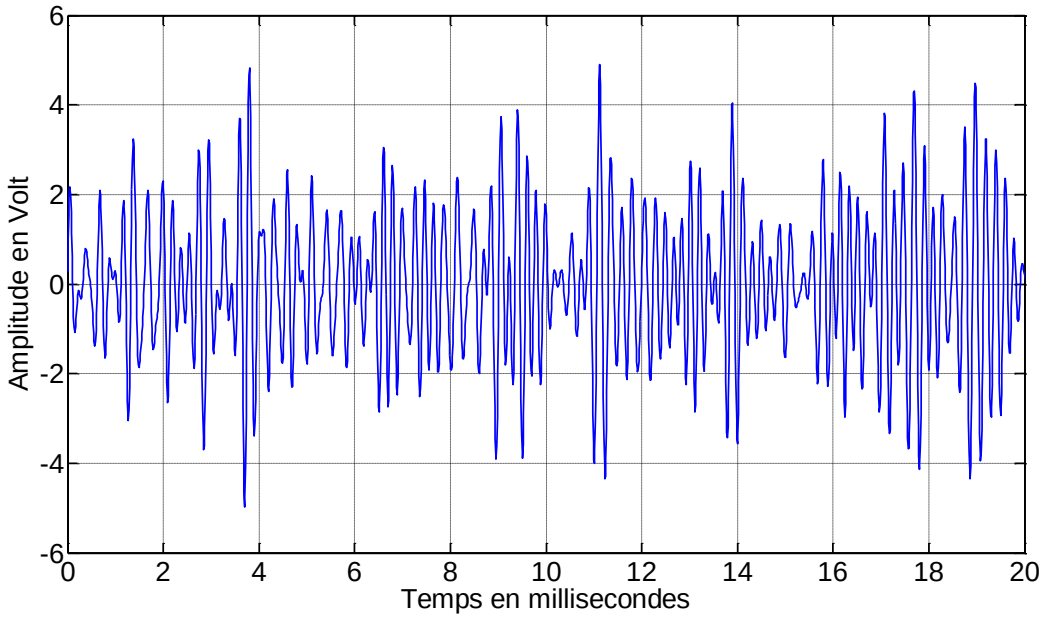


Figure 27 : Partie du signal source : Bruit gaussien filtré et amplifié

2.6. Nombre d'échantillons par acquisition

Dans cette section, on s'intéresse à la détermination du nombre nécessaire d'échantillons par acquisition pour avoir un critère *CEI* stable. Ce critère est basé sur une estimation biaisée des fonctions d'inter-corrélations, il serait plus stable quand l'estimation de celle-ci converge vers sa véritable valeur. En théorie, pour que l'erreur tende vers zéro, il faut que le nombre de points *N* du signal tende vers l'infini. En pratique, il n'est pas possible d'avoir des signaux de durée infinie, d'où l'intérêt de déterminer la valeur de *N* nécessaire pour une bonne estimation de la fonction d'inter-corrélation, et pour assurer par conséquent la stabilité des critères *CEI.*

Tout en excitant avec le signal bruit décrit dans le paragraphe précédant, le critère *CEI* a été calculé en prenant à chaque fois un nombre plus grand d'échantillons (voir figure 28). Ici le CEI est calculé sur la totalité des signaux puisque le nombre d'échantillons acquis varie.

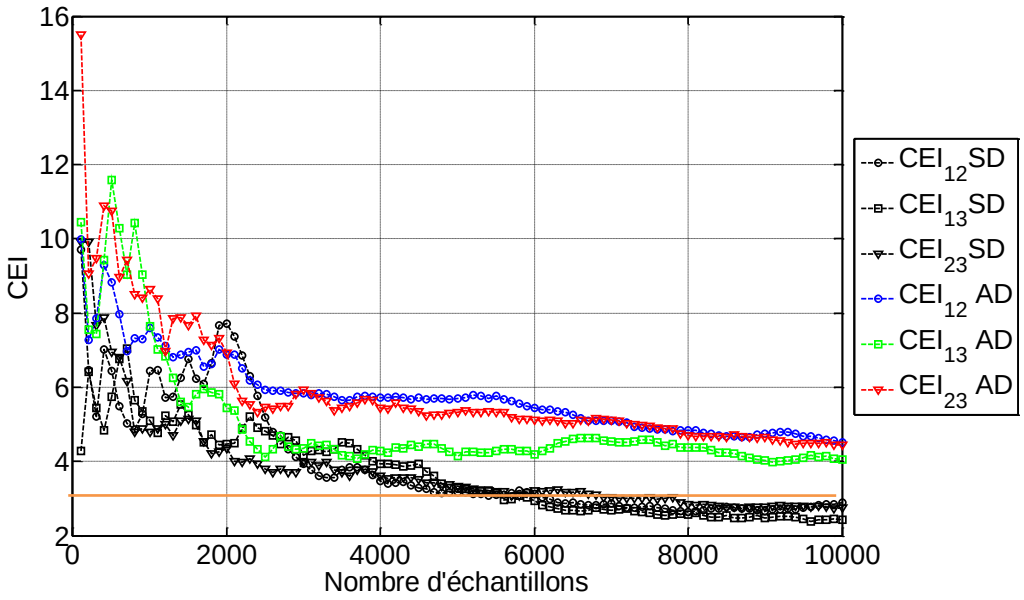


Figure 28 : CEI en fonction du nombre d'échantillons par acquisition (N) pour un signal source bruit filtré [3 6] kHz

Dans le cas d'un signal de bruit, l'écart entre *CEI_SD* et *CEI_AD* n'est pas très important, et le *CEI_SD* n'est pas suffisamment proche de zéro.

En augmentant la durée du signal (le nombre d'échantillons), les valeurs de *CEI* se stabilisent, le *CEI_SD* tend vers zéro, et l'écart par rapport à *CEI_AD* est plus important. Dans ce test, un nombre d'acquisitions de 20 est utilisé pour chaque mesure, nous verrons par la suite que le nombre *Nacq* agit également sur les critères *CEI*. Nous avons décidé de fixer un seuil maximum pour *CEI_SD* à 3, la durée des signaux de bruit est donc fixée à 100 ms (10000 échantillons avec une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz).

Notons que dans le cas d'un signal sinus de fréquence 4,7 kHz. Les valeurs CEI en fonction du nombre d'échantillons sont différentes, elles sont présentées dans la figure 29.

L'écart entre le *CEI_SD* et *CEI_AD* est plus important que celui trouvé dans le cas d'une source de bruit. Le *CEI* est stable à partir de seulement 1000 échantillon, ou de 10 ms.

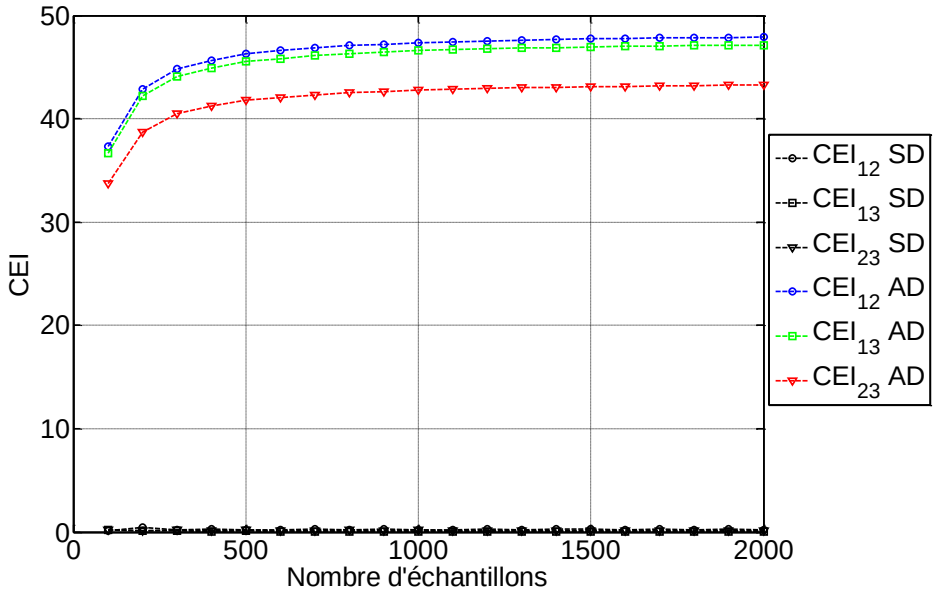


Figure 29 : CEI en fonction du nombre d'échantillons par acquisition, pour un signal source sinus de 4,7 kHz

2.7. Nombre d'acquisitions par mesure

Il est important de déterminer le nombre nécessaire d'acquisitions par mesure. Ce paramètre a une grande influence sur le temps d'acquisition et de mesure des valeurs *CEI*, il permet également d'avoir des valeurs *CEI* plus stables. En effet l'estimation de la fonction d'inter-corrélation est plus fiable en moyennant sur un nombre d'acquisitions *Nacq* important. Les fonctions d'inter-corrélations sont estimées en moyennant sur 150 acquisitions dans les travaux de N. A. Leila [92] afin de converger vers une inter-corrélation reproductible. Pour notre cas le nombre d'acquisitions sera réduit car la moyenne s'effectue uniquement sur les enveloppes des fonctions d'inter-corrélations.

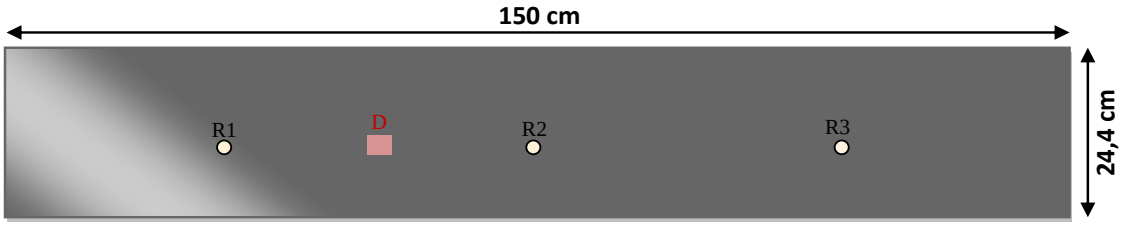


Figure 30 : Placement des capteurs et du défaut pour le test des critères en fonction de Nacq

Les capteurs et le défaut ont été placés comme décrit en figure 30, la détermination du nombre d'acquisitions par mesure sera faite pour le cas de la source de bruit blanc gaussien décrit dans le paragraphe 2.4. Chaque acquisition dure 100 ms (durée déterminé dans le paragraphe 2.5), et le calcul des critères se fait sur la partie maximale des enveloppes ayant une longueur de 30 ms.

Les critères calculés sont présentés en fonction du nombre d'acquisitions par mesure dans la figure 31.

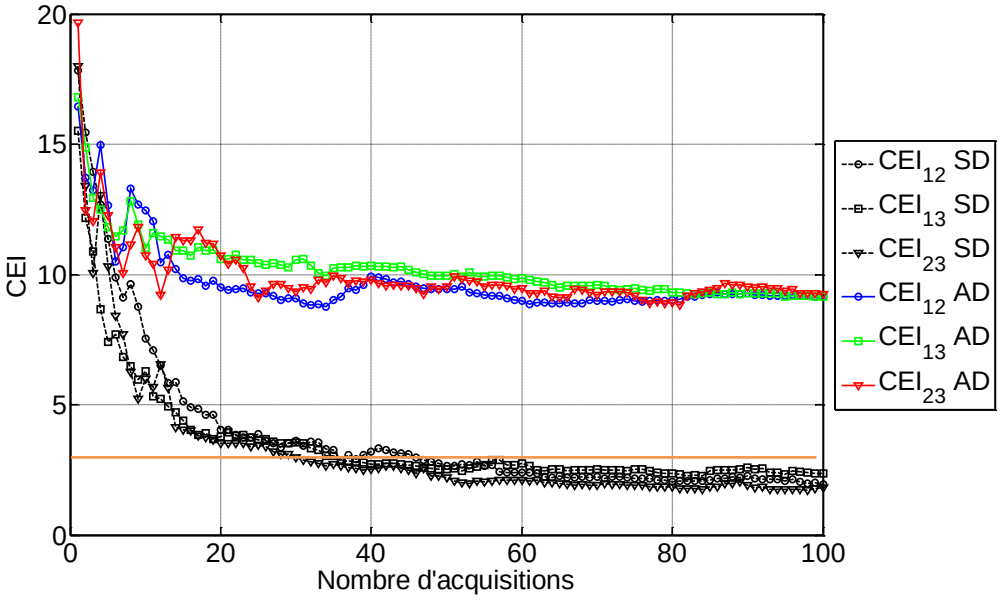


Figure 31 : CEI en fonction du nombre d'acquisitions par mesure Nacq dans le cas d'une source de bruit filtré

Contrairement au cas d'un signal source sinusoïdal, où deux acquisitions suffiraient, pour les cas d'une source de bruit, c'est seulement à partir de 60 acquisitions que l'on commence à avoir un critère stable. En plus de la stabilité des *CEI*, une autre condition est posée sur les critères *CEI_SD*, ceux-ci ne devraient pas dépasser le seuil de 3 (présenté par une ligne orangée dans la figure 31). Afin de s'assurer que ces conditions soient validées quelque soit la configuration des capteurs, 100 acquisitions seront faites par mesure.

2.8. Vérification de la reproductibilité des enveloppes

Il est nécessaire de vérifier la reproductibilité des enveloppes en comparant deux mesures ayant été acquises sous les mêmes conditions (même emplacement des capteurs et sans défaut) chaque mesure étant une moyenne de 100 acquisitions. Ces deux mesures sont représentées dans la figure 32.

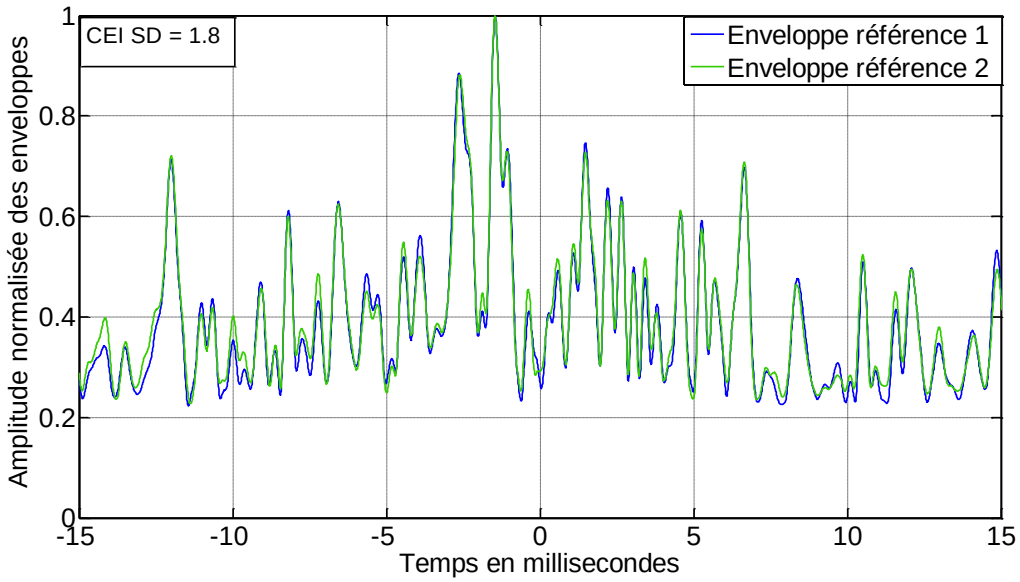


Figure 32 : Reproductibilité du critère visuel en mode passif, 2 enveloppes sans défaut correspondant aux inter-corrélations entre R2 et R3, positions des capteurs en figure 30

Seule la partie entre -15 et 15 ms sera désormais présentée, car le calcul du *CEI* se fait sur cette partie des enveloppes. Les deux mesures sont presque similaires malgré l'aspect aléatoire de la source. Quelques petites différences en amplitudes sont observées, d'où un *CEI_SD* de 1,8 pour la paire R2 R3. Pour les autres paires de capteurs les valeurs sans défaut sont également assez faibles, 1,9 pour la paire R1 R2 et 2,3 pour R1 R3. Notons l'amélioration de la reproductibilité des critères en comparaison avec le cas présenté dans le chapitre 2 (figure 11), en dépit de la nature aléatoire de la source. Reste à vérifier si l'écart entre cette valeur et celle du *CEI_AD* est assez élevé pour une identification possible des défauts.

2.9. Synthèse de la méthode d'identification

L'utilisation d'un signal sinus comme source nous a permis de vérifier l'efficacité de la méthode d'identification des défauts. Différents paramètres de cette méthode ont été optimisés en respectant trois conditions, la première est d'avoir un *CEI_SD* proche de zéro et inférieur à 3, la seconde est d'avoir un écart important entre *CEI_SD* et *CEI_AD* et la troisième condition est la stabilité de tous ces critères.

Il a été montré qu'une normalisation des fonctions d'inter-corrélations par rapport aux énergies des signaux diminuerait l'écart entre *CEI_SD* et *CEI_AD*, c'est pour cette raison que cette normalisation n'est pas adaptée pour cette méthode. D'autre part, plus le nombre d'échantillons par acquisition augmente, plus l'estimation de la fonction d'inter-corrélation est correcte, les critères deviennent alors plus stables. Le nombre d'échantillons est donc fixé à 10000 (100 ms) dans le cas d'un signal de bruit.

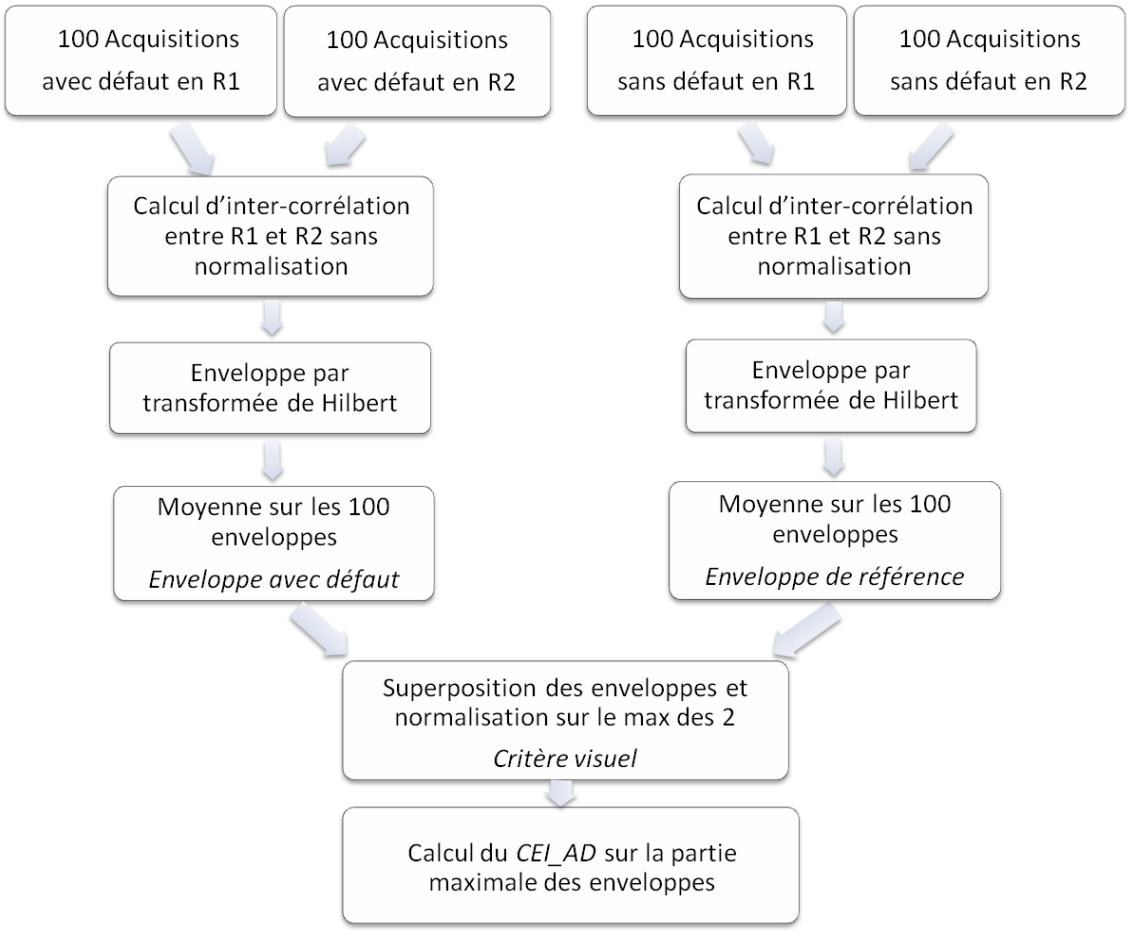


Figure 33 : Description de la méthode d'identification de défauts

Le nombre d'acquisitions par mesure (*Nacq*) est également un paramètre important, plus *Nacq* est grand, plus le *CEI_SD* tends vers zéro. Néanmoins, dans le cas d'une source de bruit, le *CEI_SD* n'est pas si proche de zéro comme dans le cas d'un signal sinus, le *Nacq* est donc fixé à 100 de telle sorte que le *CEI_SD* ne dépasse pas un seuil de 3.

Deux méthodes de calcul de *CEI* ont été testées, dans la première on calcule l'écart entre les enveloppes sur la totalité de celles ci, tandis que dans la deuxième méthode, le calcul se fait sur la partie maximale des enveloppes d'inter-corrélations. Même si la première méthode donnait des *CEI_SD* plus faibles, l'écart entre celles-ci et les *CEI_AD*

était presque doublé avec la seconde méthode, c'est donc sur la partie maximale des enveloppes que le *CEI* sera calculé.
La méthode résultante est décrite par le graphe en figure 33. Cette méthode sera ainsi appliquée dans la prochaine partie en utilisant le bruit filtré large bande comme source.

Notons qu'un filtrage passe haut type Butterworth d'ordre 2, avec une fréquence de coupure de 500 Hz est appliqué aux différents signaux capteurs. Ce filtrage sert à éliminer une composante de 50 Hz qui perturbe les signaux dans le cas d'un signal de bruit.

3. Évaluation de l'efficacité de la méthode avec une source type bruit

Les signaux acquis par les capteurs piézoélectriques sont traités avec la méthode d'identification décrite précédemment.

3.1. Sensibilité au défaut

La sensibilité des critères visuels et numériques au défaut sera vérifiée dans ce paragraphe. La procédure est toujours la même ; des acquisitions sans défaut sont faites et gardées comme référence, ensuite d'autres acquisitions avec défaut sont effectuées et comparées avec la référence. La courbe bleue dans la figure 34 correspond à une configuration sans défaut, tandis que la courbe rouge correspond à une configuration avec défaut, les deux enveloppes sont totalement différentes, surtout en amplitude. Ces différences n'ont pas été observées dans le cas de deux configurations sans défaut (figure 32). L'équation (5) dans le chapitre 2 est donc confirmée par ces résultats, en effet l'amplitude de la fonction d'inter-corrélation est influencée par la présence d'un défaut, cette influence se manifeste par une variation en amplitude. Cette variation est

traduite dans ce cas par un *CEI_AD* de 9, à noter que l'emplacement des capteurs et du défaut est le même présentée en figure 30.

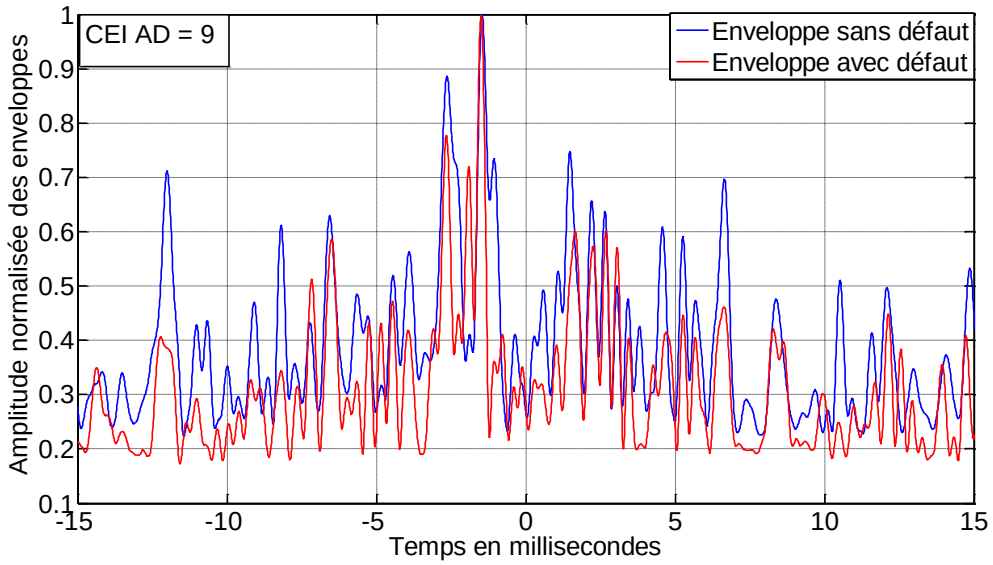


Figure 34 : Sensibilité du critère visuel à la présence de défaut, critère correspondant à la paire des capteurs R2 R3

Dans le cas d'une source sinus, le *CEI_AD* correspondant à une configuration semblable est de l'ordre de 40, cet écart entre une configuration avec une source sinusoïdale et une avec une source de bruit est due à la distribution d'énergie, dans le cas d'un sinus mono fréquence, toute l'énergie est concentrée sur cette fréquence alors que dans le cas d'un signal de bruit filtré, l'énergie est distribuée sur une bande de fréquence de 3 kHz. Néanmoins, même si les valeurs *CEI_SD* ne sont pas de l'ordre de zéro avec un bruit, les valeurs *CEI_AD* sont toujours supérieures, et la détection de défaut reste toujours possible avec ce type de source.

3.2. Sensibilité du *CEI* à la position du défaut

Maintenant, regardons l'influence de la position du défaut sur le critère numérique. Le défaut est placé sur une position différente pour chaque ensemble d'acquisitions. Les

différentes positions testées sont présentées en figure 35, le défaut est placé à l'intersection des lignes allant de 1 à 4 et de A à J. Par exemple une position de défaut au milieu des capteurs R1 et R2 sera indiquée par D2.

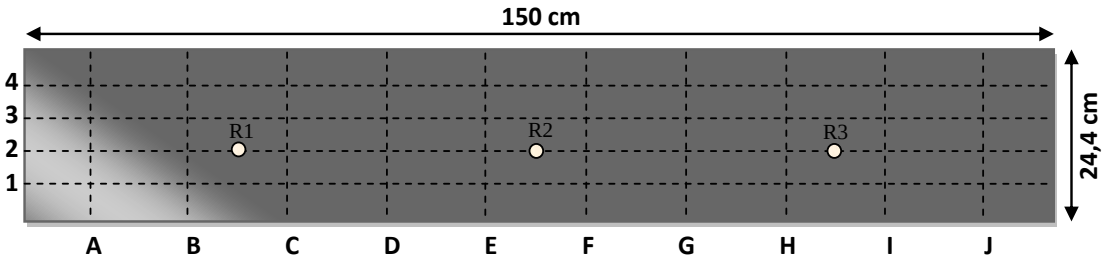


Figure 35 : Les différentes positions de défaut testées sur la plaque

L'objectif est de connaître les limites de cette méthode de détection, mais également de chercher une possibilité de localiser le défaut. Les résultats sont présentés en figure 36, les positions des défauts sont indiquées par les points noirs, le *CEI_AD* est calculé pour chaque paire de capteurs et pour chaque position de défaut, si les valeurs sont comprises entre 0 et 5 (couleur verte), le défaut n'est pas détecté, de 5 à 10 (couleur jaune), le défaut est moyennement détecté, et si la valeur *CEI_AD* est supérieur à 10 (rouge), le défaut est très bien détecté.

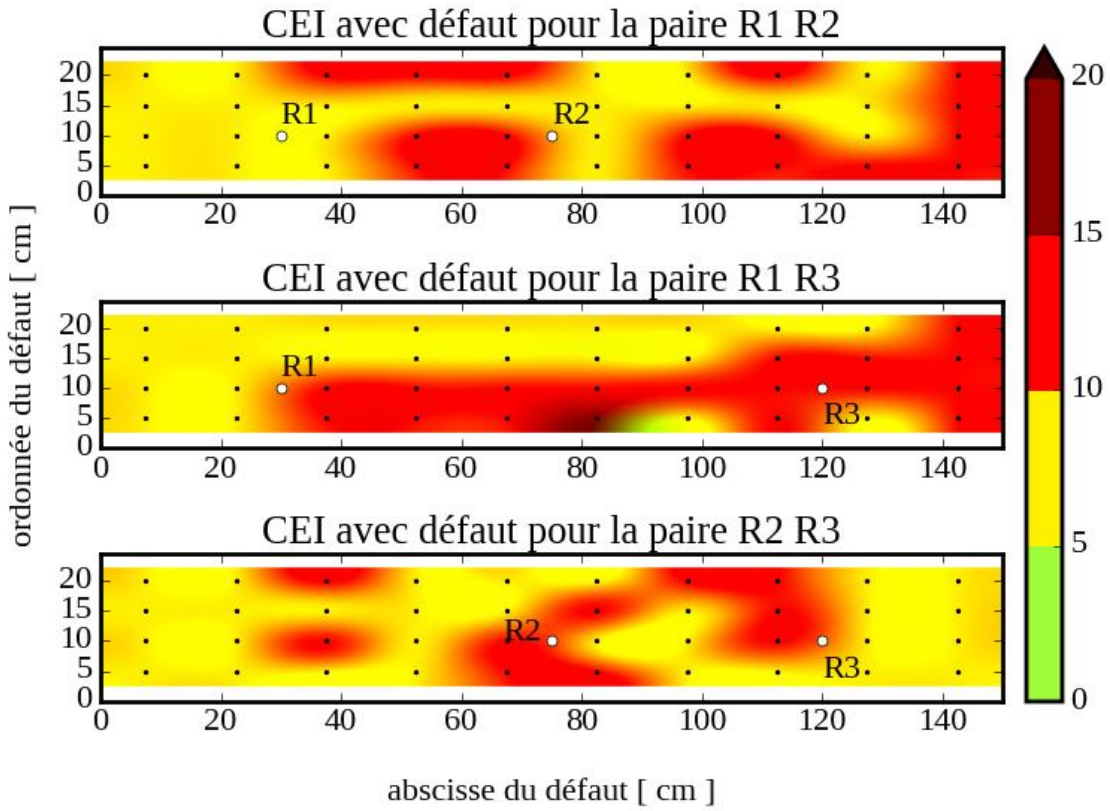


Figure 36 : CEI_AD pour différentes positions de défaut, configuration avec une distance minimale entre capteurs de 45 cm

Quelle que soit la position du défaut sur la plaque, les valeurs *CEI_AD* sont toujours supérieures à 5. Elles augmentent lorsque le défaut est à proximité de l'un des capteurs, ou lorsqu'il est placé entre deux capteurs (comme dans le cas de la paire R1 et R3, pour toutes les positions de défaut alignées avec les capteurs), mais également dans d'autres positions éloignées de réseau du capteur, ce qui signifie qu'il sera difficile d'estimer la position du défaut à l'aide de notre critère numérique. Les valeurs *CEI_AD* pour la paire R1 R3 sont plus intéressantes que celles trouvées pour les autres paires, 45% des positions sont très bien détectés contre seulement 25% pour la paire R2 et R3. Ainsi, il semblerait que lorsque la distance entre les capteurs est grande, le pourcentage des positions de défauts bien détectés augmente.

L'utilisation de 3 capteurs est très importante, car en observant les 3 graphes de la figure 36, quand une paire de capteurs n'est pas assez sensible à l'apparition d'un défaut, une autre paire l'est (par exemple le défaut positionné en G1 est très bien captée par la paire R1 R2 mais moyennement capté par les deux autres paires). Il suffit donc d'afficher la valeur *CEI_AD* maximale des 3 paires de capteurs pour chaque position de défaut, ces valeurs maximales seront appelées *CEIM_AD*, elles sont présentées en figure 37.

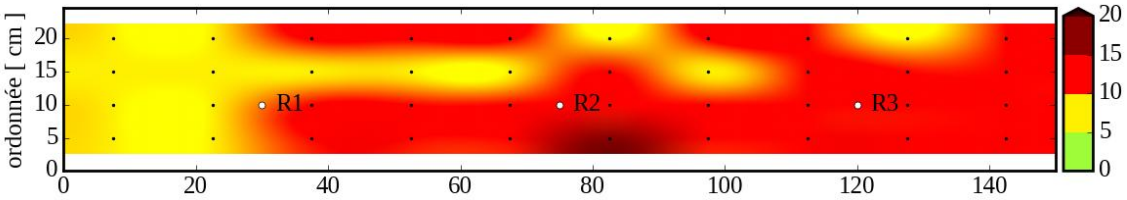


Figure 37 : CEIM_AD pour différentes positions de défaut

L'affichage des valeurs de *CEIM_AD* apporte une nette amélioration aux résultats, en effet, 65% des positions sont très bien détectés, de plus avec cette présentation, les valeurs de *CEIM_AD* pour les défauts positionnés entre chaque paire de capteurs sont toujours supérieures à 10.

4. Recherche de la position optimale des capteurs

4.1. Sensibilité des *CEI* à la distance entre capteurs

Afin de vérifier l'effet de la distance entre capteurs sur la détection des défauts, une deuxième mesure a été faite en gardant le capteur R2 à la même position mais en diminuant la distance entre les capteurs de 45 cm à 11 cm. Les valeurs de *CEI_AD* calculées pour différentes paires de capteurs sont présentées en figure 38.

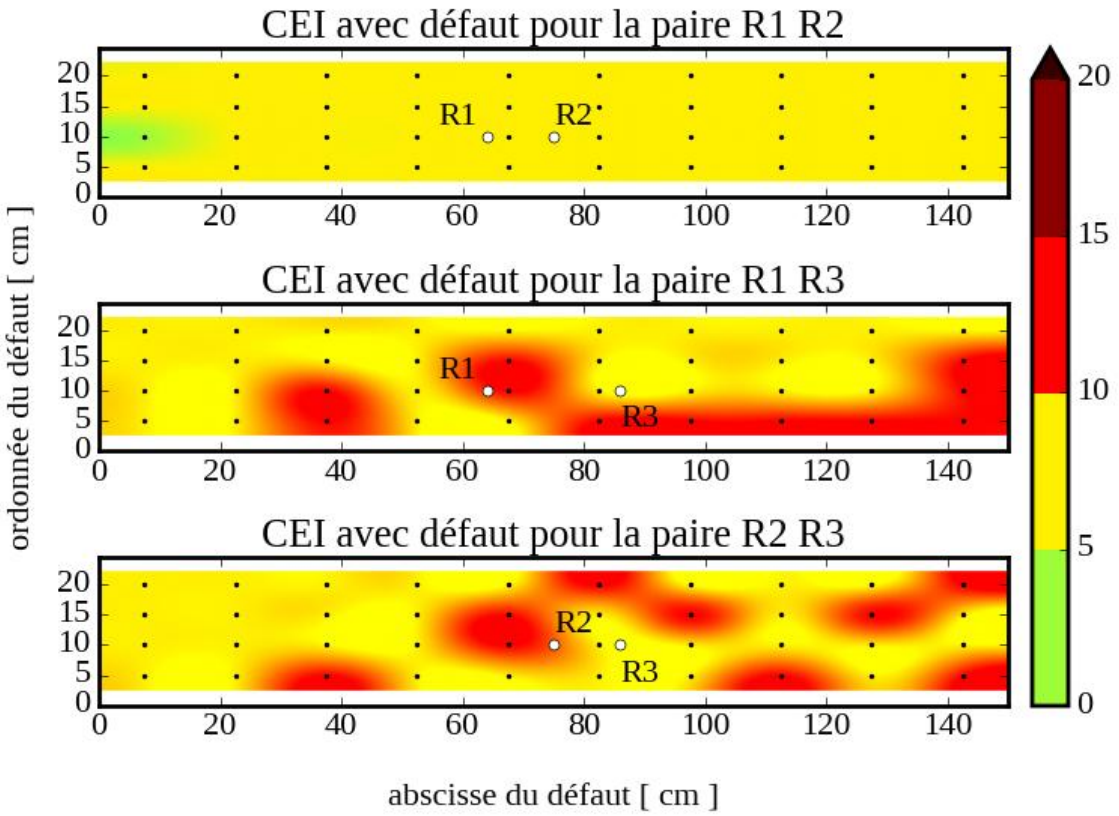


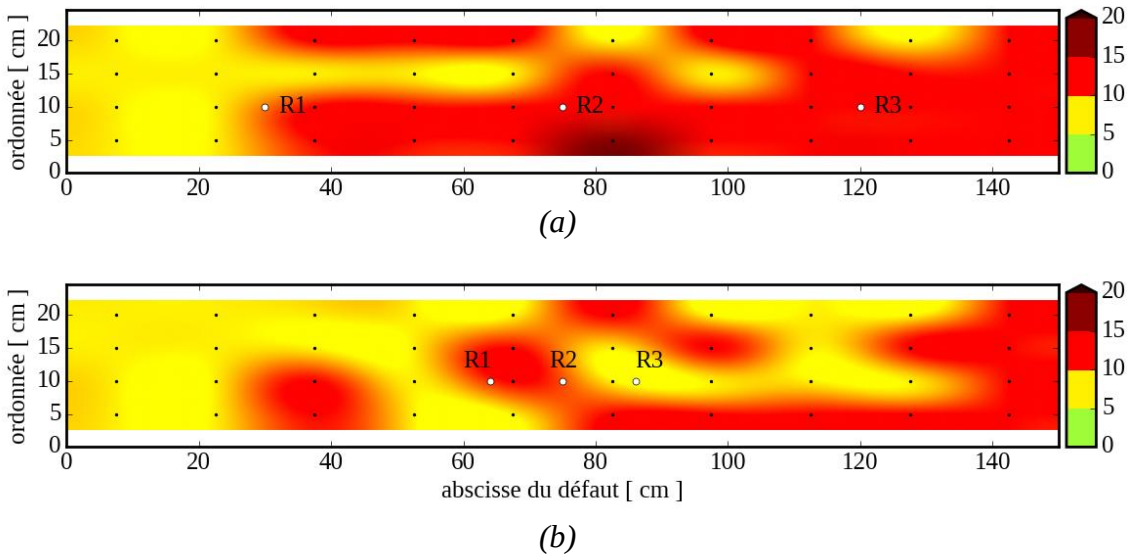
Figure 38 :CEI_AD pour différentes positions de défaut, configuration avec une distance minimale entre capteurs de 11 cm

Les valeurs *CEI_AD* pour une configuration de capteurs rapprochés sont moins élevées que celles trouvées avec le dernier emplacement des capteurs (figure 36). Notons que les valeurs de *CEI_SD* (sans défaut) pour cet emplacement de capteurs sont de 1,6 pour la paire R1 R2, et 1,7 pour les deux autres paires. Ainsi la condition posée sur les valeurs sans défaut (elles doivent être inférieures à 3) est toujours respectée.

Dans la figure 39, le *CEIM_AD* est dressé pour les deux configurations de capteurs en haut le réseau de capteurs est étendu, en bas le réseau est serré. En traçant *CEIM_AD*, le résultat est meilleur et la comparaison entre les deux configurations devient plus évidente.

Pour la configuration *(a)* le défaut est détectable dans toutes les positions, avec 65% de positions très bien détectées. La majorité des positions moyennement détectables sont situées à la gauche de la plaque. En rapprochant les capteurs (configuration *(b)*), le pourcentage des positions très bien détectées descend à un pourcentage de 37,5%.

En conclusion, la détection est donc meilleure en augmentant la distance entre capteurs.



(a)

(b)

Figure 39 : Sensibilité du critère numérique CEIM_AD à la distance entre capteurs, (a) capteurs distants de 45 cm, (b) capteurs distants de 11 cm

En utilisant cette technique on peut dire s'il existe un défaut dans une structure, mais il n'est pas facile de localiser celui-ci.

4.2. Sensibilité à la position et à l'orientation des capteurs

Dans cette partie, nous nous intéressons à trouver le placement optimal des capteurs qui permet de détecter parfaitement le défaut quelle que soit sa position sur la plaque. Pour les deux configurations de capteurs en figure 39, le défaut est toujours moyennement détectable quand il est positionné dans le coté gauche de la plaque, mais très bien détecté dans le coté droite de celle-ci, même si les capteurs ont été placés au milieu.

Afin d'en connaitre les raisons, deux mesures ont été faites, dans la première, les 3 capteurs ont été placés dans la partie gauche de la plaque (figure 40), et dans la deuxième mesure à droite (figure 41).

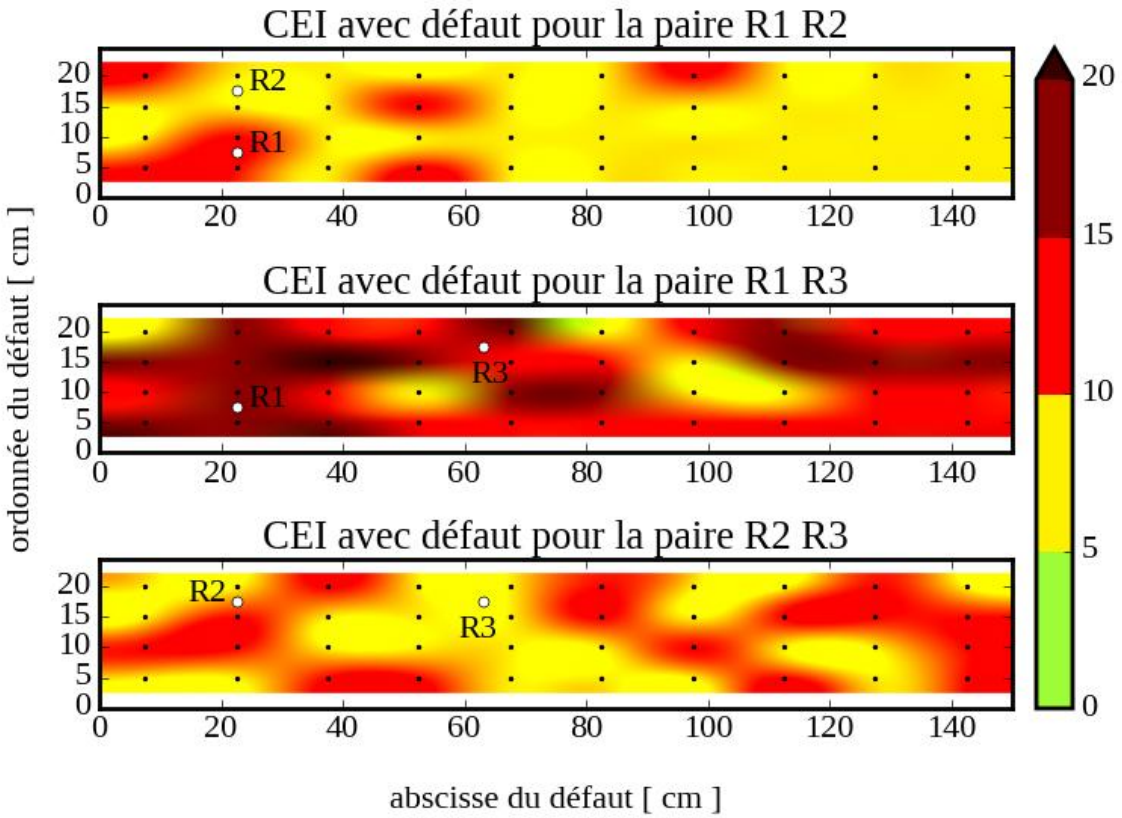


Figure 40 : Sensibilité du critère numérique à la position du défaut, capteurs placés coté source avec différentes orientations, verticale pour R1 R2, oblique pour R1 R3 et horizontale pour R2 R3

Différentes orientations des paires seront aussi testées, la paire R1 R2 est orientée verticalement, tandis que la paire R2 R3 est horizontale. La paire R1 R3 est placée sur une ligne oblique comme le montre la figure 40.

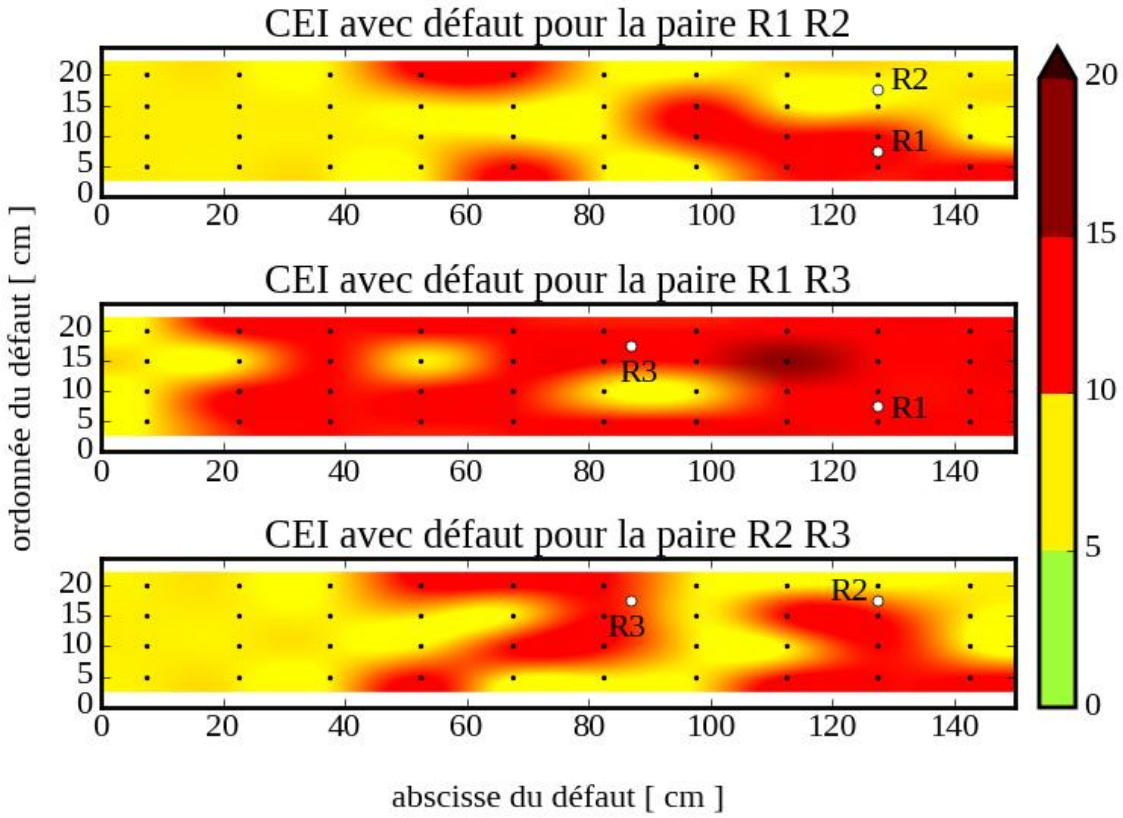


Figure 41 : Sensibilité du critère CEI_AD à la position du défaut, capteurs placés coté droite de la plaque

Notons que les valeurs de *CEI_SD* pour la position des capteurs en figure 40 sont les suivantes : 1,6 pour la paire R1 R2, 2,2 pour la paire R1 R3 et 1,9 pour la paire R2 R3. Pour la configuration de la figure 41, *CEI_SD* pour la paire R1 R2 est de 1,7 et 1,9 pour les deux autres paires. Ces valeurs respectent toujours la condition que nous avons posée dés le début, elles sont toutes inférieures à 3.

Qu'ils soient placés du coté droit au gauche, l'orientation de capteurs qui donne les meilleurs résultats est oblique, le cas de la paire R1 R3. En les plaçant verticalement (paire R1 R2), seulement 25% des positions de défaut sont très bien détectées, contre

32,5% pour une paire placée horizontalement et plus de 80% pour une orientation oblique des capteurs.

Les valeurs CEIM_AD pour les deux positions du réseau de capteurs sont tracées en figure 42. Quand les capteurs sont du coté du haut parleur *(a),* les positions du coté gauche de la source n'ont plus des *CEIM_AD* inférieur à 10, comme dans le cas de la configuration *(b).* Seulement 3 positions sont moyennement détectables contre 6 pour la configuration *(b).* Il est évident que le positionnement des capteurs influe sur la détection des défauts. Afin d'éviter la non détection des positions à gauche, il est donc préférable de placer au moins un capteur dans cette partie de la plaque.

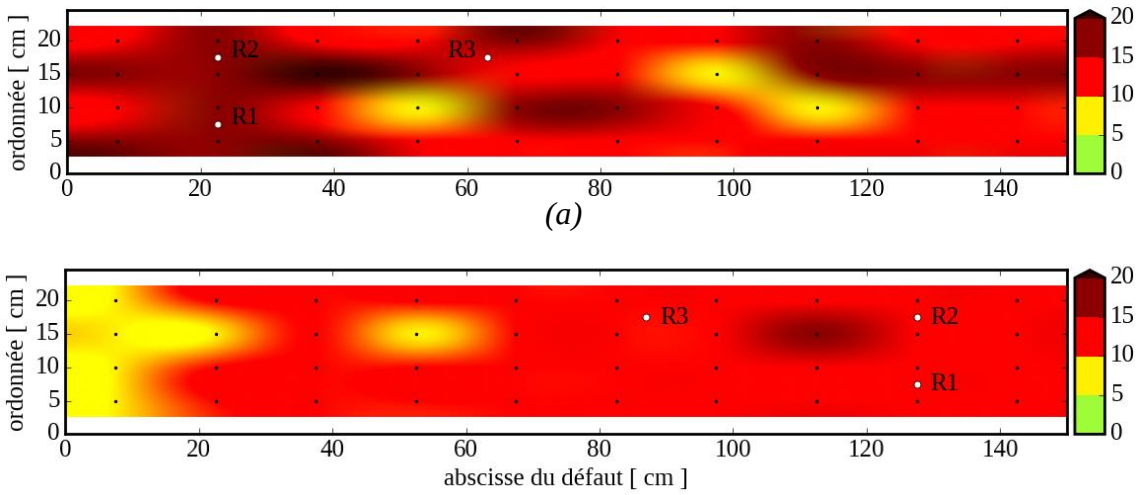


Figure 42 : CEIM_AD pour deux positionnements de capteurs, (a) capteurs coté gauche (emplacement du haut parleur), (b) capteurs coté droit

5. Sensibilité des *CEI* à la bande fréquentielle de la source

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évaluation de la méthode d'identification proposée pour différentes bandes fréquentielles. Cette étude est très importante, car l'objectif de ces travaux est de trouver une méthode qui détecte les défauts en utilisant du bruit ambiant comme source, ce bruit ayant différentes bandes de fréquences selon l'application, il est donc nécessaire d'évaluer plusieurs bandes de fréquences. La première bande de fréquence testée va de 1 à 4 kHz, les bruits ambiants pouvant se situer dans cette bande sont les bruits urbains comme le passage d'un tramway par exemple, mais également les bruits aéronautiques [118].

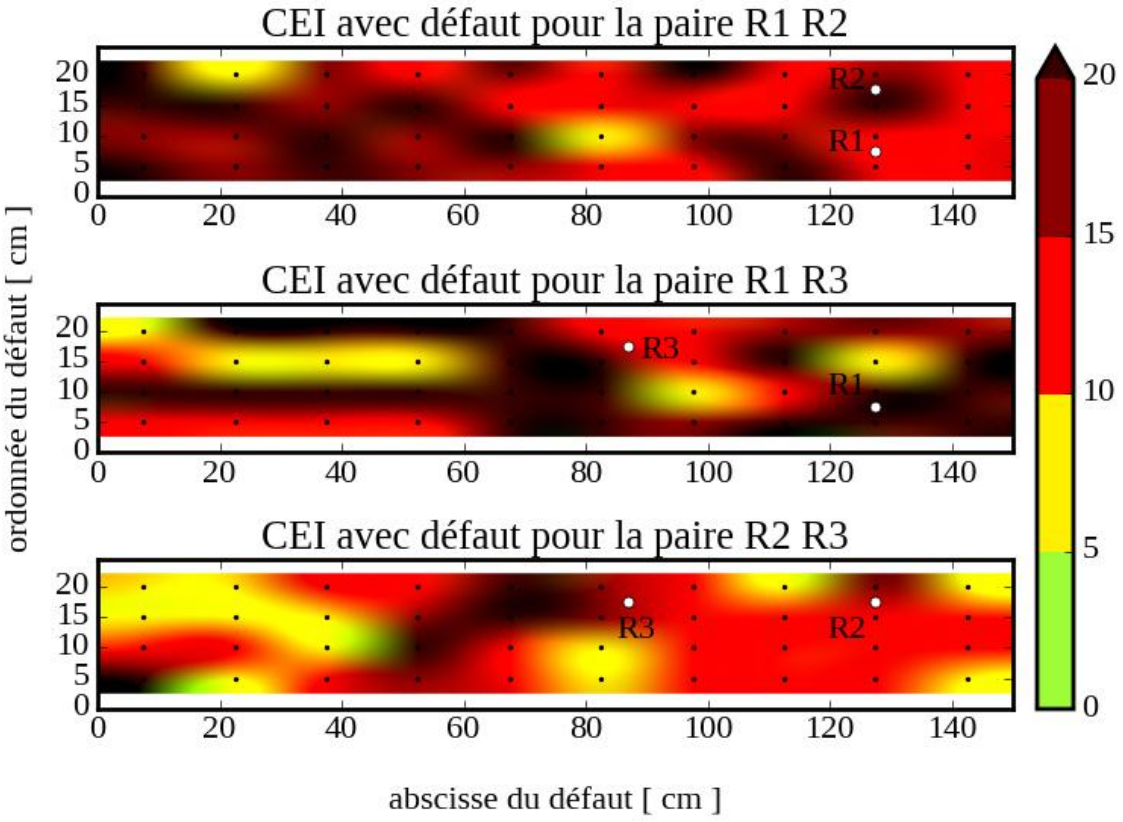


Figure 43 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, avec une source de bruit ayant une bande de fréquence de [1 4] kHz

Les valeurs de *CEI_SD* pour cette bande sont de 2,4 pour R1 R2, et 3,1 pour les 2 autres paires. Les *CEI_AD* calculés pour chacune des paires sont dressés en figure 43. Le changement de la bande fréquentielle influe clairement les résultats, pour la paire R1 R2 orienté verticalement, contrairement au cas étudié en figure 41, la majorité des positions de défaut sont très bien détectées avec des valeurs de *CEI_AD* dépassant 20. La paire R1 R3 donne aussi de bons résultats dont plus que la moitié dépassent les 20.

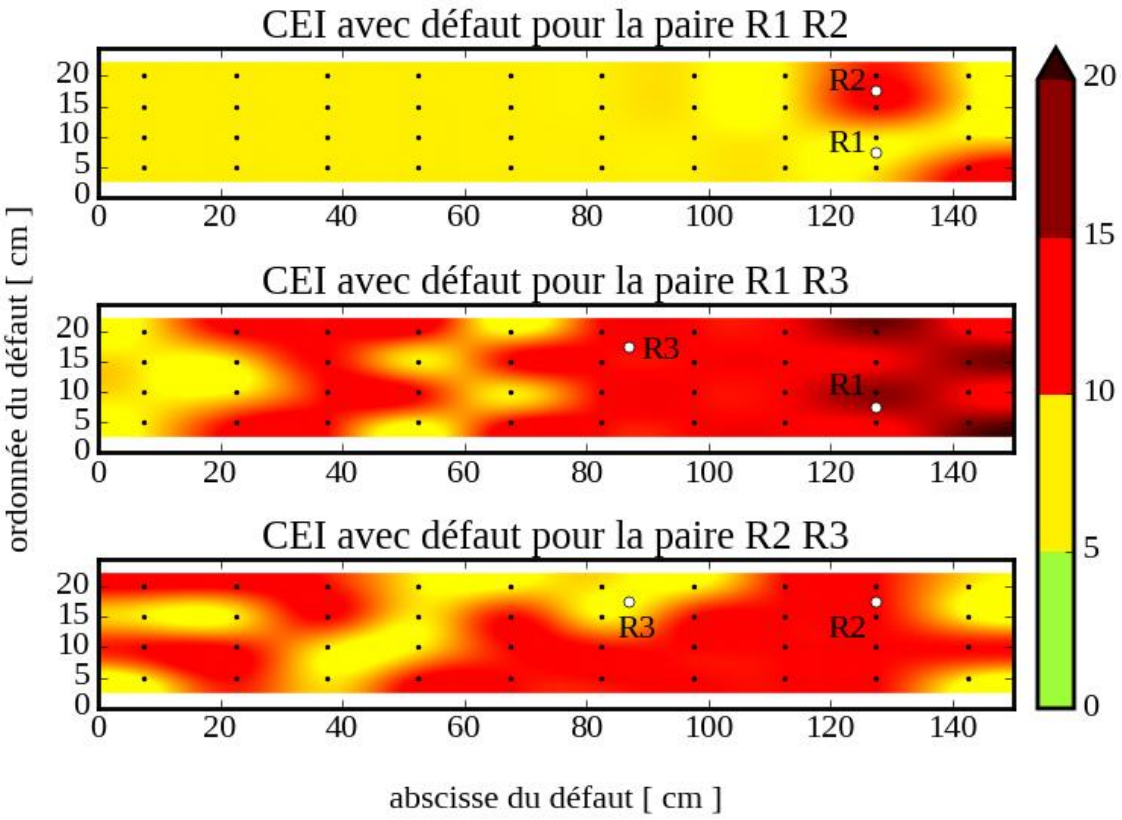


Figure 44 : Sensibilité du CEI_AD à la position du défaut, avec une source de bruit ayant une bande de fréquence de [5 8] kHz

Nous avons essayé par la suite une bande de fréquence plus haute. La figure 44 présente les résultats pour une bande de 5 à 8 kHz. Les valeurs sans défaut pour cette bande sont 1,7 pour R1 R2, 1,9 pour R1 R3 et 2 pour R2 R3.

En observant les résultats de la figure 44, la paire R1 R3 garde les meilleurs résultats par rapport aux autres paires. Finalement, nous dressons le *CEIM_AD* pour les 3 bandes de fréquences testées en figure 45 afin de mieux les comparer.

Notons que les capteurs ont gardé leur même position pour les trois bandes de fréquences testées. Ils n'ont pas été décollés et recollées non plus.

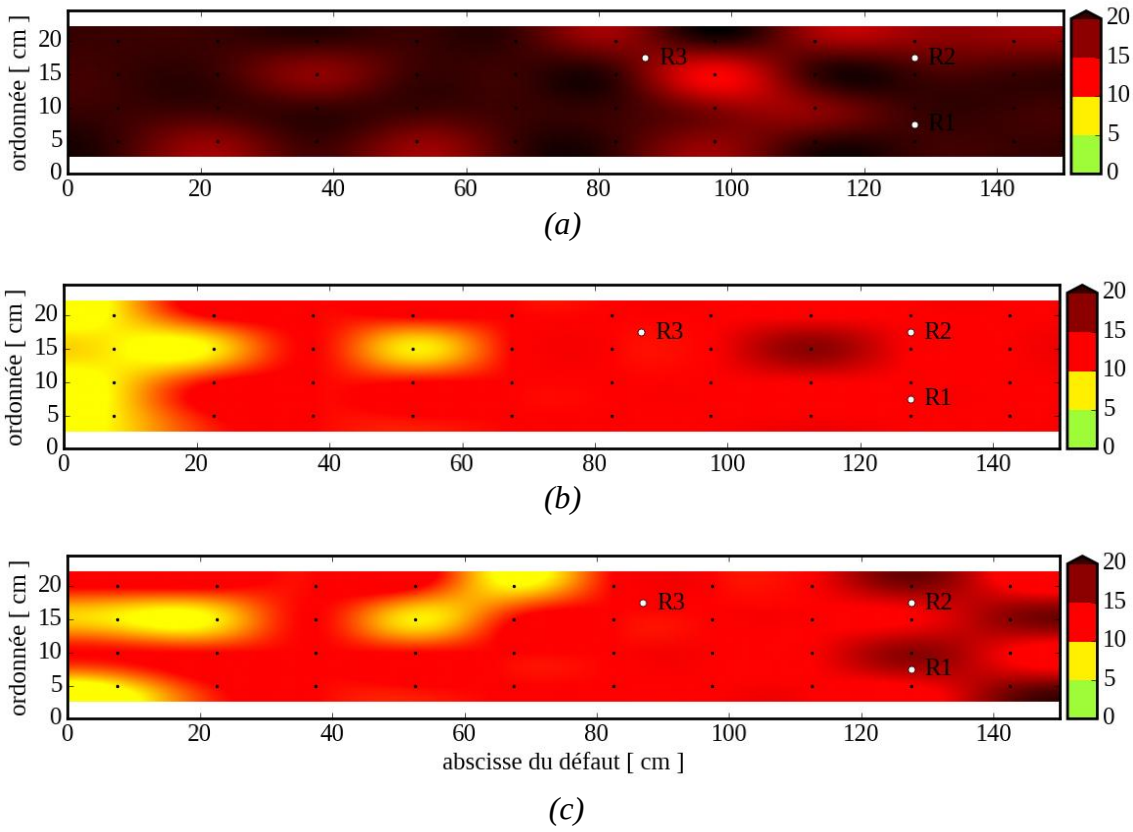


Figure 45 : Influence de la bande fréquentielle du bruit sur le CEIM_AD, (a) une bande de 1 à 4 kHz, (b) une bande de 3 à 6 kHz et (c) de 5 à 8 kHz

La méthode d'identification fonctionne très bien quelle que soit la bande fréquentielle du signal du bruit.

La bande de fréquence du signal a une grande influence sur le critère *CEI*, les meilleurs résultats ont été obtenus avec une bande en basses fréquences de 1 à 4 kHz (figure 45

(a)), le défaut est très bien détecté quelle que soit sa position sur la plaque par une paire de capteurs au moins, avec une majorité des valeurs de *CEI_AD* dépassant la vingtaine.
Pour les deux autres bandes de fréquences, les résultats sont similaires sauf pour quelques positions (les tâches jaunes), on pourrait donc en déduire qu'à partir d'une certaine fréquence les vibrations sont de plus en plus uniformes dans la plaque.
Pour les hautes fréquences, il faut tenir compte de l'efficacité du rendement du haut parleur, celui-ci n'est peut être pas capable de fournir autant d'énergie avec ces fréquences, et celles-ci sont plus sujettes à des atténuations dans la cavité résonante. Ceci pourrait expliquer les valeurs moindres de *CEI* pour ces quelques positions.

6. Vérification de la symétrie des résultats

Dans une autre configuration décrite en figure 46, les capteurs R1 et R2 sont placés sur l'axe de symétrie horizontal, ainsi les positions de défauts testées sont symétriques par rapport à cet axe. Notons que la valeur *CEI_SD* correspondante à cette configuration est de 2,4.

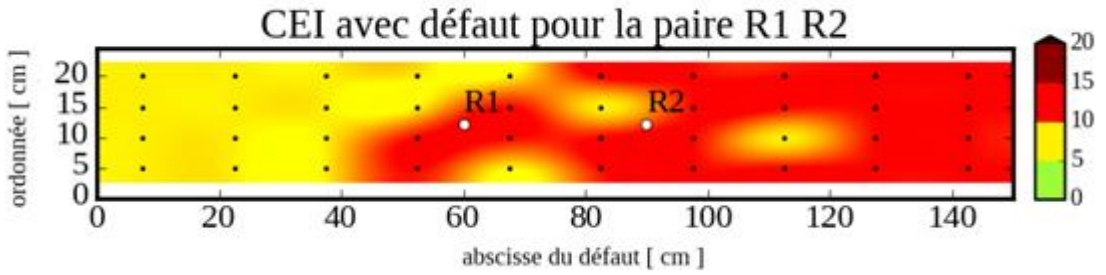


Figure 46 : Sensibilité du CEI_AD à la position de défaut, pour une configuration symétrique des capteurs R1 et R2

Les résultats obtenus sont tracés en figure 46, les valeurs de *CEI_AD* pour la paire R1 R2 sont pour la plus part des positions de défaut symétriques par rapport à l'axe horizontal. Seulement 4 positions ne le sont pas, ceci pourrait être dû à un mauvais collage du défaut sur la plaque.

La symétrie par rapport à l'axe vertical n'est pas respectée, en effet les positions de la moitié gauche de la plaque sont moyennement détectées alors que celles de la moitié droite le sont très bien. Rappelons que la cavité qui excite la plaque comporte un trou dans la partie droite et le haut parleur dans la partie gauche, la propagation des ondes acoustiques n'est donc pas forcément symétrique à l'intérieur de la cavité et ceci pourrais engendrer une vibration non symétrique par rapport à l'axe vertical de la plaque en dessus.

Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode d'identification de défauts proposée a été testée avec une source non localisée en espace. Les différentes étapes de la méthode ont été vérifiées en utilisant un signal sinus mono fréquence comme source, il s'est avéré que la normalisation des fonctions d'inter-corrélation par rapport à l'énergie des signaux reçus a une mauvaise influence sur les critères proposés, l'écart entre le *CEI_SD* et le *CEI_AD* est très faible. Le calcul de ces critères sur la partie maximale des enveloppes améliore nettement les valeurs de ces derniers. Les valeurs de CEI sans défaut trouvées dans le cas d'un signal sinus sont proches de zéro, celles avec défaut sont souvent très élevées, ce qui justifie l'efficacité de cette méthode d'identification. Les critères sont insensibles aux changements des niveaux d'intensité de la source, mais ils sont sensibles à la fréquence de celle-ci. Néanmoins il y'a toujours un écart minimum de 15 entre les *CEI_SD* et les *CEI_AD* pour toutes les fréquences testées. La répétition de l'expérience pour différentes positions de défaut sur la plaque a révélé un problème d'identification, en effet les vibrations de la plaque ne sont pas uniformes en tout point de celle ci, le défaut se trouvait ainsi parfois sur un nœud de vibration par exemple, ce qui impliquait

un *CEI_AD* faible. Cette vibration non uniforme est due à l'utilisation d'une source mono fréquence, un seul mode est excité.

Afin de palier ce problème, le signal sinus a été remplacé par un signal de bruit large bande, ainsi plusieurs modes ont été excités à la fois et l'influence de la fréquence a été réduite. Quelques paramètres ont été fixés dans le cas de cette nouvelle source comme le nombre d'acquisitions ainsi que la durée des signaux acquis. L'erreur quadratique de l'estimateur biaisée de la fonction d'inter-corrélation est faible pour des signaux de durée de 100 ms. L'estimation est également meilleure en moyennant sur 100 acquisitions par mesure.

En répétant des mesures sous les mêmes conditions mais décalées dans le temps, le critère visuel correspondant à deux mesures sans défaut est parfaitement reproductible dans le cas d'un signal de bruit blanc. Les valeurs de *CEI_SD* sont toujours inférieures à 3. Les valeurs *CEI_AD* étaient toujours supérieures, certes l'écart entre celles-ci et le *CEI_SD* a considérablement diminué par rapport à l'écart correspondant à un signal source sinus, néanmoins l'identification du défaut reste toujours possible avec un signal type bruit comme source quelle que soit la position du défaut sur la plaque.
L'utilisation de bruit blanc filtré comme source a permis de se rapprocher à une source de bruit ambiant, néanmoins, il s'agit d'une source paramétrée et générée au besoin, ce qui n'est pas le cas dans un contexte passif. Plusieurs bandes de fréquences de bruit ont été testées, la détection est possible quelle que soit la bande utilisée surtout pour les bandes en basses fréquences où les résultats étaient meilleurs. L'influence de la largeur de la bande n'a pas été vérifiée dans ce chapitre, en effet les sources de bruit ambiant peuvent avoir des bandes plus larges que 3 kHz, le comportement des critères proposés reste donc inconnu dans ces cas. Cette méthode pourrait être utilisée pour révéler la présence d'un défaut dans une structure dans le cas d'une source non localisée en espace ayant une bande de fréquences étroite. La localisation des défauts à l'aide des *CEI_AD* n'est pas évidente. Cette méthode est donc bien adaptée pour le SHM mais pas assez pour le CND.

La structure utilisée dans ce chapitre reste académique et simple, le comportement des critères proposés dans le cas de structures compliquées ou pour d'autres types de matériaux comme les composites n'a pas été exploré.

Une étude sur le positionnement optimal des capteurs a été effectuée. Pour ce cas d'étude, le défaut serait mieux détecté pour une configuration de capteurs distants les uns des autres et ayant une orientation oblique.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont pour objectif de définir une méthode d'identification de défauts en utilisant le bruit ambiant comme source, une méthode simple se basant sur les fonctions d'inter-corrélations a été proposée et a donné naissance à deux critères de détéction. Le premier est un critère visuel, ce critère est basé sur la superposition des enveloppes des fonctions d'inter-corrélation obtenues par transformée de Hilbert pour deux configurations dont l'une est dites de *référence* sans défaut et l'autre est avec défaut. Le deuxième critère est numérique, il s'agit de la moyenne des écarts entre deux enveloppes que l'on appelle *CEI*. Ces critères sont non seulement reproductibles mais également sensibles à l'apparition des défauts. La problématique que nous avons rencontrée lors de la première expérience est la sensibilité de ces derniers aux changements de la position de la source, cette sensibilité se manifeste en des variations d'amplitudes et surtout de phase des signaux d'enveloppes. Néanmoins, nous avons trouvé qu'en gardant la même position de source, les défauts sont détectables, mais pas localisables même si l'amplitude de la source est aléatoire et non contrôlable. Ces derniers agissent uniquement sur l'amplitude des signaux. Un critère tenant compte du changement de phase peut être proposé en guise de perspective pour permettre la distinction entre les deux cas.

Pour remédier au problème de l'influence de la position de source, une seconde expérience a été montée avec une source non localisée en espace. L'utilisation d'un signal sinus a permis de mieux cerner la méthode de traitement des signaux. Il s'est avéré que la normalisation des fonctions d'inter-corrélation par rapport aux énergies des signaux dégradait les résultats.

En travaillant avec une seule fréquence et en dressant la courbe des valeurs de *CEI* en fonction des amplitudes de la source, nous avons obtenu de très bons résultats, le *CEI_SD* qui correspondait à deux configurations références est très proche de zéro, ce qui implique que la paire de signaux est similaire, et qu'il n'y a donc pas de variation du milieu, tandis que le *CEI_AD* est très élevé, ce qui implique que le milieu a changé à cause d'une variation globale du milieu probablement due à l'ajout du défaut. De plus pour toutes les amplitudes de la source, ces critères semblent constants, un point très important car le but est de trouver une méthode insensible aux changements source.

Ces essais avec un signal académique mono fréquence, ont permis la vérification de la méthode proposée, ils ont également permis de constater l'importance de l'utilisation d'un signal large bande. En effet il a été montré que l'utilisation d'une seule fréquence excitant ainsi un seul mode de la plaque, provoquait des vibrations de certaines zones plus que d'autres. Par conséquent, les valeurs de *CEI_AD* étaient élevées pour certaines positions de défaut et trop faibles pour d'autres.

Ces constatations ont permis de paramétrer au mieux la méthode de traitement, et de passer à une source plus intéressante et semblable à un bruit ambiant. Un bruit large bande était donc généré et utilisé comme source.

Pour ce type de source, les valeurs *CEI_SD* n'étaient pas assez proches de zéro, mais les valeurs *CEI_AD* étaient toujours supérieures. L'écart entre les valeurs *CEI_SD* et *CEI_AD* a considérablement diminué par rapport à l'écart correspondant à un signal source sinus. Néanmoins, pour toutes les configurations de capteurs essayées, le défaut est toujours détectable, ce qui n'était pas le cas pour un sinus à cause de la distribution non uniforme des vibrations.

Plusieurs configurations de capteurs ont été testées afin de trouver un placement optimal. Il a été montré qu'en plaçant les capteurs du coté de la source avec une orientation oblique, et qu'en augmentant la distance entre ces derniers, les résultats de *CEI_AD* sont meilleurs.

Enfin, les critères ont été évalués selon la bande de fréquence du signal source. En excitant avec une bande de fréquence basse, le critère semble plus performant, le défaut est très bien détecté par au moins une paire de capteurs quelque soit sa position sur la

plaque. Les bandes de fréquences testées ont toutes une largeur de 3 kHz, en perspectives de ces travaux, une étude du comportement du critère en changeant la largeur de la bande peut apporter des informations intéressantes.
La méthode d'identification de défaut proposée dans ce manuscrit est une méthode simple et efficace, qui permet de détecter la présence d'un défaut quelle que soit sa position, en utilisant seulement trois récepteurs. Néanmoins, la localisation du défaut ne semble pas évidente avec le critère numérique proposé, afin de permettre cette localisation une étude approfondie sur le critère visuel (qui présente les enveloppes des fonctions d'inter-corrélations) est à réaliser en guise de perspective. Néanmoins, l'analyse du changement du retard entre les différents signaux d'inter-corrélation pour la localisation des défauts est impossible car il s'agit de signaux réverbérés.

Les différentes acquisitions ont été effectuées dans des conditions de température et de pression plutôt stables, il est donc très important de vérifier l'efficacité de la méthode contre les changements des conditions de pression et de température. Il faut également tester la stabilité de la méthode face à d'autres sources de bruit externe qui s'ajouteraient à la source de bruit déjà existante comme dans tout environnement industriel.

La méthode peut aussi être testée sur des matériaux plus complexes que l'aluminium, tel que les matériaux composites, pour cela, il suffit de remplacer la plaque en aluminium du chapitre 3 par une plaque en composite et de la visser sur la même cavité. L'excitation pourra se faire avec le même haut parleur en envoyant un signal de type bruit. La meilleure configuration d'emplacement pour les capteurs sera choisie afin de garantir la détection d'éventuels défauts. Les défauts d'élaboration ne peuvent pas être détectés avec cette méthode, c'est surtout les endommagements qui sont concernés comme le délaminage, le vieillissement de la matrice ou des fibres pour les composites monolithique et le décollement ou le tassement pour les structure sandwich. En effet, la méthode proposée est plus adaptée à la détection de défauts au cours de la vie d'une structure puisqu'il faut toujours établir une configuration de référence qui sera comparée ensuite à d'autres configurations présentant d'éventuels endommagements.

L'étape d'après consiste à travailler avec des structures plus complexes comme un prototype d'aile d'avion par exemple pour des applications aéronautiques. Le prototype sera soumis à un bruit puissant de moteur. Les premières expériences serviront à déterminer le nombre de capteurs nécessaire pour détecter le défaut quelque soit son emplacement sur le prototype, ensuite plusieurs types de défauts seront testés afin de classer les valeurs de *CEI_AD* selon ces types. Certes, cette tâche ne sera pas évidente car nous avons vu dans le dernier chapitre que ces valeurs changent avec la gamme des fréquences du signal source, il faudra donc avoir un tableau de valeurs *CEI_AD* en fonction du type de défaut détecté pour chaque gamme de fréquence, cette gamme est facile à déterminer par la suite même en cas de source non contrôlée, il suffit de calculer la transformé de Fourier du signal reçu par l'un des capteurs et de se placer ensuite dans le tableau y correspondant.

Enfin l'objectif à long terme de ces travaux est de pouvoir tester cette méthode dans des conditions réelles de bruit ambiant, et de faire des expériences in situ sur une vraie aile d'avion. Beaucoup de points doivent être traités pour la réalisation de cet objectif, comme la façon de traiter les données, serait ce mieux de traiter les données en temps réel ou plus tard ce qui nécessiterais un espace de stockage. Pour les capteurs, quelle est la meilleure façon de les placer, collés à l'intérieur sur le revêtement de l'aile ou bien à l'extérieur. Quel type de capteur faut-il choisir également pour s'adapter à des conditions de pression de vent pouvant atteindre les 2500 kilogrammes, et comment assurer leur alimentation.

Néanmoins la méthode telle qu'elle est présentée dans ce rapport peut servir à la détection d'objets posés sur une structure, en effet, le 4 mars 2016 un passager a repéré, juste avant que son avion ne décolle, une clé à molette coincée entre les volets de l'aile gauche, grâce à ce passager une catastrophe a pu être évitée. Ce type d'incident peut être évité avec la méthode proposée en effectuant un petit contrôle avant le décollage de l'avion. Il suffit de calculer le critère *CEI* et de le comparer à une configuration de référence, si le critère est supérieur, une alarme est déclenchée alertant ainsi le personnel.

Références

[1] M. Bruneau, C. Potel, Matériaux et acoustique Volume 3 : Caractérisation des matériaux, contrôle non destructif et applications médicales, Hermès - Lavoisier, 2006, p 390

[2] T. Kijewski, A. Kareem, Wavelet transform for system identification in civil engineering, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 18 (5), 2003, p 339

[3] Z. Su, L. Ye, Y. Lu, Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures : A review, Journal of Sound and Vibration (295) no. 3-5, 2006, p 753

[4] C. Maierhofer, M. Krause, H.Wiggenhauser, Nondestructive investigation of sluices using radar and ultrasonic impulse echo, Non Destructive Testing & Evaluation International 31 (6), 1998, p 421

[5] K. G. Sabra, P. Gerstoft, P. Roux, W. Kuperman, M. C. Fehler, Surface wave tomography from microseisms in Southern California, Geophysical Research Letters 32, 2005, p L023155

[6] L. Malagnini, R.B. Hermann, A. Mercuri, S. Opice, G. Biella, R. De Franco, Shear-wave velocity structure of sediments from the inversion of explosion-induced Rayleigh waves: comparison with cross hole measurements, Bulletin of the Seismological Society of America 87, 1997, p 1413

[7] M. Carmona, Identification passive des milieux de propagation élastiques: Application à la reconstruction de géométries dans les réseaux de capteurs et au diagnostic des structures, Thèse en Signal Image Parole et Télécoms, Université de Grenoble, 20 septembre 2011, p 9

[8] K. G. Sabra, P. Roux, W. A. Kuperman, Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach, The Journal of the Acoustical Society of America 117, 2005, p 164

[9] N. M. Shapiro, M. Campillo, L. Stehly, M. Ritzwoller, High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, Science 29, 2005, p 1615

[10] N. A. Leyla, E. Moulin, J. Assaad, Influence of a localized defect on acoustic field correlation in a reverberant medium, American Institute of Physics, Journal of Applied Physics 110, 2011, p 084906

[11] K. Sang-Tae, Y. Tae , Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method, Materials Science and Egineering, vol A, 1997, p 236

[12] O. Ceysson, M. Salvia, L. Vincent, damage mechanisms charachterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis, Scripta Materialia, vol 34, 1996, p 1273

[13] E. N. Landis, Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete, Construction and Building Materials, Elsevier Science Ltd, 13_1999.65, 1999, p 72

[14] N. Yi-Qing, Special issue on interdisciplinary and integration aspects in structural health monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing 28, 2012, p 2

[15] D. Hestern, A.Gonzalez, A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle, Mechanical Systems and Signal Processing 28, 2012, p 145

[16] S. Graveleau, P. Chemin, Magnétoscopie - Aspects théoriques et réglementaires, Mesures Analyses Contrôle non destructif, Techniques de l'ingénieur, 2015, p R 6 202-2

[17] P. Chemin, P. Dubosc, Ressuage, Mesures Analyses Contrôle non destructif, Techniques de l'ingénieur, 2014, p R 6 201-2

[18] C. Hsiao, C. Cheng, T. Liou, Y. Juang, Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method, Non Destructive Testing and Evaluation International 41, 2008, p 98

[19] S. K. Nath, K. Balasubramaniam, C. V. Krishnamurthy, B. H. Narayana, Reliability assessment of manual ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) inspection for complex geometry components, Non Destructive Testing and Evaluation International 43, 2010, p 52

[20] C. Thiery, Tomographie à rayons X Mesures Analyses Contrôle non destructif, Techniques de l'ingénieur, 2013, p P 950v3-30

[21] M. Cherfaoui, Essais non destructifs, Techniques de l'ingénieur, Editions T.I., p BM 6 450

[22] D. Pajani, Thermographie - Principes et mesure, Mesures Analyses Contrôle non destructif, Techniques de l'ingénieur, 2013, p R 2 740v2-2

[23] G. Park, H. Sohn, C.R. Farrar, D.J. Inman, Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, Shock and Vibration 35, 2003, p 451

[24] A. Yun-Kyu, H. Sohn, Integrated impedance and guided wave based damage detection, Mechanical Systems and Signal Processing 28, 2012, p 50

[25] V. Giurgiutiu, A. Reynolds, C. A. Rogers, Experimental investigation of E/M impedance health monitoring of spot-welded structural joints, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 10, 1999, p 802

[26] G. Park, H. Cudney, D. J. Inman, Impedance-based health monitoring of civil structural components, ASCE Journal Infrastructure Systems 6, 2000, p 153

[27] K. Krishnamurthy, F. Lalande, C.A. Rogers, Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors, Proceedings of SPIE 2717, 1996, p 302

[28] V. G. M. Annamdas, Y. Yang, C. K. Soh, Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers, Smart Materials and Structures 16, 2007, p 1888

[29] F. G. Baptista , D. E. Budoya, A. D. Vinicius de Almeida, J. A. C. Ulson, An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring, Sensors 14, 2014, p 1224

[30] K. Koo, S. Park, J. Lee, C. Yun, Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2009, 20, p 367

[31] R. R. C. Zhang, R. King, L. Olson, Y. L. Xu, Dynamic response of the Trinity River Bridge to controlled pile damage: modeling and experimental data and analysis comparing Fourier and Hilbert–Huang techniques, Journal of Sound and Vibration 285, 2005, p 1049

[32] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. Shevitz, Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos LA-13070-MS, 1996, p 2

[33] D. C. Kammer, Sensor placements for on orbit modal identification and correlation of large space structures, Journal of Guidance Control and Dynamics 14 (1991), p 251

[34] D. C. Kammer, Effects of noise on sensor placement for on-orbit modal identification of large space structures, Journal of dynamic systems, measurements and control, Transactions of the ASCE114 (3), 1992, p 436

[35] P. H. Kirkegaard, R. Brincker, On the optimal locations of sensors for parametric identification of linear structural systems, Mechanical Systems and Signal Processing 8, 1994, p 639

[36] F. E. Udwadia, Methodology for optimal sensor locations for parameter identification in dynamic systems, Journal of Engineering Mechanics (ASCE) 120 (2), 1994, p 368

[37] D. S. Li, H. N. Li, C. P. Fritzen, The connection between effective independence and modal kinetic energy methods for sensor placement, Journal of Sound and Vibration 305, 2007, p 945

[38] M. Azarbayejani, A. I. Eli-Osery, K. K. Choi, M. M. Reda Taha, A probabilistic approach for optimal sensor allocation in structural health monitoring, Smart Materials and Structures 17(055019), 2008, p 7

[39] K. V. Yuen, L. S. Katafygiotis, C. Papadimitriou, N. C. Mickleborough, Optimal sensor placement methodology for identification with unmeasured excitation, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 123 (4), 2001, p 677

[40] C. Inserra, V. Tournat, V.E. Gusev, Characterization of granular compaction by nonlinear acoustic resonance method, Applied Physics Letters 92, 2008, p191916

[41] V. Tournat, V.Yu. Zaitsev, V.E. Nazarov, V.E. Gusev, B. Castagnède, Experimental study of nonlinear acoustic effects in a granular medium, Acoustical Physics 51(5), 2005, p 544

[42] F. Magalhaes, A. Cunha, E. Caetano, Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection, Mechanical Systems and Signal Processing 28, 2012, p 212

[43] H. Sohn, Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring, Philosophical Transactions of The Royal Society A, 2007, p 539

[44] A. Deraemaeker, E. Reynders, G. DeRoeck, J. Kullaa, Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment, Mechanical Systems and Signal Processing 22, 2008, p 34

[45] W. J. Staszewski, Structural and mechanical damage detection using wavelets, The Shock and Vibration Digest 30 (6), 1998, p 457

[46] B. A. D. Piombo, A. Fasana, S. Marchesiello, M. Ruzzene, Modelling and identification of the dynamic response of a supported bridge, Mechanical Systems and Signal Processing 14 (1), 2000, p 75

[47] J. W. Lee, J. D. Kim, C. B. Yun, J. H. Yi, J. M. Shim, Health-monitoring method for bridges under ordinary traffic loadings, Journal of Sound and Vibration 257 (2), 2002, p 247

[48] D. Hestern, A. Gonzalez, A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle, Mechanical Systems and Signal Processing 28, 2012, p 145

[49] V. Pakrashi, A. O'Conner, B. Basu, A study on the effects of damage models and wavelet bases for damage identification and calibration in beams, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 22, 2007, p 555

[50] H. Kim, H. Melhiem, Damage detection of structures by wavelet analysis, Engineering Structures 26, 2004, p 347

[51] M. M. Reda Taha, A. Noureldin, J. L. Lucero, T. J. Baca, Wavelet transform for structural health monitoring : a compendium of uses and features, Structural Health Monitoring 5 (3), 2006, p 267

[52] Z. Hou, M. Noori, R. Amand St., Wavelet-based approach for structural damage detection, Journal of Engineering Mechanics 126, 2000, p 3

[53] A. Gentile, A. Messina, On the continuous wavelet transforms applied to discreet vibrational data for detecting open cracks in damaged beams, International Journal of Solids and Structures 40, 2003, p 259

[54] A. Chukwujekwu Oakafor, A. Dutta, Structural damage detection in beams by wavelet transforms, Smart Materials and Structures 9, 2000, p 906

[55] M. M. Reda Taha, A neural-wavelet technique for damage identification in the ASCE benchmark structure using phase II experimental data, Advances in Civil Engineering 2010 (675927), 2010, p 13

[56] S. Douka, S. Loutridis, A. Trochidis, Crack identification in beams using wavelet analysis, International Journal of Solids and Structures 40, 2003, p 3557

[57] A. C. Cobb, J. E. Michaels, T. E. Michaels, An automated time–frequency approach for ultrasonic monitoring of fastener hole cracks, NDT&E International 40, 2007, p 525

[58] S. Grondel, C. Paget, C. Delebarre, J. Assaad, and K. Levin, Design of optimal configuration for generating A0 Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers, The Journal of the Acoustical Society of America (112) no. 1, 2002, p 84

[59] R. Weber, S. M. H. Hosseini, U. Gabbert, Numerical simulation of the guided Lamb wave propagation in particle reinforced composites, Composite Structures (94) no. 10, 2012, p 9

[60] G. Kulkarni, M. Mitra, Simulation of time reversibility of Lamb wave in symmetric composite laminate, International Journal of Mechanical Sciences (54) no. 1, 2012, p 277

[61] F. Benmeddour, S. Grondel, J. Assaad, E. Moulin, Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches, Ultrasonics (49) no. 2, 2009, p 202

[62] D. Alleyne, P. Cawley, The interaction of Lamb waves with defects, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency (39), 1992, p 381

[63] P. Cawley, D. Alleyne, The use of Lamb wave for the long range inspection of large structures, Ultrasonics (34), 1996, p 287

[64] Y. Cho, Estimation of ultrasonic guided wave mode conversion in a plate with thickness variation, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (47), 2000, p 591

[65] A. Raghavan, C.E.S. Cesnik, Review of guided-wave structural health monitoring, Shock and Vibration (39), 2007, p 91

[66] T. Sainthuile, Récupération d'Énergie Vibratoire pour Systèmes de Contrôle Santé Intégré de Structures Aéronautiques, thèse en électronique, l'Université de Valenciennes Et Du Hainaut Cambresis, 2012, p 6

[67] V. Giurgiutiu, Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors, Elsevier, Burlington, MA, 2008, p 4

[68] N. Yi-Qing, Special issue on interdisciplinary and integration aspects in structural health monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing (28), 2012, p 2

[69] B. H. Koh, S. J. Dyke, Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data, Computers and Structures 85, 2007, p 117

[70] J. M. Ko, Y. Q. Ni, Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, Engineering Structures 27, 2005, p 1715

[71] P. C. Chang, A. Flatau, S. C. Liu, Health monitoring of civil infrastructure, Structural Health Monitoring 2 (3), 2003, p 257

[72] H. Van der Auweraer, B. Peeters, International research projects on structural health monitoring: an overview, Structural Health Monitoring 2 (4), 2003, p 341

[73] J. M. W. Brownjohn, P. Moyo, P. Omenzetter, S. Chakraborty, Lessons from monitoring the performance of highway bridge, Structural Control and Health Monitoring 12, 2005, p 227

[74] E. Naudin, O. Fallou, Le Structural Health Monitoring, note de veille Centre technique des industries mécaniques, 2011, p 1

[75] W.S. Phillips, T.D. Fairbanks, J.T. Rutledge, D.W. Anderson, Induced microearthquake patterns and oil-producing fracture systems in the Austin chalk, Tectonophysics 289, 1998, p153

[76] Nicolas Tsingos, Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives, thèse en Informatique de L'université Joseph Fourier, 1998, p 34

[77] R. sneider, K. Wapenaar, Imaging with ambient noise, American Institute of Physics, Physics today, 2010, p 44

[78] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. Bou Matar, F. Benmeddour, J. Assaad, Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation, Journal of applied Physics 115 , 2014, p 104901

[79] K. Sabra, E. Winkel, D. Bourgoyne, B. Elbing, S. Ceccio, M. Perlin, and D. Dowling, Using cross correlations of turbulent flow-induced ambient vibrations to estimate the structural impulse response : Application to structural health monitoring, The Journal of the Acoustical Society of America 121, 2007, p 1987

[80]K. Sabra, A. Srivastava, F. L. di Scalea, I. Bartoli, P. Rizzo, and S. Conti, Structural health monitoring by extraction of coherent guided waves from diffuse fields, The Journal of the Acoustical Society of America 123, 2008, p EL8

[81] C. Hadziioannou, E. Larose, O. Coutant, P. Roux, and M. Campillo, The Journal of the Acoustical Society of America 125, 2009, p 3688

[82] R. Weaver and O. Lobkis, Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function, The Journal of the Acoustical Society of America 116, 2004, p 2731

[83] O. I. Lobkis, R. L. Weaver, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, The Journal of the Acoustical Society of America 110, 2001, p 3011

[84] J. F. Claerbout, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, Geophysics (33), 1968, p 264

[85] E. Moulin, N. Abou Leyla, J. Assaad, and S. Grondel, Applicability of acoustic noise correlation to Structural Health Monitoring in non-diffuse field conditions, Applied Physics Letters 95, 2009, p 094104-2

[86] J. A. Ruiz, D. Baumont, P. Bernard, and C. Berge-Thierry, Combining a Kinematic Fractal Source Model with Hybrid Green's Functions to Model Broadband Strong Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America 103, 2013, p 3115

[87] P. Dublanchet, P. Bernard, P. Favreau, Creep modulation of Omori law generated by a Coulomb stress perturbation in a 3-D rate-and-state asperity model, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 118, 2013, p 4774

[88] R. L. Weaver and O. I. Lobkis, Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons, The Journal of the Acoustical Society of America 113, 2003, p 2611

[89] K. G. Sabra, P. Roux and W. A. 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 118, 2005, p 3524

[90] P. Roux, K. G. Sabra, W. A. Kuperman, and A. Roux, Ambient noise cross-correlation in free space : theoretical approach, The Journal of the Acoustical Society of America 117, 2005, p 79

[91] O. I. Lobkis and R. L. Weaver, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field, The Journal of the Acoustical Society of America 110, 2001, p 3011

[92] A. Derode, E. Larose, M. Tanter, J. de Rosny, A. Tourin, M. Campillo, and M. Fink, Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L), The Journal of the Acoustical Society of America 113, 2003, p 2973

[93] A. Derode, E. Larose, M. Campillo, and M. Fink, How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors: Application to acoustic waves, Applied Physics Letters 83, 2003, p 3054

[94] N. Abou Leila, Contrôle santé intégré passif par corrélation de champ acoustique ambiant. Application aux structures aéronautiques, thèse en électronique, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2010, p 36

[95] N. Abou Leyla, E. Moulin, And J. Assaad, Influence of a localized defect on acoustic field correlation in a reverberant medium, American Institute of Physics, Journal of Applied Physics 110, 2011, p 084906

[96] J. Bobin, J.L. Starck, J. Fadili, Y. Moudden, Sparsity and morphological diversity in blind source separation, IEEE Transactions on Image Processing 16(11), 2007, p 2662

[97] D. Mattera, F. Palmieri, M. Di Monte, A comparison of signal compression methods by sparse solution of linear systems. WIRN VIETRI 2002: Proceedings of the 13th Italian Workshop on Neural Nets-Revised Papers, London, UK, Springer-Verlag, 2002, p 146

[98] G. Ribay, S. Catheline, D. Clorennec, R. K. Ing, N. Quieffin, M. Fink, Acoustic impact localization in plates: Properties and stability to temperature variation, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 54, 2007, p 378

[99] C. Satriano, V. Dionicio, H. Miyake, N. Uchida, J. P. Vilotte, and P. Bernard, Structural control of seismic activity and megathrust rupture dynamics in subduction zones: lessons from the Mw=9.0, 2011 Tohoku earthquake, Earth and Planetary Science Letters 403, 2014, p 287

[100] M. Campillo, Phase and Correlation in Random Seismic Fields and the Reconstruction of the Green Function, Pure and Applied Geophysics 163, 2006, p 3

[101] T . Kahan, Précis de physique théorique moderne: Physique classique et relativiste et théorie classique des champs, Presses universitaires de France, 1960, p 453

[102] J. D. Polack, La transmission de l'énergie sonore dans les salles, Thèse en physique, Université du Maine, 1988, p 38

[103] A. A. Chabanov, A. Z. Genack, Statistics of dynamics of localized waves, Physical Review Letters (87) 3, 2001, p 233903-3

[104] P. Gouedard et al., Cross-correlation of random fields : Mathematical approach and applications, Geophysical Prospecting 56, 2008, p 375

[105] R. Snieder, Y. Fan, E. Slob, K, Wapenaar, Equipartitioning is not suficient for green's function extraction, Earthquake Science 23, 2010, p 403

[106] N. Abou Leila, Contrôle santé intégré passif par corrélation de champ acoustique ambiant. Application aux structures aéronautiques, thèse en électronique, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2010, p 20

[107] E. Moulin, N. Abou Leyla, J. Assaad, and S. Grondel, Applicability of acoustic noise correlation to Structural Health Monitoring in non-diffuse field conditions, Applied Physics Letters 95, 2009, p 094104

[108] G. M. Jenkins, D. G. Watts, Spectral Analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1969, p 213

[109] V. Lhuillier, S. Chesne, L. Gaudiller, C. Pezerat, Improvement of transmission loss of a double panel by using active control with a virtual modal mass, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 24, 2013, p 1822

[110] Y. Zhang, O. Abraham, V. Tournat, A. Le Duff, B. Lascoup, A. Loukili, et al., Validation of a thermal bias control technique for Coda Wave Interferometry (CWI), Ultrasonics 53, 2013 p 658

[111] C. Desjouy, G. Penelet, P. Lotton, Active control of thermoacoustic amplification in an annular engine, Journal of Applied Physics 108, 2010, p 114904

[112] D. Royer, E. Dieulesaint, Ondes élastiques dans les solides, tome 1: propagation libre et guidée, Masson, 1996, p 265

[113] D. Royer , E. Dieulesaint, Propagation dans un solide, Techniques de l'Ingénieur, p 4

[114] J. B. Ihn, F. K. Chang, Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures, Structural Health Monitoring 7(1), 2008, p 10

[115] C. S. Wang, F. K. Chang, Built-in diagnostics for impact damage identification of composite structures, Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, USA, 1999, p 612

[116] C. H. Wang, J. T. Rose, F. K. Chang, A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring, Smart materials and structures 13, 2004, p 417

[117] O. Chaouch, K. Raoof, M. Chekroun, Correlation techniques for the identification of defects: Case of a non-controllable source, 14th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, Marina Del Rey California, 2015, p 6

[118] C. Rosin, B. Bardo, B. Défréville, Monitoring du bruit des avions : une détection à partir du signal audio, Dixième congrès français d'acoustique, 2010, p 3