

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Jijel
Faculté des sciences et de la technologie
Département d'électronique



*Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de
Master en Electronique*

Option

Electronique et Systèmes de Communication

Thème

**Analyse Non Stationnaire des Signaux
Ultrasonores**

Présenté par:

HARROUACHE Sarra

FEDSI Zahira

Encadré par :

Dr. DIB Samira

Année universitaire : 2016-2017

Remerciements

A cœur vaillant rien d'impossible, à conscience tranquille tout est accessible, quand il y a la soif d'apprendre, tout vient à point à qui sait attendre, quand il y a le souci de réaliser un dessein, tout devient facile pour arriver à nos fins, malgré les obstacles qui s'opposent, en dépit des difficultés qui s'interposent.

Avant tout louange et sincère remerciement à « ALLAH » Le Tout Puissant de nous avoir accordé toute la volonté, la santé et la patience durant la réalisation de ce modeste mémoire ainsi que le long de notre cursus d'études.

Nous ne pouvons empêcher de sourire en pensant aux nombreuses personnes qui ont contribué à faire de cette aventure, une période d'épanouissement et de réel plaisir.

Nous tenons à remercier, notre encadreur, Mlle « DIB » pour tous les efforts qu'elle a consentis tout au long de l'élaboration de ce travail, ses précieux conseils, ses critiques constructives, et la confiance qu'elle nous a toujours témoignée.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et surtout à Mr « M. GRIMES » pour ses bonnes explications et remarques qui nous ont éclairé les obscurités de notre travail et l'enrichir par ses propositions.

Nos remerciements vont ainsi à tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre cursus de formation.

Un vif remerciement à nos familles et amis d'avoir donné jour après jour autant d'amour, de soutien et d'encouragement.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin ne serait-ce que par le simple signe d'encouragement.

Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis, Jour et nuit, nous mène vers le bonheur fleuri.

Sarra et Zahira

Dédicaces

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout. Je dédie ce modeste travail :

A mon coup de cœur très chère mère : Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière, tes nuits blanches et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner.

A mon cher Père : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et surtout pour apprécier la valeur de l'éducation. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous êtes consentis pour mon éducation, ma formation et de mon bien être avant tout.

Puisse Dieu, Le Tout Puissant, vous préserver mes chers parents et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A la prunelle de mes yeux : mes sœurs « Assoum » et « Imy » qui m'ont toujours soutenue moralement et aidée lors de mon cursus d'étude et n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité...

A la bougie de la maison mon très cher frère « Bilou » et le grand acariâtre de la maison « kimi », que Dieu vous assiste...

A la mémoire de mes grands parents. Et à tous les membres de ma famille : maternelle et paternelle spécialement ma chère cousine khaoula...

A ma chère binôme «Zahira » qui a supporté mon humeur au moment de stress, afin que ce travail puisse voir le jour.

mes chères amies et ma deuxième famille, Je ne peux trouver les mots justes pour vous exprimer mon affection : « Hana », « Roukia », « Fouzia », « Samira », « Dounia », « Sabrina » et « Hassiba », En souvenir de nos éclats de rire, en moments inoubliable partagés, de l'amitié sincère qui nous a liée, et de bons moments passés ensemble, que Dieu vous préserve ...

A notre promoteur et encadreur, « Melle DIB » pour son encadrement attentif et fructueux ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour

A tous mes camarades de promotion d'Electronique 2017

A toutes les personnes qui sont le symbole d'un grand amour et que j'aime beaucoup, qui m'ont toujours soutenue et étaient toujours à mes cotés, aux personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée. Que Dieu me les gardent...

Sarra

Dédicace

Je dédie ce modeste travail a :

Mes chers parents pour leur amour inestimable, leurs soutiens, leurs sacrifices, et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer

Mon cher père « Saïd » et ma chère mère « Horia »

A ma chère grand-mère « Khadîdja »

A mon mari « Hamza »

A mon frère Abd-wahad son épouse Rima

A mon frère Abd-rahim son épouse Lamia

A mon frère Massoud son épouse Mariam

A mon frère Mohamad

A mes chères sœurs Nassima, Ilham, Zozo et Medjda

A mes beaux frères et mes belles sœurs

A mes chères cousines Warda et Houda

A ma chère binôme sarra et sa famille

A mes chères amies : Manel, Mounia, Sarra, Hassiba, Hanan, Rokja, Safia, Samira et Dounia

A tous mes collègues

A notre promoteur et encadreur, « Melle DIB » pour son encadrement attentif et fructueux ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour.

A toutes les familles : Fedsi, Lefilaf et Mechekkef

A mes camarades de promotion d'Electronique 2017.

Zahira

Table des matières

Sommaire	V
Liste des Figures	IX
Liste des Tableaux	XIII
Liste des abréviations	XIV
Liste des notations	XV
Introduction générale	1

Chapitre 1

Généralités sur les ultrasons et le Contrôle Non Destructif

1.Introduction.....	4
2.Les ultrasons.....	4
2.1.Définition des ondes sonores.....	4
2.2.Définition des ultrasons.....	5
2.3.Caractéristiques générales des ondes ultrasonores.....	5
2.4.Types d'ondes ultrasonores.....	6
3.Production d'onde ultrasonore.....	8
3.1.Effet piézoélectrique.....	8
3.2.Transducteurs ultrasonores	9
4.Répartition de l'énergie par rapport à un dioptre.....	11
4.1.Incidence normale	11
4.2.Incidence oblique.....	12
5.Atténuation des ondes ultrasonores	13
6.Utilisations des ultrasons	14
7.Contrôle Non Destructif (CND)	15
7.1.Définition.....	15
7.2.Champs d'application du CND.....	16
7.3.Différentes techniques du CND.....	16
7.3.1.Contrôle visuel.....	17
7.3.2.Ressuage.....	17

7.3.3.Magnétoscopie	18
7.3.4.Courants de Foucault	19
7.3.5.Contrôle par Ultrasons	19
7.3.5.1.Principe de la technique.....	19
7.3.5.2.La méthode Pulse-écho.....	20
8.Détection des discontinuités et des défauts	22
8.1.Changements d'impédance acoustique	22
8.2.Difficultés rencontrées.....	24
9.Conclusion	25

Chapitre 2

Les méthodes EMD, EEMD et CEEMDAN – Théorie et Simulation

1.Introduction.....	26
2.La Décomposition Modale Empirique (EMD).....	26
2.1.Principe de l'EMD	27
2.2.Propriétés fondamentales de l'EMD	27
2.3.L'algorithme de l'EMD.....	28
2.3.1.Processus de tamisage.....	28
2.3.2.Extraction des IMFs.....	31
2.3.3.Critère d'arrêt	32
2.3.4.Interprétation / Inconvénients de l'EMD	34
3.La Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble (EEMD).....	34
3.1.Algorithme	34
3.2.Interprétation / Inconvénients.....	36
4.Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble Complet (CEEMDAN).....	37
4.1.Principe et Algorithme.....	37
4.2.Interprétation	39
5.Reconstruction du signal & Erreur.....	40
6.Simulation et Résultats	41
6.1.Modèle d'un signal ultrasonore	41
6.2.Analyse du signal simulé.....	42
6.3.Application de l'EMD sur le signal simulé	43
6.4.Application de l'EEMD sur le signal simulé	47
6.5.Application de la CEEMDAN sur le signal simulé.....	50

6.6. Etude comparative.....	53
7. Conclusion	55

Chapitre 3

Analyse des résultats expérimentaux

1. Introduction.....	56
2. Expérience 01	56
2.1. Description de l'expérience.....	56
2.2. Description du système de mesure	57
2.3. Caractérisation du matériau	58
2.3.1. Détermination de l'épaisseur de l'échantillon.....	58
2.3.2. Calcul des vitesses longitudinales de propagation dans les deux milieux.....	59
2.4. Analyse du signal réel d'aluminium.....	60
2.4.1. Application de l'EMD, EEMD et CEEMDAN.....	60
2.4.2. Erreur de reconstruction.....	63
2.4.3. Calcul de la vitesse de propagation dans l'aluminium.....	63
3. Expérience 02	64
3.1. Description de l'expérience.....	64
3.2. Description du système de mesure	64
3.3. Caractérisation du matériau.....	65
3.3.1. Détermination de l'épaisseur de l'échantillon et la position du défaut	65
3.3.2. Calcul de la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'acier	66
3.4. Analyse du signal réel d'acier	67
3.4.1. Application de l'EMD, EEMD et CEEMDAN.....	67
3.4.2. Erreur de reconstruction.....	69
3.4.3. Calcul de la vitesse longitudinal de propagation dans l'acier	69
4. Interprétation des résultats.....	70
5. Conclusion	71

Chapitre 4

Techniques adaptatives pour le CND

1.Introduction.....	72
2.La transformée de Huang-Hilbert (HHT).....	72
2.1.Définition et Principe	73
2.2.Algorithme HHT pour le CND	75
3.La méthode EMD/TOC pour le CND.....	76
3.1.Définition.....	76
3.2.Principe de l'algorithme.....	76
4.Résultats et interprétation.....	79
4.1.Application des méthodes EMD/TOC et HHT sur les deux signaux.....	79
4.2.Application des méthodes EEMD/TOC et EEMD/HHT sur les deux signaux....	83
4.3.Application des méthodes CEEMDAN/TOC et CEEMDAN/HHT sur les deux signaux.....	88
5.Conclusion	93
Conclusion générale.....	94

Chapitre 1

Figure 1.1	Les différents types de sons suivant la fréquence.....	5
Figure 1.2	Types de son des ultrasonores.....	9
Figure 1.3	Configurations de mesure par ultrasons.....	10
Figure 1.4	Contrôle d'un tube de grand diamètre par ultrasons.....	11
Figure 1.5	La réflexion et la transmission à incidence normale	12
Figure 1.6	Incidence oblique.....	13
Figure 1.7	Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction...	14
Figure 1.8	Principe du ressuage.....	18
Figure 1.9	Principe de la magnétoscopie.....	18
Figure 1.10	Principe du CND par courants de Foucault.....	19
Figure 1.11	Principe de contrôle par ultrasons.....	20
Figure 1.12	Principe de contrôle par contact.....	21
Figure 1.13	Principe de contrôle par immersion.....	22
Figure 1.14	Coefficients de réflexion aux interfaces de deux matériaux.....	24

Chapitre 2

Figure 2.1	La somme des trois signaux oscillants.....	30
Figure 2.2	Principe de tamisage pour l'estimation de la 1 ^{ère} IMF du signal x	32
Figure 2.3	Décomposition EMD du signal x	33
Figure 2.4	Les deux premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales	33
Figure 2.5	Organigramme de la méthode EEMD	35
Figure 2.6	Décomposition EEMD du signal x	36
Figure 2.7	Les trois premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales	36
Figure 2.8	Organigramme de la méthode CEEMDAN	38
Figure 2.9	Décomposition CEEMDAN du signal x	39

Figure 2.10 Les trois premières IMFs contenant les trois contributions sinusoidales	39
Figure 2.11 Signal reconstruit superposé avec le signal x (a) par l'EEMD (b) par la CEEMDAN	40
Figure 2.12 Erreur de reconstruction : (a) EEMD & (b) CEEMDAN	41
Figure 2.13 Signal simulé et sa représentation spectrale	43
Figure 2.14 Les IMFs du signal simulé	44
Figure 2.15 Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite	45
Figure 2.16 Signal simulé bruité et sa représentation spectral	45
Figure 2.17 Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité à droite	46
Figure 2.18 Les modes du signal simulé	48
Figure 2.19 Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite	49
Figure 2.20 Les modes du signal simulé	51
Figure 2.21 Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à droite et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à gauche	52
Figure 2.22 Erreur de reconstruction pour les trois méthodes	54
Figure 2.23 Influence des paramètres sur l'erreur de reconstruction : L'EEMD à gauche & la CEEMDAN à droite	55

Chapitre 3

Figure 3.1 Système de mesure : Schéma synoptique à gauche & vue générale de l'appareil de mesure à droite	57
Figure 3.2 (a) Signal émis (b) Echo reçu	58
Figure 3.3 Signal émis superposé avec l'écho reçu	58
Figure 3.4 Les IMFs du signal reçu par les trois méthodes	60

Figure 3.5	Superposition des deux premières IMFs obtenues par l'EMD avec le signal reçu	61
Figure 3.6	Superposition des trois premières IMFs obtenues par l'EEMD avec le signal reçu	61
Figure 3.7	Superposition des quatre premières IMFs obtenues par la CEEMDAN avec le signal reçu	62
Figure 3.8	Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) pour l'EEMD(b) pour la CEEMDAN	62
Figure 3.9	Erreur d'estimation : (a) EEMD (b) CEEMDAN	63
Figure 3.10	Système de mesure : Schéma synoptique à gauche et vue générale de l'appareil de mesure à droite	64
Figure 3.11	Echo reçu de l'échantillon d'acier	65
Figure 3.12	Les trois échos recueillis à partir du spécimen acier	65
Figure 3.13	Les IMFs du signal reçu par les trois méthodes	67
Figure 3.14	Superposition des deux premières IMFs obtenues par l'EMD avec le signal reçu	68
Figure 3.15	Superposition des trois premières IMFs obtenues par l'EEMD avec le signal reçu	68
Figure 3.16	Superposition des trois premières IMFs obtenues par la CEEMDAN avec le signal reçu	68
Figure 3.17	Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) pour l'EEMD (b) pour la CEEMDAN	69
Figure 3.18	Erreur d'estimation : (a) EEMD (b) CEEMDAN	69

Chapitre 4

Figure 4.1	Principe d'estimation de la FI et de l'AI via le signal analytique $z_x(t)$ de $x(t)$	74
Figure 4.2	Algorithme de Hilbert Huang pour le NDT	75
Figure 4.3	Organigramme de la méthode EMD/TOC	78
Figure 4.4	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant la EMD/TOC du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2.....	80

Figure 4.5	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant la EMD/TOC du signal d'acier (a) IMF2 (b) IMF3	81
Figure 4.6	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude Et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'aluminium (a)IMF1 (b) IMF2.....	82
Figure 4.7	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'acier (a)IMF2 (b) IMF3.....	82
Figure 4.8	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/EEMD du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2(c) IMF3.....	84
Figure 4.9	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/EEMD du signal d'acier (a) IMF4 (b) IMF5 (c) IMF6.....	85
Figure 4.10	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EEMD/HHT du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF3.....	86
Figure 4.11	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'acier (a) IMF4 (b) IMF5 (c) IMF6.....	87
Figure 4.12	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/CEEMDAN du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF3.....	89
Figure 4.13	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/CEEMDAN du signal d'acier (a) IMF3 (b) IMF4 (c) IMF5.....	90
Figure 4.14	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/HHT du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2 (c)IMF3.....	91
Figure 4.15	De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/HHT du signal d'acier (a) IMF3 (b) IMF4.....	92

Chapitre 2

Tableau 2.1 Pseudo-code de l'EMD	29
Tableau 2.2 Paramètres du signal simulé	43
Tableau 2.3 Erreur quadratique de reconstruction pour les trois méthodes	53

Chapitre 3

Tableau 3.1 Calcul de la vitesse de propagation dans l'aluminium pour les trois méthodes	63
Tableau 3.2 Calcul de la vitesse de propagation dans l'acier pour les trois méthodes	70

Chapitre 4

Tableau 4.1 Pseudo-code de la méthode EMD/TOC	78
Tableau 4.2 Calcul de Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (EMD).....	83
Tableau 4.3 Calcul de Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (EEMD).....	88
Tableau 4.4 Calcul de Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (CEEMDAN)	93

Liste des abréviations

CND	Contrôle Non Destructif
EMD	Empirical Mode Decomposition
EEMD	Ensemble Empirical Mode Decomposition
CEEMDAN	Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise
SP	Sifting Process
IMF	Intrinsic Mode Function
SD	Standard Deviation
SNR	Signal to Noise Ratio
RMSE	Root Mean Squared Error
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
NDT	Non Destructif Testing
HHT	Hilbert-Huang Transform
TOC	Transformée en Ondelettes Continue
FI	Fréquence instantanée
AI	Amplitude instantanée
FFT	Fast Fourier Transform

Listes des notations

f	Fréquence de propagation
λ	Longueur d'onde
v	Vitesse de propagation
z	Impédance acoustique
ρ	Masse volumique
T	Coefficient de transmission
R	Coefficient de réflexion
I_r	Energie réfléchie
I_i	Energie incidente
I_t	Energie transmise
x	Distance traversée par l'onde
A	Amplitude à la distance x
A_0	Amplitude initiale
α	Coefficient d'atténuation
$b_i(t)$	Bruit blanc gaussien
$e(t)$	Erreur de reconstruction
τ	Temps d'arrivé
α	Facteur de bande passante
f_c	Fréquence centrale
β	Amplitude
φ	Phase

<i>RMSE</i>	Erreur quadratique
<i>H(t)</i>	Transformée de Hilbert
<i>h₀(t)</i>	Réponse impulsionnelle du filtre de Hilbert
<i>z(t)</i>	Signal analytique
ψ	Ondelette
<i>a</i>	Paramètre d'échelle (dilatation)
<i>b</i>	Paramètre de position d'ondelette (translation)
$a ^{-\frac{1}{2}}$	Facteur de normalisation
ψ^*	Complexe conjugué de l'ondelette
W_f	Coefficient d'ondelette
S_a	Signal d'approximation
S_d	Signal de détail
E_1	Echo de face
E_2	Echo de fond
E_d	Echo de défaut

Introduction générale

Introduction générale

Le Contrôle Non Destructif (CND) joue un rôle important dans différents domaines. Il permet de contrôler des matériaux ou des structures afin d'en vérifier l'état, ainsi que de détecter des défauts sans endommager les pièces inspectées. De nombreux domaines industriels ont eu recours à ce type de contrôle, parmi lesquels on peut citer : l'industrie des canalisations et du stockage notamment dans les secteurs du pétrole et du gaz, le nucléaire, l'automobile, le chemin de fer, l'aéronautique, l'aérospatial, ...

Les méthodes du CND sont assez nombreuses et résultent de la mise en œuvre des principes et des techniques physiques. Le choix d'une méthode est guidé par la nécessité de reconnaître les défauts réputés dangereux que l'objet peut contenir, et aussi dépend de la structure à examiner, des conditions dans lesquelles sera effectué le contrôle, ainsi que des contraintes de temps et de coût.

Différents phénomènes physiques permettent ces contrôles de par leur caractère pénétrant dans les objets (ondes électromagnétiques, ondes acoustiques, champ magnétique, etc.), menant à différents modes de contrôle.

Nous nous intéressons dans ce travail au CND par ultrasons, modalité qui consiste à émettre des ondes acoustiques dans le matériau à inspecter. Les ondes se propageant dans le milieu, et récupérées par le capteur ultrasonore, permettent, dans la mesure du possible, de détecter et d'identifier les défauts contenus dans la pièce. Le même procédé peut être appliqué pour caractériser les matériaux, c'est-à-dire pour estimer des paramètres physiques propres, tels que la vitesse des ondes.

Le but de l'utilisateur est de visualiser les échos et d'en déduire une information spatiale sur l'objet inspecté. Nous nous intéressons ici aux interfaces de pièces, défaut inclus. L'analyse du signal peut cependant se révéler difficile à l'œil nu pour plusieurs raisons : bruit, atténuation, diffraction, superposition d'échos, etc. Des techniques de traitement du signal sont alors employées pour améliorer la résolution des signaux. Diverses techniques ont été utilisées, comme la transformée

en ondelettes continue et la transformée de Hilbert Huang et la décomposition modale empirique.

La décomposition modale empirique (EMD pour « Empirical Mode Decomposition») peut être vue comme l'application récursive d'une opération de décomposition élémentaire permettant d'extraire de tout signal oscillant sa composante qui oscille localement le plus rapidement. La différence est alors la partie du signal qui oscille plus lentement, dont on peut à nouveau extraire la partie oscillant localement le plus rapidement. On obtient ainsi le principe général de l'EMD.

Cette dernière présente certains inconvénients, tel que le mélange de modes : oscillations de différentes amplitudes se trouvant dans un même mode ou des oscillations analogues se rencontrant dans différents modes. Pour éviter ce problème, plusieurs variantes de l'EMD ont été proposées dans la littérature, on cite en particulier : l'EMD d'ensemble (EEMD) et l'EEMD complémentaire avec bruit adapté (CEEMDAN).

Notre objectif est orienté sur deux volets ; le premier porte sur l'étude théorique des méthodes de décomposition EMD, EEMD et CEEMDAN pour la détection et la localisation des échos ultrasonores. Une analyse de ces méthodes est faite sur des signaux de synthèse puis sur des signaux réels recueillis à partir d'expériences effectuées au sein du laboratoire NDT de l'Université de Jijel. Des interprétations sont présentées concernant les avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes.

Le deuxième volet est dédié aux algorithmes temps-fréquence. On propose l'application des méthodes TOC et HHT combinées avec l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN ; et ce, pour améliorer la résolution dans les deux domaines. Une étude comparative est faite pour prouver la robustesse des performances de ces méthodes en permettant une meilleure localisation de défaut et une bonne caractérisation des matériaux.

Le manuscrit est structuré dans quatre chapitres.

Chapitre 1 présentera des généralités sur le contrôle non destructif et les ultrasons ainsi que les notions de base qui seront utilisés dans la suite du manuscrit.

Chapitre 2 décrira les principes et algorithmes de la méthode EMD et ses deux variantes considérées dans ce travail (EEMD et CEEMDAN).

Chapitre 3 sera consacré à l'application de ces méthodes sur des signaux de synthèse puis sur des signaux réels. Il comprend des simulations MATLAB portant sur l'évaluation des performances de ces méthodes.

Dans le chapitre 4, on s'intéresse aux algorithmes temps-fréquence. L'objectif est d'éliminer le mélange de modes et de réduire le coût de calcul. Les méthodes HHT et TOC appliquées sur des signaux réels ont apporté des améliorations aux résultats trouvés.

Enfin, une conclusion générale regroupant les résultats de notre étude sera présentée. Elle résume les résultats trouvés sur les performances des différentes méthodes étudiées et analysées et propose quelques perspectives pour des travaux futurs.

Généralités sur les ultrasons et le Contrôle Non Destructif

-
1. Introduction
 2. Les ultrasons
 3. Production de l'onde ultrasonore
 4. Répartition de l'énergie par rapport à un dioptre
 5. Atténuation des ondes ultrasonores
 6. Utilisations des ultrasons
 7. Contrôle Non Destructif (CND)
 8. Détection des discontinuités et des défauts
 9. Conclusion
-

1. Introduction

Le contrôle par ultrasons est une méthode d'examen dont les premières applications industrielles ont été réalisées, à titre expérimental, à la veille de la seconde guerre mondiale soit vers 1935. En raison de la lente évolution des matériels de contrôle tributaires des progrès de l'électronique, l'essor du contrôle par ultrasons n'apparut qu'à partir de 1955 environ.

Depuis lors, cette méthode de contrôle constitue un puissant outil d'investigation. Elle présente à l'heure actuelle un vaste champ d'application qui s'étend aux matériaux métalliques, plastiques ou composites et aux milieux à structure hétérogène tels les bétons.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter quelques notions sur les ultrasons, qu'il est nécessaire de rappeler tels que la génération de l'onde et sa propagation, les phénomènes qui peuvent apparaître à la rencontre d'une interface entre deux milieux différents, ainsi que les différentes techniques utilisées par le contrôle non destructif.

2. Les ultrasons

2.1. Définition des ondes sonores

Le son est la partie audible du spectre des ondes acoustiques émis par des corps en vibrations. Il est donc décrit comme étant des ondes sonores mécaniques longitudinales provoquant une perturbation de la pression du milieu.

Les ondes sonores se propagent soit dans l'air soit dans un milieu matériel (solides, liquides ou gaz). Leur fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 KHz réservées pour l'audibilité humaine et, selon les cas, sont décrites comme un bruit ou comme un son musical. Les sons dont les fréquences sortent du domaine audible sont qualifiées d'infrasons si leur fréquence est basse, d'ultrasons si leur fréquence est élevée (Figure 1.1).

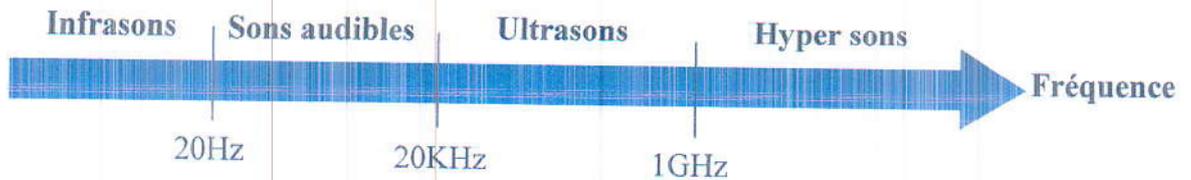


Figure 1.1 : Les différents types de sons suivant la fréquence.

2.2. Définition des ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques de même nature que le son présentant une certaine élasticité, mais de fréquence comprise entre 20 kHz et 1GHz environ. Les ultrasons se déplacent à des vitesses différentes dans les différents milieux traversés. Ils détiennent les mêmes propriétés générales que les ondes élastiques, c'est-à-dire des ondes vibratoires ou des ondes de pressions dépendant du milieu de propagation [1].

2.3. Caractéristiques générales des ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont caractérisées par plusieurs éléments, on cite en particulier [2] :

- **Fréquence, longueur d'onde et Vitesse de propagation**

Lors de la propagation dans un milieu donné, l'onde sonore est caractérisée par sa fréquence f et sa longueur d'onde λ permettant de déterminer la vitesse de propagation v :

$$v = \lambda \cdot f \quad (1.1)$$

- **Impédance acoustique**

Chaque milieu est caractérisé par une résistance au passage du son appelée impédance acoustique. Dans le cas général, elle correspond au rapport entre la pression acoustique en un point donné et la vitesse de vibration des molécules en ce point (il ne s'agit pas de la célérité du son).

Dans le cas d'une onde plane, il est possible d'estimer une valeur de l'impédance par la formule :

$$Z = \sqrt{\frac{\rho}{x}} = \rho \cdot v \quad (1.2)$$

Où Z est l'impédance acoustique caractéristique du milieu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], ρ la masse volumique du milieu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] et v la célérité du son [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

- **Puissance acoustique**

La puissance acoustique est l'énergie délivrée par une source sonore pendant un intervalle de temps donné, exprimée en watt.

- **Intensité acoustique (ou puissance surfacique)**

L'intensité acoustique correspond à l'énergie qui traverse chaque seconde une surface unitaire perpendiculaire à la direction des ondes sonores.

- **Pression acoustique**

La pression p exprimée en Pascal (Pa) est une contrainte appliquée à la surface d'un corps. Elle correspond à une force par unité de surface. Au repos, les molécules sont soumises à la pression atmosphérique. Lorsque le milieu est perturbé, le mouvement des molécules engendre des variations locales de la pression ; c'est la pression acoustique.

2.4. Types d'ondes ultrasonores

Dans un milieu solide, on distingue différents types d'ondes ultrasonores. Ces types se différencient les uns des autres par :

- La forme et la direction des trajectoires qu'elles impriment aux particules du matériau dans lequel elles se propagent.
- La vitesse de propagation.
- La distance à laquelle elles sont susceptibles de se propager dans le matériau.

Les quatre types d'ondes ultrasonores sont :

- **Ondes longitudinales ou de compression**

La propagation de ces ondes s'accompagne en chaque point de la matière par des mises en compression puis en dilatation de celle-ci conduisant à des variations de volume. Ces ondes ont la propriété de se propager dans les trois milieux : solides, liquides et gazeux. Dans les ondes longitudinales, la direction de la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

- **Ondes transversales ou de cisaillement**

La propagation de ce type d'ondes n'entraîne pas des modifications locales du volume du matériau mais simplement une déformation de celui-ci par glissement. Ces ondes ont la propriété de se propager dans les milieux solides. Elles se déplacent perpendiculairement à la direction de la propagation.

- **Ondes de surface ou de RAYLEIGH**

Dans certaines circonstances, les ondes transversales se propagent à la surface libre d'un matériau et n'affectent qu'une couche mince sous-jacente à celle-ci dont l'épaisseur est égale ou peu différente d'une longueur d'onde. Les ondes sont alors appelées ondes de surface ou de RAYLEIGH et se propagent à une vitesse environ 10 % de celle des ondes transversales lorsqu'elles se déplacent dans un milieu illimité.

- **Ondes de plaque ou de LAMB**

L'appellation onde de plaque est utilisée lorsqu'on parle de la propagation d'une onde ultrasonore dans une plaque d'épaisseur comparable à la longueur d'onde et de dimensions latérales très grandes par rapport à l'épaisseur. La vibration des deux faces de la plaque est alors couplée. Généralement on parlera de mode de Lamb pur lorsque la plaque est constituée d'un matériau isotrope et qu'elle est entourée du vide. Lorsque la plaque est immergée dans un fluide, on parle alors de mode de Lamb généralisé. Les ondes de Lamb sont des combinaisons d'ondes longitudinales et d'ondes transversales.

3. Production de l'onde ultrasonore

Les fréquences des ondes ultrasonores qui sont utilisées lors des contrôles industriels étaient comprises entre 250 KHz et 50 MHz, le domaine le plus courant étant compris entre 1 et 10 MHz environ.

Pour la production d'une onde ultrasonore mécanique à de très hautes fréquences, il faut une excitation mécanique : l'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. Elle se propage ensuite de proche en proche grâce à l'oscillation des particules autour de leur position au repos. Plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes ultrasonores. Le plus utilisé est la piézo-électricité [3].

3.1. Effet piézoélectrique

En 1880 l'effet piézoélectrique a été découvert par les frères **Pierre et Jacques Curie**. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet indirect).

- **Effet piézoélectrique direct**

C'est l'apparition d'un courant électrique, lorsqu'on applique une force mécanique sur un matériau piézo-électrique. Cette caractéristique est utilisée pour mesurer des pressions (la pression génère une contrainte mécanique sur un quartz, qui génère une charge, amplifiée par la suite). Une autre utilisation de cet effet est la création d'horloges : le quartz soumis à une charge à une certaine fréquence vibre à la fréquence propre du cristal, qui est utilisée comme référence de pulsation.

- **Effet piézoélectrique indirect**

Lorsqu'on applique un champ électrique aux bornes d'un cristal, celui-ci va se contracter et se détendre : il crée des vibrations mécaniques et émet un faisceau ultrasonore synchrone. L'effet inverse est utilisé pour commander certains systèmes mécaniques, comme des injecteurs à commande piézo-électrique en automobile (les premiers ont arrivé chez siemens en 2004). Lorsque le déplacement

est de l'ordre de quelques nanomètres, il permet des nano-manipulations en nanotechnologie [4].

3.2. Transducteurs ultrasonores

La production des ultrasons est réalisée par des transducteurs piézoélectriques. Ces derniers permettent la conversion d'une énergie électrique en une énergie mécanique et réciproquement.

En émission : les propriétés recherchées seront le rendement et la capacité d'émettre un signal de fort niveau.

En réception : la sensibilité et le rapport signal/bruit seront les caractéristiques déterminantes de la performance du transducteur.

Des transducteurs mono-élément sont représentés sur la Figure 1.2a. Il existe également des capteurs multi-éléments (voir Figure 1.2b). Ceux-ci permettent le contrôle spécifique de chaque élément et ainsi la génération de champs acoustiques complexes (focalisation, balayage, ondes planes, etc.). Une acquisition avec une sonde mono-élément permet d'obtenir un signal numérique unidimensionnel que l'on appelle A-scan (comme le signal qu'on va analyser dans les chapitres qui suivent). Il est également possible d'obtenir des images ou B-scans en déplaçant le transducteur mono-élément ou en utilisant un transducteur multi-éléments [5].

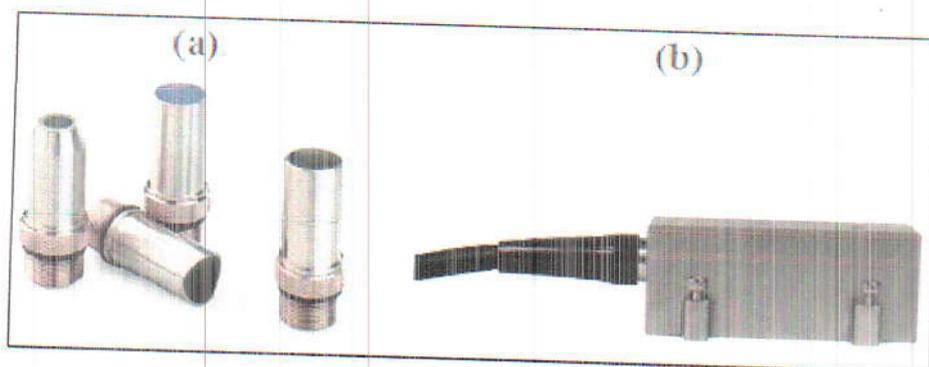


Figure 1.2 : Types de sondes ultrasonores. (a) : sondes mono-palpeur, (b) : sonde multiéléments (source : Olympus, www.olympus-ims.com).

Pour réaliser des contrôles par ultrasons, un émetteur et un récepteur ultrasonores sont nécessaires. Deux cas de figure sont alors possibles. Le premier cas utilise un seul transducteur qui va servir d'émetteur et de récepteur. On parle alors de mesure en réflexion ou pulse-écho en anglais. Ce type de mesure est utilisé pour sa simplicité, mais également lorsque la face arrière de la pièce n'est pas accessible. On peut par exemple citer le cas de contrôle de tube, à l'intérieur duquel on ne peut pas accéder. La deuxième possibilité consiste à utiliser un transducteur émetteur et un transducteur récepteur. On l'appelle alors mesure en transmission ou pitch-catch en anglais. Ce procédé est par exemple appliqué pour réaliser l'évaluation de matériaux avec un transducteur de part et d'autre de la pièce de test. Ces deux dispositifs expérimentaux sont représentés sur la Figure 1.3.

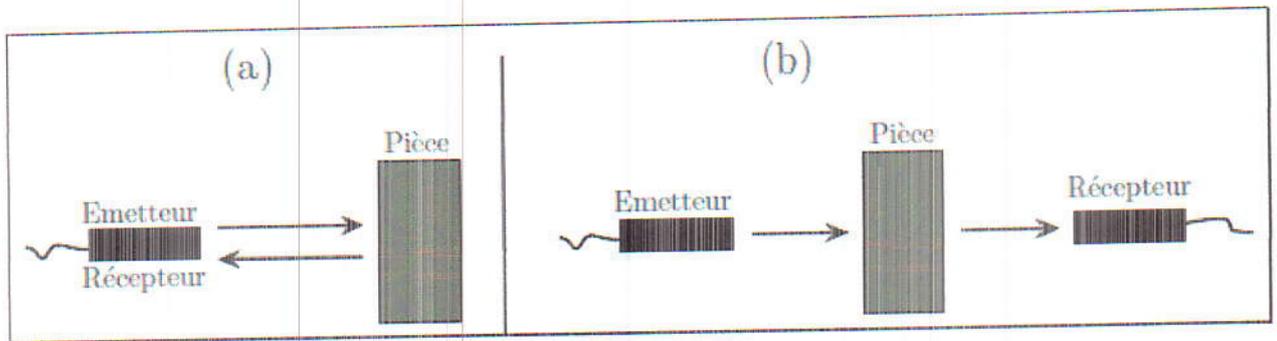


Figure 1.3 : Configurations de mesure par ultrasons (a) : en réflexion, (b) : en transmission.

Les mesures peuvent se faire directement en contact avec la pièce à inspecter comme le montre la Figure 1.4 d'un exemple de contrôle de tube de grosse dimension. On utilise alors un couplant entre le(s) transducteur(s) et le matériau pour réaliser une adaptation d'impédance. L'eau est également un très bon adaptateur d'impédance si bien que la majorité des contrôles est réalisée en immersion dans une cuve [5]. Ces techniques seront détaillées dans la suite du chapitre.

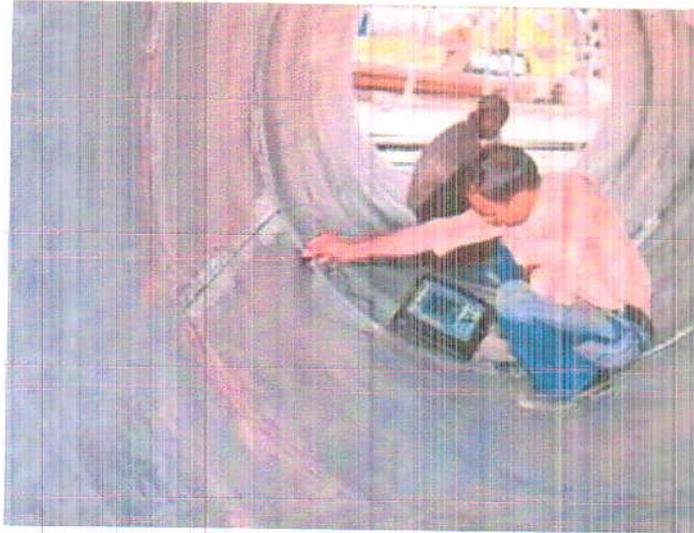


Figure 1.4 : Contrôle d'un tube de grand diamètre par ultrasons. La sonde ultrasonore est placée directement en contact avec la pièce par l'opérateur pour l'inspecter (source : IRC Advanced NDT Services, www.indiamart.com).

4. Répartition de l'énergie par rapport à un dioptré

Suivant l'angle d'incidence de l'onde se propageant dans deux milieux séparés par un dioptré, on peut distinguer deux cas : l'incidence normale et l'incidence oblique.

4.1. Incidence normale

Dans ce cas, l'onde incidente est perpendiculaire à la surface de la pièce. Lorsqu'une onde ultrasonore arrive sur une interface placée à un angle droit par rapport à sa direction initial, une partie est réfléchié dans le sens opposé et l'autre partie traverse l'interface et continue son chemin sans changer de direction. La quantité de l'énergie ultrasonore réfléchié ou coefficient de réflexion est directement proportionnelle à la différence d'impédance acoustique (Z_1, Z_2) entre les deux milieux. Si cette différence est grande, alors la plupart de l'énergie est réfléchié et seule une partie est transmise à travers l'interface. Tandis que si cette différence est petite, la majeure de l'énergie est transmise et seule une partie est réfléchié.

Soient I , R et T les amplitudes de l'onde incidente, réfléchié et transmise respectivement, la relation liant les trois amplitudes est la suivante :

$$T = I + R \quad (1.3)$$

Les fractions réfléchiée et transmise sont liées à la variation d'impédance par les relations suivantes :

➤ Coefficient de réflexion R :

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (1.4)$$

➤ Coefficient de transmission T :

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1.5)$$

Où : I_r énergie réfléchiée, I_i énergie incidente, I_t énergie transmise, Z_1 et Z_2 impédances acoustiques des deux milieux.

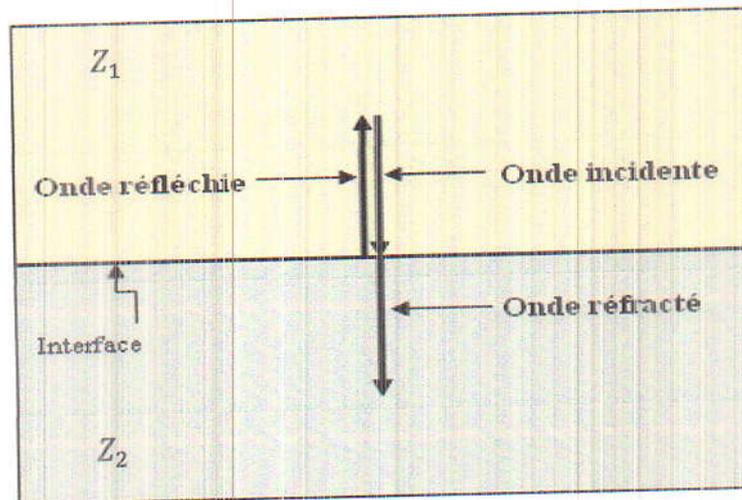


Figure 1.5 : La réflexion et la transmission à incidence normale.

Remarque :

Ces formules sont valables seulement pour le cas d'une incidence nulle. Dans le cas où cette incidence n'est pas nulle le phénomène de réflexion et de transmission devient plus compliqué.

4.2. Incidence oblique

Lorsque les deux milieux de propagation ont deux vitesses de propagation d'onde différentes, il y aura réflexion dans le premier milieu et réfraction dans le deuxième milieu ; c'est-à-dire on a une onde ultrasonore qui se déplace à la vitesse V_1 dans le milieu 1, est incidente à un angle oblique par rapport à l'interface des milieux 1 et 2, elle produit dans le milieu1 une onde réfléchiée, et dans le milieu2 une onde réfractée.

L'onde réfléchi a la même vitesse V_1 et le même angle α que l'onde incidente, mais l'onde réfractée (transmise) à une vitesse V_2 et un angle β .

La loi de Snell-Descartes donne la relation entre les deux vitesses en fonction des angles d'incidence et de réfraction :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.6)$$

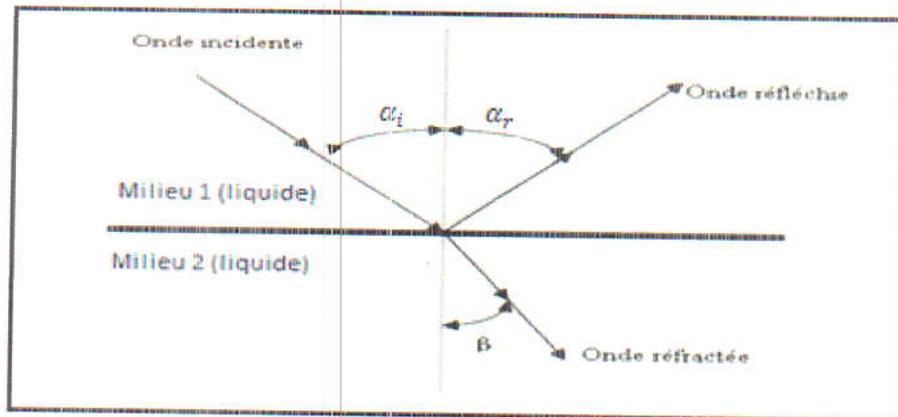


Figure 1.6 : Incidence oblique.

5. Atténuation des ondes ultrasonores

Une onde ultrasonore perd de l'énergie lors de sa propagation dans un milieu réel. Dans un matériau homogène et à faces parallèles par exemple, on observe cette perte d'énergie en enregistrant les échos successifs. L'enveloppe d'une séquence d'échos de fond de pièce présente alors une décroissance exponentielle de l'amplitude (Figure 1.7) :

$$A = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.7)$$

Où : A : l'amplitude à la distance x , A_0 : l'amplitude initiale, α : le coefficient d'atténuation et x : la distance traversée par l'onde.

Cependant, les matériaux naturels produisent un effet, plus au moins accentué, qui affaiblit d'avantage les ondes ultrasonores. Ceci est le résultat de deux phénomènes, qui sont la diffusion et l'absorption, qui se regroupent dans le concept de l'atténuation. D'une façon générale, le coefficient d'atténuation α est un paramètre relatif composé du coefficient d'absorption et du coefficient de diffusion [6].

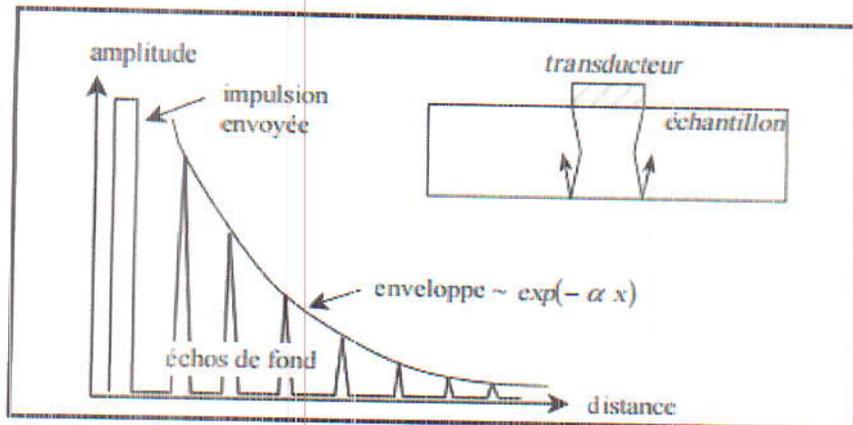


Figure 1.7 : Atténuation des échos en négligeant la diffraction.

6. Utilisations des ultrasons

Les ultrasons sont utilisés dans nombreux domaines :

- **En médecine :** l'échographie c'est une technique d'image employant les ultrasons ; la thérapie : c'est une autre technique qui consiste à utiliser les ultrasons pour obtenir de la chaleur pour des fins thérapeutiques.
- **En laboratoire :** les ultrasons sont ici employés pour nettoyer du matériel.
- **En agriculture :** par vibration (nébulisation) de l'eau qui se transforme en aérosol.
- **En télédétection :** détermination de la distance de l'objet sur lequel l'onde a rebondi par rapport au sonar.
- **En télémétrie :** pour mesurer les distances.
- **En téléphonie :** comme sonnerie inaudible appelée aussi « ultra-sonnerie ».
- **En industrie d'automobile :** pour éviter les obstacles.
- **En contrôle non destructif.**

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défauts à l'intérieur d'un matériau, ce qui constitue notre objectif dans la partie suivante

7. Contrôle Non Destructif (CND)

Dans les secteurs industriels, l'un des enjeux majeurs est le contrôle régulier des matériaux en cours de la production, ou de fonctionnement ou lors de la maintenance afin d'éviter tout risque d'accident économiquement ruinant.

Le processus par lequel les propriétés des matériaux sont étudiées d'une manière non destructive (sans les dégrader) est appelé : Contrôle Non Destructif (CND).

De nombreuses techniques ont été développées au cours de ces dernières décennies et ont toutes été regroupées sous le terme de CND. Parmi ces techniques on cite : ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault, thermographie, radiographie, ultrasons, etc.

Dans notre travail, on s'intéresse à la technique Contrôle Non Destructif par ultrasons. Cette dernière présente de nombreux avantages

- Facilité de mise en œuvre.
- Ne nécessite qu'une seule face d'accès.
- Aucun danger lié à l'utilisation de source radioactive et de rayonnements ionisants.
- Conditions d'utilisation généralement moins restrictives que les autres méthodes.
- Plus grande sensibilité de contrôle sur les pièces de forte épaisseur.
- Résultat du contrôle en temps réel et contrôle plus rapide pour des épaisseurs importantes.
- Meilleure sensibilité de contrôle pour les défauts filiformes (fissures, tapures, criques) d'orientation aléatoire.

7.1. Définition

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui intervient pendant deux phases de la vie des composants. Premièrement, il sert à vérifier que les pièces produites ne contiennent pas d'anomalies ou de défauts avant leur utilisation. Il permet ainsi d'éviter un dysfonctionnement lié à la mauvaise fabrication d'une pièce. La deuxième phase d'utilisation du CND intervient pendant l'usage des pièces. Il sert alors à contrôler leur bon fonctionnement in situ, car

celles-ci peuvent subir de fortes sollicitations mécaniques, chimiques, radioactives, menant à l'apparition de craquements, fissures, etc.

Le CND par ultrasons est effectué en émettant des ondes acoustiques à l'intérieur ou à la surface des pièces à inspecter. La réception de ces ondes après propagation dans le matériau permet d'obtenir des informations sur le milieu de propagation. Les ondes acoustiques créent des modifications locales de la pression et de la vitesse des particules [5].

7.2. Champs d'application du CND

Le CND est primordial afin de garantir la sûreté de fonctionnement des systèmes critiques dans les différents secteurs industriels, citons par exemple :

- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- L'industrie navale (contrôle des coques).
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage).
- L'aérospatiale et l'armée.
- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- La sidérurgie.
- La chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication.
- L'industrie de l'énergie : réacteurs nucléaires, chaudières, tuyauterie, turbines, etc. (maintenance des installations).
- Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- L'inspection alimentaire.
- Le Génie Civil et le bâtiment.

7.3. Différentes techniques du CND

Diverses techniques de CND sont utilisées. Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Elles exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (nature du matériau, forme, ...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit

être effectué [7]. La suite de ce chapitre est consacrée à la présentation des principales méthodes de CND et plus particulièrement celle basée sur les ultrasons.

7.3.1. Contrôle visuel

Le contrôle visuel est le plus ancien des contrôles non destructifs. C'est la méthode la plus utilisée, car la plus économique à mettre en œuvre. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Un examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Elle nécessite uniquement les "bons yeux" d'un opérateur. Mais lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie.

7.3.2. Ressuage

Méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes [8] :

- Nettoyer la pièce à contrôler ;
- Ensuite, appliquer sur la surface à contrôler un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant". Ce liquide va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...);
- Éliminer par un lavage adapté l'excès de pénétrant. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser. On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. Ces indications sont alors visibles à l'œil nu.
- Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchants en surface sur

les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

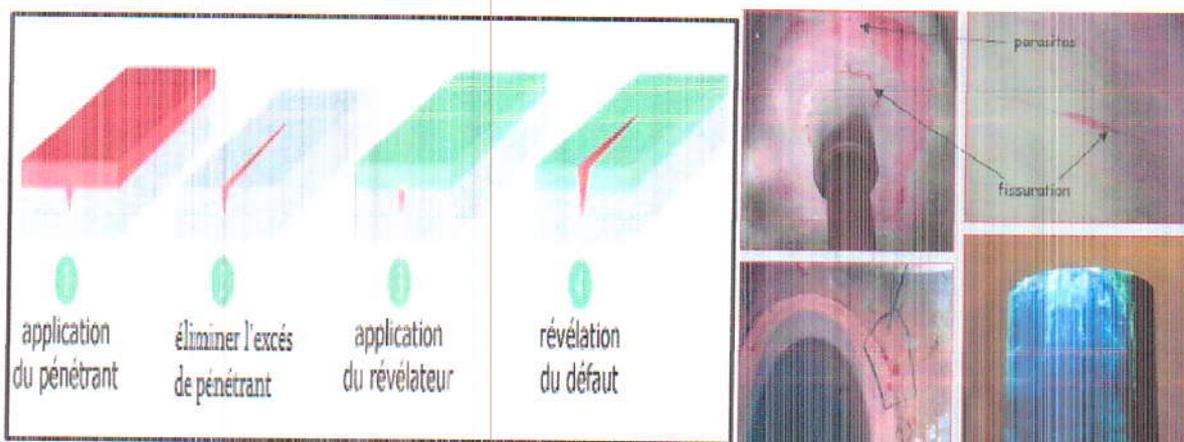


Figure 1.8 : Principe du ressuage.

7.3.3. Magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchants ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte,...). L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques. Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut.

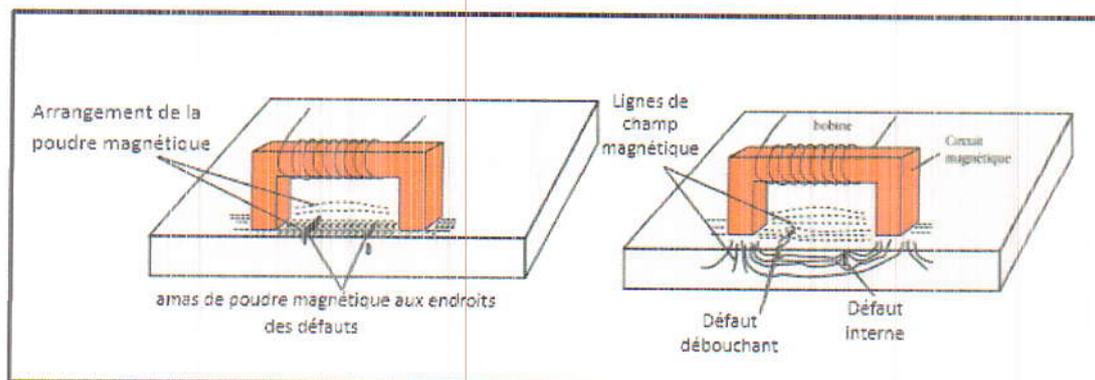


Figure 1.9 : Principe de la magnétoscopie.

7.3.4. Courants de Foucault

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées en matériaux conducteurs d'électricité. Son principe consiste à soumettre la pièce à inspecter à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps, à l'aide d'une bobine parcourue par un courant électrique. Ce faisant, on induit des courants de Foucault dans le matériau à contrôler. La trajectoire des courants induits est perturbée par des variations locales des lignes de courant conduit à une modification du champ induit, lequel s'oppose à chaque instant au champ d'excitation. Par conséquent, le courant traversant la bobine d'excitation varie. Autrement dit, l'impédance de la bobine est modifiée.

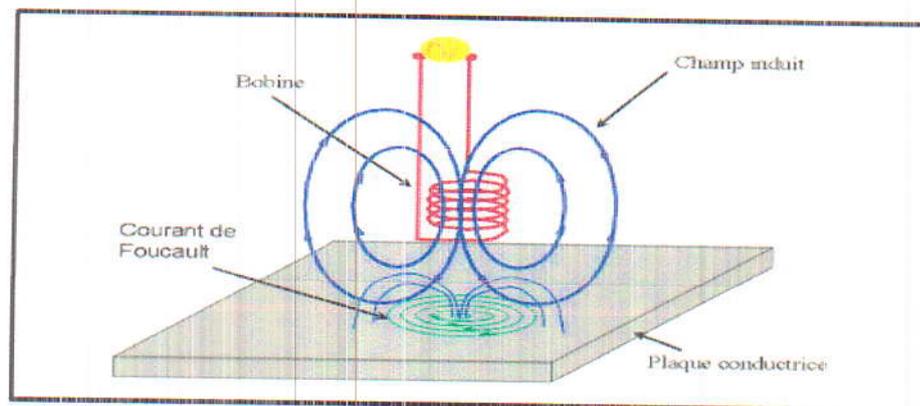


Figure 1.10 : Principe du CND par courants de Foucault.

7.3.5. Contrôle par Ultrasons

Le CND par ultrasons est une technique très utilisée, parce qu'elle est relativement flexible et simple pour détecter des défauts internes.

7.3.5.1. Principe de la technique

Les ultrasons sont des ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques. Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde.

Le principe de cette technique consiste à émettre une impulsion ultrasonore par un transducteur qui peut jouer le rôle d'émetteur et de récepteur en même temps. Cette impulsion se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

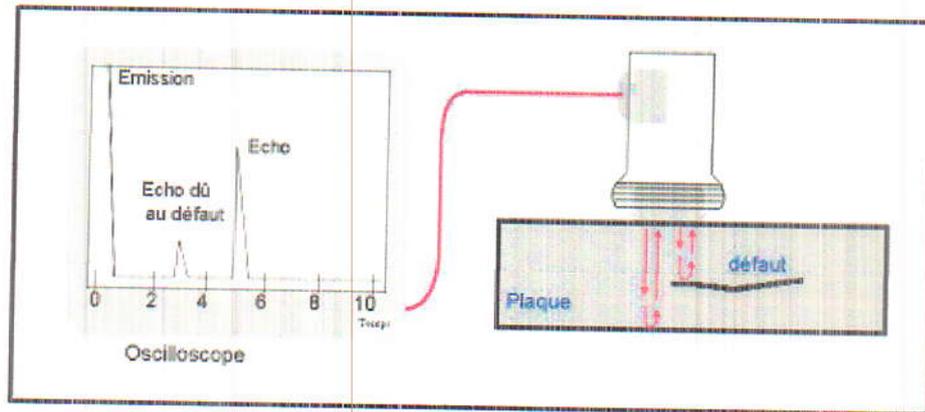


Figure 1.11 : Principe de contrôle par ultrasons.

Parmi les méthodes les plus utilisées dans le CND par ultrasons, on s'intéresse à la **méthode pulse-écho**.

7.3.5.2. Méthode Pulse-écho

Cette méthode utilise un seul transducteur émetteur-récepteur, dans le cas où le palpeur est appliqué au contact de la pièce par l'intermédiaire d'un film de couplage.

On excite le palpeur au moyen d'une brève impulsion électrique, cela correspond à un premier écho appelé : écho d'émission. En l'absence de défaut, le train d'onde progresse dans la pièce et vient frapper la face arrière de la pièce contrôlée, sur laquelle il est réfléchi. Il refait alors la progression inverse jusqu'au moment où le palpeur génère un signal électrique correspondant à l'écho de fond.

En cas de présence d'un défaut dans l'épaisseur de la pièce, celui-ci quand il est frappé par la l'onde ultrasonore, en réfléchit une partie, et pendant que le train

d'ondes principal poursuit sa propagation vers le fond, l'onde réfléchiée sur le défaut revient vers le palpeur où elle génère un écho de défaut.

Un problème qui se pose lors de la présence d'une interface air-solide est qu'il y'a une très mauvaise transmission des ondes ultrasonores. Ces dernières sont fortement atténuées. Pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit **couplage**, qui consiste à diminuer le phénomène de rupture d'impédance et pour garder la propagation d'énergie transmise sensiblement constante lorsque le transducteur se déplace. Deux techniques sont utilisées pour assurer ce couplage : le contrôle par contact et le contrôle par immersion.

a. Contrôle par contact

Dans ce type de contrôle, le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler ou par l'intermédiaire d'une pièce tampon ou d'un sabot. La liaison acoustique est assurée par un film de couplage qui est généralement une graisse, une huile ou des gels spéciaux. Cette méthode est surtout employée lors du contrôle manuel. Elle est simple à mettre en œuvre et ne nécessite qu'un seul transducteur et un appareil de contrôle. Cependant, elle présente deux inconvénients : premièrement, elle nécessite d'abord l'intervention d'un opérateur qui assure le déplacement du traducteur. Deuxièmement, la constante du couplage n'est pas bonne, c'est-à-dire qu'au cours du contrôle, la qualité du couplage risque d'évoluer et donc la qualité du contrôle [9].

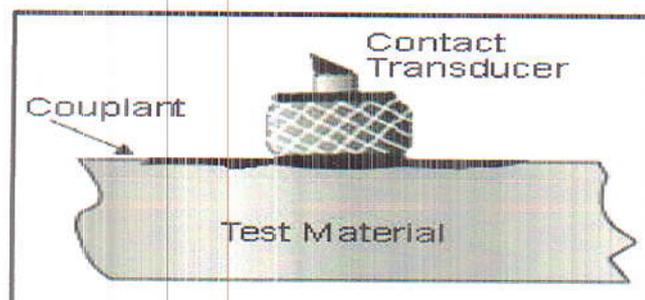


Figure 1.12 : Principe de contrôle par contact.

b. Contrôle par immersion

Cette méthode se développe pour pallier aux deux inconvénients de la méthode de contrôle précédente. Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce. Le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Cette technique est d'une mise en œuvre délicate lorsque les pièces sont lourdes et encombrantes. Mais elle se prête facilement à l'automatisation.

L'utilisation de cuve dans lesquelles les pièces sont immergées, permet de résoudre de nombreux problèmes : le couplage étant bien assuré par l'eau, les palpeurs ne sont plus situés au contact de la pièce mais sont fixés à l'extrémité d'un bras manipulateur permettant des rotations suivant plusieurs axes et sa translation verticale. Ce bras est lui-même déplacé dans un plan horizontal. Il est ainsi possible de positionner le capteur comme on le désire. [10]

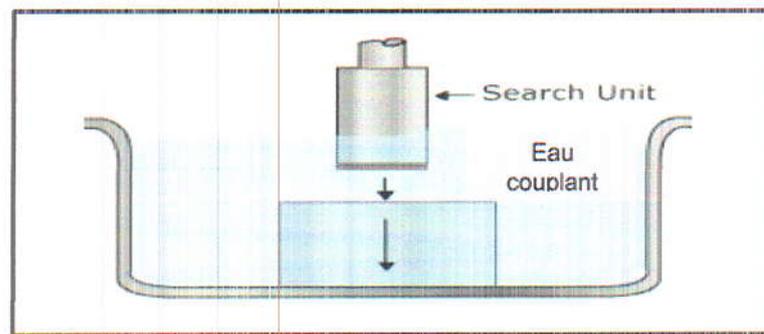


Figure 1.13 : Principe de contrôle par immersion.

8. Détection des discontinuités et des défauts [5]

8.1. Changements d'impédance acoustique

Les ondes acoustiques sont générées grâce à un transducteur électro-acoustique. L'onde se propage alors dans le milieu et crée une onde retour à chaque changement d'impédance rencontré. Ces discontinuités d'impédance acoustique peuvent provenir d'interfaces entre deux milieux ou alors de défauts qui créent des ruptures dans le matériau.

À titre d'exemple, on présente, sur la Figure (1.14), le cas d'un matériau homogène d'impédance Z_1 entouré par un milieu homogène d'impédance Z_2 . C'est typiquement le cas d'une pièce immergée dans une cuve d'eau. L'impédance acoustique d'un matériau homogène est donnée par l'équation (1.2).

Le coefficient de réflexion R_{ij} , entre un milieu i et un milieu j , qui indique le rapport entre la pression réfléchiée et la pression incidente, se calcule par :

$$R_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_i + Z_j} \quad (1.8)$$

D'un manière similaire, le coefficient de transmission T_{ij} , d'un milieu i vers un milieu j , définit le rapport entre les pressions transmises et incidente, et s'écrit :

$$T_{ij} = 1 + R_{ij} = \frac{2Z_j}{Z_i + Z_j} \quad (1.9)$$

Ainsi le facteur de transmission est toujours positif, tandis que le facteur de réflexion peut être négatif, ce qui signifie que l'écho a subi une inversion de phase. Pour plusieurs réflexions et transmissions successives, les coefficients doivent être multipliés entre eux.

Pour une mesure en réflexion, on peut alors calculer les coefficients de réflexion des deux premiers échos, l'écho de surface et l'écho du fond de la pièce (voir Figure 1.14), qui ont pour amplitudes respectives R_{12} et $T_{12}R_{21}T_{21}$.

Les ondes réfléchies sont ensuite réceptionnées par un capteur acousto-électrique et forment les échos dans le signal électrique.

Si par exemple une onde longitudinale passe de l'eau à l'acier, est ensuite réfléchiée sur la paroi postérieure de l'acier et pénètre à nouveau dans l'eau, ces facteurs sont : $T(\text{eau-acier}) = 1.94$, $R(\text{acier-acier}) = 0.91$, $T(\text{acier-eau}) = 0.06$. Soit le pourcentage total de la pression réfléchiée représente 11% de la valeur initiale.

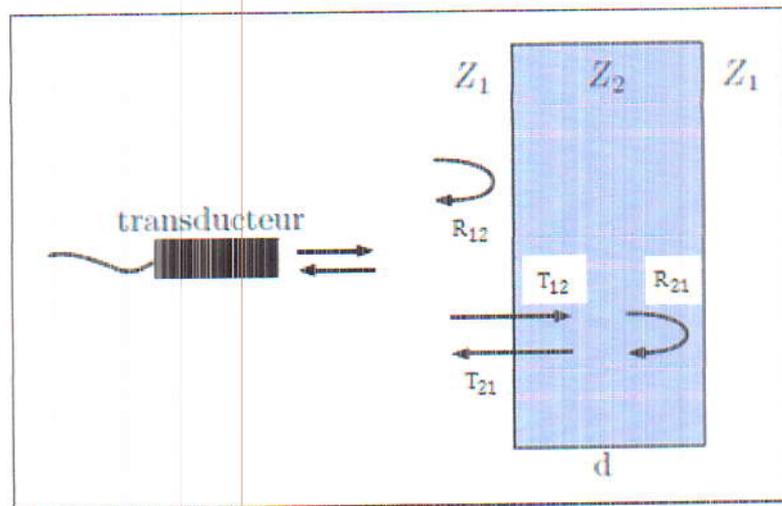


Figure 1.14 : Coefficients de réflexion aux interfaces de deux matériaux.

8.2. Difficultés rencontrées

Le problème qui consiste à retrouver les positions des changements d'impédance et les coefficients d'amplitude associés présente des difficultés de résolution.

1. Premièrement, les transducteurs travaillant dans une bande de fréquences limitée, l'information reçue est également à bande limitée. Néanmoins, le signal à reconstruire est un train d'impulsions qui contient toutes les fréquences.
2. Le deuxième problème provient de la manière dont sont acquis les signaux. En effet, on dispose de signaux quantifiés, ce qui constitue une perte d'information par rapport au signal continu. De plus, ces données comprennent un bruit de mesure qui rajoute des imprécisions dans le signal à traiter.
3. Ensuite, la propagation des ondes acoustiques est soumise à l'atténuation et à la dispersion, phénomènes physiques qui modifient la forme des échos en fonction de la propagation. Cette modification, de caractère passe-bas, provoque une perte plus importante des hautes fréquences des échos lorsque la distance de propagation augmente. Des phénomènes de diffraction peuvent également être présents, qui modifient la forme des échos en fonction de la géométrie des obstacles rencontrés.
4. Enfin, le dernier problème est la superposition des échos qui intervient lorsque les discontinuités sont proches. C'est le cas par exemple pour des plaques minces, pour des défauts proches les uns des autres ou proches des interfaces.

9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, des généralités sur les ultrasons ont été présentées à savoir ; caractéristiques, types d'onde, production, ...etc. ainsi que les phénomènes qui peuvent apparaître lors de la rencontre de deux milieux différents. Et ce, afin de mettre en évidence leur utilisation dans le contrôle non destructif des matériaux.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons donné quelques notions sur le contrôle non destructif (CND) qui consiste en la mise en œuvre de techniques pour la caractérisation de paramètres physiques ou géométriques ou la détection des défauts apparaissant dans des structures industrielles diverses. Ce qui est un enjeu dont dépend notamment la sécurité. Parmi les différentes méthodes de CND, celle des ultrasons est la plus utilisée pour le contrôle des pièces. Ainsi on a décrit la technique par ultrasons en mode Pulse-écho, par contact et par immersion.

Chapitre 2

Les méthodes EMD, EEMD et CEEMDAN Théorie et Simulation

-
1. Introduction
 2. Décomposition Modale Empirique (EMD)
 3. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble (EEMD)
 4. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble Complet (CEEMDAN)
 5. Reconstruction du signal
 6. Erreur d'estimation
 7. Simulation et Résultats
 8. Conclusion
-

1. Introduction

Actuellement, les acquisitions des signaux ultrasonores sont réalisées de manière automatique. L'analyse de ces signaux est effectuée manuellement par un opérateur. Celui-ci sélectionne les signaux à analyser et recherche visuellement la présence de défauts. La possibilité d'acquérir une information permettant de caractériser les défauts en nature, en taille et en orientation a nécessité le développement de techniques plus évoluées qui sont regroupées sous le terme général de techniques de traitement du signal ultrasonore. L'application des outils de traitement de signaux prend donc une place grandissante dans de nombreux domaines techniques et scientifiques, et en particulier, dans celui du contrôle non destructif. Les opérations de localisation et dimensionnement effectuées manuellement par l'opérateur peuvent aujourd'hui être réalisées par des algorithmes et techniques de traitement de signaux ayant fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dix dernières années. [10]

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthode de Décomposition Modale Empirique (EMD) ainsi que deux de ses variantes l'EEMD et la CEEMDAN.

2. Décomposition Modale Empirique (EMD)

La décomposition modale empirique (EMD pour Empirical Mode Decomposition), introduite par N.E. Huang en 1998, est une méthode algorithmique de décomposition spectrale adaptative [11]. Elle décompose les signaux en différents **modes** ayant une signification physique.

L'EMD est définie par un processus appelé : **tamissage** (SP pour sifting Process) permettant de décomposer un signal en fonctions de base au lieu de l'analyser dans une base fixe comme avec Fourier. Ces fonctions de base sont appelées : modes empiriques ou fonctions intrinsèques (IMF pour Intrinsic Mode Function). Les IMFs ont pour seule caractéristique d'être de moyenne nulle dont les nombres d'extrema et de passages à zéro diffèrent au plus d'un (en d'autres termes, cela signifie qu'entre un minimum et un maximum successif, une IMF passe par zéro), et elles suivent une loi de modulation en amplitude et en fréquence (comportement oscillant) naturellement de type mono-composante [12].

2.1. Principe de l'EMD

L'EMD postule que tout signal réel $x(t)$ se décompose en une moyenne locale ou tendance locale d'oscillations lente (basses fréquences) $m(t)$ et une composante fortement oscillante (hautes fréquences) $IMF_1(t)$. Plus précisément, si on considère par exemple l'évolution du signal entre deux minima locaux successifs t_0 et t_1 , l'idée est de considérer que sur cet intervalle, le signal est la somme d'une composante oscillante $IMF_1(t)$ et d'une tendance lente $m(t)$ sur l'intervalle $[t_0, t_1]$ et apparentée à la valeur moyenne de $x(t)$ sur cet intervalle [13] :

$$x(t) = IMF_1(t) + m(t) \quad (2.1)$$

On peut ensuite extraire le mode oscillant $h_2(t)$ de la tendance locale $m(t)$ et itérer le procédé jusqu'à n'obtenir qu'un résidu non oscillant noté $r(t)$. La décomposition totale s'écrit alors :

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r(t), (N \in \mathbb{N}^*) \quad (2.2)$$

Le résidu $r(t)$ est plutôt moins oscillant donc de plus basse fréquence que $IMF_i(t)$, c'est-à-dire qu'il contient au plus 3 extrema.

La méthode est par construction, d'après (Eq.2.2), une décomposition **complète**, N , le nombre d'IMF, étant fini. En effet, si l'on additionne toutes les IMF ainsi que le résidu, alors on reconstruit linéairement le signal original sans perte ou déformation de l'information initiale (du moins en théorie) [14].

2.2. Propriétés fondamentales de l'EMD

• Aspect multi-résolution

L'EMD réalise une décomposition multi-échelles, ou multi-résolution, puisqu'elle explore successivement les échelles du signal de la plus fine, représentée par la première IMF, à la plus grossière, représentée par la dernière IMF ou le résidu.

• Non-linéarité

Dans l'algorithme de l'EMD, l'extraction des IMFs est non-linéaire mais leur recombinaison pour la reconstruction du signal est linéaire donc cette méthode est globalement non linéaire. On peut noter au plus trois sources de non-linéarité :

- La première et la plus importante est dans le fait de s'appuyer sur les extrema. En effet, le nombre et la position des extrema dans une somme de signaux sont en général différents de ceux des signaux pris individuellement. Cette source de non-linéarité est fondamentale dans l'EMD car les enveloppes sont définies à chaque échelle d'un signal à l'aide de ses extrema.
- Les deux autres sources de non-linéarité éventuelles sont l'interpolation et le critère d'arrêt du processus de tamisage qui, selon l'implantation, peuvent être non linéaires [13].

• L'orthogonalité

L'orthogonalité des IMFs assure l'unicité de la décomposition. Ainsi, l'analyse est réversible dans le sens où le signal initial peut être reconstruit simplement à partir de l'ensemble des IMFs. L'orthogonalité permet de réduire la représentation et décrit le signal dans un espace optimal au sens du minimum de redondance d'information. L'orthogonalité de la décomposition est étroitement liée à son aspect multi résolution dans la mesure où le produit scalaire de deux ondes de fréquences différentes est habituellement faible et que les IMFs sont construites de telle manière qu'à tout instant elles oscillent avec des périodes différentes. Dans ce sens, il est suggéré par les auteurs en [14] que la décomposition en oscillations rapides et oscillations lentes serait « **quasi-orthogonale** ».

2.3. L'algorithme de l'EMD

2.3.1. Processus de tamisage

Le processus de tamisage (SP) est l'opération qui consiste à soustraire un signal $x(t)$ de sa moyenne locale $m(t)$, plusieurs fois de suite jusqu'à obtenir une moyenne (quasi) nulle ou précisément jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt en rapport avec la définition d'une IMF soit satisfait. La composante oscillant le plus rapidement peut être obtenue à partir du signal en lui soustrayant la moyenne de ses enveloppes. Afin de vérifier la définition d'une IMF, il est proposé d'itérer l'opération de soustraction de la moyenne des enveloppes $m(t)$ jusqu'à ce que tous les maxima locaux soient strictement positifs et tous les minima locaux soient strictement négatifs. De plus, après un certain nombre d'itérations, on peut s'attendre à ce que

Pour expliquer les différentes étapes du pseudo-code et afin d'illustrer les capacités de l'EMD, on analyse la décomposition du signal $x(n)$ qui se compose de deux signaux gaussiens et d'une FM sinusoidale.

$$x(n) = x_1 + x_2 + x_3 \tag{2.3}$$

Avec :

$$\begin{cases} x_1 = 3 \cos\left(2\pi \frac{5}{16} (n - 1000)\right) e^{-\pi\left(\frac{n-500}{100}\right)^2} \\ x_2 = \cos\left(2\pi \frac{f_{max} + f_{min}}{2} (n - 1000) + \frac{f_{max} - f_{min}}{2} 1000 \left(\sin \frac{2\pi n}{1000} + \varphi - \sin \varphi\right)\right) \\ x_3 = \cos\left(2\pi \frac{7}{256} (n - 1000)\right) e^{-\pi\left(\frac{n-1000}{200}\right)^2} \end{cases} \tag{2.4}$$

Où: $1 \leq n \leq 1000$, $f_{max} = 3/32$, $f_{min} = 9/128$, $\varphi = -\arccos\left(\frac{3f_{min} + f_{max}}{f_{max} - f_{min}}\right)$.

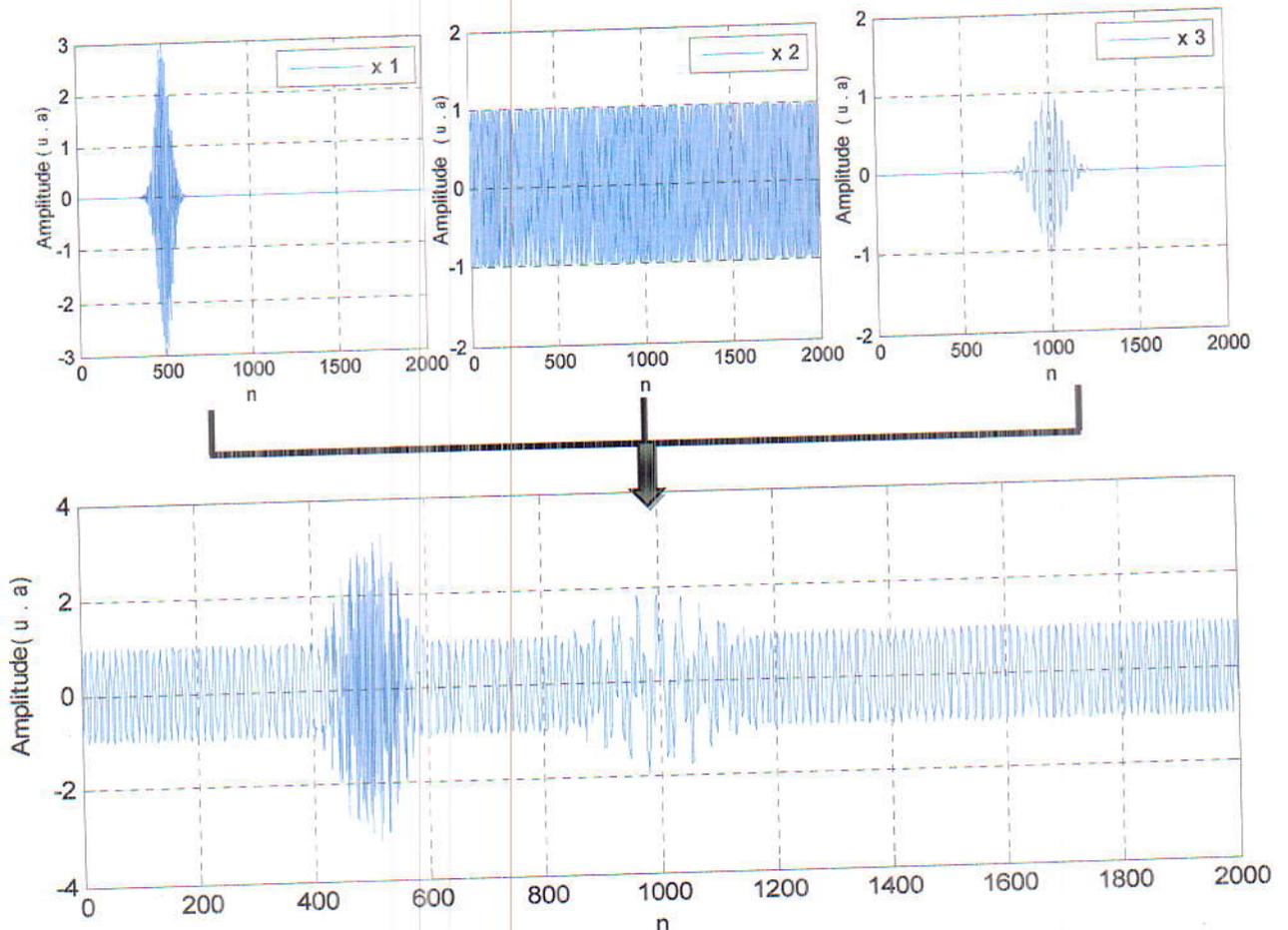


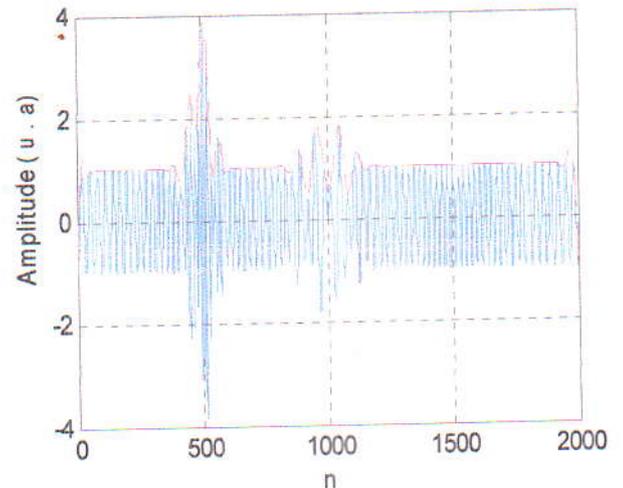
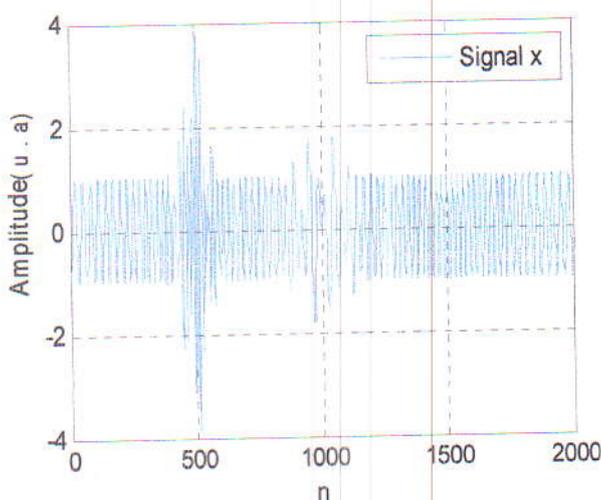
Figure 2.1 : La somme des trois signaux oscillants.



2.3.2. Extraction des IMFs

De manière générale, l'extraction des IMFs suit les étapes suivantes :

- Trouver les extrema locaux du signal (étape : 3b) ;
- Estimer les enveloppes supérieure et inférieure par interpolation respective des maxima et minima locaux (étape : 3c);
Estimer l'enveloppe moyenne locale à partir des enveloppes supérieure et inférieure (étape : 3d) ; (Figure 2.2)
- Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée (étape : 3e). Cela correspond alors à la première itération du tamisage. On calcule le critère d'arrêt (étape : 3f) et on vérifie alors que le signal remplit les critères d'une IMF (étape : 3g). Ici le critère décrit est celui proposé par Huang et al.
- Vérifier si le résidu présente un nombre suffisant d'extrema (supérieur à deux) et réitérer, sur le signal résultant, le processus d'extraction de l'IMF (étape : 03) ; sinon, le résidu est considéré comme étant le résidu final $r(t)$ de l'équation (Eq.2.2). Idéalement, le processus d'extraction des IMFs est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema. Cela signifie que le résidu est une fonction monotone qui correspond à la dérivée ou tendance du signal initial $x(t)$ [15].



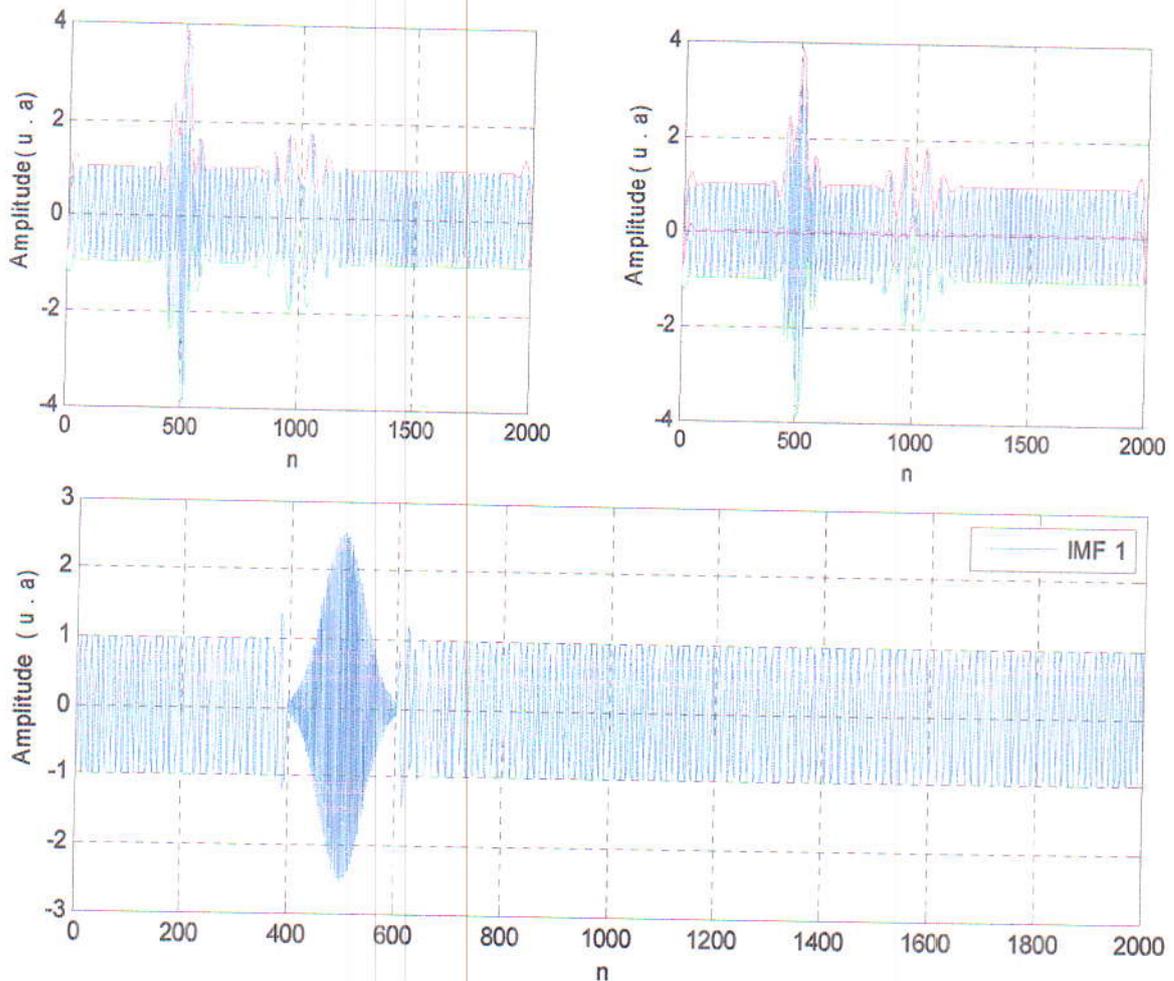


Figure 2.2: Principe de tamisage pour l'estimation de la 1^{ère} IMF du signal x .

2.3.3. Critère d'arrêt

Nous avons vu qu'une IMF est une fonction oscillante de moyenne locale nulle. En fait, pour l'EMD et l'application de la transformée de Hilbert, si la condition « les maxima sont positifs et les minima négatifs » est fondamentale, la condition de symétrie des enveloppes (de moyenne locale nulle) n'a pas besoin d'être respectée strictement.

Les modes que l'on souhaite obtenir ne vérifient pas strictement la condition de symétrie des enveloppes. Du point de vue algorithmique, cela revient à fixer un critère d'arrêt pour le procédé de tamisage [16].

Dans la suite, on notera $h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_k$ les IMFs de x . Pour tout k , on note h_k^i le résultat de la $i^{\text{ème}}$ itération du SP lors du calcul de h_k . Le critère proposé à l'origine consiste à mesurer l'écart entre h_k^{i-1} , au moyen de la valeur :

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|h_k^{i-1}(t) - h_k^i|^2}{(h_k^{i-1}(t))^2} \tag{2.5}$$

Lorsque h_k^i oscille bien autour de 0 et a un SD très faible, on est proche de la convergence donc on peut s'arrêter.

La Figure (2.3) illustre le résultat de la décomposition EMD sur le signal $x(t)$. La décomposition permet d'extraire correctement les trois contributions sinusoïdales ainsi que le résidu du signal x .

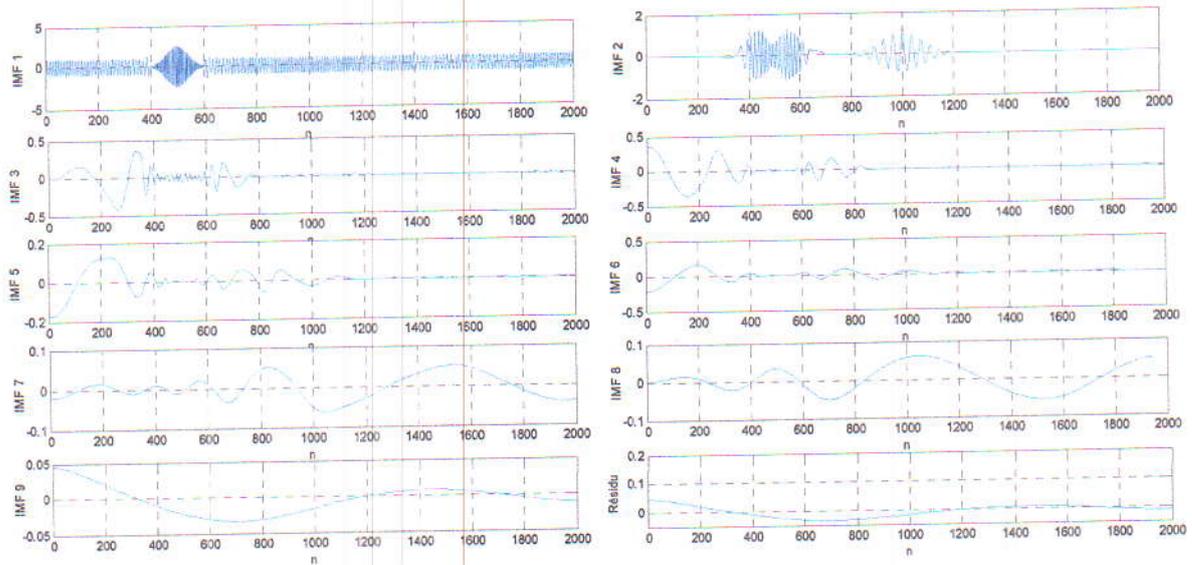


Figure 2.3: Décomposition EMD du signal x .

La Figure (2.4) représente les deux premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales superposées avec le signal original x .

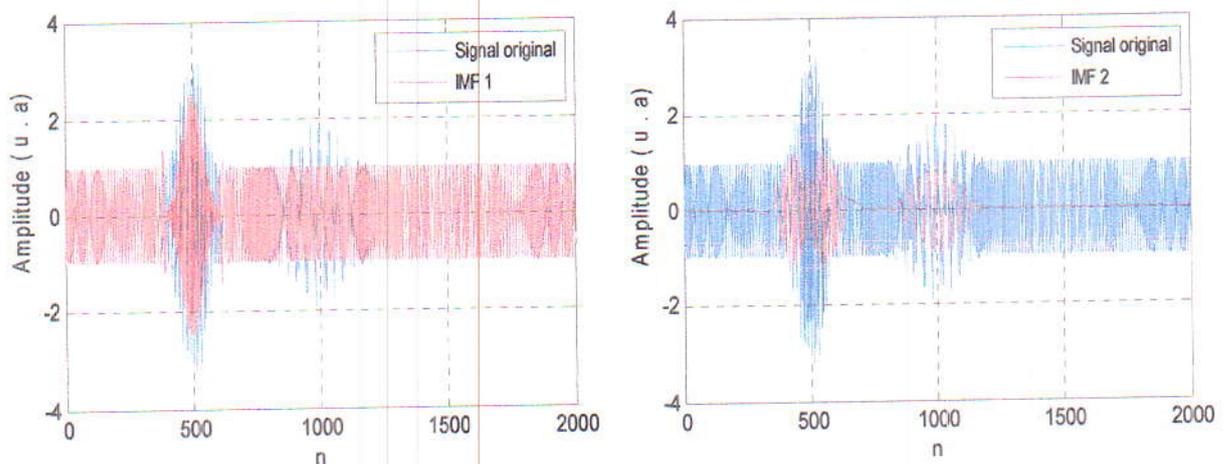


Figure 2.4: Les deux premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales.

2.3.4. Interprétation / Inconvénients de l'EMD

L'EMD décompose le signal x en 9 IMFs des plus hautes fréquences vers les plus basses fréquences plus un résidu (Figure 2.3). Les IMFs 1 et 2 contiennent les composantes de ce signal. Le mélange de modes est évident dans l'IMF1 ce qui présente l'inconvénient majeur de l'EMD. L'interprétation de ce mélange a été présentée dans les références [17] et [18]. Ceci consiste d'une part à l'apparition de plus d'une IMF de la même oscillation locale et d'autre part à la disparition des oscillations de faible amplitude causée par la non identification de leurs extrema et par conséquent l'IMF résultant se présente comme un mélange de plus d'une fréquence sur une durée d'analyse ce qui lui fait perdre sa signification physique.

L'IMF1 contient localement les oscillations les plus rapides par rapport aux autres IMFs (Figure 2.4). A partir du 3^{ème} mode, les composantes présentent de très faible énergie et des oscillations indésirables.

3. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble (EEMD)

Partant du problème de mixage de mode de l'EMD et pour améliorer les résultats de la méthode, des versions assistées par bruit ont été proposées pour atténuer ce phénomène, qui peut apparaître lorsque différents signaux sont analysés. Parmi eux on cite en particulier : L'EMD de l'ensemble (EEMD : Ensemble Empirical Mode Decomposition) qui sera présentée dans ce qui suit. Cette méthode a été introduite par Wu et Huang en 2009 dans le but d'éliminer les problèmes de mélanges de modes [18].

3.1. Algorithme

L'algorithme de la méthode EEMD est représenté sur la Figure (2.5).

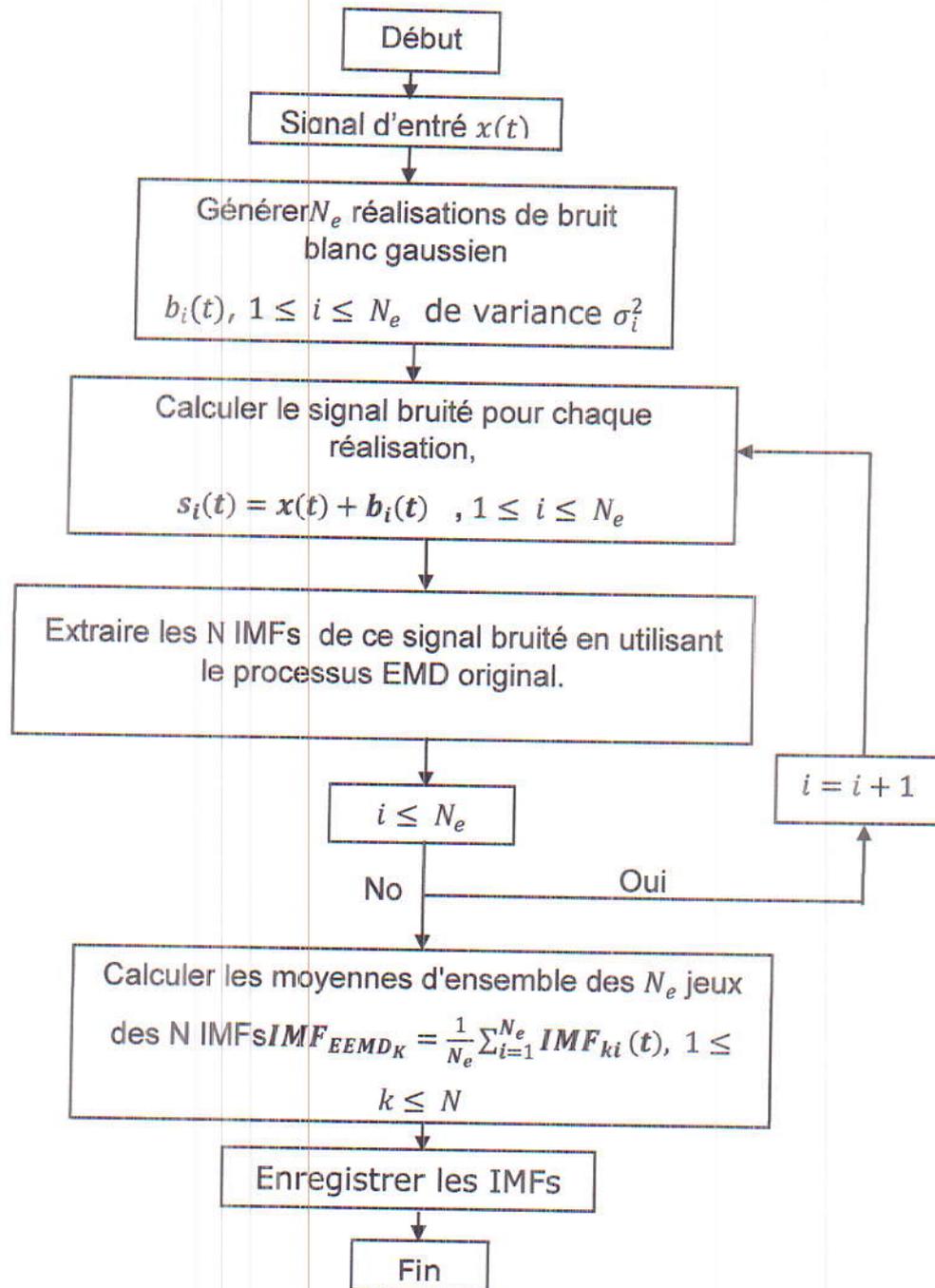


Figure 2.5: Organigramme de la méthode EEMD [18].

On applique l'EEMD sur le signal x pour extraire les différents modes avec une amplitude de bruit $\varepsilon_0=0.2$ et un nombre d'itérations $N_e = 1000$. La décomposition est illustrée sur la Figure (2.6).

La Figure (2.7) représente les trois premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales comparées avec le signal x .

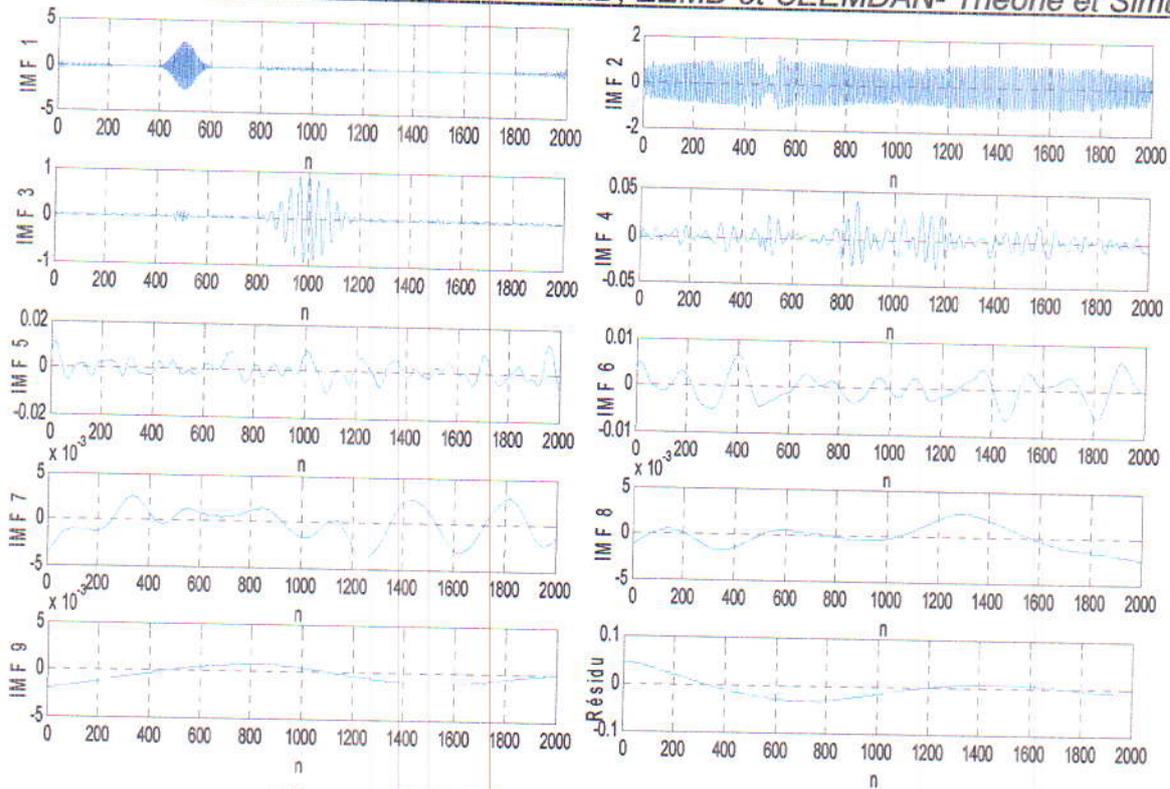


Figure 2.6: Décomposition EEMD du signal x .

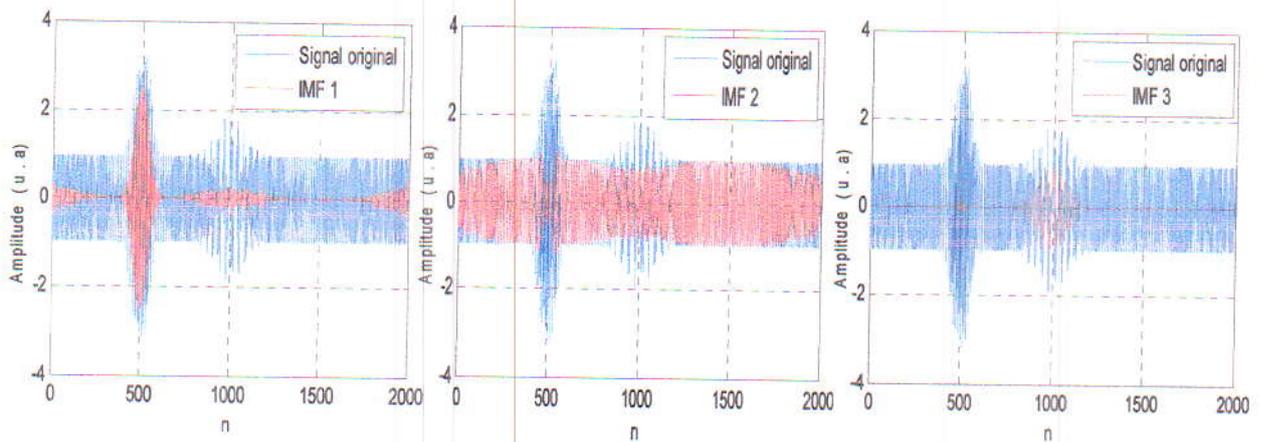


Figure 2.7: Les trois premières IMFs contenant les trois contributions sinusoïdales.

3.2. Interprétation / Inconvénients

Un nombre total de 9 modes a été obtenu par la décomposition EEMD (Figure 2.6). D'une part les composantes du signal sont bien récupérées et décomposées indépendamment l'une de l'autre (IMF1, 2 et 3) et particulièrement la composante rapide (Figure 2.7), évitant ainsi le mixage de mode rencontré avec l'EMD. D'autre part la décomposition EEMD donne des modes redondants qui sont apparus car différentes réalisations du signal plus bruit ont produit un nombre différent de

modes. A partir du 4^{ème} mode, les composantes possèdent très peu d'énergie et ne contiennent aucune information pertinente du signal.

4. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble Complet (CEEMDAN)

Une autre variante de l'EMD serait l'EMD de l'ensemble complet avec bruit adaptatif (CEEMDAN : Complete EEMD with Adaptive Noise). Elle a été proposée dans le but d'améliorer l'algorithme EEMD. En effet, il a été prouvé dans [19] qu'elle décompose un signal avec un nombre d'essais N_e inférieur à celui obtenu par la méthode EEMD.

4.1. Principe et Algorithme

Dans la méthode EEMD, chaque réalisation $S_i(t)$ bruitée du signal original (Eq.2.3) est décomposée indépendamment des autres réalisations et ainsi pour chaque réalisation un résidu est obtenu :

$$r_k^i(t) = r_{k-1}^i(t) - IMF_k^i(t) \quad (2.6)$$

Dans la méthode CEEMDAN [19], les modes de décomposition sont notés $\overline{IMF}_k(t)$ et un premier résidu est calculé :

$$r_1(t) = x(t) - \overline{IMF}_1(t) \quad (2.7)$$

$\overline{IMF}_1(t)$ est obtenue de la même façon que dans l'EEMD. Ainsi, le premier mode EMD est calculé sur un nombre d'essais de $r_1(t)$ et les différentes réalisations d'un bruit blanc gaussien donnant accès à $\overline{IMF}_2(t)$ par moyennage. Le prochain résidu est défini comme :

$$r_2(t) = r_1(t) - \overline{IMF}_2(t) \quad (2.8)$$

Cette procédure s'applique sur le reste des modes jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. La méthode CEEMDAN est décrite par l'algorithme résumé dans la Figure 2.8.

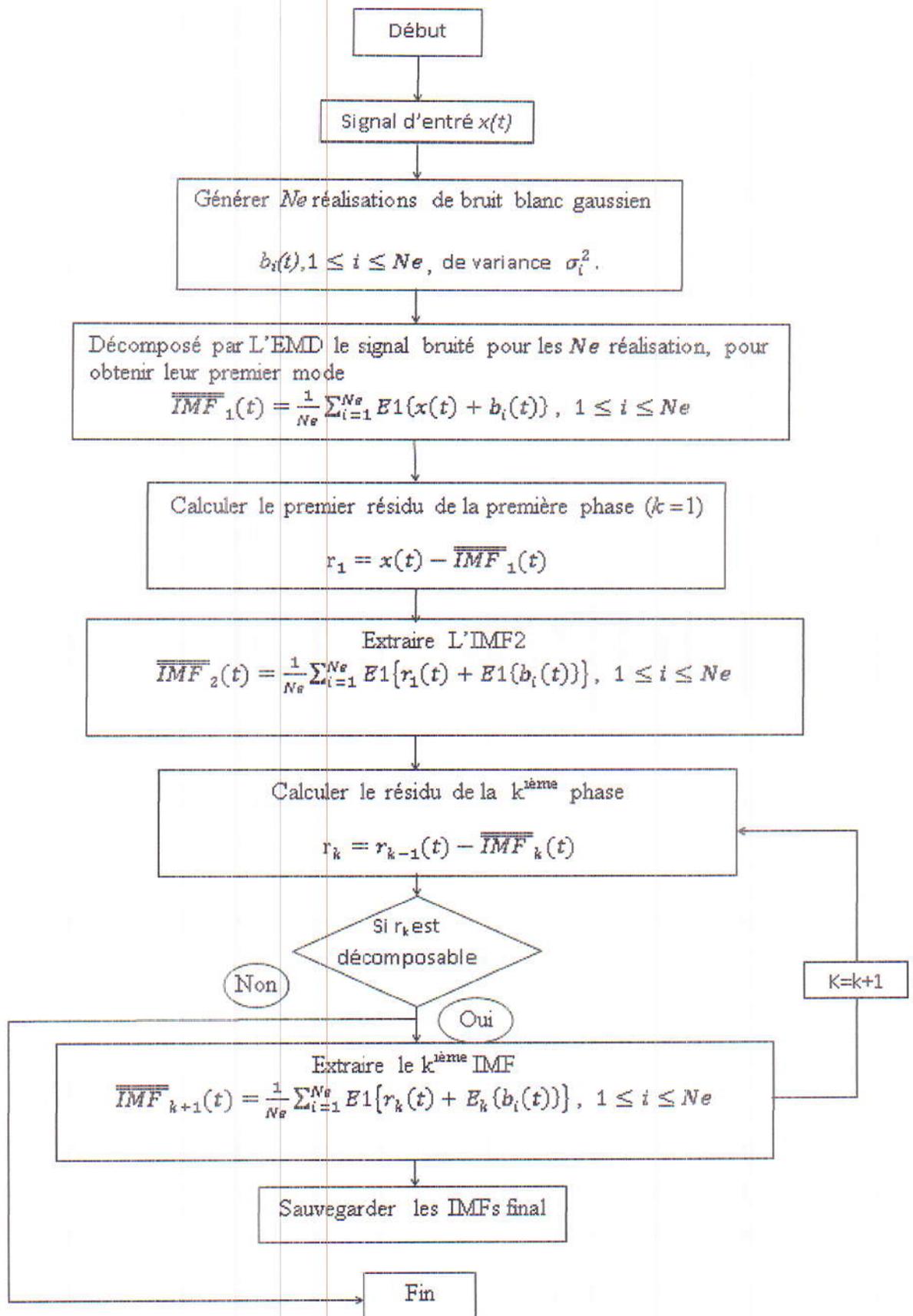


Figure 2.8: Organigramme de la méthode CEEMDAN.

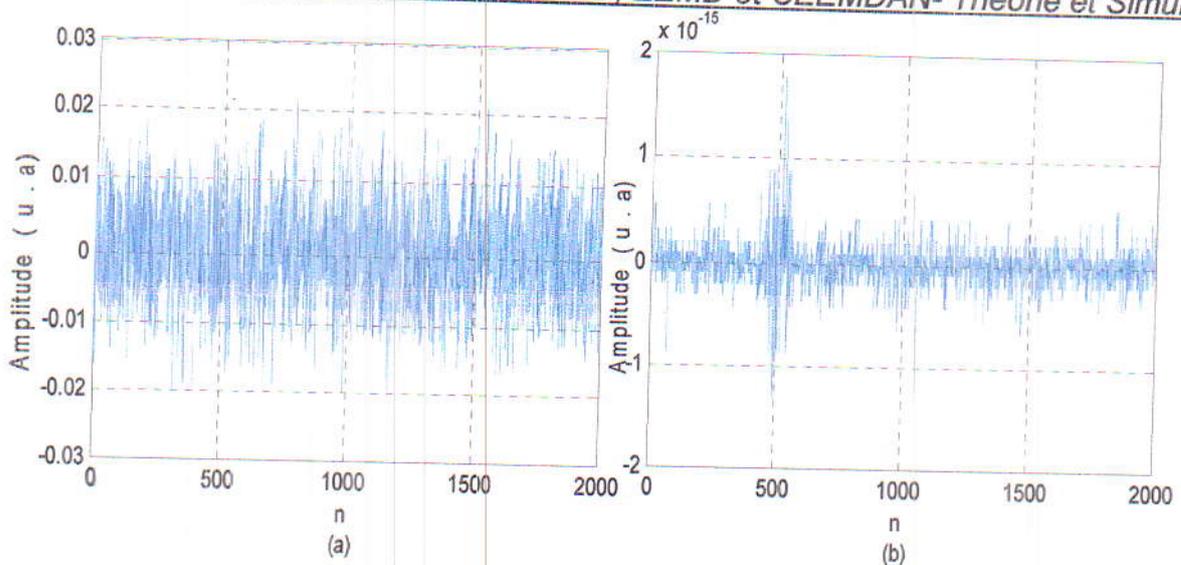


Figure 2.12: Erreur de reconstruction : (a) EEMD & (b) CEEMDAN.

6. Simulation et Résultats

L'analyse d'un signal ultrasonore nécessite la connaissance des informations aussi bien temporelles que fréquentielles. C'est pour cela qu'on s'intéresse à la détection d'échos ultrasonores multiples qui constitue une étape très importante pour la caractérisation d'un matériau et la détection et localisation d'un défaut.

La suite de ce chapitre est consacrée à l'analyse d'un signal ultrasonore simulé par les trois méthodes de décomposition dont l'étude théorique a été présentée dans la première partie de ce chapitre. Une étude comparative entre ces méthodes permettrait de choisir laquelle qui conviendrait à ce type de signaux. On note que ces derniers sont similaires à ceux rencontrés dans le CND par ultrasons (réels).

6.1. Modèle d'un signal ultrasonore

Les motifs des échos ultrasons rétrodiffusés représentent des informations précieuses concernant la forme, la taille et l'orientation géométriques des réflecteurs ainsi que la microstructure du chemin de propagation. La connaissance du modèle d'écho ultrasonique est essentielle pour déterminer les propriétés de ces échos. Dans cette partie, on va utiliser des échos ultrasoniques rétrodiffusés modélisés en termes d'échos gaussiens superposés [20]. Chaque écho gaussien dans le modèle est une fonction non linéaire d'un ensemble de cinq paramètres.

Ces paramètres sont utilisés pour étudier les performances de l'EMD et ses variantes. Dans les tests pulse-echo par ultrasons, l'écho rétrodiffusé d'un réflecteur peut être modélisé comme suit :

$$s(t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \varphi) \quad (2.11)$$

Les paramètres du signal sont α : facteur de la bande passante ; τ : temps d'arrivée ; f_c : fréquence centrale ; φ : phase et β : amplitude. Ces paramètres ont des significations intuitives pour un réflecteur de surface idéal dans un chemin de propagation homogène :

Le temps d'arrivée τ est lié à l'emplacement du réflecteur.

Le facteur de bande passante α détermine la bande passante de l'écho ou la durée de temps de l'écho dans le domaine temporel.

La fréquence centrale f_c est régie par la fréquence centrale du transducteur et les caractéristiques de fréquence du chemin de propagation.

L'écho a une amplitude spécifique β et phase φ tenant compte de l'impédance, de la taille et de l'orientation du réflecteur.

6.2. Analyse du signal simulé

Dans le but d'étudier les performances des méthodes de décomposition décrites ci-dessus, on considère un exemple illustratif constitué de quatre impulsions gaussiennes du modèle (Eq.2.11). Les paramètres sont choisis de façon à avoir des composantes qui se chevauchent afin d'analyser la capacité de ces méthodes pour la séparation des signaux trop proches ou superposés. Ceci peut être le cas des matériaux à très faible épaisseur ou en présence de défauts. Les amplitudes, fréquences et temps d'arrivés sont donnés dans le tableau 2.2.

Echos	1	2	3	4
Temps d'arrivée	9×10^{-6}	6.5×10^{-5}	7×10^{-5}	8×10^{-5}
Amplitude	3	2.2	1.7	1
Fréquence	2Mhz	1Mhz	0.5Mhz	0.25Mhz

Tableau 2.2 : Paramètres du signal simulé.

La Figure 2.13 illustre la représentation temporelle du signal simulé et sa représentation spectrale.

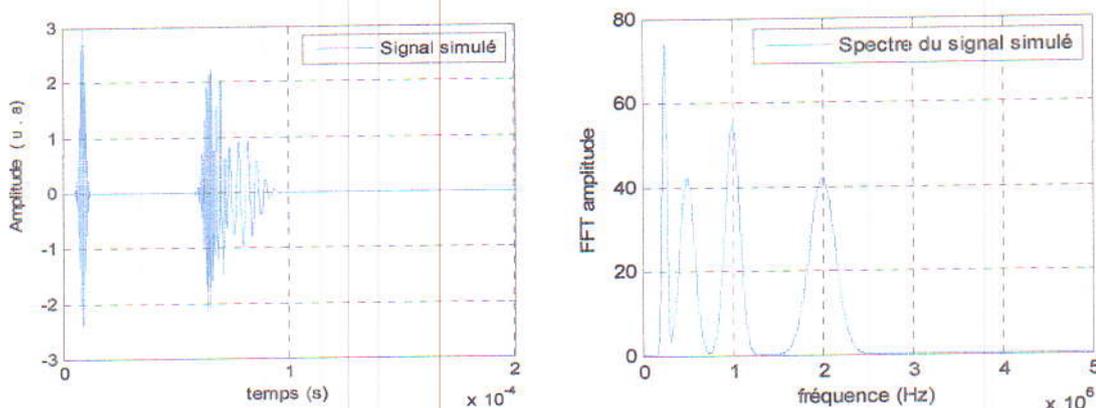


Figure 2.13 : Signal simulé et sa représentation spectrale.

6.3. Application de l'EMD sur le signal simulé

L'application de l'EMD permet l'extraction des IMFs du signal simulé qui sont représentées sur la Figure 2.14. Le spectre fréquentiel pour chaque IMF est ensuite calculé et représenté, sur la Figure 2.15, avec le spectre du signal simulé dans le but de vérifier l'efficacité de la méthode. On remarque que l'IMF1 contient les quatre échos ensemble. Ce qui n'est pas acceptable vu que l'objectif est de séparer les échos rapprochés. L'EMD est donc incapable de séparer les échos superposés.

Pour remédier à ce problème, on a ajouté un bruit blanc gaussien dont le SNR est de 10dB (Figure 2.16). Les représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho

correspondant ainsi que son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité sont illustrées sur la Figure 2.17. On constate que les échos sont bien détectés et séparés à l'exception de l'IMF1 qui contient deux échos à la fois.

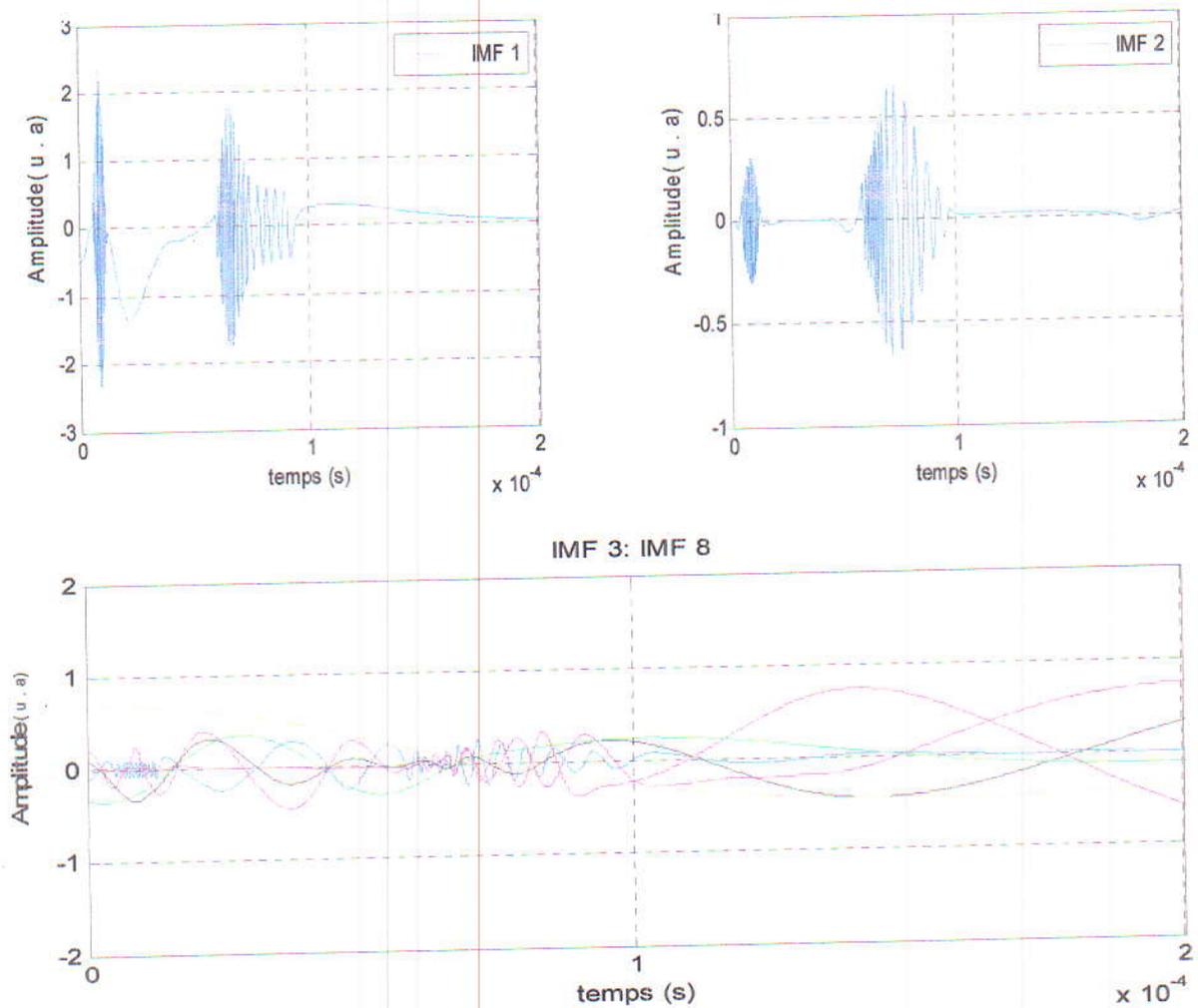


Figure 2.14 : Les IMFs du signal simulé.

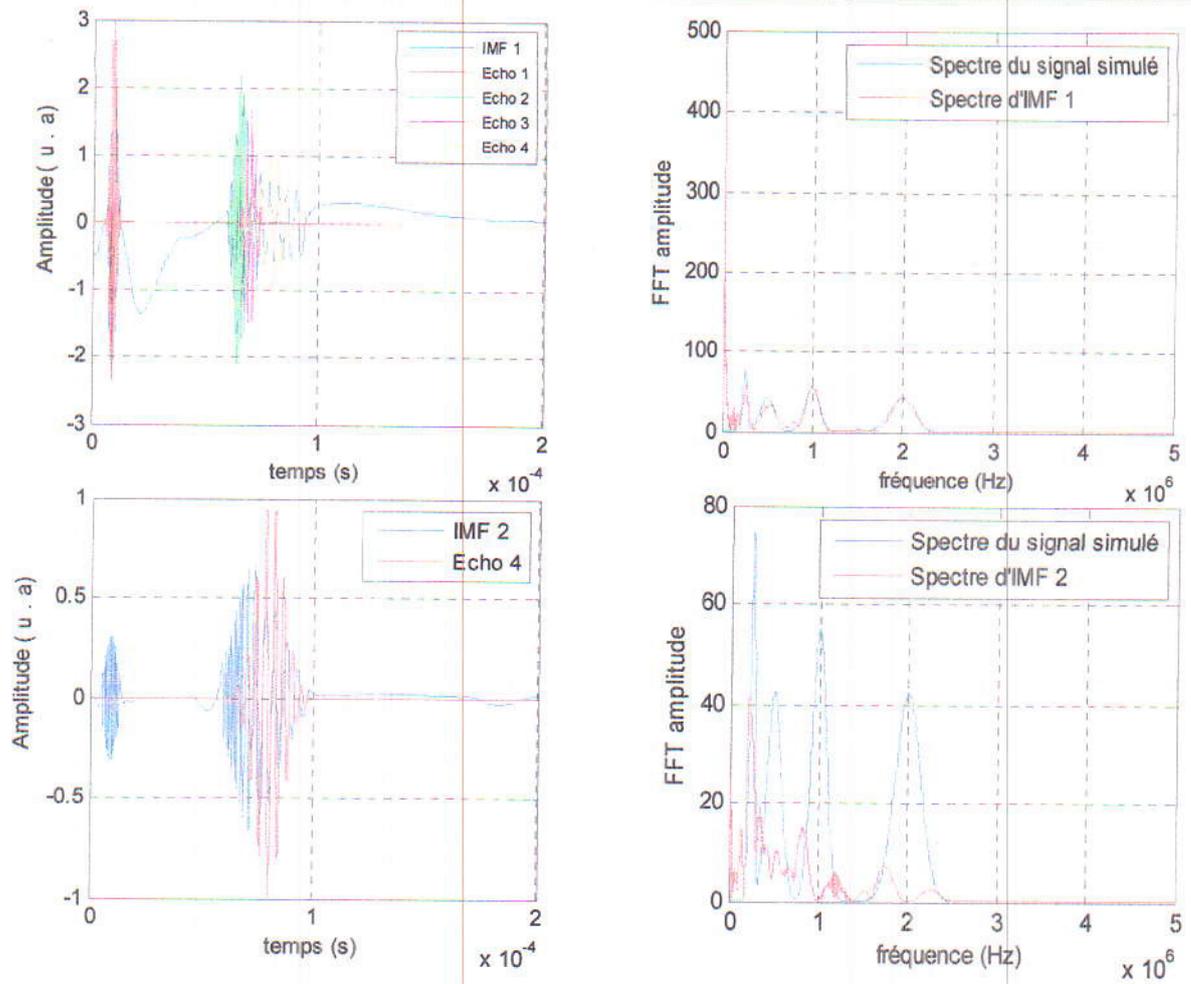


Figure 2.15 : Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite.

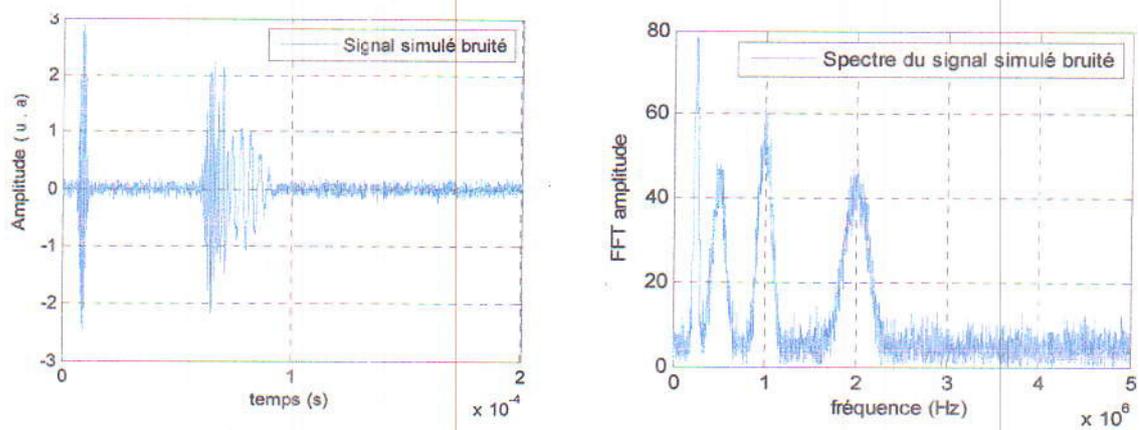


Figure 2.16 : Signal simulé bruité et sa représentation spectrale.

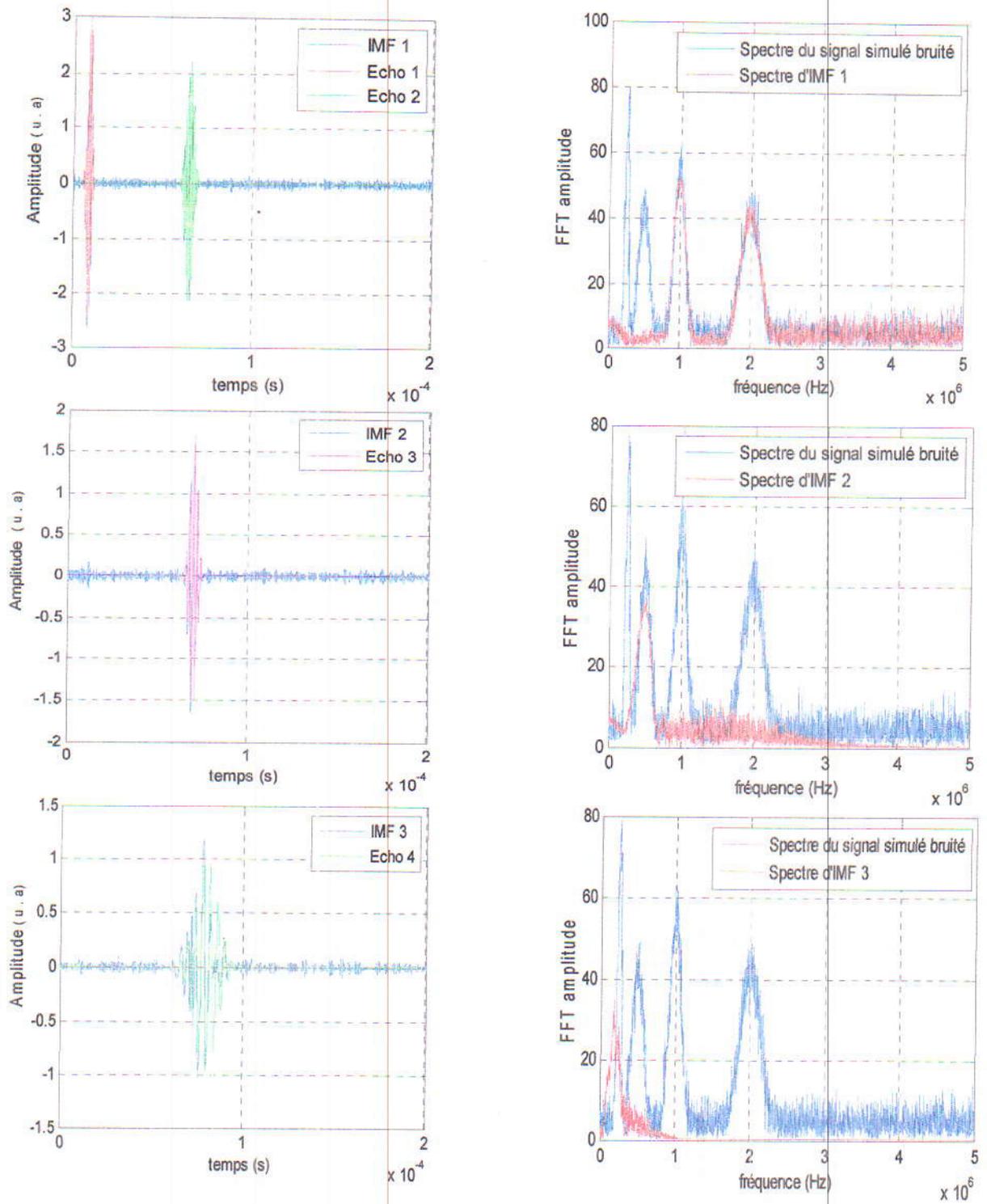


Figure 2.17 : Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité à droite.

- **Conclusion**

En comparant les résultats obtenus et illustrés par les Figures (2.15) et (2.17), on constate que l'ajout du bruit blanc gaussien (SNR=10dB) a amélioré la décomposition. Cependant, elle souffre toujours du mélange de modes qui apparaît dans l'IMF1 pour les échos de fréquences éloignées (2MHz et 1MHz).

Pour pallier à cet inconvénient, on va analyser par la suite le même signal simulé avec les deux variantes assistées par le bruit l'EEMD et la CEEMDAN.

6.4. Application de l'EEMD sur le signal simulé

On applique l'EEMD sur le signal simulé plus un bruit d'amplitude $\varepsilon_0=0.2$ et un nombre d'itérations $N_e = 1000$. Les différents modes sont représentés sur la Figure 2.18. Les représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant ainsi que son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité sont illustrées par la Figure 2.19. On peut faire les mêmes constatations lors de l'application de l'EMD sur le signal bruité. Ceci est intuitif car l'application de l'EMD sur un signal non bruité ne permet pas d'avoir une décomposition acceptable. Cette méthode a montré son efficacité dans plusieurs domaines mais s'avère incomplète pour les applications du CND.

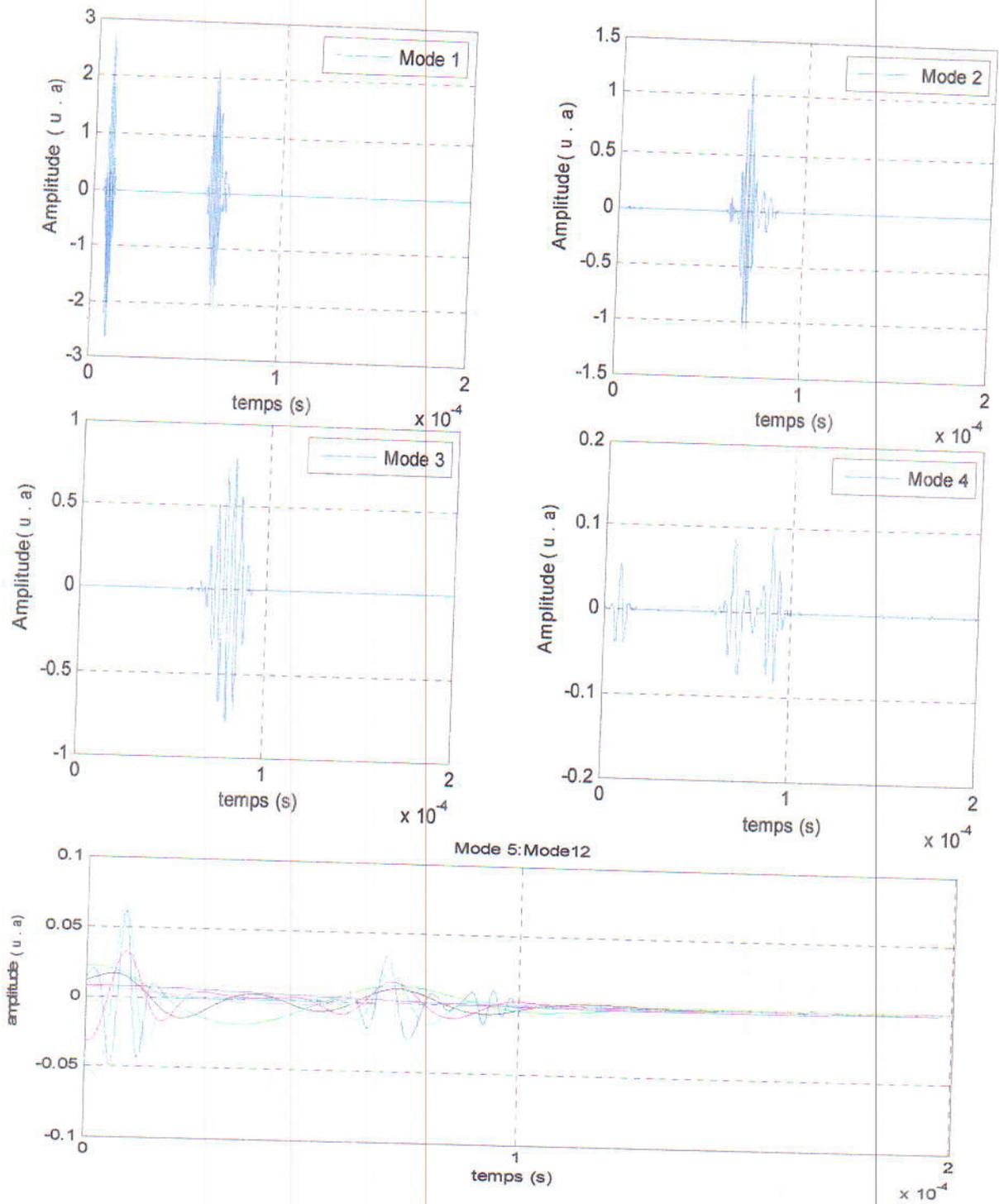


Figure 2.18 : Les modes du signal simulé.

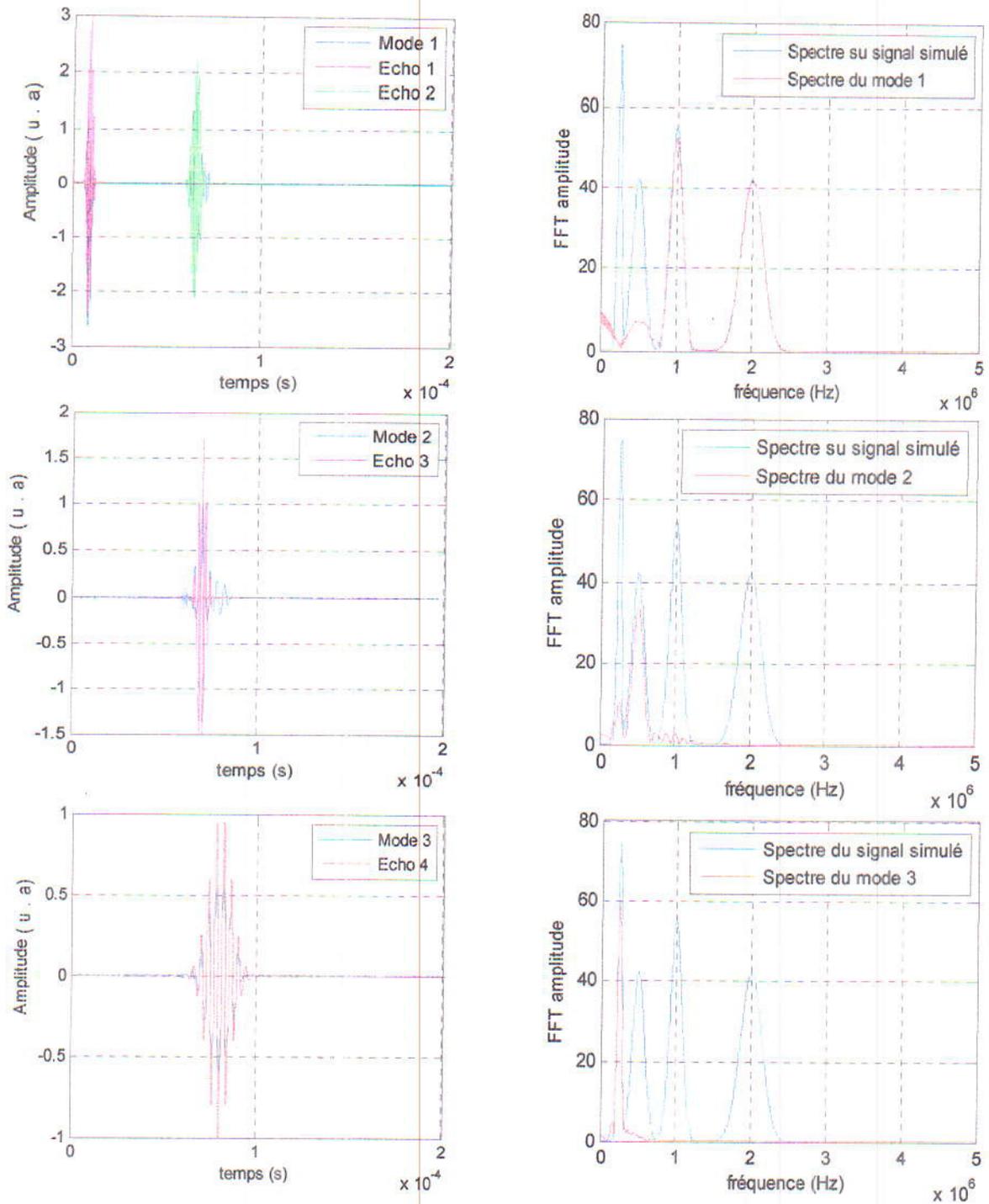


Figure 2.19 : Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite.

- **Conclusion**

Les composantes du signal sont récupérées et décomposées sauf les deux échos 1 et 2 qui sont présents dans le mode 1, réduisant une grande partie du problème de mélange de modes. Ceci permet de conclure que L'EEMD est « relativement » plus performante que l'EMD.

Le bruit blanc Gaussien ajouté a permis l'amélioration des performances de cette méthode.

6.5. Application de la CEEMDAN sur le signal simulé

On applique la CEEMDAN sur le signal simulé permettant une amélioration de l'algorithme EEMD afin d'extraire les différents modes avec une amplitude de bruit $\varepsilon_0=0.2$ et un nombre d'itérations $N_e=500$. Les différents modes et les représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant ainsi que son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité sont illustrées par les Figures (2.20) et (2.21) respectivement.

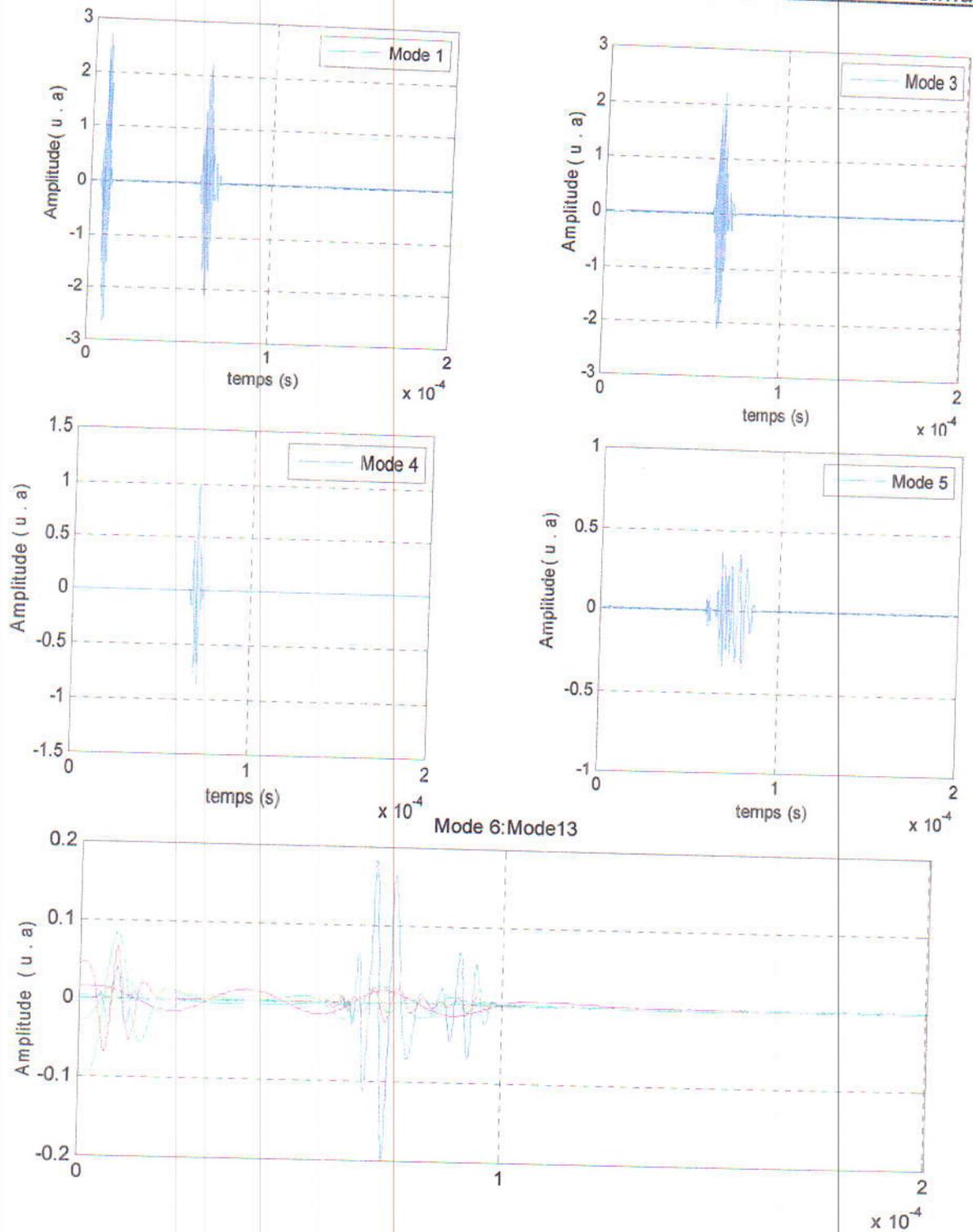


Figure 2.20: Les modes du signal simulé.

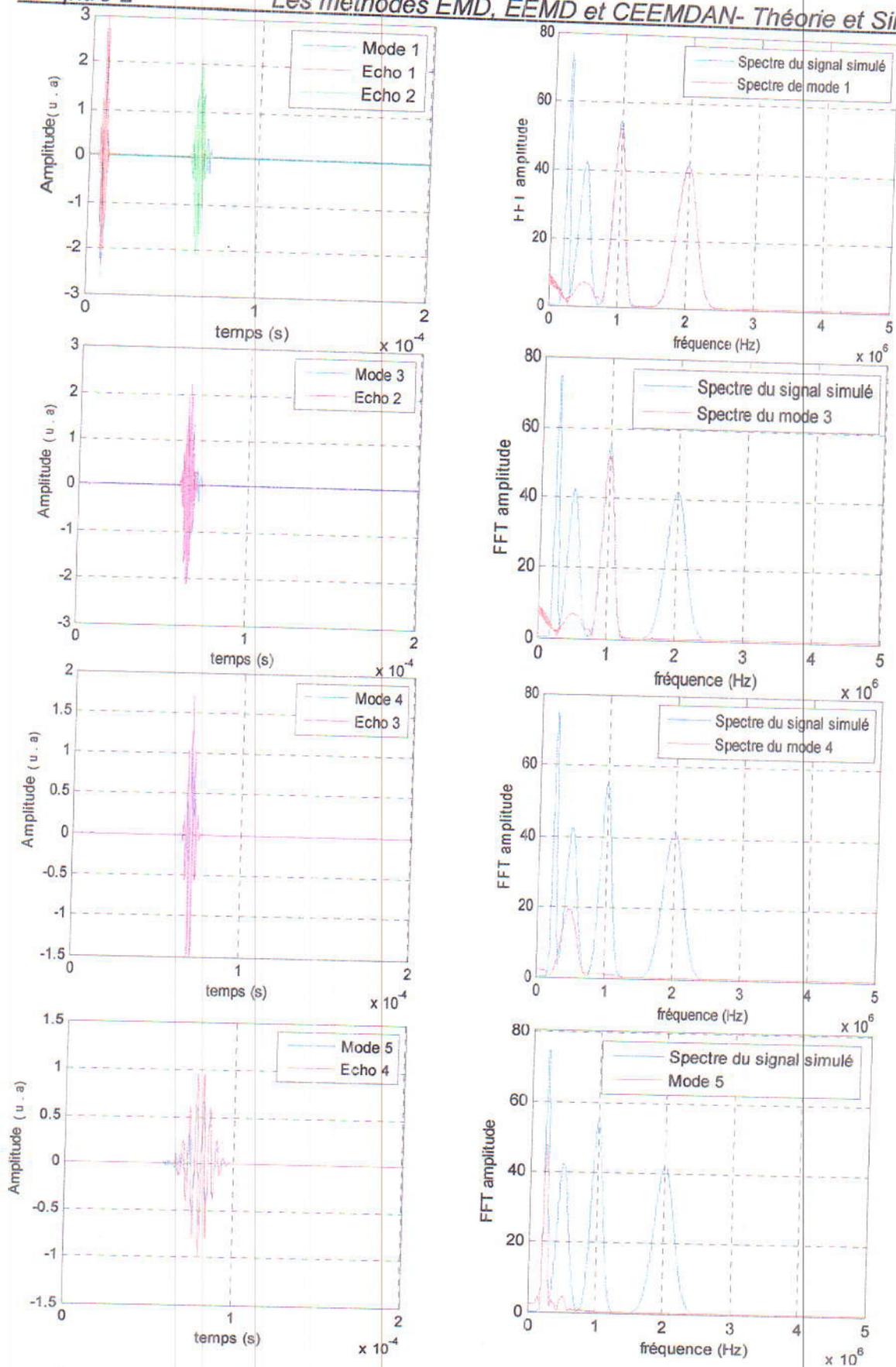


Figure 2.21 : Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à *droite* et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à *gauche*.

- **Interprétation**

Les résultats de la CEEMDAN sont améliorés par rapport à ceux de l'EEMD. En effet, le bruit a été éliminé et le signal est efficacement décomposé malgré l'apparition des échos 1 et 2 dans le 1^{er} mode.

La CEEMDAN sépare les échos 2, 3 et 4 dans les modes 3,4 et 5 respectivement.

6.6. Etude comparative

- **Erreur de reconstruction**

On calcule l'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Squared Error) pour les trois méthodes afin de savoir laquelle des trois est fiable lors de la reconstruction du signal. Cette erreur est calculée comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ri})^2} \quad (2.12)$$

N est le nombre d'échantillons du signal simulé, x_r est le signal estimé, x est le signal original.

Les valeurs moyennes de la RMSE des trois méthodes sont présentées dans le tableau (2.3).

La Figure (2.22) présente les variations de l'erreur de reconstruction pour les trois méthodes de décomposition.

On constate que la RMSE est négligeable pour l'EMD et la CEEMDAN alors qu'elle est importante pour l'EEMD. Ce qui nous permet de conclure que la reconstruction du signal est parfaite par l'EMD et la CEEMDAN.

Méthode	EMD	EEMD	CEEMDAN
RMSE	3.7657e-017	1.7321e-03	4.9005e-017

Tableau 2.3 : Erreur quadratique de reconstruction pour les trois méthodes.

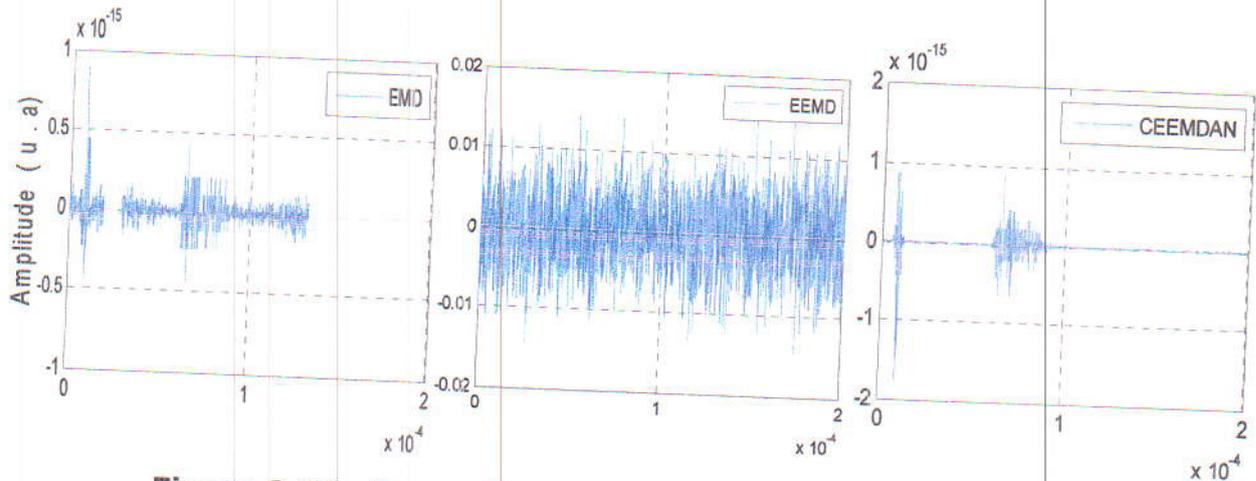


Figure 2.22 : Erreur de reconstruction pour les trois méthodes.

- **Influence des paramètres sur l'erreur de reconstruction**

Pour explorer le comportement des paramètres du signal, une simulation a été effectuée pour examiner le changement de l'erreur de reconstruction à mesure que chaque paramètre est modifié pour un seul écho [21] (Echo 3). Dans le cas de l'écart de paramètre variant de -10% à 10% de la valeur actuelle, la Figure (2.23) montre l'évolution de l'erreur de reconstruction avec l'altération de chaque paramètre séparément. On constate d'une part que le temps d'arrivée τ domine les effets sur l'erreur de reconstruction par rapport aux autres paramètres. Sachant que τ est lié à l'emplacement du réflecteur, par conséquent, il est le paramètre le plus critique à choisir, suivi de la fréquence centrale f_c , puis l'amplitude β , ensuite la phase φ et enfin le facteur de bande passante α .

D'autre part les résultats obtenus confirment bien ce que nous avons trouvé dans la partie précédente : la CEEMDAN permet une reconstruction parfaite du signal simulé.

calcul des vitesses de propagation. Ce qui justifie encore son efficacité pour CND par ultrasons.

La méthode	EMD (IMF2)	EEMD (IMF5)	CEEMDAN (IMF3)
La vitesse (m/s)	6478.94	6166.67	6004.75

Tableau 3.2 : calcul de la vitesse de propagation dans l'acier pour les trois méthodes

4. Interprétation des résultats

L'application des trois méthodes sur les deux échantillons a permis d'avoir des résultats similaires à ceux obtenus avec les signaux simulés du chapitre 2. Les mêmes constatations sont faites en ce qui concerne la signification des IMFs et leur apparition. En effet, si on prend les IMFs résultants de l'EMD du signal provenant de l'échantillon d'aluminium, on remarque l'appariation de tous les échos du signal reçu dans l'IMF 1(mélange de modes) (Figure 3.5) et dans l'IMF 2 pour l'échantillon d'acier (Figure 3.14). Ce qui montre la non efficacité de l'EMD pour la séparation des échos réels.

L'EEMD réduit le mixage de mode par rapport à l'EMD mais il reste toujours le problème des modes redondants à cause du bruit ajouté. La CEEMDAN montre clairement l'apparition des trois échos du signal reçu dans l'IMF2 et l'IMF3. Elle supprime aussi les modes redondants apparus dans l'EEMD avec un nombre moindre d'itérations (Figure 3.8 et 3.17). Par conséquent, on peut dire que la CEEMDAN permet d'obtenir moins d'IMFs avec plus d'informations significatives.

L'EMD, l'EEMD et beaucoup plus la CEEMDAN permet de visualiser les échos des deux faces, avant et arrière de la pièce à contrôler, et surveille l'apparition d'un autre écho qui peut représenter un défaut (échantillon d'acier). Ce qui donne un avantage à l'EMD et ses variantes c'est que l'opérateur peut éliminer tous les échos et ne garde que la plage susceptible de contenir l'écho cible ou désiré pour une bonne détection et de localisation des échos ultrasonores.

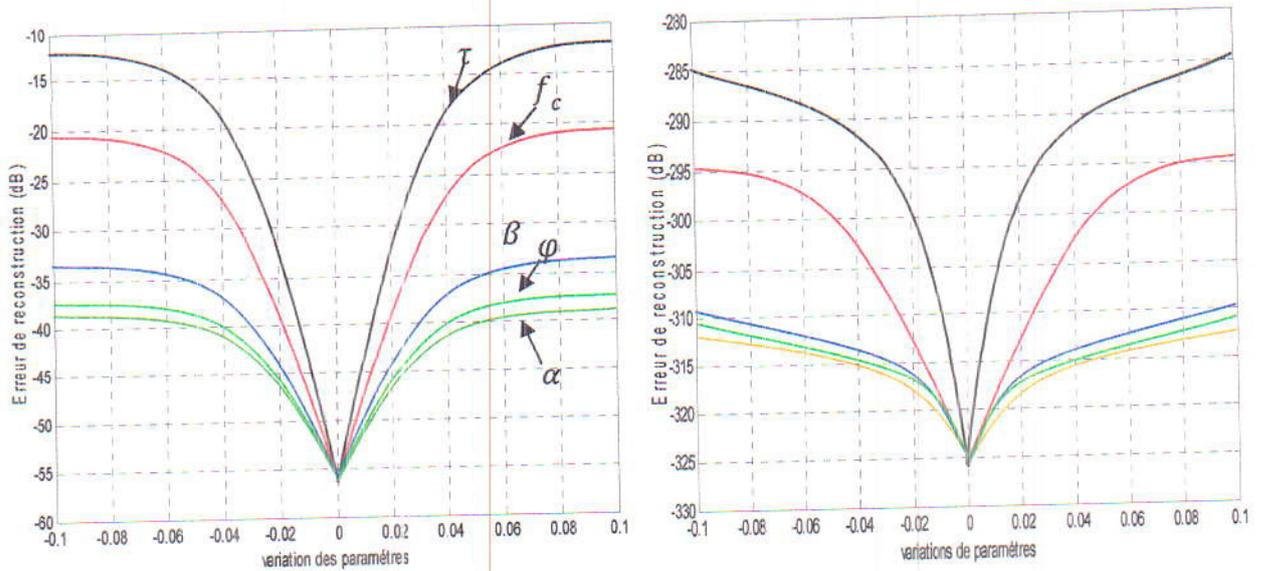


Figure 2.23 : Influence des paramètres sur l'erreur de reconstruction :
L'EEMD à gauche & la CEEMDAN à droite

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de Décomposition Modale Empirique (EMD), qui est une méthode de nature adaptative et algorithmique ayant pour but de traiter des signaux non-stationnaires issus de processus non linéaires. L'EMD décompose les signaux multi-composantes en un nombre fini d'oscillations (IMFs) qui sont des modes centrés AM-FM obtenus par un processus dit « tamisage » afin d'extraire des données utiles.

L'application de l'EMD sur des signaux similaires à ceux rencontrés dans le domaine du CND par ultrasons a montré que cette méthode souffre du mélange de modes en plus de l'apparition de modes redondants.

Partant des limitations de l'EMD, nouvelles variantes ont été proposées dans la littérature. Nous avons considéré l'EEMD et la CEEMDAN qui ont permis l'annulation du mélange de modes. En outre, la CEEMDAN permet la réduction de l'erreur commise lors de la reconstruction du signal original.

Chapitre 3

Analyse des Résultats Expérimentaux

-
1. Introduction
 2. Expérience 01
 3. Expérience 02
 4. Interprétation des résultats
 5. Conclusion
-

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a appliqué la méthode de décomposition modale empirique (EMD) et ses deux variantes EEMD et CEEMDAN sur des signaux simulés. Au niveau de ce chapitre, on va étudier les performances des méthodes susmentionnées sur deux signaux ultrasonores réels. Le premier recueilli à partir d'une expérimentation utilisant la technique pulse-écho par immersion dans la direction longitudinale, pour un échantillon d'aluminium. Le deuxième est obtenu à partir d'une expérimentation utilisant la technique pulse-écho par contact dans la direction longitudinale, pour un échantillon d'acier.

Les deux expériences sont réalisées au laboratoire NDT de l'Université de Jijel dans le but de caractériser les matériaux d'une part ; et d'autre part, détecter et localiser d'éventuels défauts.

2. Expérience 01

2.1. Description de l'expérience

Cette expérience est basée sur la technique pulse-écho par immersion (Figure 3.1), en s'appuyant sur l'application de la réflexion et de la réfraction des ondes entre deux milieux liquide/solide séparés par une interface. On utilise un échantillon d'aluminium (2017A) réalisé sous forme d'un cube de dimensions (6x6) Cm. Cette expérience ne nécessite qu'un seul transducteur pour émettre le signal ultrasonore et recevoir les échos des interfaces.

Durant l'expérience, l'onde ultrasonore incidente du transducteur en immersion est normalement destinée à épiétrer sur les deux côtés de l'échantillon utilisé. En effet, le transducteur émet une onde ultrasonore de façon qu'elle tombe selon une incidence normale sur la face de l'échantillon pour éliminer l'effet de conversion de modes, de sorte que les échos reçus soient des ondes longitudinales. D'où l'échantillon est placé à 4 cm du transducteur. Dans le signal réfléchi par l'échantillon d'aluminium, trois échos apparaissent respectivement : l'écho d'excitation (E1), l'écho de face (E2) et l'écho de fond (E3).

2.2. Description du système de mesure

Le système de mesure est représenté sur la Figure 3.1. Il est constitué essentiellement d'une cuve comportant le support porte-échantillon. Un transducteur à immersion de 1 Mhz qui représente la source génératrice du faisceau d'ondes ultrasonores. Il permet l'émission des impulsions nécessaires pour attaquer l'échantillon soumis au test, comme il joue le rôle de récepteur d'échos à leur retour après avoir traversés le liquide et le matériau. Les impulsions émises (reçues) par le transducteur sont générées par un émetteur/récepteur ultrasonique (Panametrics 5077PR, 606V) relié avec un oscilloscope numérique (Tektronics TDS 1002). Ce dernier est relié à un ordinateur menu d'un logiciel d'acquisition de données (WaveStar).

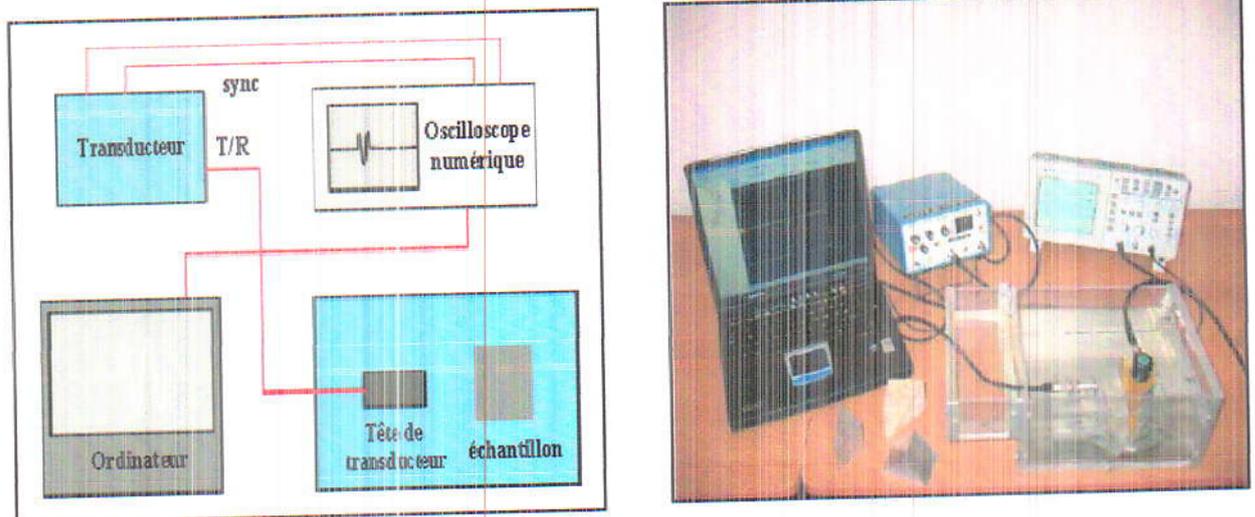


Figure 3.1 : Système de mesure : Schéma synoptique à gauche & vue générale de l'appareil de mesure à droite.

Le signal envoyé par le transducteur ultrasonore et l'écho reçu de l'échantillon sont représentés dans la Figure 3.2.

La Figure 3.3 illustre la superposition du signal émis et de l'écho reçu.

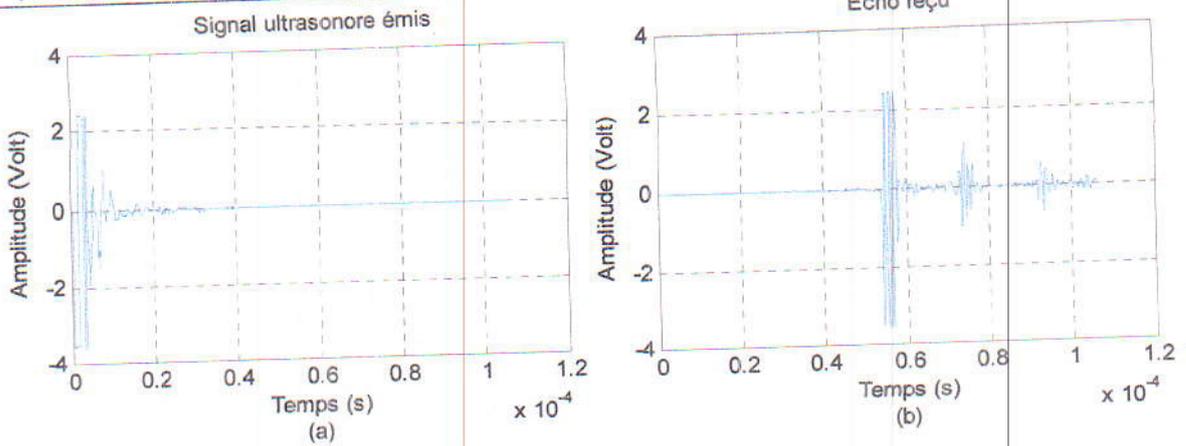


Figure 3.2 : (a) Signal émis (b) Echo reçu

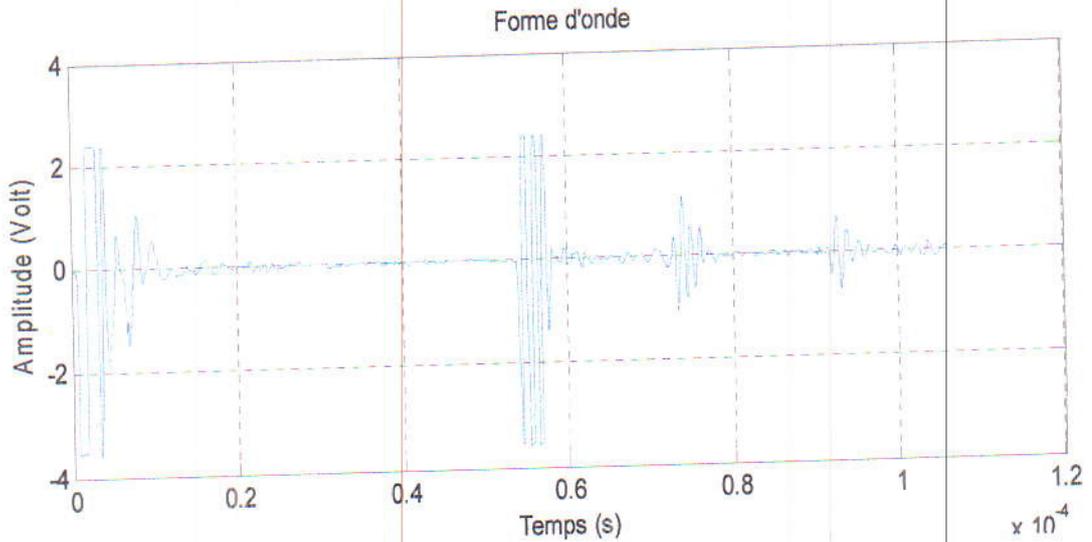


Figure 3.3 : Signal émis superposé avec l'écho reçu.

2.3. Caractérisation du matériau

2.3.1. Détermination de l'épaisseur de l'échantillon

Dans la Figure 3.3, la première onde représente le signal émis par le transducteur.

On sait que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'eau est égale à 1480 m/s et on a le deuxième pic décalé par rapport au premier par un temps égal à : $t_1 = (56 - 1.9) \times 10^{-6} = 54.1 \mu\text{s}$

On obtient une interface située à la distance $x_1 = (v \times t_1)/2 = 0.040034 \text{ m}$, donc le premier pic représente la première face de l'échantillon (Figure 3.2b). Il est évident que les échos qui suivent sont des pics représentant l'intérieur du matériau. Sachant que l'onde longitudinale se propage dans l'aluminium avec une vitesse

de 6700m/s , on a le troisième pic décalé par rapport au deuxième par un temps égal à : $t_2 = (73.9 - 56) \times 10^{-6} = 17.9\mu\text{s}$

On obtient alors une deuxième interface située à la distance : $x_2 = (v \times t_2)/2 = 0.059965\text{m}$ de la première. On constate qu'elle représente la deuxième face de l'échantillon.

Les résultats de calcul confirment que le matériau est d'épaisseur égale à 5.99cm placée à une distance de 4cm du transducteur. En plus, il ne contient aucun défaut.

2.3.2. Calcul des vitesses longitudinales de propagation dans les deux milieux

L'onde longitudinale se propage dans l'eau entre le transducteur et la première interface de l'échantillon durant un temps t_1 avec une vitesse de propagation :

$$v_1 = \frac{2d_1}{t_1} \quad (3.1)$$

Avec : d_1 la distance entre le transducteur et la première face de l'échantillon.

La différence entre les maxima des deux premiers échos sur la Figure 3.2b représente le temps de retard t_2 entre les deux interfaces de l'échantillon.

A partir de t_2 , on peut calculer la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'aluminium par la relation :

$$v_2 = \frac{2d_2}{t_2} \quad (3.2)$$

Avec d_2 la distance séparant les deux façades de l'éprouvette.

Le facteur de 2 dans (Eq.3.1) et (Eq.3.2) explique le trajet aller-retour de l'onde

D'après la Figure 3.3, on peut lire : $t_1 = 54.1\mu\text{s}$ et $t_2 = 17.9\mu\text{s}$, et sachant que : $d_1 = 4\text{cm}$ et $d_2 = 6\text{cm}$, on peut déduire les vitesses de propagation de l'onde longitudinale dans l'eau et dans l'aluminium et qui sont respectivement égales à : $v_1 = \frac{2 \times 0.04}{54.1 \times 10^{-6}} =$

$$\frac{1478\text{m}}{\text{s}} \text{ et } v_2 = \frac{2 \times 0.06}{17.9 \times 10^{-6}} = 6703.91\text{m/s}.$$

On note que le quatrième écho qui apparaît sur la Figure 3.3 représente un écho provenant réflexions multiples entre les faces de l'échantillon.

2.4. Analyse du signal réel d'aluminium

2.4.1. Application de l'EMD, EEMD et CEEMDAN

D'après la Figure 3.4, on remarque que les résultats de la décomposition du signal reçu par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN permettent bien la séparation des échos réels. Pour plus de détails, on a tracé différentes courbes qui confirment ce constat tout en indiquant avantages et limitations de chaque méthode.

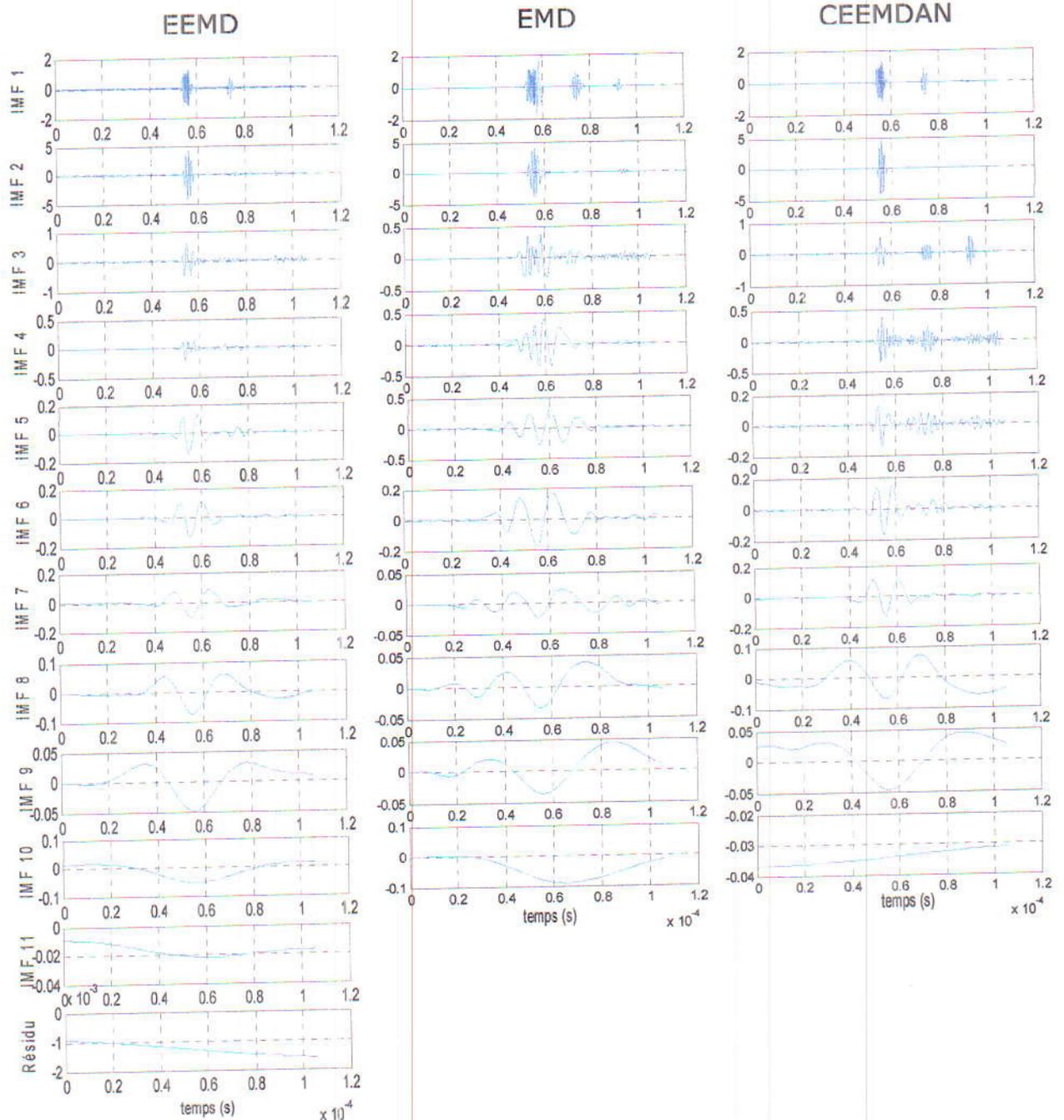


Figure 3.4 : Les IMFs du signal reçu par les trois méthodes.

Les Figures 3.5-3.7 représentent la superposition des premières IMFs obtenues respectivement par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN avec le signal reçu.

La Figure 3.8 illustre l'effet du nombre d'itérations pour les deux variantes EEMD et CEEMDAN. On constate que cette dernière nécessite un nombre moindre d'itérations ainsi que le nombre d'IMF. Ce qui permet de réduire le temps de calcul et le nombre d'IMFs redondants.

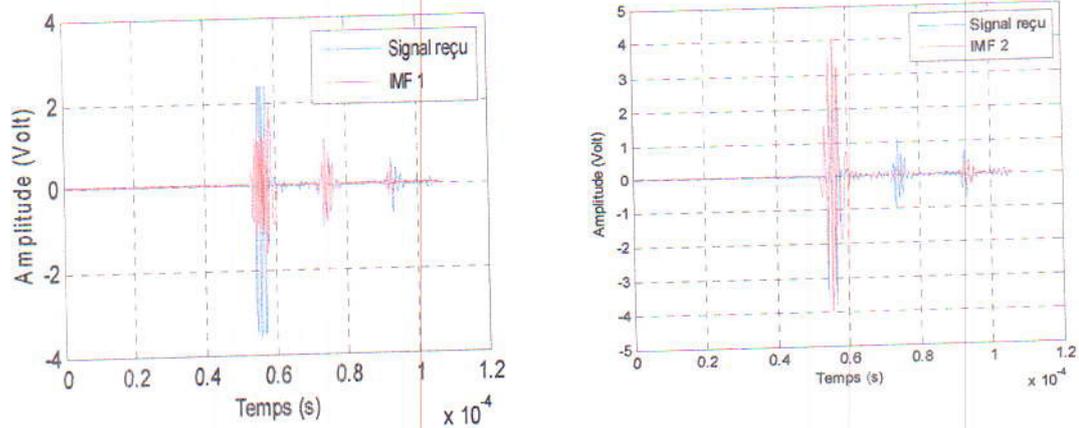


Figure 3.5 : Superposition des deux premières IMFs obtenues par l'EMD avec le signal reçu.

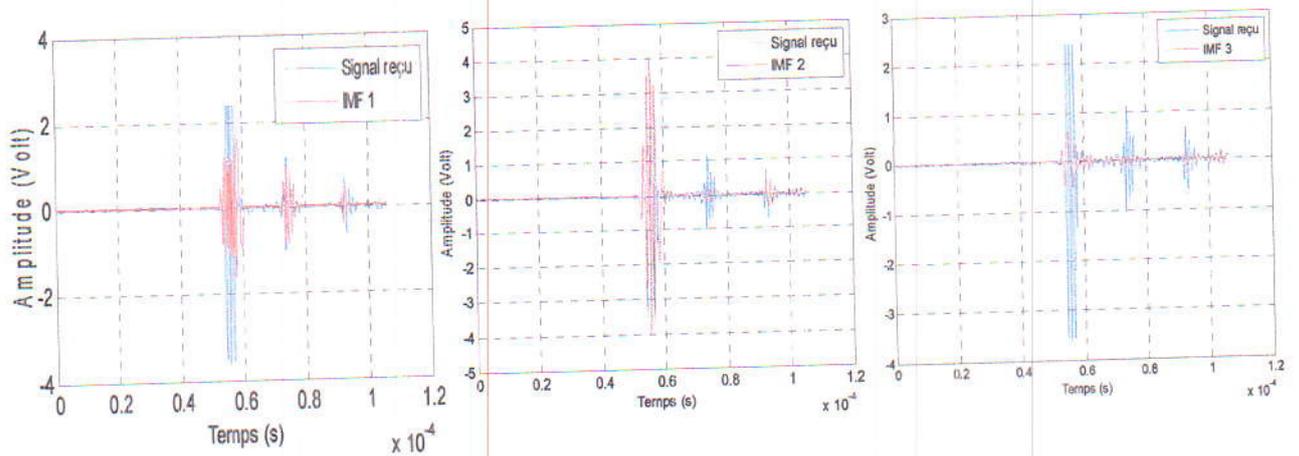


Figure 3.6 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par l'EEMD avec le signal reçu.

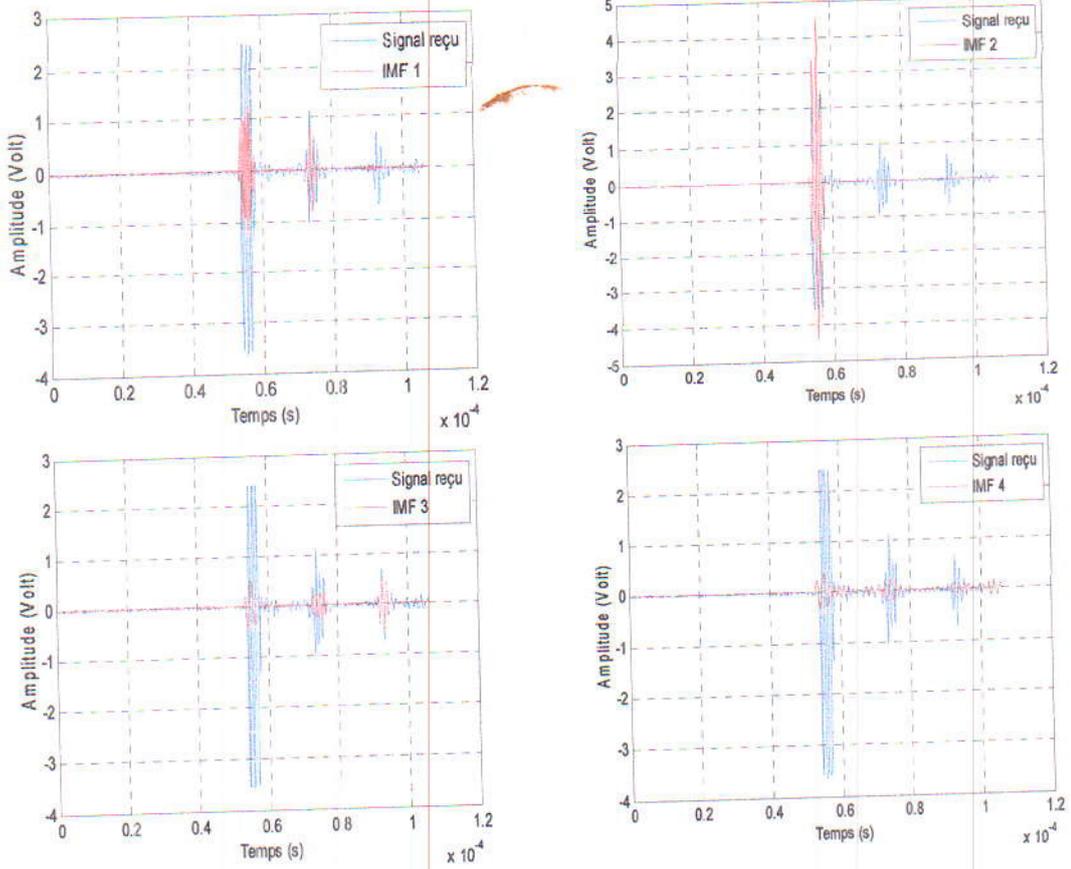


Figure 3.7 : Superposition des quatre premières IMFs obtenues par la CEEMDAN avec le signal reçu.

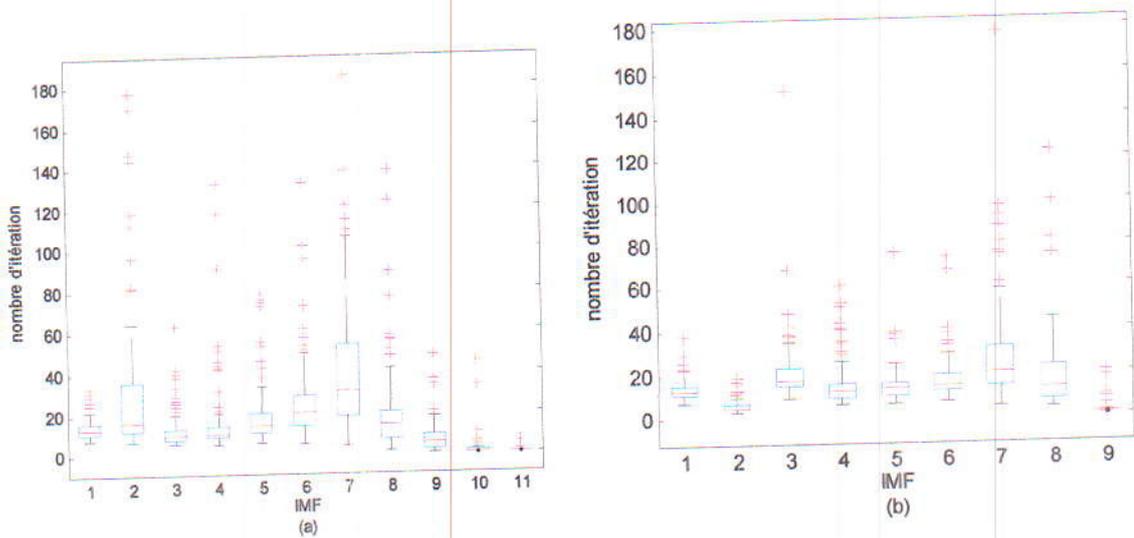


Figure 3.8 : Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) : pour l'EEMD (b) : pour la CEEMDAN

2.4.2. Erreur de reconstruction

D'après la Figure 3.9, on remarque que l'erreur de reconstruction pour la CEEMDAN reste toujours faible par rapport à celle de l'EEMD, ce qui confirme bien les résultats obtenus pour le signal simulé.

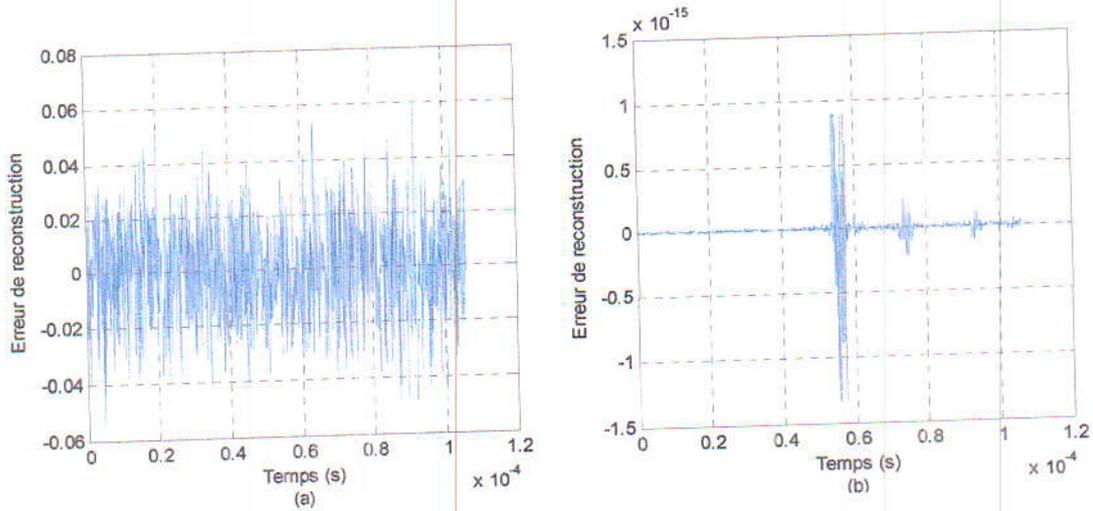


Figure 3.9 : Erreur d'estimation : (a) EEMD (b) CEEMDAN

2.4.3. Calcul de la vitesse de propagation dans l'aluminium

Nous avons localisé les échos de face et de fond à partir des IMFs, puis nous avons calculé les vitesses de l'onde longitudinale dans l'échantillon (Eq.3.1).

Le tableau 3.1 regroupe les valeurs des vitesses calculées à partir de l'IMF significative pour chacune des trois méthodes.

La méthode	EMD (IMF1)	EEMD (IMF2)	CEEMDAN (IMF3)
La vitesse (m/s)	7643.31	6818.18	6693.40

Tableau 3.1 : calcul de la vitesse de propagation dans l'aluminium pour les trois méthodes.

On a appliqué l'EMD et ses variantes sur les signaux réels en vue d'une détection et localisation des échos. Les performances de la CEEMDAN sont bien meilleures ce que prouve son efficacité pour CND par ultrasons.

3. Expérience 02

3.1. Description de l'expérience

Cette expérience est basée sur la technique pulse-écho par contact (Figure 3.10). Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler et la liaison acoustique est assurée par un gel spécial. La pièce sous test est une plaque d'acier de dimension (1x5) Cm avec un défaut inséré à la profondeur 0.5 Cm. Le défaut est une fissure ou une porosité interne vide. Cette expérience ne nécessite qu'un seul transducteur pour émettre le signal ultrasonore et recevoir les échos des interfaces.

Dans le signal réfléchi par l'échantillon d'acier, trois échos apparaissent consécutivement : l'écho de face (E1), l'écho de défaut (Ed) et l'écho de fond (E2).

3.2. Description du système de mesure

Le système de mesure réalisé est constitué essentiellement d'un transducteur à contact de 2.25 MHz placé directement sur la pièce à contrôler, il représente la source génératrice du faisceau d'ondes ultrasonores. Il permet l'émission et la réception des impulsions. Les impulsions émises (reçues) par le transducteur sont générées par un émetteur / récepteur ultrasonique (Panametrics 5077PR, 606V) relié avec un oscilloscope numérique (Tektronics TDS 1002) pour visualiser les échos (les ondes ultrasonores) émises et réfléchies qui est relié à un ordinateur avec un logiciel d'acquisition de données (WaveStar) à son tour (Figure 3.10).

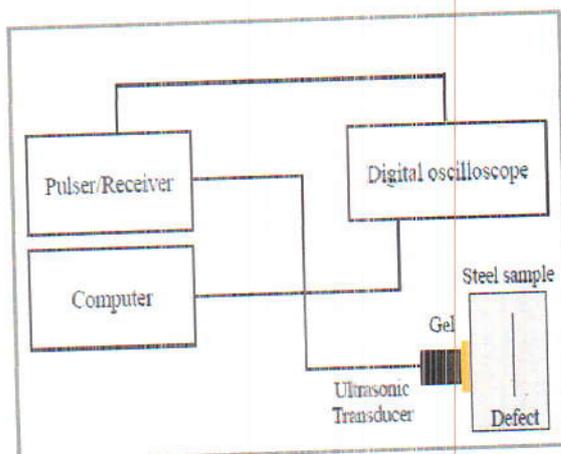


Figure 3.10 : Système de mesure : Schéma synoptique à gauche et vue générale de l'appareil de mesure à droite.

L'écho reçu de l'échantillon est représenté dans la Figure 3.11. On a préféré limiter le signal pour pouvoir augmenter la résolution temporelle.

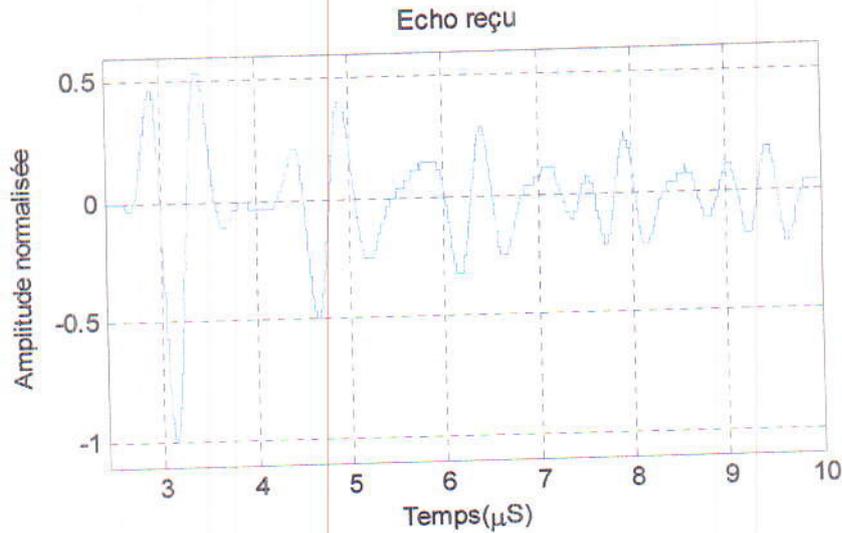


Figure 3.11 : Echo reçu de l'échantillon d'acier.

3.3. Caractérisation du matériau

3.3.1. Détermination de l'épaisseur de l'échantillon et la position du défaut

Dans la Figure 3.12, le premier pic représente la première face de l'échantillon, les échos qui suivent sont des pics qui représentent l'intérieur du matériau.

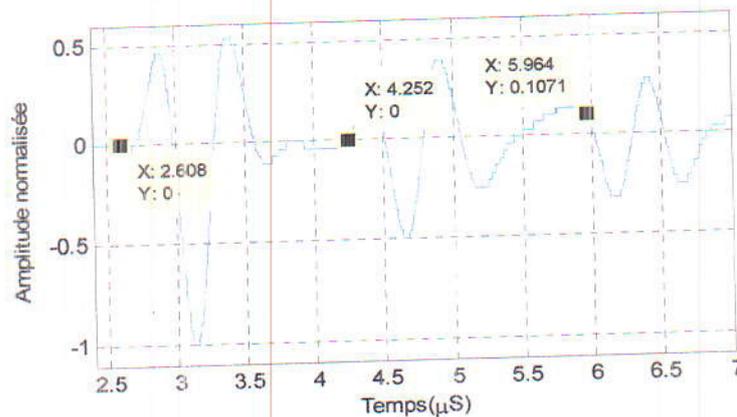


Figure 3.12 : Les trois échos recueillis à partir du spécimen acier

On sait que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'acier égale à 5950 m/s et on a le deuxième pic décalé par rapport au premier par un temps égale à $t_3 = (4.252 - 2.608) \times 10^{-6} = 1.644 \mu\text{s}$. Donc on obtient une interface située à

une distance $x_3 = (v \times t_3)/2 = 0.004909 \text{ m}$, donc le deuxième pic représente l'écho de défaut de l'échantillon.

Le troisième pic décalé par rapport au deuxième par un temps égal à : $t_4 = (5.964 - 2.608) \times 10^{-6} = 3.356 \mu\text{s}$, par conséquent, on obtient une interface à la distance : $x_4 = (v \times t_4)/2 = 0.0099841 \text{ m}$ qui représente la deuxième face de l'échantillon.

Les résultats de calcul confirment que l'échantillon d'acier a une épaisseur de 0.99 cm et présente un défaut situé à une distance $x_3 = 4.909 \text{ mm}$ de la première face.

3.3.2. Calcul de la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'acier

On a démontré dans la partie précédente que les trois premiers échos dans la Figure 3.11, représentent respectivement l'écho de la première façade, l'écho de défaut et l'écho de la deuxième façade de l'échantillon.

L'onde longitudinale se propage dans l'acier entre la première interface de l'échantillon et la deuxième durant un temps t_3 avec une vitesse de propagation :

$$v_3 = \frac{2d_3}{t_3} \quad (3.3)$$

Avec : d_3 la distance entre la première face de l'échantillon et le défaut.

A partir du temps de retard t_4 entre les deux échos, on peut calculer la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'acier par la relation :

$$v_4 = \frac{2d_4}{t_4} \quad (3.4)$$

Avec d_4 la distance sépare le défaut et la deuxième face de l'échantillon.

D'après la Figure 3.12, on peut lire : $t_3 = 1.644 \mu\text{s}$ et $t_4 = 3.356 \mu\text{s}$, et sachant que : $d_3 = 5 \text{ mm}_1$ et $d_4 = 10 \text{ mm}_2$, on peut déduire les vitesses de propagation de l'onde longitudinale dans l'acier avant et après la fissure et qui sont respectivement égales à : $v_3 = \frac{2 \times 0.005}{1.644 \times 10^{-6}} = 6082.725/\text{s}$ et $v_4 = \frac{2 \times 0.01}{3.356 \times 10^{-6}} = 5959.475 \text{ m/s}$.

3.4. Analyse du signal réel d'acier

3.4.1. Application de l'EMD, EEMD et CEEMDAN

D'après la Figure 3.13, on remarque que les résultats de la décomposition du signal reçu par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN permettent bien la séparation des échos réels.



Figure 3.13 : Les IMFs du signal reçu par les trois méthodes.

Les Figures 3.14-3.16 représentent la superposition des premières IMFs obtenues respectivement par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN avec le signal reçu.

La Figure 3.17 illustre l'effet du nombre d'itérations pour les deux variantes EEMD et CEEMDAN. On constate que cette dernière nécessite un nombre moindre

d'itérations ainsi que le nombre d'IMF. Ce qui permet de réduire le temps de calcul et le nombre d'IMFs redondants.

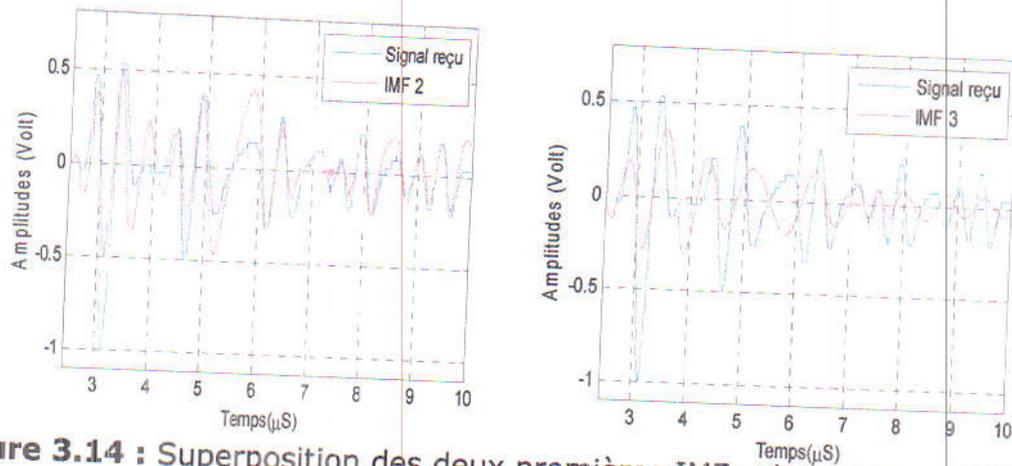


Figure 3.14 : Superposition des deux premières IMFs obtenues par l'EMD avec le signal reçu.

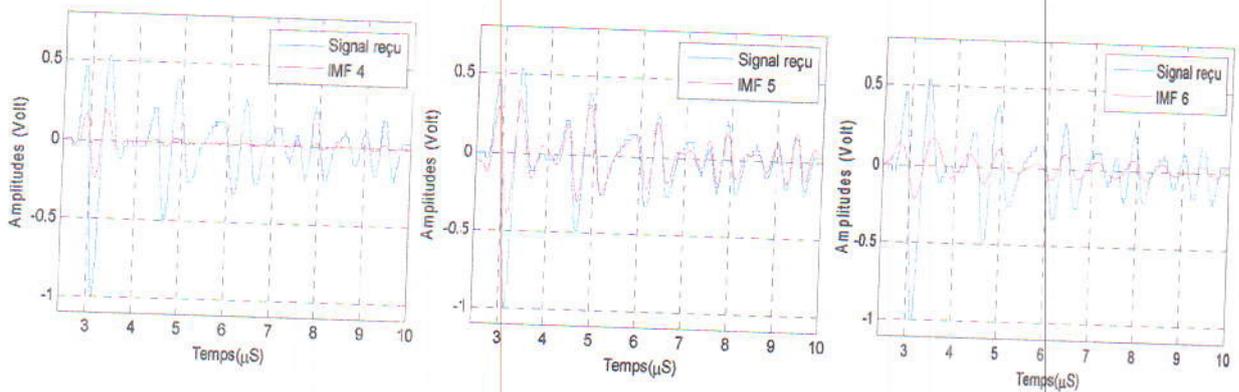


Figure 3.15 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par l'EEMD avec le signal reçu.

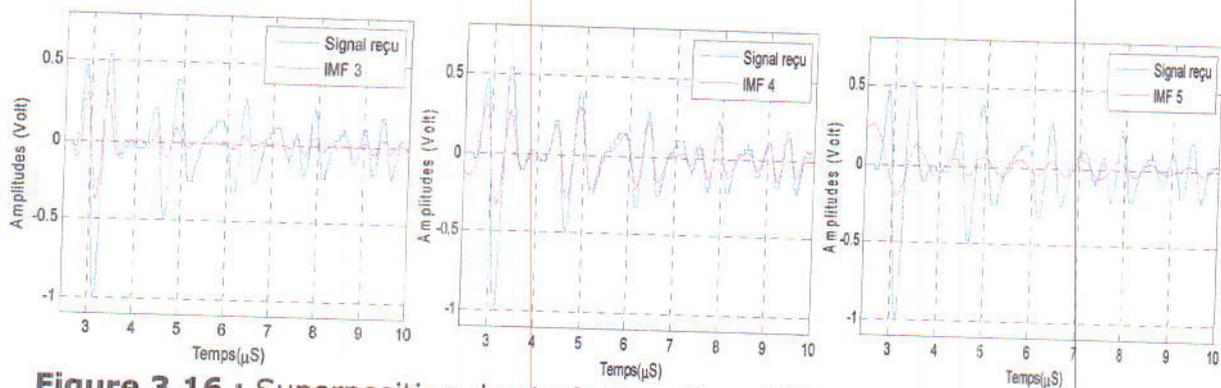


Figure 3.16 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par la CEEMDAN avec le signal reçu.

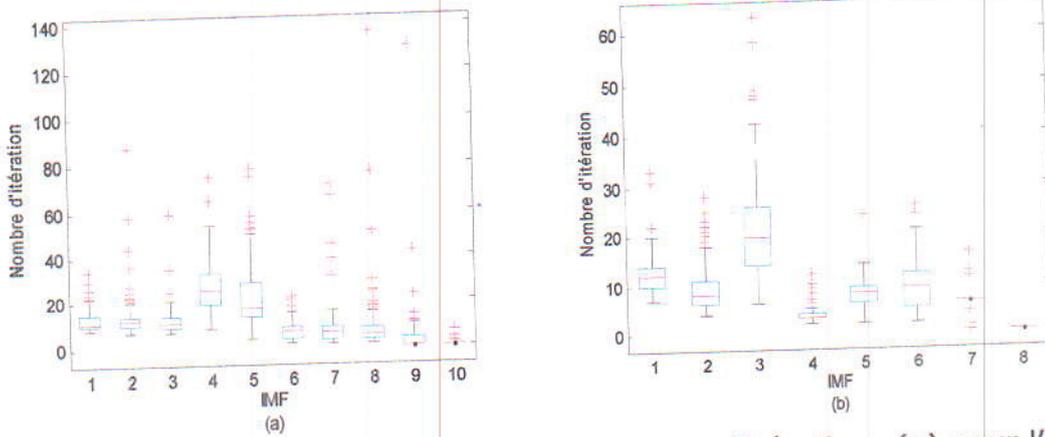


Figure 3.17 : Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) pour l'EEMD (b) pour la CEEMDAN

3.4.2. Erreur de reconstruction

D'après la Figure 3.18, on remarque que l'erreur de reconstruction pour la CEEMDAN reste toujours faible par rapport à celle de l'EEMD, ce qui confirme bien les résultats obtenus pour le signal simulé.

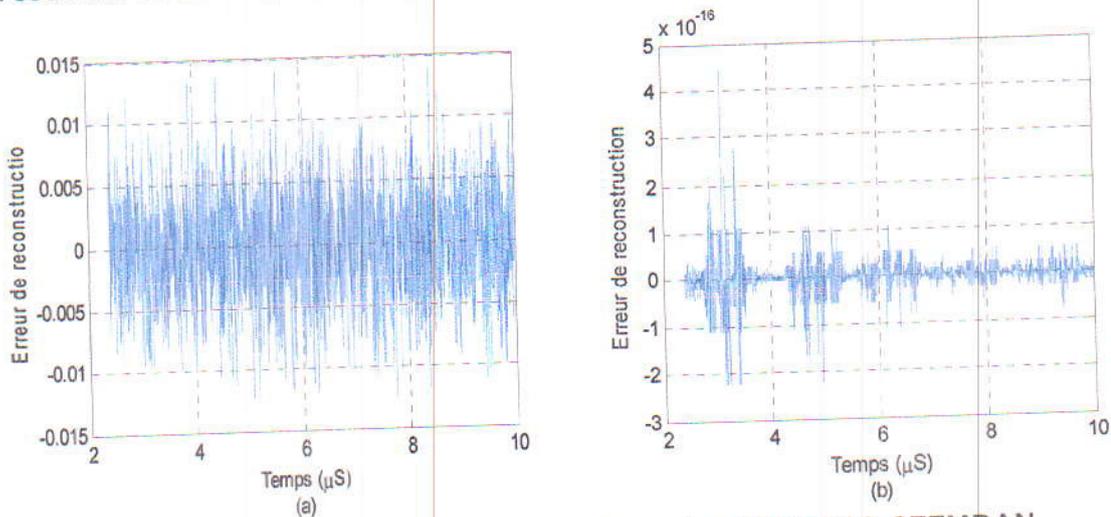


Figure 3.18 : Erreur d'estimation : (a) EEMD (b) CEEMDAN

3.4.3. Calcul de la vitesse longitudinal de propagation dans l'acier

Nous avons localisé les échos de face, de défaut et de fond à partir des IMFs, puis nous avons calculé les vitesses de l'onde longitudinale dans l'échantillon (Eq.3.3). Le tableau 3.2 regroupe les valeurs des vitesses calculées à partir de l'IMF significative pour chacune des trois méthodes. On constate que la CEEMDAN sont bien meilleure pour la localisation des échos, même en présence de défaut, et le

5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé la technique pulse-écho pour caractériser des matériaux. On a considéré deux spécimens : un cube d'aluminium (sans défaut) et une plaque d'acier (avec une fissure au milieu). On a déterminé les vitesses des ondes longitudinales à partir du calcul du temps de vol dans les spécimens.

D'autre part, on a appliqué l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN sur les deux signaux ultrasonores réels, afin de vérifier les résultats obtenus dans le chapitre précédent concernant les capacités des méthodes proposées. La CEEMDAN a prouvé sa supériorité quant à la détection et la localisation des échos et le calcul de manière exacte des vitesses de propagation.

Chapitre 4

Techniques adaptatives pour le CND

-
1. Introduction
 2. La transformée de Huang-Hilbert (HHT)
 3. La méthode EMD/TOC pour le CND
 4. Résultats et interprétation
 5. Conclusion
-

1. Introduction

L'écho ultrasonore est de nature non stationnaire, ceci est dû au milieu de propagation non uniforme, qui contient des discontinuités provoquant la variation de la fréquence de l'onde reçue par rapport à l'onde émise. Il est aussi non linéaire et est constitué de plusieurs composantes fréquentielles. Ce signal est bref, ne se répète que rarement, et se manifeste par des oscillations évoluant au cours du temps. Dans de telles situations, la représentation temporelle classique de l'écho ultrasonore, ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples, tandis que la représentation fréquentielle (transformée de Fourier) ne permet pas la localisation temporelle de ces composantes. Ainsi, il est naturel de s'orienter vers une analyse multi-composantes adaptée aux signaux traités ; c'est à dire projeter le signal sur des fonctions analysantes qui permettent de décrire le signal par une représentation conjointe à la fois en temps et en fréquence [13, 15, 22].

Des techniques de traitement du signal temps-fréquence ont été proposées dans la littérature et sont appliquées dans divers domaines. Leur utilisation dépend de l'application, des avantages et des inconvénients de chacune pour faire apparaître les informations recherchées. Dans le cadre de ce projet et afin de caractériser, détecter et localiser les imperfections présentes dans les échantillons à tester, on propose l'utilisation de deux techniques, à savoir : la transformée de Hilbert Huang (HHT) ainsi que la transformée en ondelette continue TOC combinée avec l'EMD.

2. La transformée de Huang-Hilbert (HHT)

L'objectif de l'EMD est de réaliser une décomposition temporelle en signaux mono-composante pour calculer leurs fréquences instantanées (FI) définies comme étant la dérivée de la phase du signal analytique. Dans le chapitre 2, nous avons vu le principe de la décomposition d'un signal en IMF. L'EMD seule n'est pas une analyse temps-fréquence. Pour rendre la fréquence instantanée applicable, E. Huang et al présentent un processus qui combine la transformée de Hilbert et l'EMD. Cette combinaison est appelée Transformée de Hilbert-Huang (HHT). Elle est non linéaire et permet d'estimer la fréquence instantanée (FI) et l'amplitude instantanée (AI) de

chaque IMF des signaux non-stationnaires. Ainsi une représentation temps-fréquence est élaborée à partir de l'ensemble des couples $(AI_K(t), FI_K(t))$ [11].

2.1. Définition et Principe

La transformée de Hilbert, notée $H(t)$ utilise un filtre permettant le déphasage de chaque composante d'un quart de période pour un signal traduit par une somme de plusieurs sinusoïdes. En d'autres termes, c'est une transformée linéaire qui permet d'étendre un signal réel dans le domaine complexe (génération de l'enveloppe).

A l'instant t , la sortie $y(t)$ du filtre quadrature de Hilbert appliqué au signal réel $x(t)$ est notée par $H[x(t)]$. Idéalement ce filtre a une amplitude de 1 pour toutes les fréquences et introduit un décalage de $-\frac{\pi}{2}$ pour chaque fréquence positive et $+\frac{\pi}{2}$ pour chaque fréquence négative. Ainsi la fonction $y(t)$ est déterminée par la convolution de $x(t)$ avec la réponse impulsionnelle du filtre de Hilbert $h_0(t) = \frac{1}{\pi t}$. Les propriétés locales de $x(t)$ sont données comme suit :

$$H[x(t)] = x(t) * h_0(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t - \tau) \cdot x(\tau) \cdot d\tau \quad (4.1)$$

Afin d'introduire la méthode de Hilbert permettant l'estimation de la fréquence instantanée (FI) et de l'amplitude instantanée (AI), il est nécessaire d'associer à un signal réel $x(t)$ un signal analytique $z(t)$ tel que:

$$z_x(t) = x(t) + jH[x(t)] = \alpha(t)e^{j\varphi(t)} \quad (4.2)$$

Les notions d'amplitude $\alpha(t)$ et de phase $\varphi(t)$ d'un signal réel $x(t)$ non-stationnaire sont associées à un unique signal complexe $z_x(t)$ dont le module et l'argument définissent respectivement l'amplitude instantanée et la phase instantanée.

$$AI = \alpha(t) = |z_x(t)| = \sqrt{x^2(t) + H[x(t)]^2} \quad (4.3)$$

$$\theta(t) = \arg z_x(t) = \arctan\left(\frac{H[x(t)]}{x(t)}\right) \quad (4.4)$$

La fréquence instantanée FI de $z(t)$, et donc de $x(t)$, n'est autre que la dérivée de la phase instantanée :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Le principe de l'estimation de la FI et l'AI par l'intermédiaire d'un signal analytique est résumé dans la Figure 4.1.

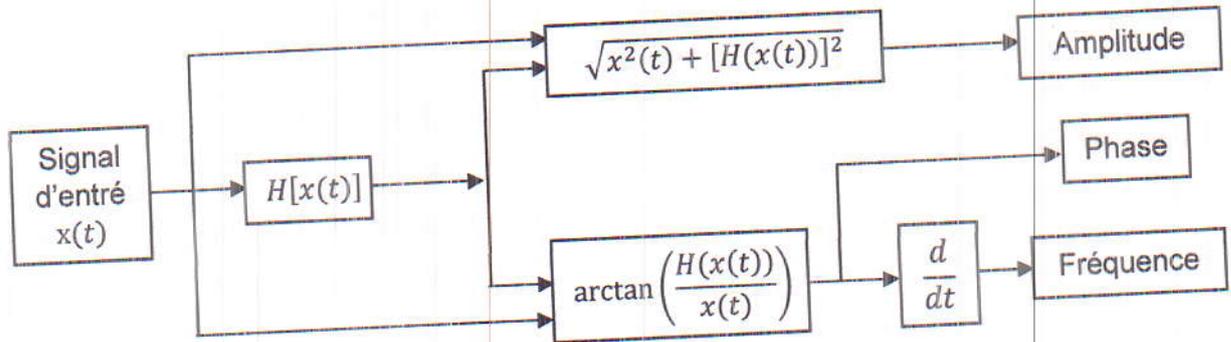


Figure 4.1 : Principe d'estimation de la FI et de l'AI via le signal analytique $z_x(t)$ de $x(t)$.

L'algorithme de détection par la HHT combine deux techniques de traitement du signal qui sont la transformée de Hilbert et l'EMD. Il est basé sur l'application de la transformée de Hilbert sur chaque IMF_i afin d'obtenir le spectre d'amplitude de Hilbert et la fréquence instantanée à l'aide des équations suivantes :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t) \quad (4.6)$$

$$H_i(t) = H(IMF_i(t)) \quad (4.7)$$

$$a_i(t) = \sqrt{IMF_i(t)^2 + H_i^2} \quad (4.8)$$

$$\phi_i(t) = \arctan\left(\frac{H_i(t)}{IMF_i(t)}\right) \quad \text{et} \quad W_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (4.9)$$

Les équations (4.8) et (4.9) représentent respectivement l'amplitude et la phase de chaque sous bande. Ces équations permettent la reconstruction du signal, décomposé par l'EMD, à partir de l'expression suivante :

$$x(t) = \text{Re} \sum_{j=1}^m a_j(t) \cdot \exp(i\phi_j(t)) = \text{Re} \sum_{j=1}^m a_j(t) \cdot \exp\left(i \int W_j(t) dt\right) \quad (4.10)$$

L'équation (4.10) est appelée spectre d'amplitude de Hilbert qui peut être considéré comme une transformée de Fourier avec des amplitudes variables en temps et en fréquences.

$$TF(x(n)) = \sum_{n=1}^{\infty} x(n) \cdot \exp(-j2\pi n f) \quad (4.11)$$

Par identification, on peut déduire la fréquence instantanée de chaque *IMF* :

$$TF_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} W_i(t) \quad (4.12)$$

L'équation (4.12) est une distribution en temps et en fréquence de l'amplitude. Elle est appelée spectre de Hilbert-Huang HHT et peut être considérée comme une forme généralisée de la transformée de Fourier avec des amplitudes variables en temps et en fréquences [15, 24, 25].

2.2. Algorithme HHT pour le CND

La procédure proposée par Hilbert-Huang est basée sur la combinaison d'un estimateur de la fréquence instantanée et la méthode de décomposition modale empirique, afin d'estimer les instants de chaque composante fréquentielle du signal étudié. On peut résumer cette procédure par l'organigramme de la Figure 4.3.

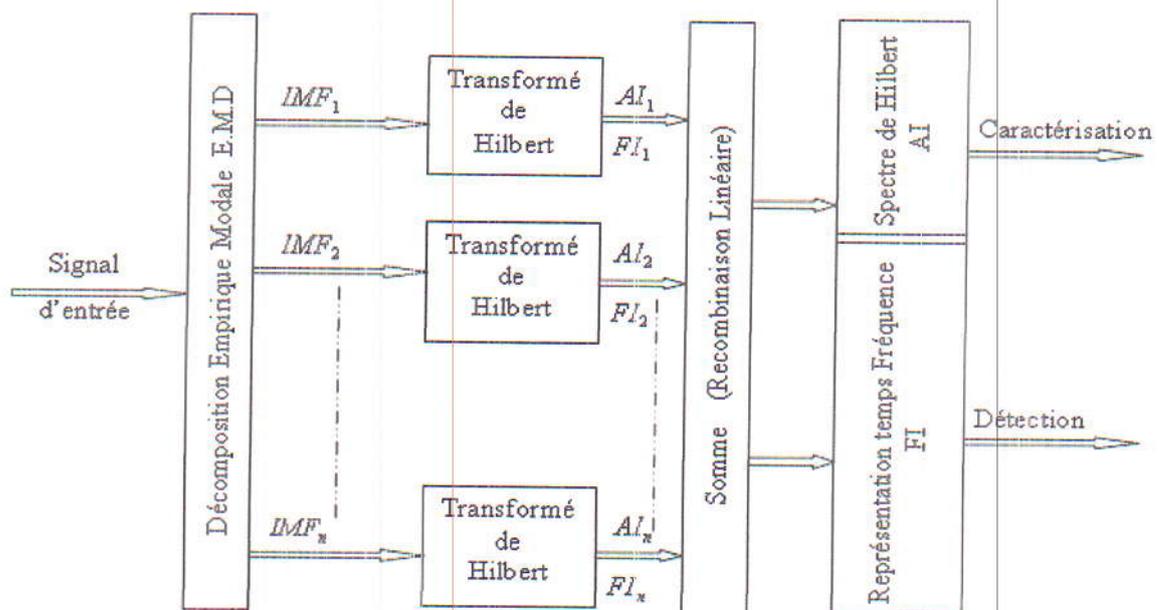


Figure 4.2 : Algorithme de Hilbert Huang pour le NDT

3. La méthode EMD/TOC pour le CND

3.1. Définition

Une ondelette est une forme d'onde ayant une moyenne nulle et une durée limitée. L'analyse en ondelette adopte une fonction de prototype d'une ondelette connue sous le nom d'ondelette mère. Cette dernière génère un ensemble de fonctions de base par des translations et dilatations récursive. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.13)$$

Le paramètre « b » est un paramètre de position d'ondelette (translation), le paramètre « a » est un paramètre d'échelle (dilatation) qui est proportionnel à (1/f) et $|a|^{-\frac{1}{2}}$ est le facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles.

$\psi_{a,b}(x)$: L'ondelette mère et $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$: L'ondelette fille.

Soit ψ une ondelette analysante et f une fonction de \mathbb{R}^2 . La transformée en ondelette continue (TOC) de f est la fonction (W_f) qui s'applique sur toutes les valeurs continues de la fréquence et du temps. Elle est définie sur \mathbb{R}^2 par :

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (4.14)$$

Avec [26, 27] : $\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$: Le complexe conjugué de l'ondelette fille.

$W_f(a,b)$: représente la corrélation (produit scalaire) de f avec $\psi_{a,b}$ et est appelée coefficient d'ondelette.

3.2. Principe de l'algorithme

L'algorithme EMD/TOC appliqué au CND, tout comme la HHT, présente deux objectifs : le premier est la détection des échos réfléchis par chaque interface interne ou externe ; le deuxième est la suppression du bruit et l'amélioration du rapport signal/bruit. Cet algorithme est basé essentiellement sur la sélection des sous bandes IMFs significatives (les plus énergiques.)

Pour trouver les sous bandes IMFs significatives du signal ultrasonore, le critère de sélection est basé sur l'application de la TOC sur chaque sous bande IMFs afin de :

- Savoir la distribution d'énergie de chaque sous bande IMFs, et lesquelles sont les plus énergiques.
- Sélectionner les sous bandes IMFs qui permettent de détecter les fréquences de chaque motif (composante) du signal ultrasonore étudié.

Cet algorithme se résume en la décomposition du signal ultrasonore en plusieurs bandes fréquentielles IMFs, puis l'estimation des fréquences de motifs essentiels du signal par la TOC. Ensuite la déduction des sous bandes les plus énergiques du signal. Enfin la construction du signal d'approximation S_a à partir des sous bandes sélectionnées d'une façon linéaire, ou d'une façon non linéaire (algorithme de recombinaison maximisation, seuil de la polarité PT,...etc.). D'autre part, le signal de détail S_d est construit d'une façon linéaire par les sous bandes non sélectionnées $S_d = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r(t)$.

Cet algorithme permet de localiser les échos réfléchis par les interfaces internes ou externes à partir de signal d'approximation, et ainsi d'améliorer le rapport signal/bruit (supprimer une partie de bruit de structure).

En résumé, l'algorithme peut être résumé par le pseudo code du Tableau 4.1 ainsi que l'organigramme de la Figure 4.3.

Etape 01 : Décomposer le signal ultrasonore $x(t)$ par l'EMD pour obtenir les sous bandes IMFs;

Etape 02 : Appliquer la T.O.C sur chaque IMF ;

Etape 03 : Sélectionner les sous bandes IMFs les plus énergiques;

$$IMF_{v_j}(t) = \begin{cases} IMF_j(t) & \text{si } IMF_j \text{ significative} \\ 0 & \text{si Non} \end{cases}$$

Etape 04 : Construire le signal d'approximation S_a par les sous bandes $IMF_{v,s}$ Sélectionnées d'une façon linéaire, et par la suite le signal de détail S_d par les sous bandes IMFs non sélectionnées,

$$\begin{cases} S_a = \sum_{j=1}^M IMF_{v_j}(t) \\ S_d = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r(t) \end{cases}$$

Etape 05 : Détecter les échos de chaque interface pour

Tableau 4.1 : Pseudo-code de la méthode EMD/TOC

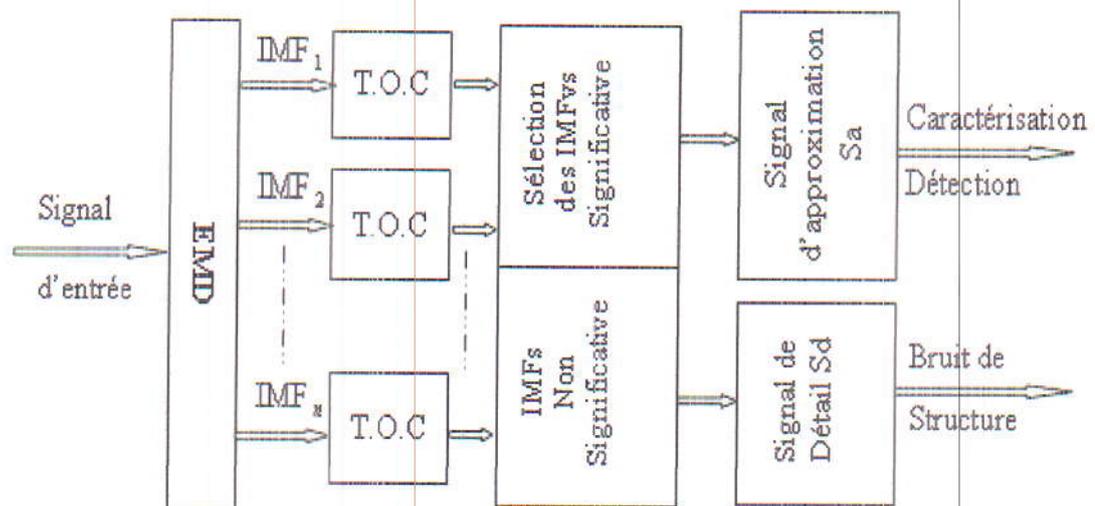


Figure 4.3 : Organigramme de la méthode EMD/TOC

4. Résultats et interprétation

4.1. Application des méthodes EMD/TOC et HHT sur les deux signaux

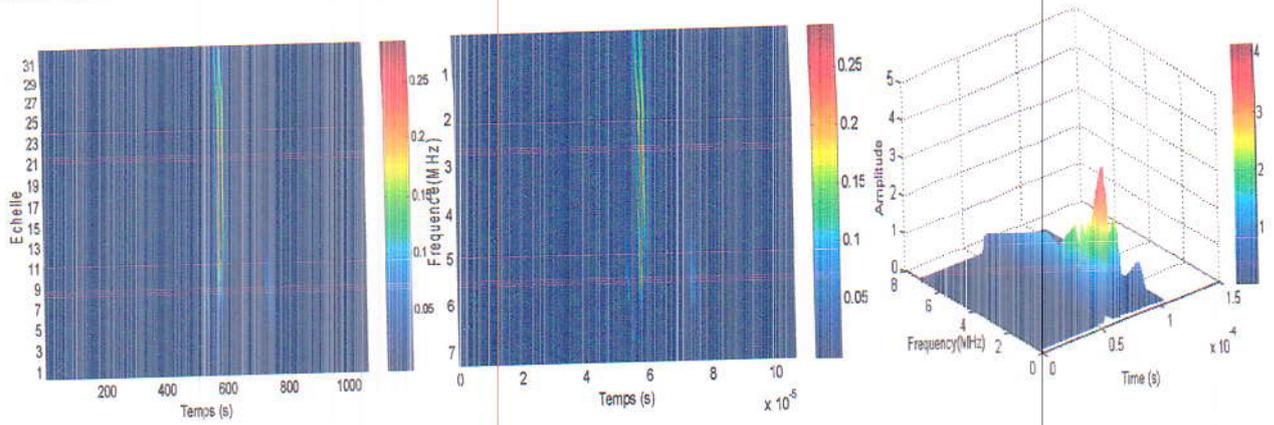
L'EMD est une technique purement temporelle. L'application de cette méthode sur les signaux réels (signal d'aluminium et d'acier) permet d'extraire la bande fréquentielle pour chaque signal ainsi de détecter et localiser les échos qui contiennent l'information utile.

Le problème de cette méthode qu'on a déjà cité, dans le chapitre précédent, est que sa représentation temporelle ne donne pas une bonne perception des composantes et la représentation fréquentielle ne permet pas la localisation temporelle de ces dernières. Pour résoudre ce problème et avoir une représentation temps-fréquence on a proposé les méthodes EMD/TOC et EMD/HHT. L'implémentation de l'algorithme EMD/TOC est faite par le logiciel matlab sur les signaux réels avec l'ondelette mère adaptée aux signaux ultrasonores « Daubechis db4 ».

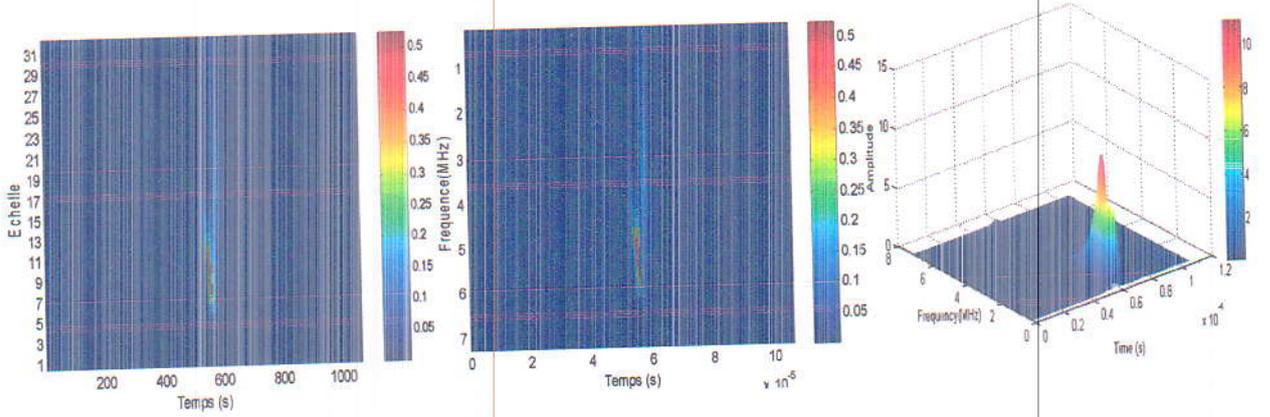
Les résultats obtenus par les deux méthodes sont semblables (Figure 4.4 jusqu'à 4.7). Elles montrent que l'EMD/TOC et l'EMD/HHT ne donnent pas une bonne localisation/détection des échos réfléchis par chaque interface en temps et en fréquence.

Aussi elles ne permettent pas de localiser correctement les échos des signaux ultrasonores étudiés afin de calculer exactement l'épaisseur relative du cube pour l'aluminium et du défaut dans l'acier ainsi que la vitesse de propagation ultrasonore pour les deux spécimens (calcul du temps de vol) et/ou détection des échos de faces et de défaut ce qui confirme les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Dans ce qui suit, on nomme l'écho de face par E_1 , l'écho de fond par E_2 et l'écho du défaut par E_d .



(a)



(b)

Figure 4.4 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant la EMD/TOC du signal d'aluminium (a) IMF1 (b) IMF2

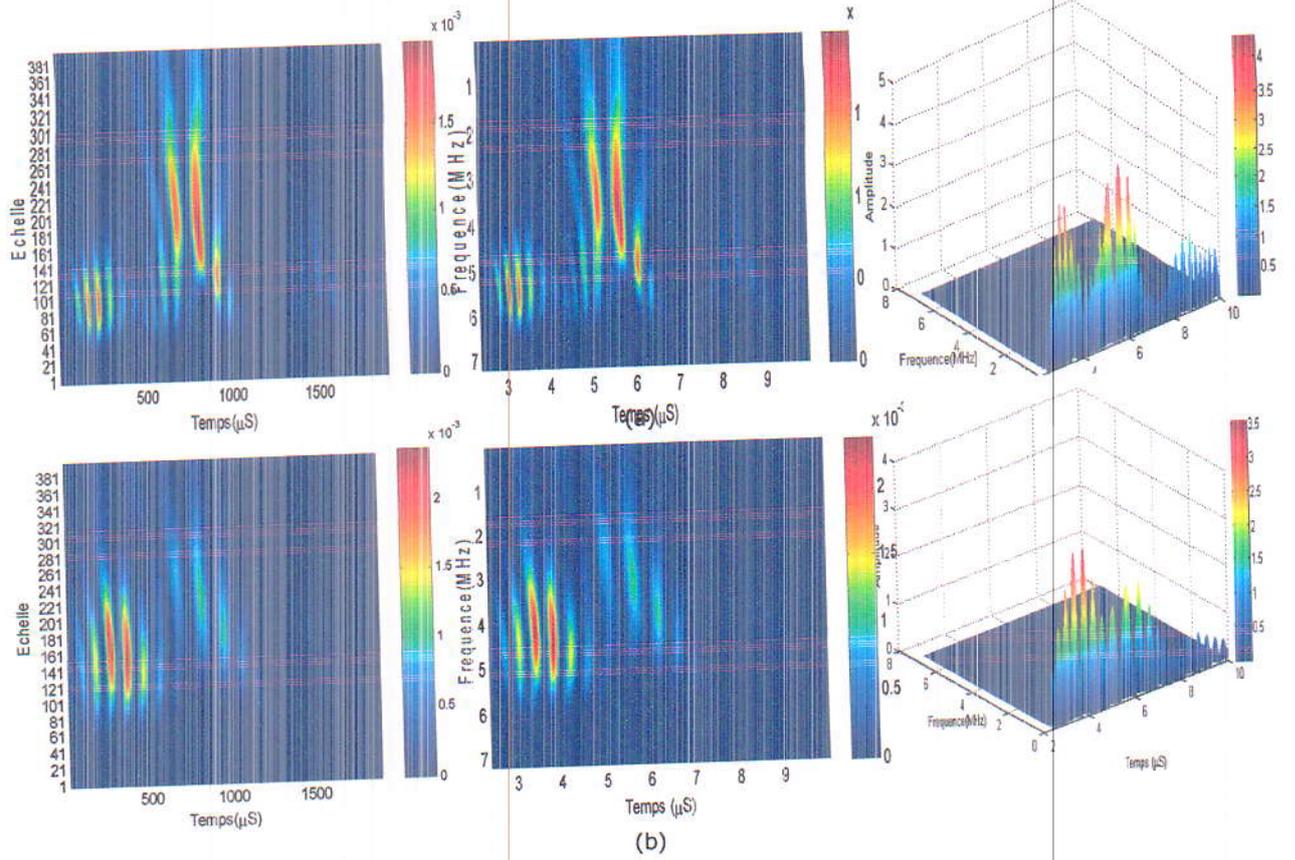
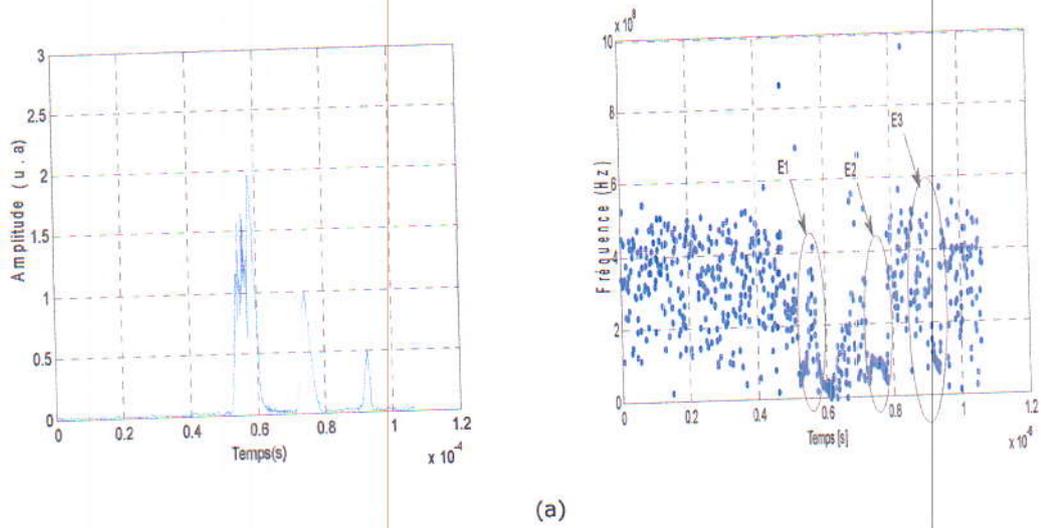


Figure 4.5 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant la EMD/TOC du signal d'acier (a) IMF2 (b) IMF3



(a)

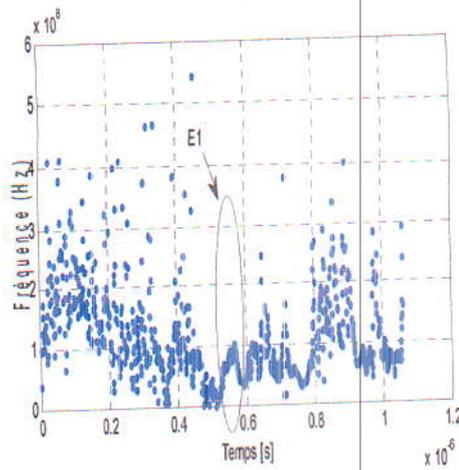
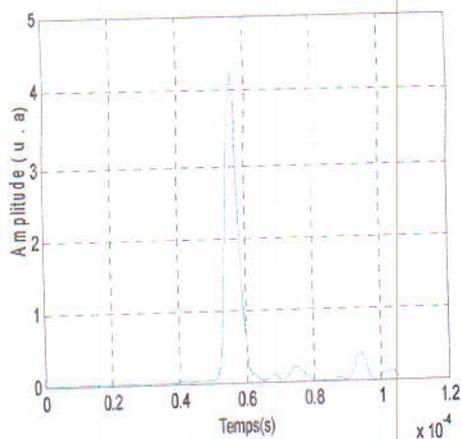
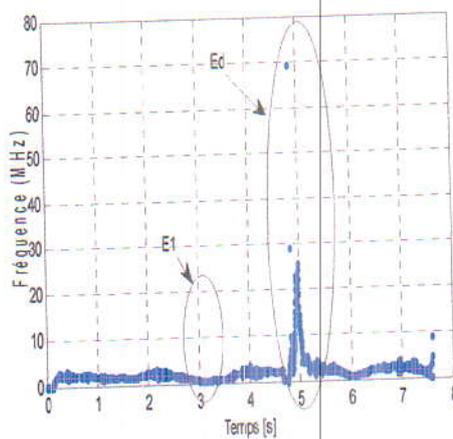
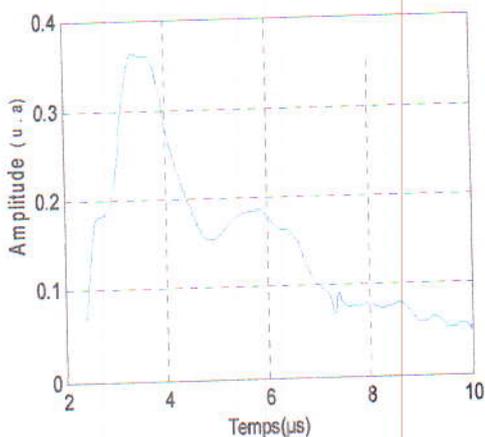
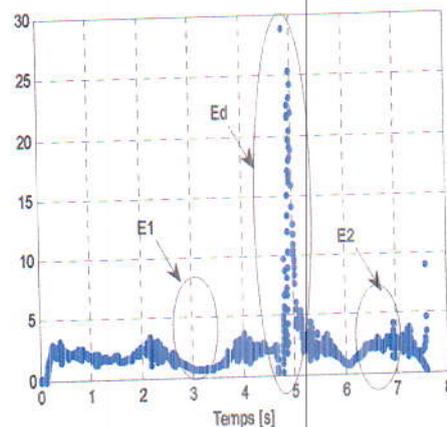
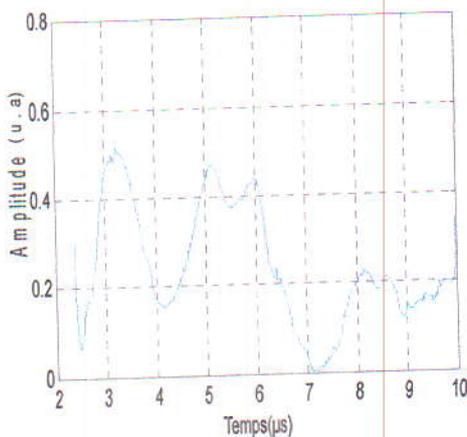


Figure 4.6 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'aluminium

(a) IMF1 (b) IMF2



(a)



(b)

Figure 4.7 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'acier

(a) IMF2 (b) IMF3

En termes de calculs numériques et en vue d'une caractérisation des spécimens étudiés, on calcule le temps de vol entre l'écho de face et l'écho de fond pour le premier spécimen et entre l'écho de face et l'écho du défaut pour le deuxième. Les données sont prises à partir de l'IMF1 pour le signal d'aluminium et l'IMF2 pour le signal d'acier. Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.2.

Echo	Signal d'aluminium		Signal d'acier	
	E_1	E_2	E_1	E_d
IMF	1	1	2	2
Temps (μ s)	57.2	72.9	2.66	4.2
Temps de vol (μ s)	15.7		1.54	
Célérité (m/s)	7643.31		6478.94	

Tableau 4.2 : Calcul de Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (EMD)

Partant des inconvénients de l'EMD, on a proposé de faire une représentation temps-fréquence par la recombinaison des variantes de l'EMD avec la TOC et la HHT (EEMD/TOC, EEMD/HHT, CEEMDAN/TOC et CEEMDAN/HHT), les résultats seront illustrés dans ce qui suit.

4.2. Application des méthodes EEMD/TOC et EEMD/HHT sur les deux signaux

Les Figures 4.8 et 4.10 montrent clairement que l'IMF2, IMF3, IMF4 sont les sous bandes significatives du signal d'aluminium. A partir de ces trois IMFs, on peut détecter/localiser les échos des deux faces avant et arrière en temps et en fréquence, et donc caractériser le spécimen utilisé par le calcul de l e temps de vol.

Les Figures 4.9 et 4.11 montrent l'apparition de l'écho de la première face dans l'IMF4, IMF5, IMF6, et l'écho de défaut dans l'IMF5 et l'IMF6, cela permet de dire que ces trois IMFs sont les sous bandes significatives du signal provenant de l'acier.

A partir des Figures 4.8 et 4.10, on remarque que l'énergie se manifeste avec le changement de couleur. La grande partie de cette énergie est concentrée dans les IMFs significatives et diminue progressivement pour les autres.

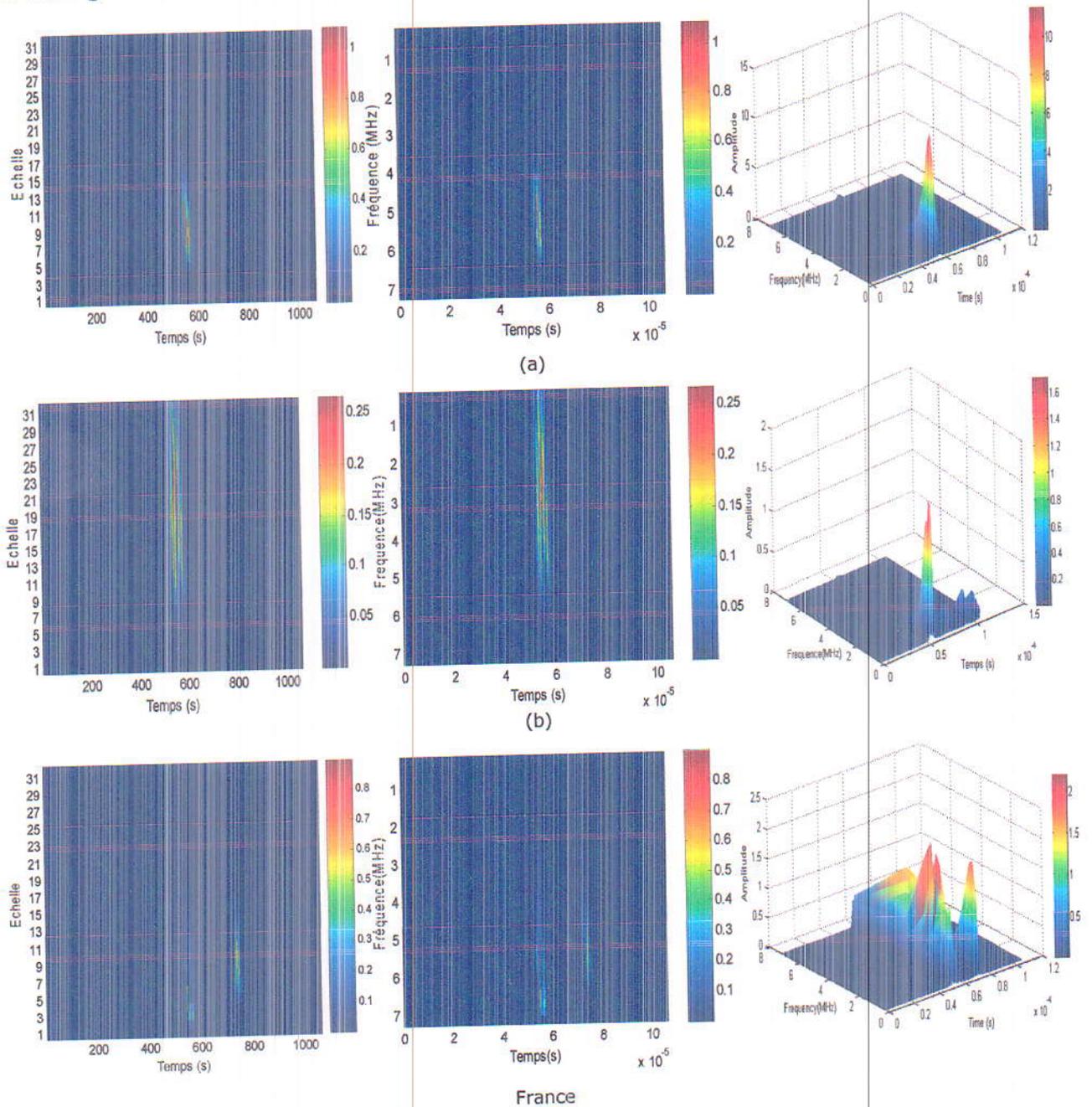


Figure 4.8 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/EEMD du signal d'aluminium
(a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF3

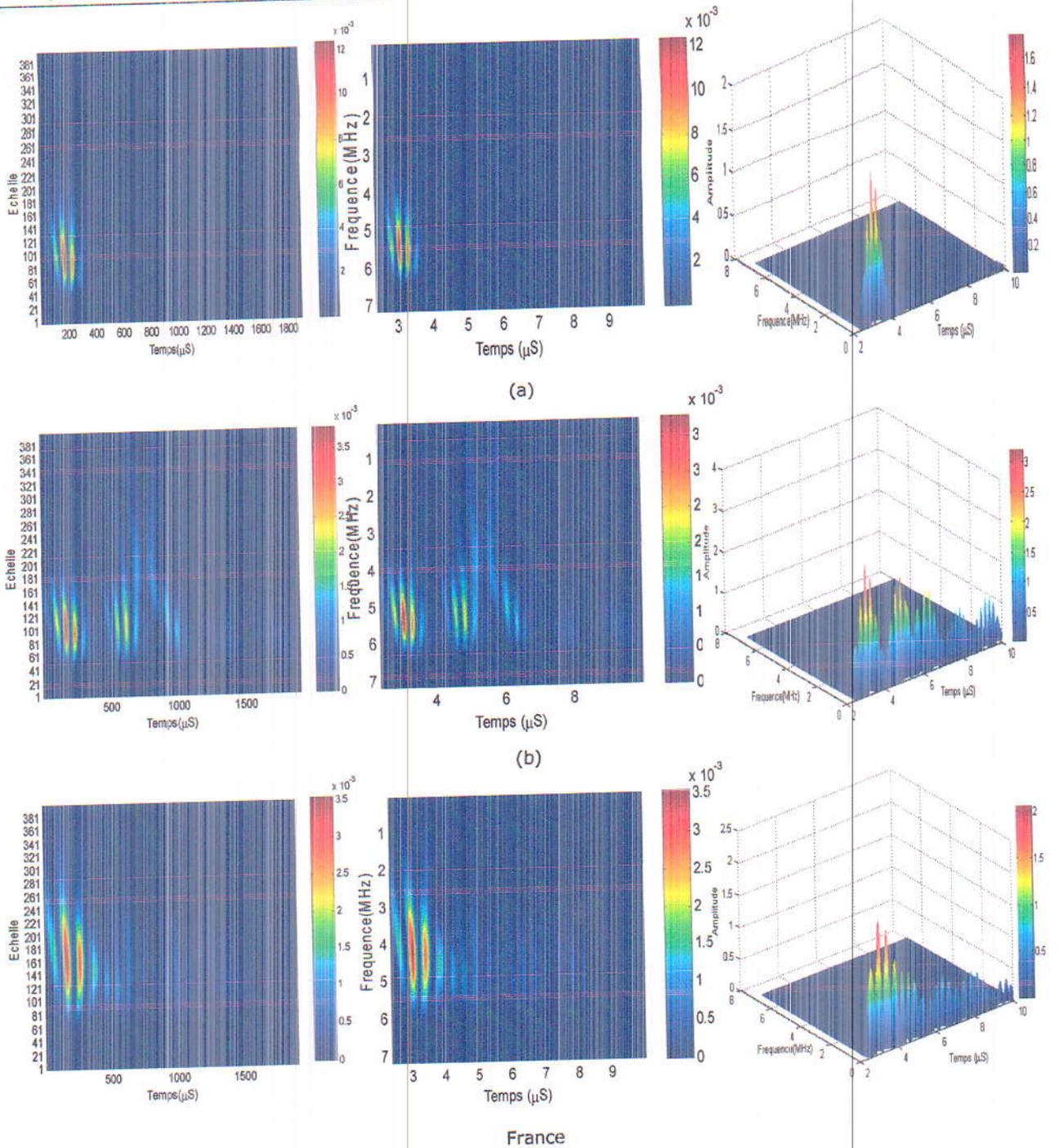


Figure 4.9 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/EEMD du signal d'acier
 (a) IMF4 (b) IMF5 (c) IMF6

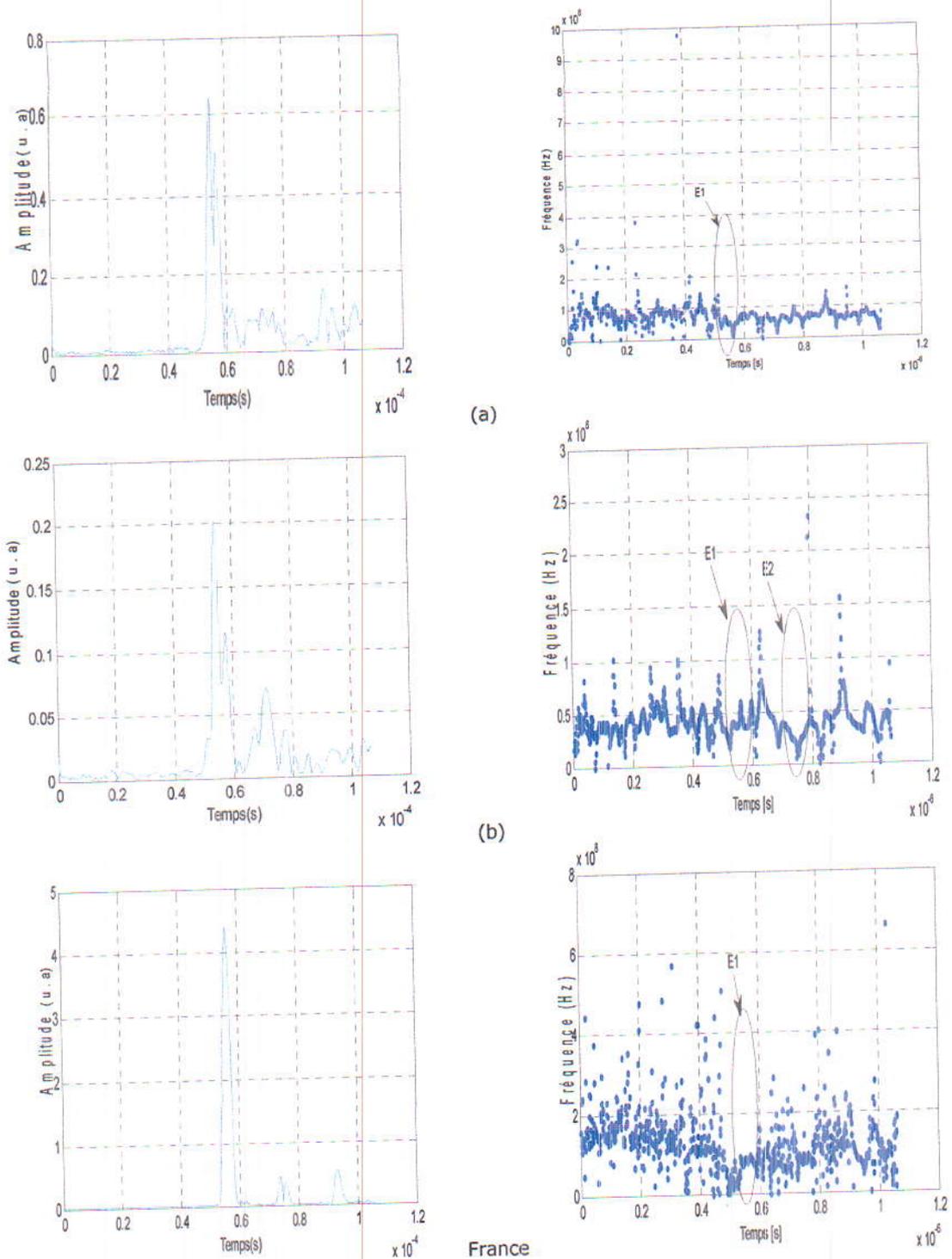


Figure 4.10 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EEMD/HHT du signal d'aluminium
 (a) IMF1 (b) IMF2 (c)IMF3

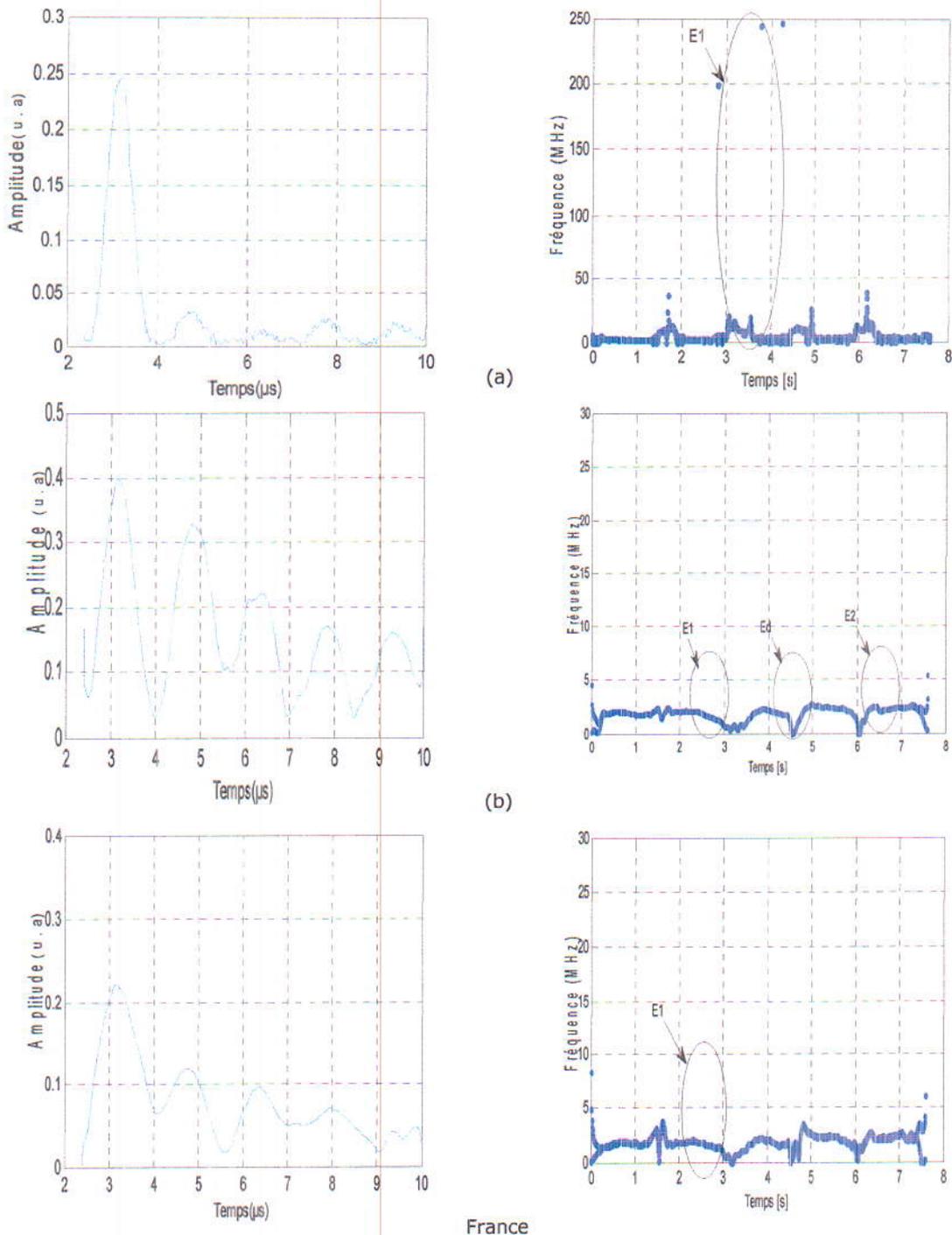


Figure 4.11 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la EMD/HHT du signal d'acier
 H. IMF4 (b) IMF5 (c) IMF6

Pour la caractérisation des spécimens on prend l'IMF2 pour le signal d'aluminium et l'IMF5 pour le signal d'acier et calculer le temps de vol entre l'écho de face et l'écho de fond pour le premier spécimen et entre l'écho de face et l'écho du défaut pour le deuxième. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 4.3.

	Signal d'aluminium		Signal d'acier	
Echo	E_1	E_2	E_1	E_d
IMF	2	2	5	5
Temps (μ s)	55.8	73.7	2.4	4.34
Temps de vol (μ s)	17.9		1.94	
Célérité (m/s)	6818.18		6166.67	

Tableau 4.3 : Calcul du Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (EEMD)

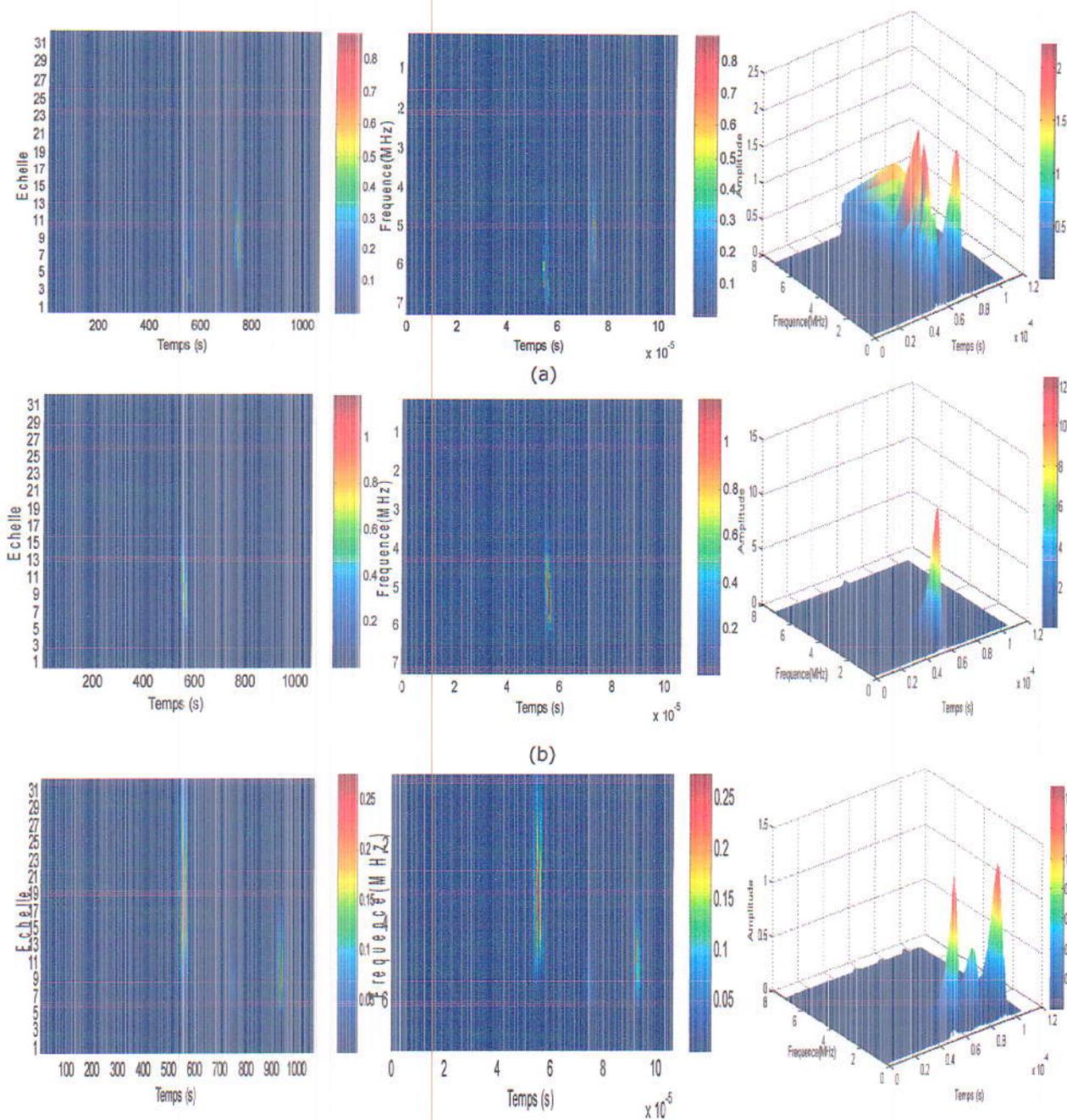
4.3. Application des méthodes CEEMDAN/TOC et CEEMDAN/HHT sur les deux signaux

Les Figures 4.12-4.15 montrent la variation de fréquence observée clairement lors de l'application de la TOC et la HHT.

Les sous bandes significatives du signal d'aluminium sont illustrées dans l'IMF1, IMF2, IMF3 (Figure 4.12 et 4.14). Ces sous bandes permettent de détecter/localiser les échos des deux faces avant et arrière en temps et en fréquence et de calculer la vitesse de vol afin de caractériser le spécimen utilisé.

Les Figures 4.13 et 4.15 montrent l'apparition de l'écho de la première face dans l'IMF3, IMF4, IMF5, et l'écho de défaut dans l'IMF4, ce qui signifie que ces trois IMFs sont les sous bandes significatives du signal d'acier.

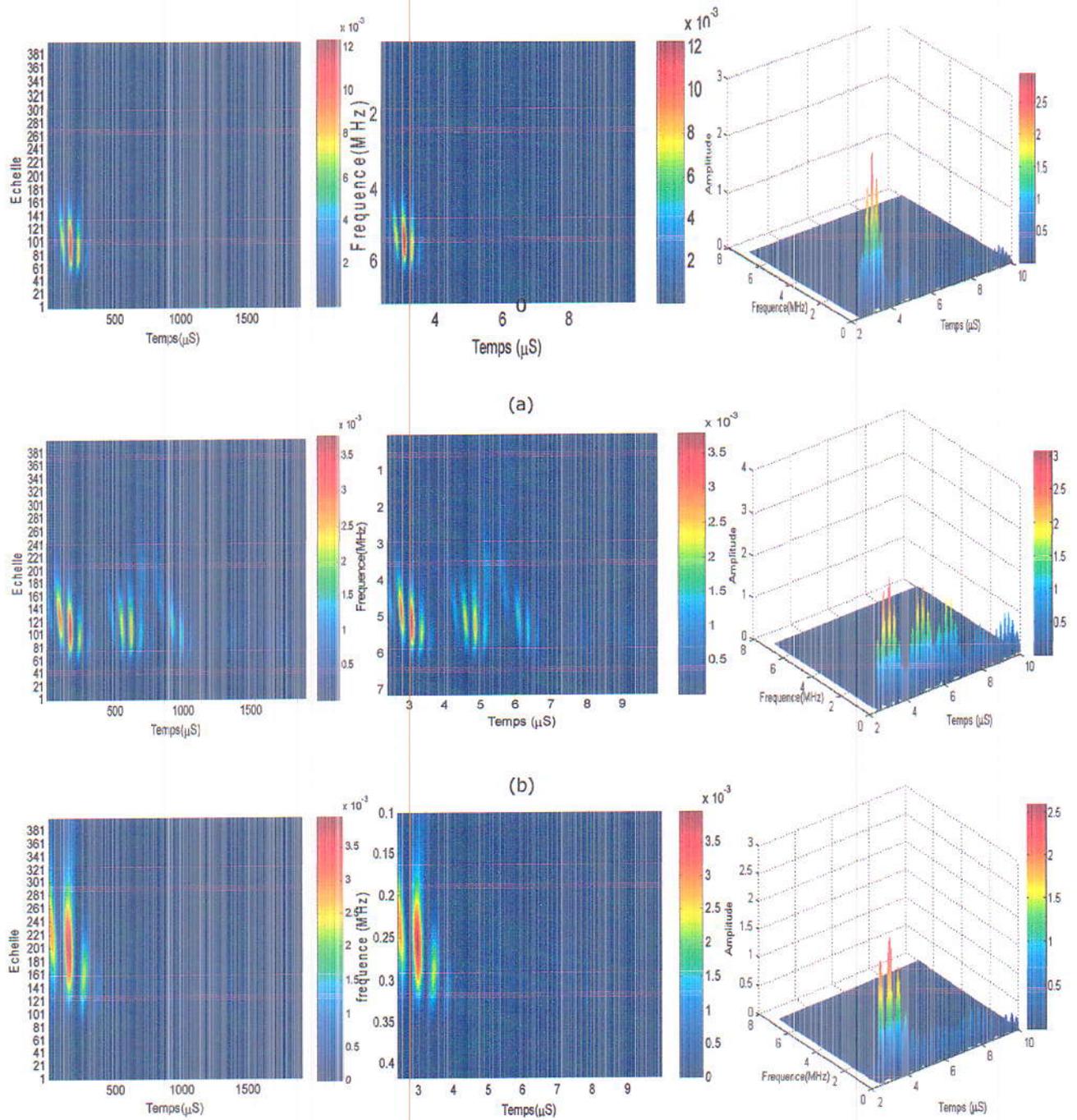
L'énergie est concentrée dans les IMFs significatives des deux signaux et est faible dans les autres IMFs.



France

Figure 4.12 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/CEEMDAN du signal d'aluminium

(a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF3



France

Figure 4.13 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la TOC/CEEMDAN du signal d'acier
(a) IMF3 (b) IMF4 (c) IMF5

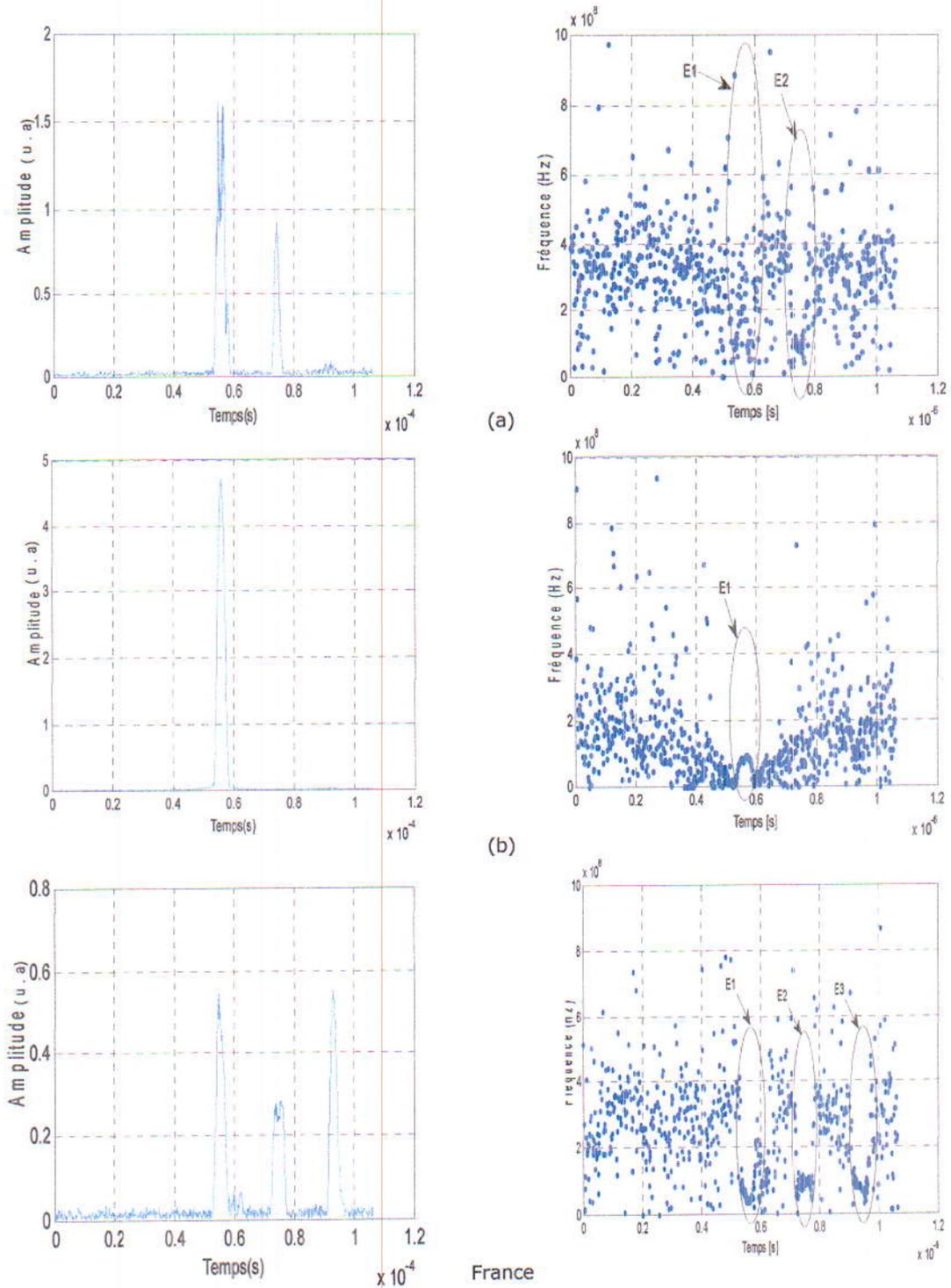


Figure 4.14 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/HHT du signal d'aluminium
 (a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF3

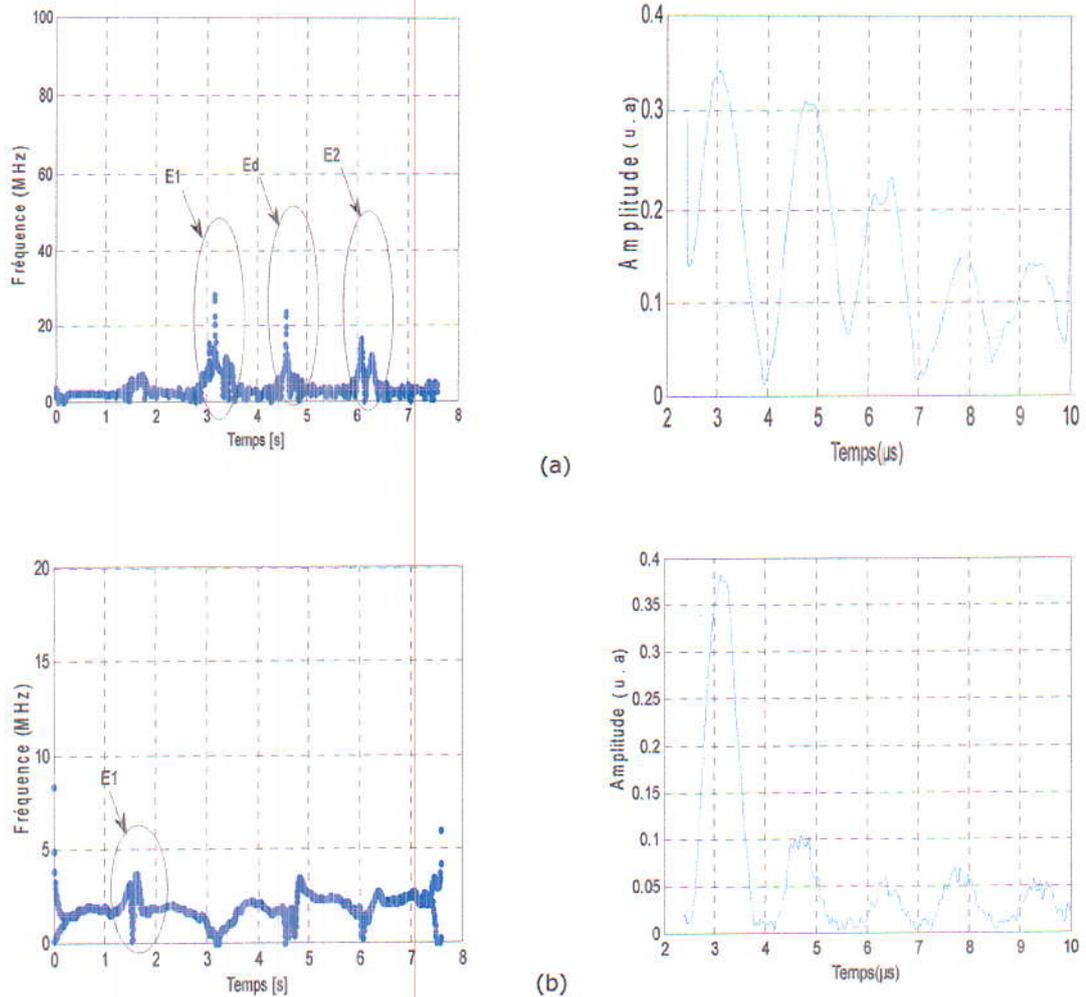


Figure 4.15 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Amplitude et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/HHT du signal d'acier

(a) IMF3 (b) IMF4

On prend l'IMF3 pour chaque signal et on calcule le temps de vol entre l'écho de face et l'écho de fond pour le premier spécimen et entre l'écho de face et l'écho du défaut pour le deuxième. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 4.4.

Echo	Signal d'aluminium		Signal d'acier	
	E_1	E_2	E_1	E_d
IMF	3	3	3	3
Temps (μ s)	55.92	73.84	2.6	4.26
Temps de vol (μ s)	17.92		1.66	
Célérité (m/s)	6693.40		6004.75	

Tableau 4.4 : Calcul de Temps de Vol et Célérité relative au défaut pour les deux pièces respectivement (CEEMDAN)

5. Conclusion

La décomposition modale seule est incapable de séparer les modes contenus dans un seul écho surtout quand ils ont le même comportement fréquentiel en fonction du temps. D'autres méthodes sont alors nécessaires pour effectuer la séparation désirée.

Dans ce chapitre, nous avons combiné la TOC et la HHT à l'algorithme de l'EMD et ses variantes afin d'avoir une représentation temps-fréquence et de déterminer les instants exacts d'apparition des échos. La combinaison de ces méthodes est meilleure de point de vue localisation temporelle et elle permet de vérifier et approfondir les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté des outils de traitement et d'analyse des signaux ultrasonores pour la détection des échos réfléchis lors de la réalisation des essais du CND par ultrasons ainsi que la caractérisation des matériaux. Les échos reçus sont des signaux non-stationnaires, ce qui nous a incitées à choisir des méthodes appropriées pour faire les traitements sur les résultats expérimentaux. Dans ce modeste travail, on a étudié trois méthodes de décomposition, à savoir EMD, EEMD et CEEMDAN pour la séparation des échos. En outre et en vue d'une bonne résolution temps-fréquence, on a appliqué la TOC et HHT combinées avec les trois méthodes de décomposition.

La décomposition modale empirique : intuitive, adaptative, non paramétrique, basée sur l'algorithme de tamisage, décompose chaque signal de la plus haute vers la plus basse fréquence. Cependant, elle donne des résultats moins clairs en présence du fort bruit.

L'application de l'EMD sur des signaux synthétiques, similaires à ceux rencontrés dans le domaine du CND par ultrasons, a montré que cette méthode présente des limitations quant à la séparation des signaux superposés et présente ainsi un mélange de modes en plus de l'apparition de modes redondants.

Les deux variantes ont prouvé leur efficacité en termes de suppression du mélange de modes ainsi que l'élimination du bruit. En outre, la CEEMDAN permet la réduction de l'erreur commise lors de la reconstruction du signal original. Cependant elles présentent toutes des difficultés pour la séparation des échos superposés et la localisation précise des interfaces. Pour réduire ces limitations, on a proposé l'application des algorithmes temps-fréquences pour une meilleure résolution dans les deux domaines.

D'autre part, on a appliqué ces méthodes sur des signaux ultrasonores réels provenant de deux spécimens : l'aluminium et l'acier, pour vérifier les résultats concernant les capacités des méthodes proposées et pour mieux détecter et localiser les échos et calculer de manière exacte les vitesses de propagation.

La méthode EMD et ses variantes permettent de décomposer le signal en plusieurs bandes de fréquences. Cependant, cette décomposition ne permet pas de suivre la variation de la fréquence et de l'amplitude dans le temps. Pour cela, on a appliqué sur les signaux réels deux méthodes :

La HHT qui est une technique simple, puissante et efficace pour traiter, localiser les défauts et/ou caractériser des signaux ultrasonores. Ainsi que la EMD/TOC qui est une combinaison de la transformée en ondelette et l'EMD afin de permettre une bonne estimation des fréquences de chaque motif du signal (détecter le plus petit changement local en signal traité).

La HHT et la TOC ont permis de surmonter le problème de l'EMD et ses variantes. Par ailleurs, nous avons montré que les résultats obtenus par ces deux méthodes sont meilleurs pour la localisation et la caractérisation des matériaux.

Une étude comparative a prouvé la robustesse des performances de ces méthodes en permettant une meilleure localisation de défaut et une bonne caractérisation des matériaux ainsi qu'une convergence relativement rapide et justifiant de ce fait leur adaptabilité dans le CND par ultrasons.

Espérant que ce travail ouvrira quelques pistes pour de futurs travaux, notamment pour l'application d'autres méthodes à caractères temps-fréquences.

Références

- [1] <https://tpe1echo.wordpress.com/category/3-principe-les-ultrasons/>
- [2] <http://www.cochlea.eu/son>
- [3] D. KOLB, « Contrôle par ultrasons », Licence Pro Métrologie/Qualité – Initiation au contrôle des matériaux, Mis à jour le 06/12/10.
- [4] http://www.memoireonline.com/03/13/7074/m_Etude-dunechographe-GE-Vivid-3N-Proexpert3.html
- [5] Ewen CARCREFF, « Déconvolution adaptative pour le contrôle non destructif par ultrasons », Thèse Doctorat, Université de Nantes Angers Le Mans, 28 novembre 2014.
- [6] N.GRENIER-GH, Pellegrin Tripole-Bordeaux, « Imagerie ultrasonore, Edition Eyrolles », France 2003.
- [7] CHOUA Yahya, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », Thèse Doctorat en physique, Université de PARIS-SUD11, 01 octobre 2009.
- [8] HAMEL Meziane, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par méthodes électromagnétiques », Mémoire de Magister, Université de MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, 18 octobre 2012.
- [9] Abdessalem BENAMMAR, « Etude et implémentation d'outils de traitement de signal dans la détection des imperfections multiples noyées dans le bruit. Application au contrôle ultrasonore des matériaux. », Mémoire de Magister en Electronique, Université de Saâd DAHLEB. Blida, 2004.
- [10] DRAI Redouane, « TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES SIGNAUX ULTRASONORES APPLIQUEES AU France NON DESTRUCTIF DES MATERIAUX », Thèse Doctorat en Electronique, Université de Houari Boumediene USTHB – ALGER, 16 Février 2005.
- [11] Thomas OBERLIN, « Différentes méthodes pour la décomposition modale empirique », Rapport de TER, 20 mai 2009.

- [12] Abdoulaye Thioune, « Décomposition Modale Empirique et Décomposition Spectrale Intrinsèque : Applications en traitement du signal et de l'image », Thèse Doctorat , Université Paris Est Val-de-Marne Créteil, 19 Novembre 2015.
- [13] HAMDAD Nassima, « Transformée de Huang-Hilbert : Application à la détection des défauts », Mémoire de Magister, Université de MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU, 07 Mars 2003.
- [14] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung et H.H. Liu: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, 454 :903–995, 1998.
- [15] Jean-Christophe Cexus, « Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang-Teager (THT) », Thèse de Doctorat en Traitement du signal et Télécommunications, Université de Rennes 1, 12 décembre 2005.
- [16] Thomas OBERLIN, « Approches mathématiques pour la décomposition modale empirique », Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [17] Zhang J., Yan R., Gao R. X., Feng Z., Performance enhancement of ensemble empirical mode decomposition, *Mechanical Systems and Signal Processing.*, 24 (7): 2104-2123, 2010.
- [18] MOHGUEN Wahiba, « Améliorations de la méthode EEMD », Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF-1- UFAS, ALGERIE, 19 octobre 2014.
- [19] Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G. and Flandrin P., A Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise. *IEEE Ann. Int. Conf. on acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP'11.*, 4144-4147, 2011.
- [20] R. Demirli, *Student Member, IEEE*, and J. Saniie, *Senior Member, IEEE*, « Model-Based Estimation of Ultrasonic Echoes Part I: Analysis and Algorithms », *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 48, no. 3, mai 2001.

- [21] Y. Lu, R. Demirli and J. Saniie, « A Comparative Study of Echo Estimation Techniques for Ultrasonic NDE Applications », *IEEE Proceedings of Ultrasonic Symposium*, Vancouver, 2-6 Octobre 2006, pp. 536-539.
- [22] F. Tafnine, B. Ouazine , A. Houacine, « Détection de petits défauts en CND par filtrage des échos ultrasonores dans le domaine Temps-Echelle », Université A/Mira Bejaia et USTHB Alger, Algérie, 27-31 Mars 2005.
- [23] El Houssin El Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Jean Frédéric Charpentier, « Etude Comparative des Techniques de Traitement du Signal Non-Stationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes », Université de Brest, France, décembre 2011.
- [24] D. Duhamel, « Analyse des signaux », Cours Acoustique
- [25] H.MAHGOUN, « ANALYSE NON STATIONNAIRE DES SIGNAUX VIBRATOIRES DANS LA SURVEILLANCE DES MACHINES ET LA PREVENTION DES DEFAILLANCES », Thèse Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF1, 13juin 2013.
- [26] René Alt, « LA TRANSFORMATION EN ONDELETTES », Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- [27] Valérie Perrier, « Application de la théorie des ondelettes », Enseignement UNESCO Traitement du signal et des images numériques, Tunis, ENIT, 14-18 mars 2005.

Résumé

Le Contrôle Non Destructif (CND) est une étape importante du processus industriel. Il permet de contrôler l'intégrité des composants sans les endommager. L'objectif de ce mémoire est de fournir des outils de traitement du signal permettant d'accomplir un diagnostic précoce des pièces inspectées en vue d'une caractérisation et/ou détection et localisation de défauts.

Pour atteindre cet objectif, on a étudié la méthode EMD ainsi que deux de ses variantes améliorées: l'EEMD et la CEEMDAN. Ensuite, on a appliqué ces méthodes sur des signaux de synthèse puis sur des signaux réels collectés à partir de deux échantillons : un cube d'aluminium (sans défaut) et une plaque d'acier (avec défaut). Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation individuelle de ces méthodes n'est pas assez efficace pour une bonne analyse des pièces considérées. Afin d'améliorer la résolution, on a proposé l'utilisation d'une représentation Temps-Fréquence moyennant deux méthodes : la Transformée de Hilbert-Huang (HHT) et la Transformée en Ondelettes Continue (TOC) combinées avec l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN.

Une étude comparative a prouvé la robustesse des performances de ces méthodes en termes de l'erreur de reconstitution du signal, du *RMSE* et du nombre d'échantillons ainsi qu'une convergence relativement rapide et justifiant de ce fait leur adaptabilité dans le CND par ultrasons. La CEEMDAN a prouvé sa supériorité quant à la détection et la localisation des échos et le calcul de manière exacte des vitesses de propagation.

Mots clés : CND, Ultrasons, Pulse-Echo, Localisation, Détection, Caractérisation, EMD, EEMD, CEEMDAN, HHT, TOC.