

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Electronique**

Thèse Présentée

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Par : Hassina MERDJANA

Thème

**Contribution à la Résolution des Problèmes Liés à la
Détection, Modélisation et Caractérisation des Défauts
par des Traitements de Signaux**

Soutenue le : **18 /01/2018**, devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------------|------------|----------------------|------------|
| Toufik BOUDEN | Professeur | Université de Jijel | Président |
| Abdelkrim BOUKABOU | Professeur | Université de Jijel | Rapporteur |
| Djamel BENATIA | Professeur | Université de Batna | Examineur |
| Djalil BOUDJEHEM | Professeur | Université de Guelma | Examineur |

Remerciements

A mon directeur de thèse, Mr Abdelkrim BOUKABOU,

Je suis profondément touchée par le grand honneur que vous m'avez fait en acceptant de diriger cette thèse. Permettez-moi de vous manifester ma grande admiration pour votre compétence et vos qualités humaines. Merci pour votre aide précieuse, vos conseils judicieux et vos encouragements incessants. Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner de ma grande reconnaissance et ma profonde estime.

A Mr Toufik BOUDEN, le président du jury,

Vous me faites un grand honneur en acceptant de siéger au jury de cette thèse. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mes sincères reconnaissances et respects.

A Mr Djamel BANATIA et Mr Djalil BOUDJEHEM,

Ravie et fière de l'honneur que vous me faites en acceptant aimablement d'être les examinateurs de ce travail et je vous remercie vivement d'avoir accepté de le juger. Puisse ce travail vous satisfaire.

A M^{elle} Samira DIB et Mr Morad GRIMES,

Je vous remercie pour vos aides précieuses et vos conseils avisés qui m'ont permis d'enrichir mes travaux de recherche. Veuillez trouver ici l'expression de mes grands estimes et remerciements.

A mes collègues du laboratoire NDT de l'université de Jijel que je remercie vivement, plus particulièrement Samira DIB, Morad GRIMES, Sofiane HADDAD et Toufik BENKEDIDAH.

A mes collègues du département d'Electronique de l'Université de Jijel que je remercie pour l'ambiance sympathique et le climat de confiance, en particulier Riad REMMOUCHE.

Enfin, mes remerciements iront à toutes les personnes dont l'empreinte restera dans ce dit travail plus encore dans ma mémoire, pour leurs conseils, leur aide, leur générosité, leur compréhension, leurs motivations,...

Ma reconnaissance s'adresse à ma famille qui a su m'apporter, sans relâche, les soutiens durant toutes ces longues années de dur labeur.

A Tous, un Grand Merci.

Dédicaces

A mon Père et ma Mère,

Aucune dédicace ne pourra traduire mon profond amour et gratitude pour l'affection que vous m'avez offerte. Vos sacrifices illimités, vos encouragements et vos prières ont été pour moi source de zèle et gage de réussite.

J'espère être digne et à la hauteur de votre confiance et de vos espérances.

A mes chers frères et sœurs,

Que cette thèse soit un témoignage de la profondeur des sentiments d'amour, de considération et de respect que j'éprouve à vos égards.

A mon mari,

Que ce modeste travail puisse traduire la profondeur de l'amour, du respect et de la reconnaissance infinie que je porte pour toi.

A mes chers enfants,

Takoua, Doha, Nouha et le petit Ahmed Taha.

Je prie Allah le tout puissant de vous protéger et de vous accorder réussite et bonheur.

A mes chers neveux et nièces,

Que ce travail soit le témoignage de ma gratitude et de ma grande estime.

A mon amie et sœur Samira DIB

Que ton sourire durera aussi longtemps que tu vivras.

A tous mes amis

Que vous trouverez dans ce travail, l'expression de ma sincère reconnaissance pour votre disponibilité et votre gentillesse.

Résumé

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.

Nous nous intéressons dans cette thèse 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 estimer des paramètres physiques propres, tels que la vitesse des ondes. L'analyse du signal ultrasonore peut 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 afin d'améliorer la résolution du signal, prouvant ainsi leur efficacité en CND.

Dans le but d'évaluer les propriétés élastiques des matériaux pour une éventuelle caractérisation, un système de mesure non destructif basé sur le principe de conversion de mode, a été utilisé pour la détermination simultanée des vitesses des ondes longitudinale et transversale.

Mots clés : CND, Ultrasons, Pulse-écho, Caractérisation des matériaux, Localisation et Détection de défauts, EMD, CEEMDAN, TOC, TFCT, Technique du prisme, Estimation, Algorithme EM.

Abréviations

| | |
|----------------|---|
| <i>CND</i> | Contrôle Non Destructif |
| <i>EMD</i> | Empirical Mode Decomposition |
| <i>EEMD</i> | Ensemble Empirical Mode Decomposition |
| <i>CEEMDAN</i> | Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise |
| <i>SP</i> | Sifting Process |
| <i>IMF</i> | Intrinsic Mode Function |
| <i>SD</i> | Standard Deviation |
| <i>SNR</i> | Signal to Noise Ratio |
| <i>RMSE</i> | Root Mean Squared Error |
| <i>AM</i> | Amplitude Modulation |
| <i>FM</i> | Frequency Modulation |
| <i>RTF</i> | Représentation temps-fréquence |
| <i>NDT</i> | Non Destructif Testing |
| <i>TOC</i> | Transformée en Ondelettes Continue |
| <i>FI</i> | Fréquence instantanée |
| <i>AI</i> | Amplitude instantanée |
| <i>TFCT</i> | Transformée de Fourier à court terme |
| <i>EM</i> | Expectation-Maximization algorithm |
| <i>Onde P</i> | Onde Longitudinale |
| <i>Onde S</i> | Onde Transversale |

Notations

| | |
|----------------|-------------------------------|
| f | Fréquence de propagation |
| λ | Longueur d'onde |
| v | Vitesse de propagation |
| z | Impédance acoustique |
| ρ_m | 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_{att} | Coefficient d'atténuation |
| $b_i(t)$ | Bruit blanc gaussien |
| $e(t)$ | Erreur de reconstruction |
| τ | Temps d'arrivée |
| α | Facteur de bande passante |
| f_c | Fréquence centrale |
| β | Amplitude |
| φ | Phase |
| $RMSE$ | Erreur quadratique |
| ψ | Ondelette |

| | |
|----------------------|---|
| a | Paramètre d'échelle (dilatation) |
| b | 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 d'excitation |
| E_2 | Echo de face |
| E_3 | Echo de fond |
| E_d | Echo de défaut |
| $V_{p,s}$ | Vitesses longitudinale et transversale |
| $T_{p,s}$ | Temps d'arrivée des ondes longitudinale et transversale |
| a | Face du prisme |
| λ_a | Coefficient de Lamé |
| μ | Module de cisaillement |
| ρ | Densité |
| E | Module d'young |
| σ | Coefficient de Poisson |
| θ | vecteur de paramètres à estimer |
| θ_{crT} | Angle critique de l'onde transversale |
| θ_{crL} | Angle critique de l'onde longitudinale |
| $f(x \theta)$ | Fonction de densité de probabilité |

Table Des Matières

| | |
|---------------------------------|------|
| Sommaire | v |
| Liste Des Figures | ix |
| Liste Des Tableaux | xiii |

Introduction Générale

| | |
|---|---|
| 1. Contexte et problématique de la thèse..... | 2 |
| 2. Organisation du manuscrit..... | 5 |

Chapitre 1

Généralités Sur Le Contrôle Non Destructif Et Les ultrasons

| | |
|--|----|
| 1.Introduction et historique | 7 |
| 2. Intéret et domaines d'utilisation du contrôle non destructif..... | 7 |
| 3. Méthodes du contrôle non destructif..... | 8 |
| 4. Généralités sur les ultrasons | 10 |
| 4.1. Définition..... | 10 |
| 4.2. Paramètres de l'onde ultrasonore | 11 |
| 4.3. Types d'ondes ultrasonores | 12 |
| 5. Production des ultrasons..... | 15 |
| 5.1. Le transducteur piézoélectrique..... | 15 |
| 5.2. Différents types de transducteurs..... | 16 |
| 5.3. Faisceau ultrasonore..... | 17 |
| 6. Intéraction de l'onde et de la matière | 18 |
| 6.1. Atténuation des ondes ultrasonores | 18 |
| 6.2. Intéraction des ultrasons et d'une interface..... | 19 |
| 6.2.1. Notion d'interface acoustique..... | 19 |
| 6.2.2. Incidence normale..... | 19 |
| 6.2.3. Incidence oblique..... | 21 |
| 6.2.4. Conversion de modes..... | 21 |
| 6.2.5. Notion d'angle critique..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 7. Mode de représentation des ultrasons..... | 25 |
| 8. Utilisation des ultrasons..... | 27 |
| 9. Choix de la technique de controle | 28 |
| 9.1. Méthode Pulse-écho..... | 28 |
| 10. Détection des défauts | 30 |
| 10.1 Principe de la détection des défauts..... | 32 |
| 11. Conclusion | 33 |

Chapitre 2

Les Méthodes EMD, EEMD Et CEEMDAN – Théorie Et Simulation

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 35 |
| 2. Décomposition Modale Empirique (EMD) | 35 |
| 2.1.Principe de l'EMD | 36 |
| 2.2.Propriétés fondamentales de l'EMD..... | 37 |
| 2.3. Description de l'algorithme de EMD | 39 |
| 2.4. Processus de tamisage..... | 40 |
| 2.5. Critère d'arrêt..... | 43 |
| 3. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble (EEMD) | 44 |
| 3.1. Principe et Algorithme..... | 44 |
| 4. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble Complet (CEEMDAN)..... | 46 |
| 4.1. Principe et Algorithme..... | 46 |
| 5. Simulation et Résultats..... | 48 |
| 5.1. Modèle d'un signal ultrasonore..... | 48 |
| 5.2. Analyse du signal simulé | 49 |
| 5.3. Application de l'EMD sur le signal simulé | 50 |
| 5.4. Application de l'EEMD sur le signal simulé | 54 |
| 5.5. Application de la CEEMDAN sur le signal simulé..... | 57 |
| 6. Reconstruction du signal et estimation de l'erreur..... | 60 |
| 6.1. Etude comparative..... | 60 |
| 7. Analyse des résultats expérimentaux..... | 61 |
| 7.1. Expérience 01 | 61 |
| 7.1.1. Déroulement de l'expérience | 61 |
| 7.1.2. Description du système de mesure | 62 |

| | |
|--|----|
| 7.1.3. Caractérisation du matériau | 63 |
| 7.1.4. Analyse du signal réel d'Aluminium | 64 |
| 7.2. Expérience 02..... | 69 |
| 7.2.1. Déroulement de l'expérience et description du système de mesure | 69 |
| 7.2.2. Caractérisation du matériau | 70 |
| 7.2.3. Analyse du signal réel d'Acier..... | 71 |
| 8. Interprétation des résultats | 75 |
| 9. Conclusion | 76 |

Chapitre 3

Techniques Adaptatives Pour Signaux Non Stationnaires

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 78 |
| 2. Transformée de Fourier à court terme (TFCT) | 78 |
| 2.1. Intérêt de la TFCT pour les signaux ultrasonores | 79 |
| 2.2. Définition | 79 |
| 2.3. Spectrogramme..... | 80 |
| 2.4. Principe d'incertitude d'Heisenberg..... | 81 |
| 2.5. Les fonctions de fenêtrage..... | 82 |
| 2.6. Description de l'algorithme..... | 83 |
| 3. Analyse du signal simulé..... | 83 |
| 3.1. Application de la TFCT au signal simulé..... | 83 |
| 3.2. Combinaison de l'EMD et la TFCT au signal simulé..... | 86 |
| 4. Transformée en ondelettes continue..... | 89 |
| 4.1. Définition | 89 |
| 4.2. Scalogramme | 90 |
| 4.3. Principe de l'algorithme..... | 91 |
| 5. Application de la combinaison EMD/TFCT et EMD/TOC pour le CND..... | 93 |
| 5.1. Combinaison EMD/TFCT sur les deux signaux réels..... | 94 |
| 5.1.1. Combinaison EMD/TFCT et CEEMDAN/TFCT sur le signal réel d'aluminium..... | 94 |
| 5.1.2. Combinaison EMD/TFCT et CEEMDAN/TFCT sur le signal réel d'acier..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| 5.2. Combinaison EMD/TOC sur les deux signaux réels..... | 99 |
| 5.2.1. Combinaison EMD/TOC pour les deux signaux réels..... | 99 |
| 5.2.2. Combinaison EEMD/TOC pour les deux signaux réels..... | 102 |
| 5.2.3. Combinaison CEEMDAN/TOC pour les deux signaux réels..... | 105 |
| 6. Conclusion | 108 |

Chapitre 4

Estimation Des Propriétés Élastiques Pour La Caractérisation Des Matériaux

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction | 110 |
| 2. Technique du prisme | 110 |
| 3. Modèle d'un signal ultrasonore | 112 |
| 4. Estimation de la vraisemblance maximale..... | 113 |
| 5. Algorithme Espérance-Maximisation EM..... | 113 |
| 5.1. Aspect théorique | 114 |
| 5.2. Organigramme..... | 116 |
| 5.3. Implémentation de l'algorithme | 117 |
| 5.4. Remarques..... | 118 |
| 6. Dispositif expérimental | 118 |
| 6.1. Données expérimentales..... | 119 |
| 6.2. Déroulement de l'expérience | 120 |
| 7. Résultats de simulation et discussions | 120 |
| 7.1. Détermination des angles critiques | 120 |
| 7.2. Procédé d'estimation | 122 |
| 8. Conclusion | 129 |

Conclusion Générale Et Perspectives

| | |
|--|-----|
| 1. Conclusion générale | 132 |
| 2. Perspectives..... | 133 |
| Annexe | 135 |
| Références Bibliographiques | 138 |

Liste Des Figures

| | | |
|-------------|--|----|
| 1.1 | Contrôle non destructif par Ultrasons..... | 9 |
| 1.2 | Fréquence du son | 10 |
| 1.3 | Onde longitudinale | 13 |
| 1.4 | Onde transversale | 13 |
| 1.5 | Transducteur droit | 16 |
| 1.6 | Transducteur focalisé | 17 |
| 1.7 | Géométrie d'un faisceau ultrasonore..... | 17 |
| 1.8 | Exemples d'atténuation des ondes ultrasonores dans l'eau et le plexiglas | 19 |
| 1.9 | Réflexion et transmission d'onde à incidence normale | 20 |
| 1.10 | Réflexion et transmission d'onde à incidence oblique | 21 |
| 1.11 | Conversion de mode d'une onde longitudinale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2 | 23 |
| 1.12 | Conversion de mode d'une onde transversale incidente dans le milieu1 à l'interface avec le milieu 2..... | 24 |
| 1.13 | Angles critiques pour une incidence longitudinale ou transversale..... | 25 |
| 1.14 | Acquisition de données ultrasonores avec représentation A-Scan..... | 26 |
| 1.15 | Exemple de signal A-Scan..... | 27 |
| 1.16 | Méthode Pulse-écho..... | 29 |
| 1.17 | Contrôle par contact..... | 30 |
| 1.18 | Contrôle par immersion..... | 30 |
| 2.1 | Organigramme du pseudo-code de l'EMD..... | 42 |
| 2.2 | Organigramme de la méthode EEMD..... | 45 |
| 2.3 | Organigramme de la méthode CEEMDAN..... | 47 |
| 2.4 | Signal simulé et sa représentation spectrale | 50 |
| 2.5 | Les IMFs du signal simulé | 51 |
| 2.6 | Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à <i>gauche</i> et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite | 52 |
| 2.7 | Signal simulé bruité et sa représentation spectrale..... | 52 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 2.8 | Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité à droite..... | 53 |
| 2.9 | Les modes du signal simulé | 55 |
| 2.10 | Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite | 56 |
| 2.11 | Les modes du signal simulé..... | 58 |
| 2.12 | Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à droite et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à gauche | 59 |
| 2.13 | Système de mesure : schéma synoptique à gauche et vue générale de l'appareil de mesure à droite..... | 62 |
| 2.14 | Superposition du signal émis et l'écho reçu..... | 63 |
| 2.15 | Les IMFs du signal reçu par les trois méthodes..... | 65 |
| 2.16 | Superposition des deux premières IMFs obtenues par EMD avec le signal reçu..... | 66 |
| 2.17 | Superposition des deux premières IMFs obtenues par EEMD avec le signal reçu..... | 66 |
| 2.18 | Superposition des deux premières IMFs obtenues par la CEEMDAN..... | 67 |
| 2.19 | Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) pour l'EEMD (b) pour la CEEMDAN | 67 |
| 2.20 | Erreur de reconstruction (a) EEMD (b) CEEMDAN..... | 68 |
| 2.21 | Système de mesure : schéma synoptique à gauche et vue générale de l'appareil de mesure à droite..... | 69 |
| 2.22 | Echo reçu de l'échantillon d'acier..... | 70 |
| 2.23 | Les IMFs du signal reçu obtenu par les trois méthodes..... | 72 |
| 2.24 | Superposition des deux premières IMFs obtenues par EMD avec le signal reçu | 73 |
| 2.25 | Superposition des trois premières IMFs obtenues par EEMD avec Le signal reçu..... | 73 |
| 2.26 | Superposition des trois premières IMFs obtenues par la CEEMDAN avec le signal reçu..... | 73 |
| 2.27 | Les IMFs en fonction du nombre d'itérations (a) pour l'EEMD | |

| | |
|---|-----|
| (b) pour la CEEMDAN..... | 74 |
| 2.28 Erreur de reconstruction : (a) EEMD (b) CEEMDAN..... | 74 |
| 3.1 Principe de la TFCT | 80 |
| 3.2 Exemple d'un spectrogramme..... | 81 |
| 3.3 Résolution temps fréquence du spectrogramme | 82 |
| 3.4 Analyse par TFCT pour différentes tailles de la fenêtre rectangulaire..... | 84 |
| 3.5 Analyse par TFCT pour différentes tailles de la fenêtre de Hamming..... | 85 |
| 3.6 Analyse par TFCT pour différentes tailles de la fenêtre de Hanning..... | 85 |
| 3.7 Principe de l'EMD et la TFCT | 86 |
| 3.8 Représentation énergétique de l'IMF1 pour différentes tailles de La fenêtre d'analyse..... | 87 |
| 3.9 Représentation énergétique de l'IMF2 pour différentes tailles de La fenêtre d'analyse..... | 88 |
| 3.10 Représentation énergétique de l'IMF3 pour différentes tailles de La fenêtre d'analyse..... | 88 |
| 3.11 Exemples d'ondelettes..... | 90 |
| 3.12 Résolution en temps et en échelle du scalogramme..... | 90 |
| 3.13 Organigramme de la combinaison EMD/TOC..... | 93 |
| 3.14 Spectrogrammes de l'IMF1 et l'IMF2 par la fenêtre de Hanning avec N = 100..... | 95 |
| 3.15 Spectrogramme 3D du signal reçu et des IMFs..... | 95 |
| 3.16 Spectrogramme du signal reçu et les IMFs obtenues par CEEMDAN avec la fenêtre de Hanning avec N = 100..... | 97 |
| 3.17 Spectrogramme 3D du signal reçu, l'IMF3 et l'IMF4..... | 98 |
| 3.18 Représentation temps-échelle et temps-fréquence et le spectrogramme 3D utilisant EMD/TOC du signal d'Aluminium | 100 |
| 3.19 Représentation temps-échelle et temps-fréquence et le spectrogramme 3D utilisant EMD/TOC du signal d'Acier..... | 101 |
| 3.20 Représentation temps-échelle et temps-fréquence utilisant la EEMD/TOC du signal d'Aluminium..... | 103 |
| 3.21 Représentation temps-échelle et temps-fréquence utilisant la EEMD/TOC du signal d'Acier..... | 104 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 3.22 | Représentation temps-échelle et temps-fréquence utilisant la CEEMDAN/TOC du signal d'Aluminium..... | 106 |
| 3.23 | Représentation temps-échelle et temps-fréquence utilisant la CEEMDAN/TOC du signal d'Acier..... | 107 |
| 4.1 | Technique du prisme..... | |
| 4.2 | Algorithme EM..... | 111 |
| 4.3 | Vue générale du système de mesure et Schéma synoptique..... | 116 |
| 4.4 | Intensité des coefficients de réflexion et de transmission pour (a) Aluminium (b) Pate de ciment..... | 119 |
| 4.5 | Signaux expérimentaux recueillis pour (a) Aluminium (b) Pate de Ciment..... | 121 |
| 4.6 | Zoom des ondes réfléchies longitudinale et transversale pour l'Aluminium (b) la Pâte de Ciment..... | 122 |
| 4.7 | Superposition des signaux expérimental et simulé | 123 |
| 4.8 | Echos simulés et séparés pour l'Aluminium (a) Echo de face, (b) Onde longitudinale, (c) Réflexions multiples et (d) Onde transversale | 124 |
| 4.9 | Echos simulés et séparés pour la pâte de ciment (a) Echo de face, (b) Onde longitudinale, (c) Réflexions multiples et (d) Onde transversale ... | 125 |
| 4.10 | Localisation temporelle et amplitudes des échos rétrodiffusés pour (a) l'Aluminium (b) la Pâte de Ciment..... | 126 |
| | | 128 |

Liste Des Tableaux

| | | |
|------------|---|-----|
| 1.1 | Impédance dans quelques milieux..... | 11 |
| 1.2 | Célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents Milieux usuels..... | 14 |
| 2.1 | Pseudo-code de l'EMD..... | 41 |
| 2.2 | Paramètres du signal simulé..... | 49 |
| 2.3 | Erreur quadratique de reconstruction pour les trois méthodes..... | 61 |
| 2.4 | Calcul de la vitesse de propagation dans l'Aluminium pour les trois méthodes..... | 68 |
| 2.5 | Calcul de la vitesse de propagation dans l'Acier pour les trois méthodes..... | 73 |
| 3.1 | Pseudo-code de la méthode EMD/TOC | 92 |
| 3.2 | Paramètre des différents échos..... | 97 |
| 3.3 | Calcul du temps de vol et célérité relative pour les deux échantillons Pour l'EMD..... | 102 |
| 3.4 | Calcul du temps de vol et célérité relative pour les deux échantillons pour l'EEMD..... | 105 |
| 3.5 | Calcul du temps de vol et célérité relative pour les deux échantillons pour la CEEMDAN..... | 108 |
| 4.1 | Paramètres estimés des échos rétrodiffusés pour l'Aluminium | 127 |
| 4.2 | Paramètres estimés des échos rétrodiffusés pour la pâte de Ciment... | 127 |
| 4.3 | Valeurs des paramètres estimés pour l'Aluminium et la Pâte de Ciment..... | 129 |

Introduction Générale

-
1. Contexte et problématique de la thèse
 2. Organisation du manuscrit
-

1. Contexte et problématique de la thèse

La détection des défauts dans les matériaux est une phase nécessaire dans le contrôle des systèmes d'ingénierie pour leur usage sûr et réussi dans des situations pratiques. Le processus par lequel les propriétés des matériaux sont étudiées d'une manière non destructive (sans endommager les matériaux) est appelé contrôle non destructif.

Le Contrôle Non Destructif (CND) s'effectue généralement à deux niveaux distincts. En premier lieu, il intervient massivement lors de la phase de prototypage. En effet, c'est tout le processus de production d'une pièce qui est étudié puisqu'il faut vérifier que les procédés de fabrication sont fiables et ne sont pas à l'origine d'anomalies structurelles internes. En second lieu, le contrôle non destructif intervient en production. Ici, il permet de valider la fiabilité de la technologie de production en effectuant régulièrement des prélèvements pour analyse. Il présente un avantage majeur : comme il n'y a pas destruction de l'élément testé, celui-ci n'est pas sacrifié s'il donne satisfaction.

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.

Ces méthodes sont en perpétuelle évolution afin de répondre aux besoins de plus en plus croissants des industriels. A cet effet, différentes techniques du CND, plutôt complémentaires que concurrentes, ont été développées et admettent en outre, des champs d'application très variés. Le contrôle par ultrasons est l'une des méthodes les plus populaires en raison de sa flexibilité et surtout son efficacité. Diverses industries y font appel : aéronautique, aérospatiale, génie civil, transport, génie civil, etc. Différents niveaux de contrôle existent, permettant de détecter, localiser et dimensionner des défauts sans altérer les propriétés d'usage des structures contrôlées.

La science des ultrasons est aujourd'hui le fruit de l'union de l'électronique moderne et de l'acoustique. Les effets ultrasonores sont connus depuis 1812, cependant leur utilisation n'a été généralisée qu'à partir de 1945 où les ultrasons ont été utilisés

pour la détection des sous-marins. Depuis, elle n'a cessé d'évoluer et d'occuper plusieurs domaines tels que la biologie, la médecine et l'industrie. Avec l'évolution de l'électronique dans les années 1970, les ultrasons ont connu le sommet de leur évolution.

Dans le monde des ultrasons, les ondes ultrasonores constituent un moyen privilégié d'investigation dans l'étude du comportement mécanique des matériaux, ainsi que l'analyse et la caractérisation de leurs propriétés : les vitesses de propagation des ondes ultrasonores dépendent essentiellement de certaines grandeurs physiques comme la déformation du milieu de propagation, des constantes élastiques et de la masse volumique du milieu considéré. Elles dépendent aussi de la nature de l'onde longitudinale ou transversale, ainsi que la direction de polarisation de l'onde.

Actuellement, la technique par réflexion d'impulsions ultrasonores (Pulse-Echo) est la plus utilisée car elle permet de connaître la distance par rapport à la surface de l'hétérogénéité, d'avoir une idée sur sa forme, son étendu et surtout pour son coût faible et sa mise en œuvre facile. Cette technique consiste à interroger un milieu à l'aide d'une impulsion ultrasonore et à enregistrer les échos générés par des inhomogénéités. Celles-ci peuvent être des défauts ou des fissures. Le signal rétrodiffusé, peut porter des informations telles que la position des défauts dans le matériau, la vitesse de propagation qui détermine la nature du matériau si ce dernier est inconnu et la position des différentes interfaces qui représentent les dimensions de la pièce. Ensuite, ce signal sera soumis à un traitement du signal spécifique afin de savoir l'image interne du matériau et juger sa santé d'une façon précise.

Diverses techniques de traitement du signal peuvent être appliquées pour mieux interpréter les signaux issus des différents systèmes du CND. Ces signaux sont en général de nature non stationnaires, non linéaires et se forment de plusieurs composantes fréquentielles (signaux multi-composantes). Ces signaux sont brefs, ne se répètent que rarement et se manifestent par des oscillations évoluant au cours du temps. Dans de telles situations, la représentation temporelle classique des échos ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples, alors que la représentation fréquentielle ne permet pas la localisation temporelle de ces composantes. IL est donc primordial de s'orienter vers un

schéma d'analyse temps-fréquence ou temps-échelle qui sont, en fait, des transformations conjointes du temps et de la fréquence et fournissent des informations sur la façon dont la fréquence du signal varie au cours du temps.

Si les représentations temps-fréquence constituent un moyen puissant pour l'analyse des signaux non-stationnaires, elles posent en revanche un problème pour l'interprétation et la lisibilité des représentations obtenues en raison de la présence de termes d'interférences. Le lissage temps-fréquence peut réduire les interférences mais introduit des erreurs de localisation en temps et en fréquence. Ainsi, l'idéal serait de trouver une décomposition adaptée au signal ne nécessitant pas d'informations a priori sur ce dernier et qui permet d'obtenir une description temps-fréquence.

Partant des limitations énumérées ci-dessus, Huang et al ont récemment proposé une méthode abordant, sous un autre angle, la problématique d'analyse des signaux non-stationnaires : la décomposition modale empirique EMD, pour Empirical Mode Decomposition introduite en 1998. Cette décomposition a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années pour mieux analyser les séries temporelles non-stationnaires et non-linéaires. Contrairement aux RTF, la base de décomposition de l'EMD est intrinsèque au signal. L'extraction des composantes oscillantes appelées modes empiriques (IMF pour Intrinsic Mode Functions) est non-linéaire mais leur recombinaison linéaire est exacte.

Cependant l'EMD présente des inconvénients tels que le mélange de mode. Pour éviter ce problème, plusieurs variantes ont été développées, telles que l'EEMD pour l'EMD d'ensemble proposée par Wu et Huang en 2009 et la CEEMDAN pour l'EEMD complémentaire avec bruit adapté.

L'EMD seule n'est pas une analyse temps-fréquence, mais sa combinaison avec une autre méthode permet d'obtenir une RTF. Un des objectifs de cette thèse est l'application de la TOC et la TFCT combinées avec l'EMD et ses variantes et ce pour améliorer la résolution dans les deux domaines et permettre ainsi une meilleure localisation des défauts et une bonne caractérisation des matériaux.

La détermination de la relation entre la structure d'un matériau et ses propriétés est l'un des buts du contrôle non destructif par ultrasons. Plusieurs travaux ont démontré le lien entre la vitesse des ondes ultrasonores et les caractéristiques physiques des matériaux. A cet effet, une technique de mesure, basée sur la

conversion de mode appelée technique du prisme, a été utilisée avec succès pour évaluer ces propriétés à partir des vitesses longitudinale et transversale. Ensuite, vient l'étape d'estimation des paramètres des signaux ultrasonores recueillis et qui représente une phase fondamentale dans le traitement. Différents algorithmes d'estimation itérative existent en littérature. Notre choix s'est porté sur l'algorithme EM (Expectation-Maximization) pour l'estimation des ondes se propageant dans l'échantillon et ensuite, la détermination de leurs caractéristiques.

2. Organisation du manuscrit

Cette thèse est structurée 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 de ses deux variantes (EEMD et CEEMDAN) considérées dans ce travail afin d'éliminer le mélange de modes et réduire le temps de calcul. Ces trois méthodes seront appliquées sur des signaux de synthèse puis sur des signaux réels. Le chapitre comprend des simulations MATLAB portant sur l'évaluation des performances de ces méthodes.

Dans le chapitre 3, on s'intéresse aux algorithmes temps-fréquence. On propose l'application des méthodes TOC et TFCT combinées avec l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN ; et ce, pour améliorer la résolution dans les deux domaines. Ces méthodes combinées, appliquées sur des signaux réels ont apporté des améliorations aux résultats trouvés.

Chapitre 4 traitera le problème de modélisation et d'estimation des paramètres des signaux ultrasonores. Des résultats expérimentaux seront interprétés mettant en évidence l'efficacité de la technique du prisme pour la caractérisation des matériaux.

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

Généralités Sur Le Contrôle Non Destructif Et Les Ultrasons

-
1. Introduction et historique
 2. Intérêt et domaines d'utilisation
 3. Méthodes de contrôle non destructif
 4. Généralités sur les ultrasons
 5. Production des ultrasons
 6. Interaction des ultrasons et de la matière
 7. Mode de représentation des ultrasons
 8. Utilisation des ultrasons
 9. Choix de la technique de contrôle
 10. Détection des défauts
 11. Conclusion
-

1. Introduction et historique

L'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure industrielle, sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à son utilisation ultérieure, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de la maintenance, est regroupé sous deux appellations principales : **Contrôle Non Destructif (CND)** ou encore **Essai ou Examen Non Destructif (END)**.

L'histoire du contrôle non destructif (CND) commença avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle: la découverte des rayons X, de la piézoélectricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie: contrôle des aciers et radiographie des soudures.

Une grande accélération du progrès et du développement du CND s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide des secteurs de génie des centrales électriques nucléaires et l'aéronautique et du transport des produits énergétiques.

Enfin, la dernière décennie voit l'émergence des techniques du CND qui ne pouvaient être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante [1].

2. Intérêt et domaines d'utilisation

A l'heure actuelle ou la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le domaine d'utilisation du CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telle que le nucléaire et l'aéronautique.

La qualité, la gestion des risques et la maintenance sont trois paramètres que ne peuvent négliger les industriels fabricants. Le contrôle non destructif est un élément fondamental de la maîtrise de la qualité industrielle.

Le CND consiste à évaluer, par une méthode physique bien adaptée (ultrasonore, radiographique...), l'intégrité d'une structure à l'intérieure de laquelle peuvent apparaître d'éventuels défauts lors de son élaboration ou lors de son cycle de vie.

De ce fait, la plupart des méthodes du CND nécessitent une bonne connaissance de la physique du matériau en question et de son endommagement. L'objectif principal des essais non destructifs est la détection des défauts (les inhomogénéités) dans les matériaux par des techniques qui n'endommagent pas le produit contrôlé [2].

Il est donc devenu essentiel dans plusieurs domaines industriels, tels que

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- L'industrie navale (contrôle des coques).
- L'aéronautique (poutres ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, l'aérospatiale et l'armée).
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines...).
- L'inspection alimentaire et l'archéologie.

3. Méthodes de contrôle non destructif

Il existe de nombreuses méthodes de contrôle non destructif. Chacune possède des avantages et des inconvénients, des types de défauts à détecter en fonction de l'efficacité du diagnostic, l'accessibilité de la pièce, le coût, etc. On cite quelques-unes [3,4].

➤ Le contrôle par examen visuel (VT)

C'est la méthode la plus simple et la plus commune. L'appareillage comprend des loupes, des miroirs, des endoscopes, des caméras vidéo et peut même utiliser des robots pour inspecter des endroits dangereux ou difficiles tels que les réacteurs nucléaires.

➤ La radiographie

La radiographie est une technique d'imagerie de transmission, par rayons X (dans le cadre de la radiographie X), ou par rayons gamma (gammagraphie). En effet, il s'agit de former une image qui traduit l'absorption subie par un rayonnement ionisant qui traverse l'objet à étudier. Cette technique permet de détecter les cavités et les fissures dans les pièces du matériau dont l'épaisseur peut être importante. Néanmoins elle est assez complexe, coûteuse et présente quelques limites, notamment dans ses capacités de contrôle des surfaces planes.

➤ Les courants de Foucault

C'est une méthode de contrôle qui consiste à créer, dans un matériau conducteur, un courant induit par un champ magnétique variable. Ces courants induits, appelés courants de Foucault, circulent localement, à la surface du matériau. La présence d'une discontinuité à la surface de la pièce contrôlée perturbe la circulation des courants entraînant une variation de l'impédance apparente de la sonde de contrôle.

➤ Le contrôle par ultrasons US

Le contrôle par ultrasons permet de vérifier l'intégrité d'une pièce sans la dégrader. Le principe de cette méthode consiste à générer des impulsions acoustiques (des ondes ultrasonores) de hautes fréquences supérieures à 30 kHz dans un matériau. Cette méthode permet de localiser les défauts internes avec précision et d'en apprécier leur forme. L'onde ultrasonore se propage suivant différents modes de propagation dans la pièce à contrôler. Le train d'ondes émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts, la présence d'une discontinuité sur le trajet des ultrasons provoque la réflexion. Le signal réfléchi est recueilli par un transducteur ultrasonore qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur [5].

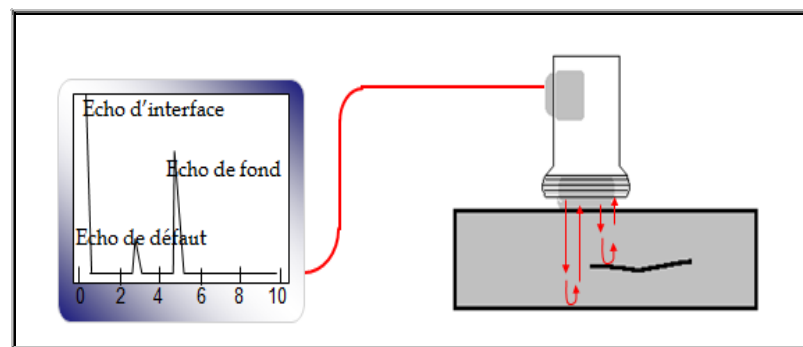


Figure 1.1 : Contrôle par ultrasons.

➤ Avantages

- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forgé).
- Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore).

- Localisation et dimensionnement des défauts.
- Examen à partir d'une seule face souvent suffisant.
- Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation.

➤ **Inconvénients**

- Pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire.
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité.
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité).
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Certains matériaux métalliques sont difficilement contrôlables.

4. Généralités sur les ultrasons

Depuis bien longtemps, les ultrasons étaient utilisés durant la première guerre mondiale pour détecter les sous-marins et depuis 1970, on utilise les ultrasons en médecine pour faire les premières images de coupes échographiques. Le rayonnement ultrasonore est d'un usage très répandu, car ses propriétés sont très intéressantes: son amortissement dans les métaux est généralement faible ce qui implique une bonne pénétration dans ces derniers [6].

4.1. Définition

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques et élastiques, qui se propagent à travers des supports fluides, solides, gazeux ou liquides (aucune propagation n'est possible dans le vide). Ce qui les caractérise par rapport aux autres phénomènes acoustiques, ce sont leurs fréquences, supérieures à celles audibles naturellement par l'oreille.

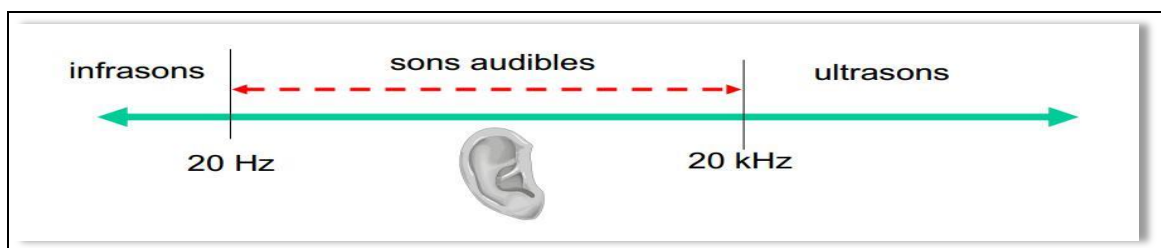


Figure 1.2 : Fréquences du son.

4.2. Paramètres de l'onde ultrasonore

On peut caractériser une onde ultrasonore par plusieurs paramètres

➤ Fréquence et longueur d'onde

Lors de la propagation dans un milieu donné, l'onde ultrasonore est caractérisée par sa fréquence et sa longueur d'onde qui sépare deux oscillations voisines, elle est reliée à la fréquence par la formule

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1.1)$$

λ est la longueur d'onde en m, V est la vitesse de l'onde ultrasonore en m.s^{-1} et f est la fréquence en hertz (Hz).

➤ Célérité et impédance acoustiques

La célérité de l'onde ultrasonore est sa vitesse de propagation dans un milieu. Elle dépend essentiellement des caractéristiques du milieu (élasticité, densité).

$$V = \frac{Z}{\rho_m} \quad (1.2)$$

Z est l'impédance acoustique en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et ρ_m est la masse volumique du milieu en kg.m^{-3} .

L'impédance acoustique joue un rôle capital dans la transmission de l'énergie dans un milieu ainsi que lors des phénomènes de transmission et de réflexion de cette énergie à l'interface de deux milieux. Très petite pour les gaz en raison de leur faible masse volumique, l'impédance acoustique est beaucoup plus importante dans les milieux liquides et solides. Le tableau ci-dessous donne les valeurs des impédances acoustiques pour les principaux milieux qui peuvent être pris en considération lors des contrôles industriels [7].

| Milieu | Air | Tissus mous | Os | Eau |
|-------------------------------------|------|-------------|------|------|
| Z en $10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ | 0,04 | 1,63 | 7,80 | 1,48 |

Tableau 1.1 : Impédance de quelques milieux.

➤ **Pression et intensité**

En chaque point, la pression acoustique P varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore et l'intensité ultrasonore correspond à l'énergie qui traverse perpendiculairement une unité de surface pendant une unité de temps. L'intensité est reliée à la pression acoustique par l'expression

$$I = \frac{P^2}{2Z} \quad (1.3)$$

P est la pression acoustique en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ et I est l'intensité en W.m^{-2} .

4.3. Types d'ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont émises par une source à partir de laquelle elles se propagent et se déplacent dans toutes les directions possibles dans un milieu élastique. Plusieurs types d'ondes ultrasonores sont susceptibles de se propager dans les milieux solides. Ces ondes se différencient les unes des autres par [8]

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

On distingue quatre types d'ondes ultrasonores : les ondes longitudinales ou de compression, les ondes transversales ou de cisaillement, les ondes de surfaces ou de Rayleigh les ondes Lamb ou de plaque.

- Ondes longitudinales

Appelées également ondes de compression ou ondes P, elles sont caractérisées par le fait que la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde tel qu'illustré à la figure (1.3). Ces ondes ne se propagent que dans les solides et les liquides. La vitesse de propagation des ondes longitudinales dépend des paramètres caractéristiques du matériau considéré [9].

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.4)$$

E est le module d'Young en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ et ρ la densité en kg.m^{-3} .

Les ondes longitudinales sont très utilisées pour le contrôle non destructif des matériaux et la mesure des épaisseurs de parois.

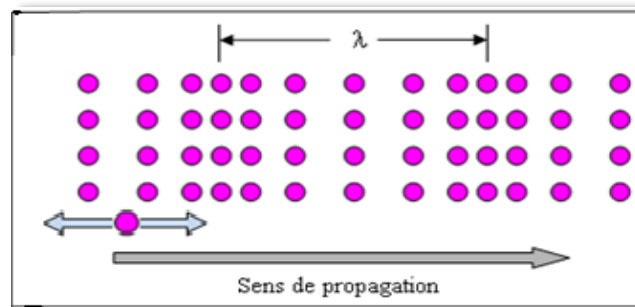


Figure 1.3 : Onde longitudinale.

- Ondes transversales

Appelées également ondes de cisaillement ou ondes S. Le déplacement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation, figure (1.4). Ces ondes ne se propagent que dans les milieux solides, elles ne se propagent pas dans les milieux gazeux ou liquides. La vitesse des ondes transversales est donnée par

$$V_t = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \quad (1.5)$$

μ_s est le module d'élasticité transverse. Puisque $E = 2 \mu_s(1 - \sigma)$, avec σ est le coefficient de Poisson, l'équation (1.5) peut alors s'écrire

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{2 \rho (1 - \sigma)}} \quad (1.6)$$

Les ondes transversales sont très utilisées pour le contrôle non destructif des milieux métalliques et notamment des assemblages soudés.

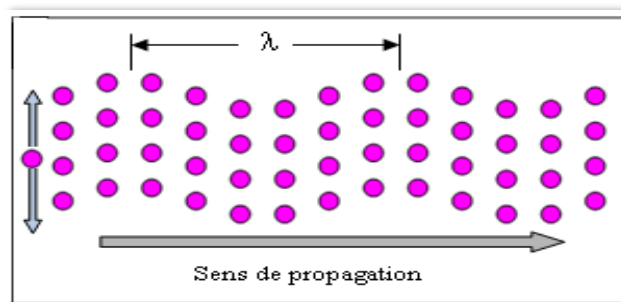


Figure 1.4 : Onde transversale.

Le tableau 1.2 indique la célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents milieux usuels.

| Milieux | Matériaux | Vitesse longitudinale (m/s) | Vitesse transversale (m/s) |
|----------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|
| Gazeux | Air | 332 | |
| Liquides | Eau | 1480 | |
| | Huile | 1440 | |
| Solides | Aluminium | 6400 | 3130 |
| | Fer | 5950 | 3220 |
| | Acier | 5900 | 3230 |
| | cuivre | 4760 | 2325 |

Tableau 1.2 : Célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents milieux usuels.

- Ondes de surface ou de Rayleigh

Découvertes par Lord Rayleigh en 1885, elles n'affectent que la surface du solide sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde λ . Elles se propagent à une vitesse environ 10 % de celle des ondes transversales lorsqu'elles se déplacent dans un milieu illimité. Ce type d'ondes est naturellement rencontré dans la propagation des secousses telluriques.

Dans la pratique des contrôles industriels, les ondes de Rayleigh sont peu utilisées en raison de leur trop grande sensibilité aux rugosités de surface.

- Ondes de plaque ou ondes de Lamb

Dans les tôles dont l'épaisseur est égale ou peu différente d'une longueur d'onde, les ondes de surface ne peuvent pas être générées. Dans ce cas, d'autres ondes apparaissent, ce sont les ondes de LAMB ou de plaque qui sont de deux types principaux : le premier est comparable à une onde de compression et le deuxième est caractérisé par une onde de mode transversal.

5. Production des ultrasons

Les ultrasons sont produits par transformation d'une énergie électrique, transportée par des courants alternatifs de fréquence élevée, en énergie mécanique. Pour créer une onde mécanique, il faut une excitation mécanique, l'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. Les oscillations mécaniques sont difficiles à mettre en œuvre. Par contre, des oscillations électriques sont beaucoup plus aisées à réaliser.

La production des ondes ultrasonores de très hautes fréquences fait appel à des transducteurs, terme général qui désigne un dispositif susceptible de transformer une forme d'énergie en une autre forme d'énergie. Les transducteurs utilisés vont convertir l'énergie électrique en énergie acoustique. Ils sont de quatre types [10]

- Les transducteurs électromagnétiques.
- Les transducteurs électrostatiques.
- Les transducteurs magnétostrictifs.
- Les transducteurs piézo-électriques.

5.1. Transducteur piézo-électrique

Un transducteur ultrasonore est un émetteur ou un capteur. La majorité des transducteurs utilisent l'effet piézo-électrique. Il a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie. La piézo-électricité est un phénomène propre à certains types de cristaux (le quartz est le plus connu) ou de céramique. Il apparaît à la surface de ces corps, quand on les soumet à des pressions ou à des charges électriques (effet "direct"). Inversement, l'application d'une tension électrique sur ces mêmes surfaces donne lieu à une modification des dimensions des cristaux (effet "inverse"). Il y a là un moyen de transformer un signal électrique en déformation mécanique et réciproquement.

- **L'effet piézoélectrique direct** : si on applique un effort, les contraintes mécaniques qui apparaissent dans le matériau provoquent des déformations de sa structure cristalline et ainsi des déplacements relatifs des charges électriques des ions. Ces déplacements correspondent à une polarisation électrique dans le matériau.

➤ **L'effet piézoélectrique indirect** : inversement, l'application d'un champ électrique extérieur crée des forces électrostatiques sur les charges électriques liées aux molécules du cristal, qui se déplacent les unes par rapport aux autres, créant ainsi des déformations dans le matériau. Ainsi, l'état mécanique du matériau est modifié par une action électrostatique.

5.2. Différents types de transducteurs

Selon le matériau, la géométrie de l'élément sondé, les défauts recherchés et la configuration expérimentale requise, il existe plusieurs types de transducteurs selon leur utilisation [11]. On distingue

- **Les transducteurs droits ou plans**

Le rayonnement d'un traducteur ultrasonore est provoqué par la vibration d'un transducteur qui va entraîner un champ de déplacement dans le milieu de propagation. L'onde se propage perpendiculairement à la face avant du transducteur.

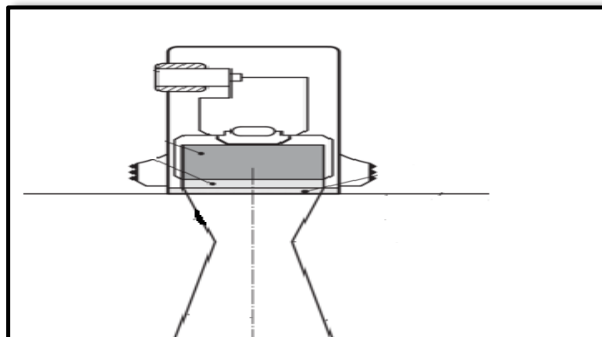


Figure 1.5 : Transducteur droit.

- **Les transducteurs focalisés**

Lorsqu'il est nécessaire de concentrer la puissance acoustique P en une zone de faible surface pour améliorer la détection de petits défauts ou de déterminer avec précision le contour de défauts plus importants, on procède à une focalisation du faisceau ultrasonore.

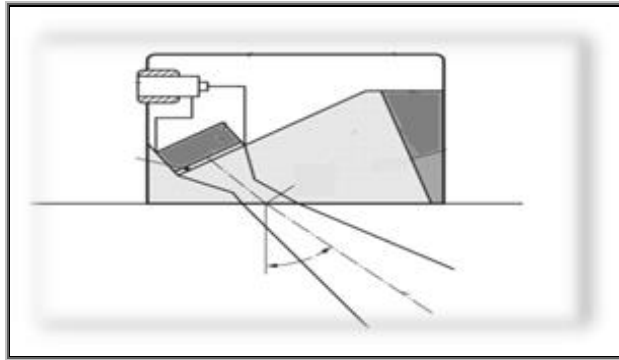


Figure 1.6 : Transducteur focalisé.

5.3. Faisceau ultrasonore

Il est nécessaire de connaître le comportement d'une onde ultrasonore émise par un palpeur (ou transducteur) lorsqu'elle pénètre dans un matériau et en particulier la géométrie du champ sonore dans ce matériau. Ce comportement s'appelle le faisceau ultrasonore.

Le faisceau créé par un élément piézo-électrique de dimension D (ouverture), est constitué d'une zone de champ proche (zone de Fresnel) et d'une zone de champ lointain (zone de Fraunhofer) [10]. Plus le diamètre du palpeur est important, moins le faisceau divergera comme le montre la figure (1.7).

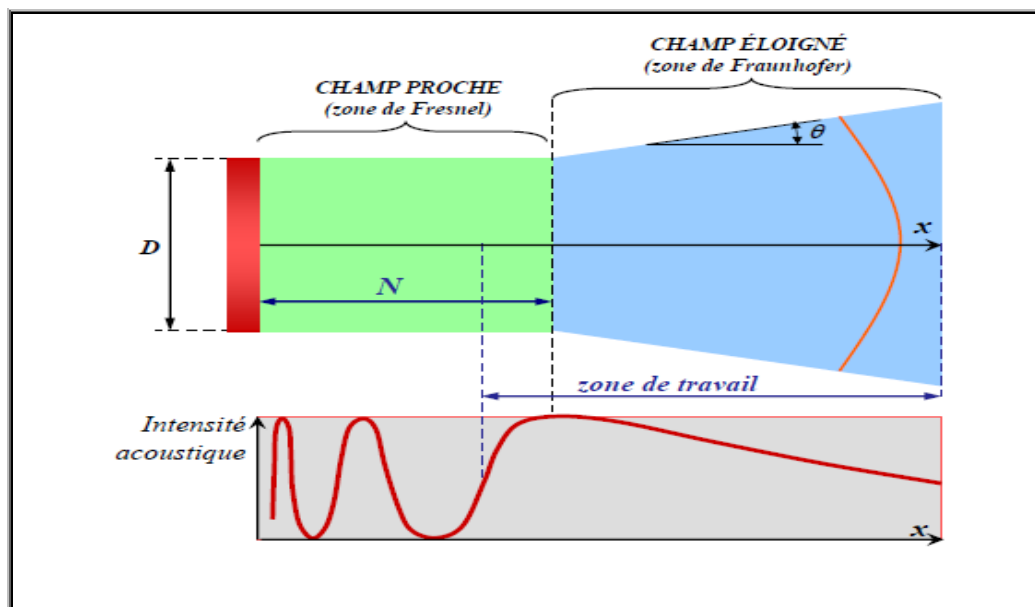


Figure 1.7 : Géométrie d'un faisceau ultrasonore.

- Zone de Fresnel, de forme cylindrique, son étendue dépend du diamètre du cristal, de la fréquence d'émission et de la célérité.

$$N = D^2 \times \frac{f}{4c} \quad (1.7)$$

N est la longueur de la zone et D est le diamètre de la source.

- Zone de Fraunhofer, de forme conique, est plus éloignée de la source. Le faisceau est divergent selon un angle θ . La divergence est inversement proportionnelle à la fréquence et au diamètre de la sonde.

$$\sin\theta = \frac{1,22 C}{Df} \quad (1.8)$$

6. Interaction des ultrasons avec la matière

Les ondes ultrasonores, concentrées sous forme de faisceaux vont interagir avec la matière qu'elles traversent. Il se produit plusieurs phénomènes

- Une absorption dans les milieux homogènes.
- Des réflexions, réfractions et diffusion au changement de milieux.

6.1. Atténuation des ondes ultrasonores

Lors de la propagation d'une onde ultrasonore dans un milieu, l'amplitude de celle-ci diminue en s'éloignant de la source de l'onde. Les causes de cette atténuation sont :

- Diffraction : divergence du faisceau ultrasonore.
- Diffusion : réfraction et réflexion par des discontinuités internes multiples
- Absorption : perte d'amplitude provoquée par des frictions internes (transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique).

Cette atténuation suit une loi exponentielle décroissante

$$A = A_0 e^{(-\alpha_{att} \cdot x)} \quad (1.9)$$

A est l'amplitude à la distance x , A_0 est l'amplitude initiale, α_{att} est le coefficient d'atténuation et x est la distance traversée par l'onde.

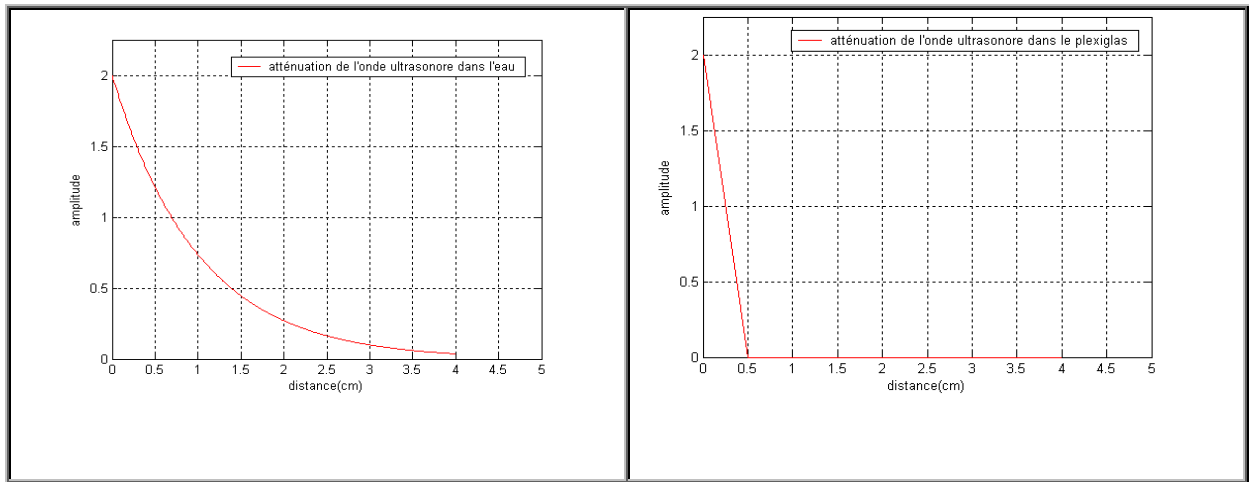


Figure 1.8 : Exemples d'atténuation de l'onde ultrasonore dans l'eau et le plexiglas.

La fréquence des ultrasons a une influence déterminante sur les possibilités d'exploration et le coefficient d'atténuation α_{att} est un paramètre relatif composé du coefficient d'absorption et du coefficient de diffusion $\alpha_{att} = \alpha_{absorption} + \alpha_{diffusion}$ [7]. Ce coefficient définit le pouvoir de pénétration des ultrasons et il est proportionnel au carré de la fréquence.

6.2. Interaction des ultrasons avec une interface

6.2.1. Notion d'interface acoustique

La frontière séparant deux milieux différents porte le nom d'interface acoustique. L'importance de cette interface est liée à la différence des impédances acoustiques des deux milieux, sa forme, son orientation par rapport au faisceau, son caractère lisse ou rugueux et enfin sa taille par rapport à la longueur d'onde.

6.2.2. Incidence normale

Lorsqu'une onde ultrasonore atteint perpendiculairement l'interface (incidence normale) entre deux milieux d'impédances acoustiques différentes, une partie de l'énergie incidente est transmise (ou réfractée) et l'autre partie est réfléchiée c'est-à-dire renvoyée vers la source au niveau de l'interface : c'est l'écho ultrasonore.

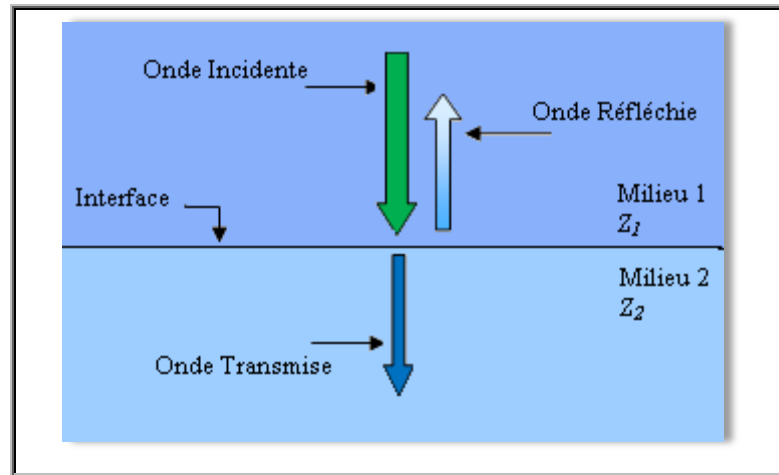


Figure 1.9 : Réflexion et Transmission à Incidence normale.

La quantité de l'énergie ultrasonore qui est réfléchiée ou transmise dépend de la différence entre les impédances acoustiques des deux milieux. Si cette différence est grande, alors la plupart de l'énergie est réfléchiée et seule une petite partie est transmise à travers l'interface. Tandis que pour une petite différence dans l'impédance acoustique, la majeure partie de l'énergie ultrasonique est transmise et seule une petite partie est réfléchiée. Les fractions réfléchiée et transmise sont liées à la variation d'impédance par les relations suivantes [12].

- Coefficient de réflexion R :
$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (1.10)$$

- Coefficient de transmission T :
$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1.11)$$

I_i est l'énergie incidente, I_r est l'énergie réfléchiée, I_t est l'énergie transmise et Z_1 et Z_2 sont les impédances acoustiques du milieu 1 et 2 respectivement.

- Si $Z_1 - Z_2 \gg \gg$: Réflexion dominante (\rightarrow Détection de défauts dans la matière).

- Si $Z_1 - Z_2 \ll \ll$: Réfraction dominante (\rightarrow Pas de détection de défauts).

6.2.3. Incidence oblique

Comme le montre la figure (1.10), les deux ondes réfléchies et réfractées sont le résultat d'une onde ultrasonore incidente arrivant obliquement sur la surface de l'interface entre deux milieux différents. Dans ce cas, une onde ultrasonore se déplaçant 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 alors dans le milieu 1 une onde réfléchie, et dans le milieu 2 une onde réfractée, les deux avec le même mode ; c'est-à-dire, si l'onde incidente est longitudinale, l'onde réfléchie et l'onde réfractée sont longitudinales aussi. Même chose pour le cas d'une onde transversale [10].

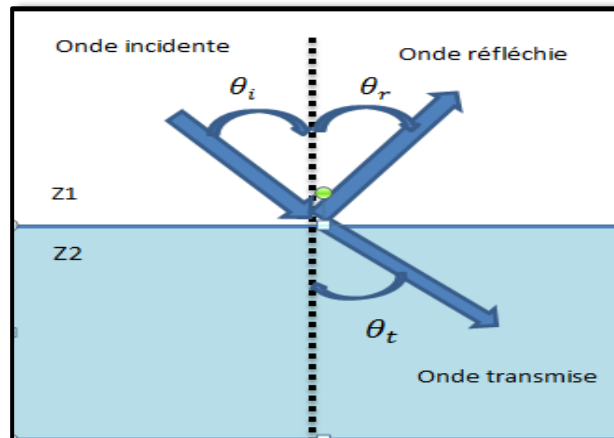


Figure 1.10 : Transmission et réflexion d'ondes à incidence oblique.

L'onde réfléchie possède la même vitesse V_1 et le même angle que l'onde incidente $\theta_r = \theta_i$; tandis que l'onde réfractée a une vitesse V_2 et un angle de réfraction θ_t et elle est donnée par la loi de Snell_Descartes (équation 1.12) qui est appliquée de manière indifférente pour les ondes longitudinales ou transversales.

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.12)$$

6.2.4. Conversion de mode

Les ondes acoustiques réfléchies ou réfractées peuvent changer également de mode ; c'est-à-dire, passer de l'onde longitudinale à l'onde transversale et vice

versa, selon la vitesse de l'onde incidente, le milieu et l'angle d'incidence. Pour analyser la conversion de mode, considérons les cas décrits ci-dessous [11].

- **Onde incidente longitudinale**

La figure (1.11) montre le schéma d'une onde longitudinale qui influe sur l'interface de séparation entre deux milieux, et se déplace dans le milieu 1 avec une vitesse V_{1L} et un angle d'incidence i avec la normale du plan d'interface. Quand la vitesse de l'onde ultrasonore est supérieure dans le milieu 1, c'est-à-dire, $V_1 > V_2$, une partie de l'énergie acoustique est réfléchiée et l'autre est réfractée. En conséquence, quatre types d'ondes acoustiques différentes sont obtenus:

- Une onde longitudinale réfléchiée se déplaçant à une vitesse V_{1L} et avec un angle de réflexion r_L .
- Une onde transversale réfléchiée se déplaçant à une vitesse V_{1T} et avec un angle de réflexion r_T .
- Une onde longitudinale réfractée se déplaçant à une vitesse V_{2L} et avec un angle de transmission R_L .
- Une onde transversale réfractée de vitesse V_{2T} et un angle de transmission R_T .

Les angles des différentes ondes résultantes sont régis par la loi de Snell-Descartes et sont donnés par l'équation

$$\frac{\sin(i)}{V_{1L}} = \frac{\sin(r_T)}{V_{1T}} = \frac{\sin(r_L)}{V_{1L}} = \frac{\sin(R_T)}{V_{2T}} = \frac{\sin(R_L)}{V_{2L}} \quad (1.13)$$

Lorsque l'angle d'incidence est i ; les angles des ondes réfléchiées sont r_L et r_T , et ceux des ondes réfractées sont R_L et R_T . Dans ce cas, les indices L et T correspondent aux ondes longitudinales et transversales, respectivement. Pour les vitesses, leurs indices 1 et 2 se réfèrent au milieu.

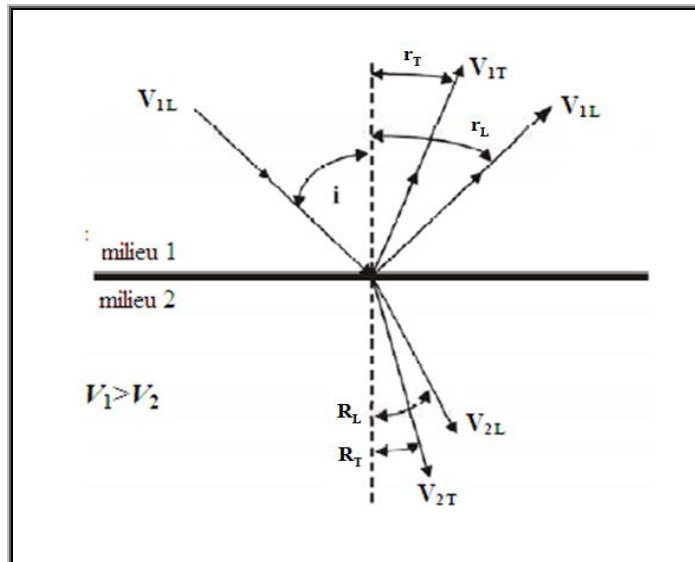


Figure 1.11 : Conversion de mode d'une onde longitudinale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.

- **Onde incidente transversale**

De façon équivalente au cas précédent et dans la figure (1.12), a été inséré le schéma de conversion de mode quand l'onde acoustique incidente est de type transversal. Dans ce cas, il est supposé que $V_2 > V_1$, et l'angle d'incidence est i ; les angles de réflexion sont i et r_L , et ceux de réfraction sont R_L et R_T . Ainsi dans cette situation, la relation entre les angles est décrite par la loi de Snell-Descartes à travers l'équation

$$\frac{\sin(i)}{V_{1T}} = \frac{\sin(r_L)}{V_{1L}} = \frac{\sin(R_T)}{V_{2T}} = \frac{\sin(R_L)}{V_{2L}} \quad (1.14)$$

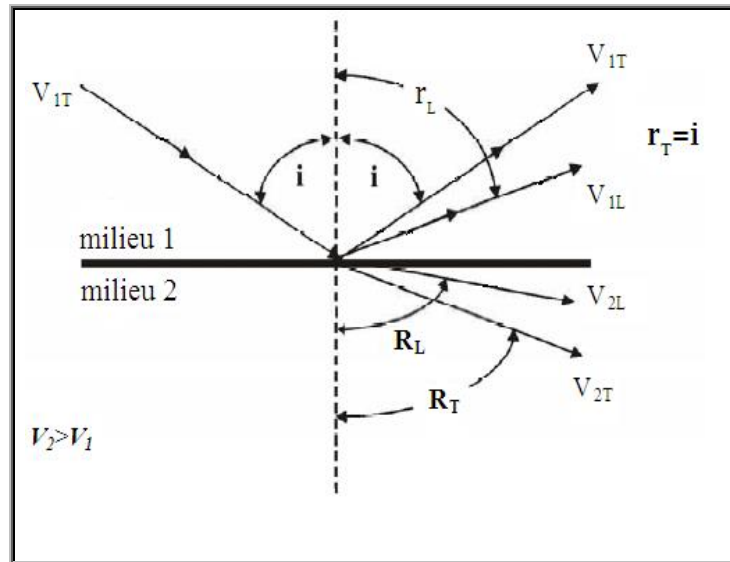


Figure 1.12 : conversion de mode d'une onde transversale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.

6.2.5. Notion d'angle critique

La notion d'angle critique fait toujours intervenir une interface entre deux matériaux (fluide-fluide, solide-fluide ou solide-solide). En utilisant la construction de la figure (1.13), il apparaît que l'incidence d'une onde ultrasonore sur une interface fluide-solide introduit deux angles critiques, l'un pour l'onde longitudinale, α_{2L} , et l'autre pour l'onde transversale, α_{2T} . Ces deux angles correspondent respectivement aux angles d'incidences à partir desquels il n'y a plus d'ondes réfractées longitudinalement et transversalement. Ils sont définis par $\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{V_1}{V_{2L}}\right)$ et $\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{V_2}{V_{2T}}\right)$. Ces angles sont appelés angles de réflexion totale car lorsque l'incidence devient supérieure à l'un d'eux, la réflexion est totale pour le type d'ondes considérées. A partir de l'angle critique correspondant aux ondes transversales α_2 , la réflexion est égale à l'unité. Il n'y aura plus d'énergie qui se propage dans l'échantillon et tout le faisceau incident est réfléchi. Cependant, il faut surtout remarquer que, entre les deux angles critiques, les ondes transmises sont uniquement transversales, ce qui facilite l'interprétation des échos rendant ainsi cette technique très utilisée en CND par ultrasons [13].

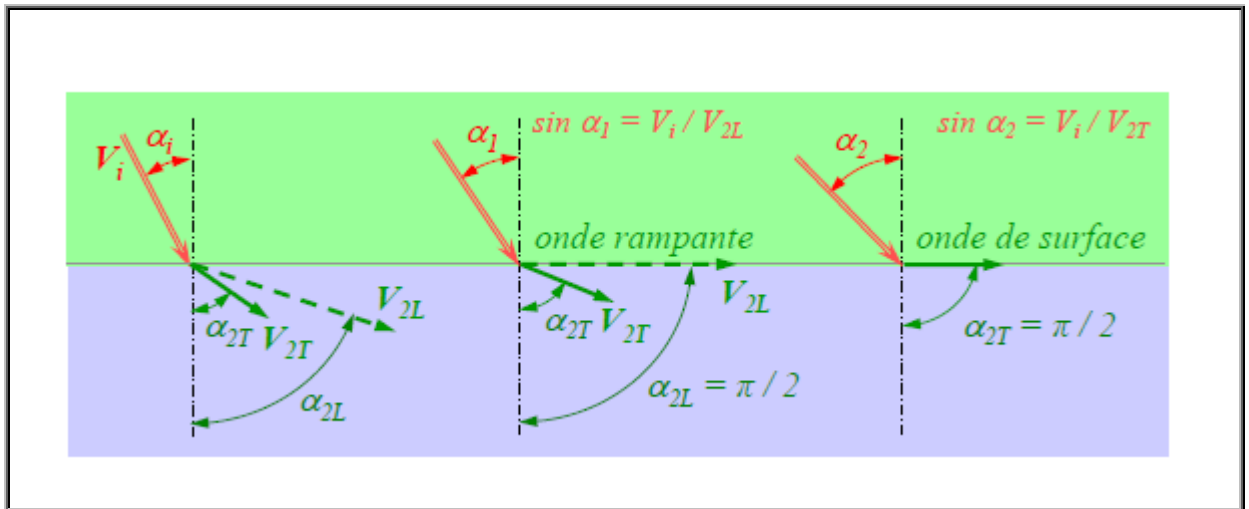


Figure 1.13 : Angles critiques pour une incidence transversale ou longitudinale.

- α_{2L} et α_{2T} augmentent avec α_i .
- Quand $\alpha_i = \arcsin(V_i/V_{2L}) = \alpha_1$ (premier angle critique), $\alpha_{2L} = \pi/2$

L'onde réfractée suit l'interface (onde rampante).

- Quand $\alpha_i = \arcsin(V_i/V_{2T}) = \alpha_2$ (second angle critique), $\alpha_{2T} = \pi/2$

L'onde réfractée suit l'interface (onde de surface) ; elle se propage à une vitesse V_s légèrement inférieure à V_{2T} .

- Si $\alpha_i > \alpha_2$, alors toute l'énergie incidente est réfléchie.

7. Modes de représentation des ondes ultrasonores

Les données issues d'une acquisition ultrasonore peuvent être représentées sous la forme d'un ensemble de signaux monodimensionnels, ou sous la forme d'images permettant une visualisation simple et une interprétation rapide des informations contenues dans les données d'acquisition. Ces représentations peuvent être monodimensionnelles, comme les A-Scan ou bidimensionnelles comme les B-Scan, C-Scan ou D-scan [14].

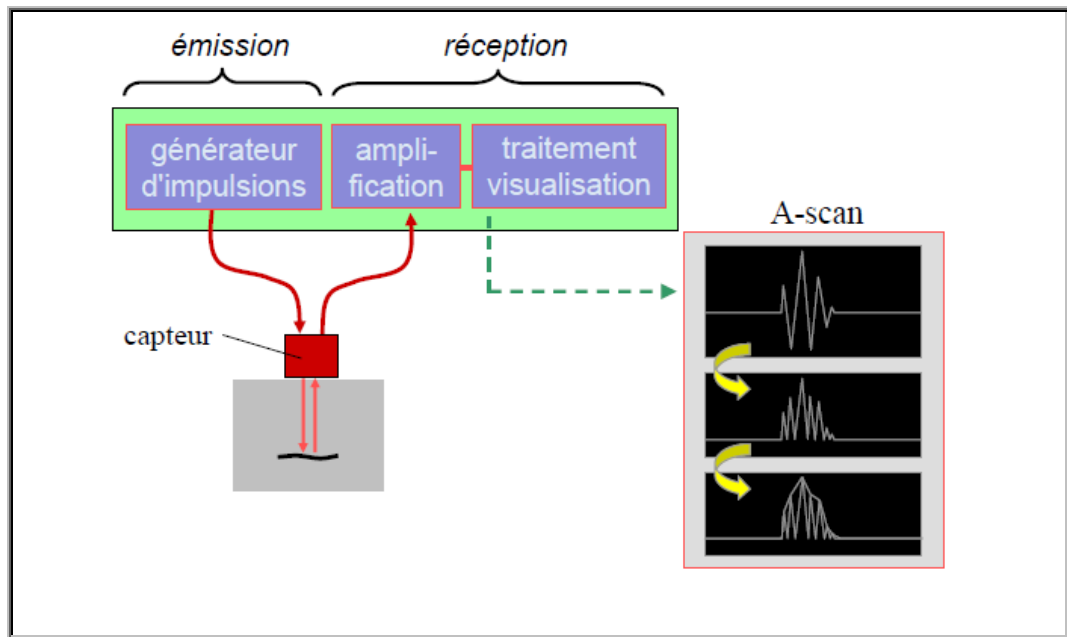


Figure 1.14 : Acquisition de données ultrasonores avec représentation A-Scan.

Le mode de représentation A-scan est à la base de toutes les premières méthodes d'exploitation et d'interprétation de données ultrasonores en contrôle non destructif. Il ne nécessite pas beaucoup de matériel : une sonde et un oscilloscope sont nécessaires. Les signaux enregistrés sur l'A-Scan sont des ondes propagées à l'intérieur du volume du matériau. Ce mode est défini par des ondes réfléchies par la surface avant (écho de la face avant) et le fond de la pièce (écho de fond).

Si le matériau contient des imperfections (fissures), un écho de défaut représentera les ondes réfléchies par ce défaut. Le reste du signal est constitué d'oscillations correspondant au bruit d'acquisition et de structure.

La figure (1.15) représente un signal A-Scan. L'axe des ordonnées correspond aux amplitudes des différents échos enregistrés par le récepteur ultrasonore. L'axe des abscisses représente le temps mis par ces échos pour atteindre le récepteur.

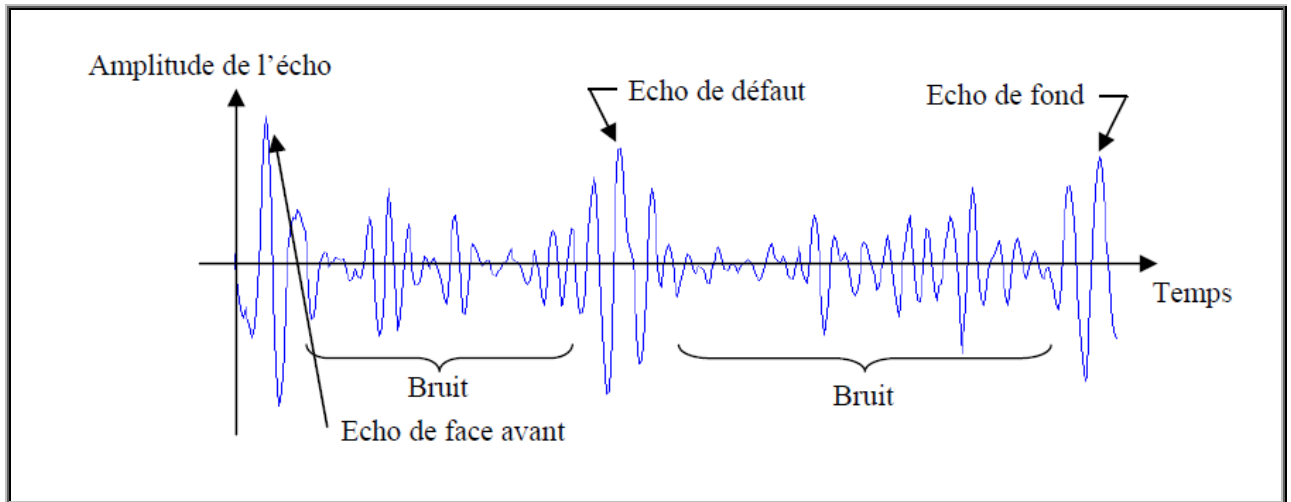


Figure1.15 : Exemple de signal A-Scan.

8. Utilisation des ultrasons

Les ultrasons sont utilisés dans de très nombreux domaines de l'industrie métallurgique. Leur emploi est plus récent dans les secteurs des matériaux plastiques et composites. Les ultrasons sont mis en œuvre en

- Médecine : avec notamment l'échographie et la thérapie par ultrasons focalisés;
- En agriculture : par vibration (nébulisation) de l'eau qui se transforme en aérosol et alimente le système racinaire en oxygène;
- En télédétection : pour le sonar;
- En télémétrie : pour mesurer les distances ;
- Dans l'industrie automobile, afin d'éviter les obstacles ;
- En contrôle non destructif;

Ce panorama des utilisations des ultrasons ne serait pas complet si l'on ne mentionnait pas leur application comme outil d'investigation des propriétés élastiques des matériaux. C'est pourquoi, l'objectif du contrôle non destructif par les ultrasons est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité par la détection des défauts, la sécurité d'emploi et plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. De ce fait, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits.

9. Choix de la technique de contrôle

Le contrôle par ultrasons permet de vérifier l'intégrité d'une pièce sans la dégrader. Le principe de cette méthode consiste à générer des ondes élastiques dans la pièce à l'aide d'un transducteur émetteur et de détecter toute hétérogénéité dans la pièce à l'aide d'un transducteur récepteur. Toute modification des propriétés mécaniques du milieu de propagation affectera l'onde ultrasonore incidente. Les transducteurs émetteur et récepteur peuvent être confondus, auquel cas on parle de méthode par réflexion ou mode pulse-écho. Ils peuvent également être séparés, en mode transmission (transducteurs situés de chaque côté de la pièce) ou tandem (transducteurs situés du même côté de la pièce). Le type d'onde générée sera choisi en fonction de la position du défaut : ondes de surface pour la recherche de défauts situés à proximité de la surface, ondes de volume pour des défauts situés à une profondeur supérieure à quelques longueurs d'onde.

La principale difficulté réside dans la transmission de l'onde ultrasonore depuis le transducteur jusque dans la pièce contrôlée. La méthode la plus simple consiste à plonger le transducteur et la pièce contrôlée dans un milieu fluide couplant. On parle alors de contrôle par immersion. Cependant, ce type de contrôle est difficilement applicable sur site en raison des contraintes d'environnement rencontrées : inaccessibilité au composant ou impossibilité de l'immerger localement. Pour de tels composants, le transducteur doit être placé directement au contact de la pièce, une fine lame de liquide assurant alors le couplage. Ce type de contrôle est dit par contact [15].

9.1. Méthode pulse-écho

C'est la méthode la plus utilisée dans le contrôle par ultrasons. Elle est appelée l'échographie et consiste à utiliser un seul transducteur en émetteur-récepteur. Le transducteur reçoit un signal électrique (pulse initial) produisant une vibration mécanique qui va se propager vers le fond de la pièce. Cette vibration, après un certain temps, va rencontrer le fond sur lequel elle se réfléchit et refait alors la progression inverse, jusqu'au transducteur où il génère un signal électrique correspondant à l'écho de fond. Le même principe est réalisé avec une pièce à défaut mais de plus, on aura un écho de défaut. Cette méthode est intéressante car

- la présence d'un défaut est caractérisée par la présence d'un signal spécifique (écho de défaut) dont l'amplitude fournit une information sur l'importance de ce défaut et la position de ce signal sur l'écran indique la profondeur de ce défaut dans la pièce.
- elle ne nécessite que l'utilisation d'un seul transducteur, ce qui est beaucoup plus pratique et capital dans les mesures d'épaisseur de parois dont la face interne est inaccessible [5].

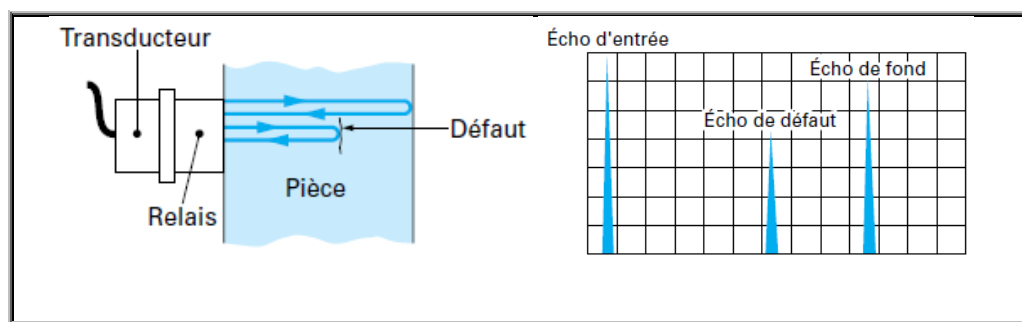


Figure1.16 : Méthode pulse-écho.

Deux techniques existent : le contrôle par contact et le contrôle par immersion.

- **Contrôle par contact** : c'est la méthode la plus employée, le transducteur ultrasonore est positionné sur la surface de la pièce. La liaison acoustique est assurée par un film d'agent de couplage qui est généralement soit une graisse ou une huile de même impédance acoustique pour qu'il y ait adaptation. 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 transducteur. Deuxièmement, la constante de couplage n'est pas bonne, c'est-à-dire qu'au cours du contrôle, la qualité du couplage risque d'être affectée et donc la qualité du contrôle aussi.

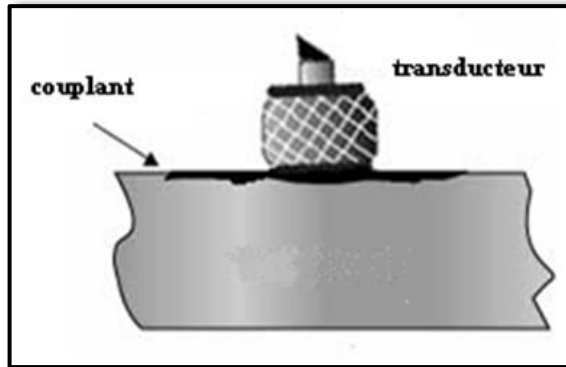


Figure 1.17 : Contrôle par contact.

- **Contrôle par immersion :** Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce contrôlée ; le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Il peut s'agir soit d'une immersion totale où le traducteur et la pièce sont entièrement immergés dans une cuve de contrôle. Ou bien une immersion locale où le traducteur et la partie de la pièce qui est contrôlée sont reliés entre eux par un volume de liquide, grâce à des dispositifs spéciaux [9]. Ce système est réservé aux pièces de faibles dimensions et aux contrôles en série.

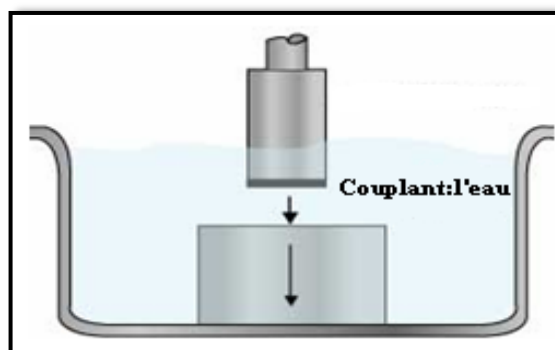


Figure 1.18 : Contrôle par immersion.

10. Détection des défauts

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle originale à cause de sa remarquable sensibilité qui a pour objectif de détecter les défauts de matière, qui

ne sont pas détectables visuellement. L'important est de suivre l'évolution de ces défauts sans endommager la pièce à contrôler et de la changer juste avant que la pièce ne casse pour éviter différents risques.

La détection des défauts par les ultrasons est très pratiquée en contrôle de fabrication, en surveillance de structure ainsi qu'en maintenance. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci.

Le défaut se traduit soit par l'absence de matière (air), ou par une anomalie non conductrice. Il peut être situé à la surface de la pièce, ou à l'intérieur de celle-ci. Les défauts que l'on peut rencontrer en maintenance sont de deux types les défauts de surface et les défauts internes.

- **les défauts internes**

Ce sont des hétérogénéités de natures, de formes et de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées et soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique ou l'imagerie infrarouge [3].

- **Les défauts de surface**

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, les défauts de surface peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

La première catégorie (défauts ponctuels) correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit de criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par

exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'utilisation, pour leur détection, de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault ou les ultrasons.

La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

10.1. Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Généralement, on peut distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée.

- mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...).

Les méthodes de flux, avec une excitation et une détection de même nature et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique); la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes [3].

11. Conclusion

Dans ce chapitre, des notions de base sur le contrôle non destructif ont été données afin de mieux comprendre la mise en œuvre de ses différentes techniques qui sont complémentaires et chacune d'elles possède des spécificités la prédestinant à un type de pièces ou de matériaux pour une éventuelle caractérisation des paramètres ou une détection des défauts qui apparaissent dans les structures industrielles.

L'utilisation des ultrasons occupe une place importante dans différents domaines surtout en CND où ils sont devenus un outil indispensable. Des notions de base sur les ultrasons ont été présentées pour mieux comprendre les phénomènes que subissent les ondes ultrasonores lors de leur propagation dans les milieux parcourus. Et ce, afin de mettre en évidence leur utilisation dans le contrôle non destructif où ils ont prouvé leur simplicité, leur précision et surtout leur efficacité.

Chapitre 2

Les Méthodes EMD, EEMD Et CEEMDAN Théorie Et Simulation

-
1. Introduction
 2. Notions sur les signaux
 3. Décomposition Modale Empirique (EMD)
 4. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble (EEMD)
 5. Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble Complet (CEEMDAN)
 6. Reconstruction du signal
 7. Simulation et Résultats
 8. Analyse des résultats expérimentaux
 9. Interprétation des résultats
 10. Conclusion
-

1. Introduction

Les techniques de contrôle non destructif par ultrasons utilisent la transmission de l'onde sonore de haute fréquence pour la détection des défauts ou pour localiser des changements dans les propriétés des matériaux. Des ultrasons sont envoyés dans la pièce à contrôler, leurs réflexions sur les différents obstacles dans la pièce permettent d'obtenir une image de l'intérieur de celle-ci. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau et le temps aller-retour d'une impulsion ultrasonore envoyée par le transducteur, on en déduit la distance parcourue par cette impulsion et, par la suite, la profondeur du défaut.

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 [16].

Ce chapitre présente une description d'une méthode empirique de décomposition des signaux qui est la décomposition modale empirique EMD ainsi que deux de ces 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 [17]. Elle est définie par un processus appelé tamisage (sifting) permettant de décomposer un signal en contributions de base appelées modes empiriques ou IMF (Intrinsic mode functions) qui sont des signaux de type AM-FM mono-composante (au sens large), chacun de moyenne nulle [18]. Ces différents modes permettent de comprendre de manière intuitive le contenu fréquentiel du signal. L'extraction des IMFs est non-linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire.

2.1. Principe de l'EMD

L'idée principale de l'EMD est de décomposer un signal en composantes constituées d'oscillations rapides (hautes fréquences) appelées approximations qui s'atténuent progressivement vers les oscillations lentes (basses fréquences) appelées détails ou tendances. L'EMD décompose ainsi tout signal en une somme de modes empiriques ou fonctions intrinsèques IMFs et d'un résidu, qui, par convention, représente la tendance globale du signal.

Dans cette décomposition, les IMFs sont générées de la plus haute fréquence à la plus basse fréquence, permettant ainsi une analyse fréquentielle des signaux [19]. La décomposition totale d'un signal $x(t)$ s'écrit alors

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \text{IMF}_i(t) + r(t), \quad (N \in \mathbb{N}^*) \quad (2.1)$$

- $\text{IMF}_i(t)$ est la $i^{\text{ème}}$ oscillation. Ces oscillations sont des fonctions oscillantes autour de 0 de moyenne locale nulle.
- $r(t)$ est le résidu qui est plutôt moins oscillant donc de plus basse fréquence que l'IMF et N est le nombre d'IMFs.

Cette approche repose entièrement sur les caractéristiques oscillatoires de $x(t)$ et elle est adaptée à celui-ci. C'est pourquoi le nom de fonction modale intrinsèque (IMF) a été retenu, principalement car, il associe naturellement l'idée de décrire un signal $x(t)$ suivant ses différents modes d'oscillations naturelles.

La méthode EMD est par construction, c'est à dire, si l'on additionne toutes les IMFs ainsi que le résidu alors on peut reconstruire le signal original sans perte ou déformation de l'information initiale [19]. Une fonction modale intrinsèque (IMF) est une fonction vérifiant les propriétés suivantes

- 1) La fonction oscille autour de 0 : le nombre de passages à zéro du signal diffère d'au plus 1 avec son nombre d'extrema.
- 2) L'enveloppe moyenne de la fonction est nulle [20].

2.2. Propriétés fondamentales de l'EMD [21]

- **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. En effet, l'EMD d'une somme de deux signaux est en général différente de la somme des EMD des signaux séparés. Par conséquent, cette méthode est globalement non linéaire. On peut noter au plus trois sources de non-linéarité.

1. 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.
2. 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 [22].

- **Orthogonalité**

D'après l'équation (2.1), l'EMD permet d'écrire un signal comme une somme finie de composantes. Idéalement, il serait intéressant que cette décomposition soit orthogonale.

$$\langle \text{IMF}_m | \text{IMF}_n \rangle = 0 \quad \forall (m \neq n) \quad (2.2)$$

$\langle . | . \rangle$ est le produit scalaire dans L^2 . Comme chaque élément de la décomposition $\text{IMF}_j(t)$ est obtenu par la différence entre le signal $x(t)$ et sa moyenne locale $\overline{x(t)}$, alors

$$\langle \text{IMF}_j(t) | \overline{x(t)} \rangle = (x(t) - \overline{x(t)}) \overline{x(t)} = 0 \quad \forall t \quad (2.3)$$

Il faut noter que cette égalité n'est pas strictement vérifiée dans la pratique puisque la moyenne estimée est déduite à partir des deux enveloppes. Aussi, en toute rigueur, comme l'orthogonalité s'exprime de manière globale, nous devons effectuer une moyenne sur l'intervalle étudié et alors

$$\overline{(\overline{x(t)} - \overline{x(t)}) \overline{x(t)}} = 0 \quad (2.4)$$

Lors de l'estimation de l'orthogonalité, le résidu n'est pas pris en compte. En effet, ce résidu n'est pas une IMF et il correspond à la tendance du signal. Dans la pratique, les erreurs d'approximation commises sont faibles mais souvent non négligeables. L'orthogonalité permet de réduire la représentation et décrit le signal dans un espace optimal au sens du minimum de redondance d'information. Dans ce sens, il est suggéré par les auteurs en [23] que la décomposition en oscillations rapides et oscillations lentes serait « quasi-orthogonale ».

- **Localité**

La gamme des oscillations contenues dans l'IMF change sur l'échelle temporelle, mais la première IMF contient localement celles qui sont les plus rapides par rapport aux autres IMFs pour un même instant considéré. Cette propriété d'oscillations locales reste d'ailleurs toujours vérifiée entre des IMFs successives.

L'EMD permet de sélectionner localement les oscillations correspondant aux hautes fréquences, pour tendre progressivement vers celles qui correspondent aux plus basses fréquences. Le même signal analysé à l'aide de la TF n'aurait pas permis de détecter l'instant de changement des fréquences du signal, clairement mis en évidence ici. Ainsi comme le font justement remarquer Flandrin et al, la discrimination haute et basse fréquence est d'une part essentiellement qualitative (les oscillations ne sont pas nécessairement sinusoïdales) et d'autre part elle ne s'applique que localement [24].

- **Calcul de l'enveloppe moyenne par interpolation des maxima et minima**

L'interpolation est l'une des étapes clés dans l'estimation et l'extraction des IMFs à partir des extrema. Bien évidemment, de nombreuses approches existent pour

rendre facile le problème d'interpolation, mais les plus couramment utilisées font partie des méthodes dites par collocation. Il existe de nombreuses approches de collocation, allant des plus simples (forme de Newton ou de Lagrange) aux plus élaborées comme les splines-cubiques [24].

- ✓ L'approche « escalier » : est une fonction constante par morceaux et dont l'intervalle est centré autour des points $x(i)$;
- ✓ L'approche « linéaire » : est une fonction continue linéaire par morceaux entre deux points consécutifs $x(i)$. Une droite étant entièrement définie par deux points, l'interpolation est unique ;
- ✓ L'approche « cubique » : est une interpolation polynomiale par morceaux (cubique sur chaque intervalle) sans condition tangentielle stricte;
- ✓ L'approche « spline » : est une interpolation par morceaux à l'aide des polynômes cubiques d'Hermite (sur chaque intervalle). C'est une approximation plus locale que la précédente dans le sens où les variations sont plus douces entre les différents segments;
- ✓ L'approche « akima » : est une interpolation par splines cubiques privilégiant le lissage de l'ensemble des points au détriment de la monotonie de la courbe (la dérivée seconde n'est pas nécessairement continue). Cet interpolateur peut traiter un ensemble de points dispersés.

De manière générale, l'ensemble des interpolations produisent des résultats satisfaisants à l'exception des approches « escalier » et « linéaire » qui ne sont pas recommandées pour l'estimation des IMFs. En effet, ces deux méthodes aboutissent à un nombre trop important de modes. D'après les études menées, l'interpolation par les splines cubiques est très recommandée pour ses bons résultats fournis.

2.3. Description de l'algorithme EMD

Le but de l'EMD est de décomposer le signal en une somme finie de modes oscillants IMFs. D'une manière plus explicite, l'extraction des IMFs suit les étapes suivantes

1. Trouver les extrema locaux (maximum et minimum) du signal (étape 3b) ;

2. Estimer les enveloppes supérieure et inférieure par interpolation respective des maxima et minima locaux (étape 3c), l'interpolation utilisée dans ce cas est basée sur les splines cubiques.
3. Estimer l'enveloppe moyenne locale à partir des enveloppes supérieure et inférieure (étape 3d).
4. Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée (étape 3 e). Cela correspond alors à la première itération de 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.
5. Vérifier si le résidu présente un nombre suffisant d'extrema (supérieure à 2) et réitérer sur le signal résultant le processus d'extraction de l'IMF (étape 3) ; sinon, le résidu est considéré comme étant le résidu final. Idéalement, le processus d'extraction des IMF est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema.

2.4. 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.

Le procédé de tamisage est résumé dans le pseudo-code du tableau (2.1).

Etape 01 : Fixer ε , $j \leftarrow 1$ ($j^{\text{ème}}$ IMF)

Etape 02 : $r_{j-1}(t) \leftarrow x(t)$ (résidu)

Etape 03 : Extraire la $j^{\text{ème}}$ IMF :

(a) $h_{j,i-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t)$, $i \leftarrow 1$ (i : itération de la boucle de tamisage)

(b) Extraire les maxima et minima locaux de $h_{j,i-1}(t)$

(c) Calculer les enveloppes supérieure et inférieure $U_{j,i-1}(t)$ et $L_{j,i-1}(t)$ par interpolation (splines cubiques par exemple) avec les maxima et minima locaux de $h_{j,i-1}(t)$ respectivement.

(d) Calculer l'enveloppe moyenne :

$$m_{j,i-1}(t) \leftarrow (U_{j,i-1}(t) + L_{j,i-1}(t)) / 2$$

(e) Mettre à jour : $h_{j,i}(t) \leftarrow h_{j,i-1}(t) - m_{j,i-1}(t)$, $i \leftarrow i + 1$.

(f) Calculer le critère d'arrêt : $SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{j,i-1}(t) - h_{j,i}(t)|^2}{(h_{j,i-1}(t))^2}$

(g) Décider : répéter l'étape (b)-(f) tant que $SD(i) < \varepsilon$ et mettre alors $IMF_j(\equiv IMF_j(t)) \leftarrow h_{j,i}(t)$ ($j^{\text{ème}}$ IMF).

Etape 04 : Mettre à jour le résidu : $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$

Etape 05 : répéter l'étape 03 avec $j \leftarrow j + 1$ jusqu'à ce que le nombre d'extrema dans $r_j(t)$ soit inférieur à 2.

Tableau 2.1 : Pseudo-code de l'EMD.

Cet algorithme est résumé dans l'organigramme suivant

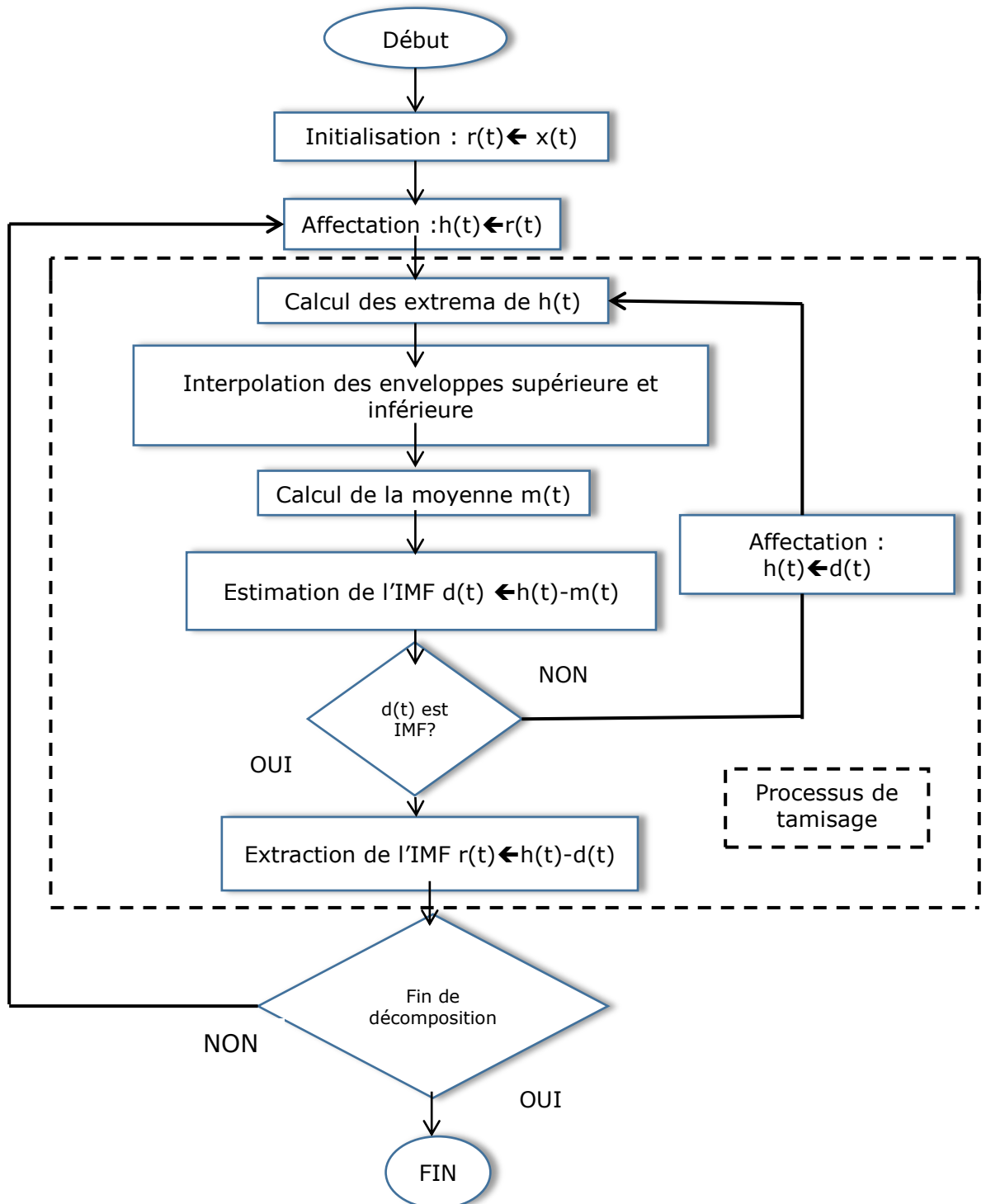


Figure 2.1 : Organigramme du pseudo-code de l'EMD.

Il est important de mentionner que le tamisage est répété plusieurs fois (i fois) jusqu'à ce que h vérifie les conditions nécessaires d'une IMF. La boucle principale, indiquée sur j , correspond au concept lui-même. Elle s'interrompt lorsqu'il n'est plus

possible d'extraire du résidu courant une autre IMF ($r(t)$ présente moins de deux extrema). C'est l'une des conditions pour que $IMF_j(t)$ soit une IMF d'après la définition. Cela permet de définir N le niveau de profondeur de la décomposition. La deuxième boucle, indicée sur i , est plus fondamentale. En effet, l'application stricte du concept (boucle sur j) conduirait à des fonctions $IMF_j(t)$ qui ne seraient pas nécessairement des IMFs, notamment les deux enveloppes qui ne seraient pas symétriques par rapport à zéro. D'où la nécessité d'avoir une seconde boucle (indicée sur i) qui correspond au processus de tamisage [25].

Enfin, l'ensemble de la boucle de tamisage permet d'obtenir des modes de type AM-FM mono-composante et permet d'autre part

- d'éliminer les petites oscillations (riding waves).
- d'adoucir les trop fortes amplitudes d'oscillations.
- de réduire les phénomènes de biais de proche en proche.

2.5. Critère d'arrêt

Comme indiqué précédemment, l'EMD est composée de deux boucles : l'une permet d'extraire l'IMF (qui détermine le niveau de profondeur de la décomposition) et l'autre conditionne la fonction $IMF_j(t)$ de manière à valider la définition d'une IMF. Dans la pratique (tableau 2.1), la boucle de tamisage qui permet d'extraire les IMFs correctement conditionnées est pilotée par un critère d'arrêt (étape 3f), noté $SD(i)$ [25]. D'une manière générale, les définitions du critère d'arrêt du processus de tamisage reposent toutes sur le même principe : $h_{j,i}(t)$ est de moyenne nulle et symétrique. D'après la définition, c'est l'une des conditions d'existence d'une IMF. Dans [20], les auteurs proposent un critère d'arrêt $SD(i)$ reposant sur la déviation standard et est définie par

$$SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{i-1}(t) + h_i(t)|^2}{[h_{i-1}(t)]^2} \quad (2.5)$$

$h_i(t)$, $h_{i-1}(t)$ sont deux résultats consécutifs de tamisage et T représente le nombre d'échantillons du signal. Pour plus de clarté, l'indice j , associé à l'estimation de la $j^{\text{ème}}$ IMF, a été volontairement omis. Le test d'arrêt est valide lorsque la différence entre deux tamisage successifs est inférieur à un seuil prédéfini ε tel que

$SD(i) < \varepsilon$ (étape 3g). Typiquement, la valeur de ε permettant d'arrêter le tamisage est comprise entre 0.2 et 0.3.

3. La méthode EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

La décomposition par l'EMD originale rencontre un obstacle qui restreint ses performances, dû principalement à l'intermittence et le mélange de modes. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour surmonter ces problèmes, ayant recours à de nouvelles variantes de l'EMD. Parmi ces variantes la Décomposition Modale Empirique de l'Ensemble EEMD.

La méthode EEMD (Ensemble EMD) a été proposée par Wu et Huang en 2009 [30]. C'est une méthode d'analyse de données assistée par du bruit dans laquelle les IMFs sont définies comme la moyenne d'un ensemble d'essais, chacun est la somme du signal à décomposer et d'un bruit blanc.

3.1. Principe

La méthode EEMD a été introduite initialement pour résoudre le problème de mélange de modes. Son principe est le suivant [30]

1. Etant donné un signal $x(t)$, on génère N_e réalisations $b_i(t)$, $1 \leq i \leq N_e$, de bruit blanc gaussien et de même variance σ_1^2 .

2. On calcule le signal bruité pour chaque réalisation,

$$s_i(t) = x(t) + b_i(t), \quad 1 \leq i \leq N_e \quad (2.6)$$

Ensuite, on extrait les N IMFs de ce signal bruité en utilisant la méthode EMD originale.

3. Les N_e réalisations donnent accès à N_e signaux bruités qui permettent l'extraction de N_e jeux de N IMFs : $IMF_{ki}(t)$, $1 \leq k \leq N$ et $1 \leq i \leq N_e$. Les IMFs de la méthode EEMD sont alors les moyennes d'ensemble de ces N_e jeux de N IMFs

$$IMF_{EEMD_k} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} IMF_{ki}(t) \quad (2.7)$$

$$1 \leq k \leq N$$

L'amplitude du bruit blanc Gaussien ε est pilotée par le taux d'erreur ε_n sur la reconstruction du signal $x(t)$ par sommation des IMFs et par le nombre N_e de moyennes effectuées par la relation

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{N_e}} \quad (2.8)$$

L'organigramme de la méthode EEMD est représenté dans la figure (2.2) [23].

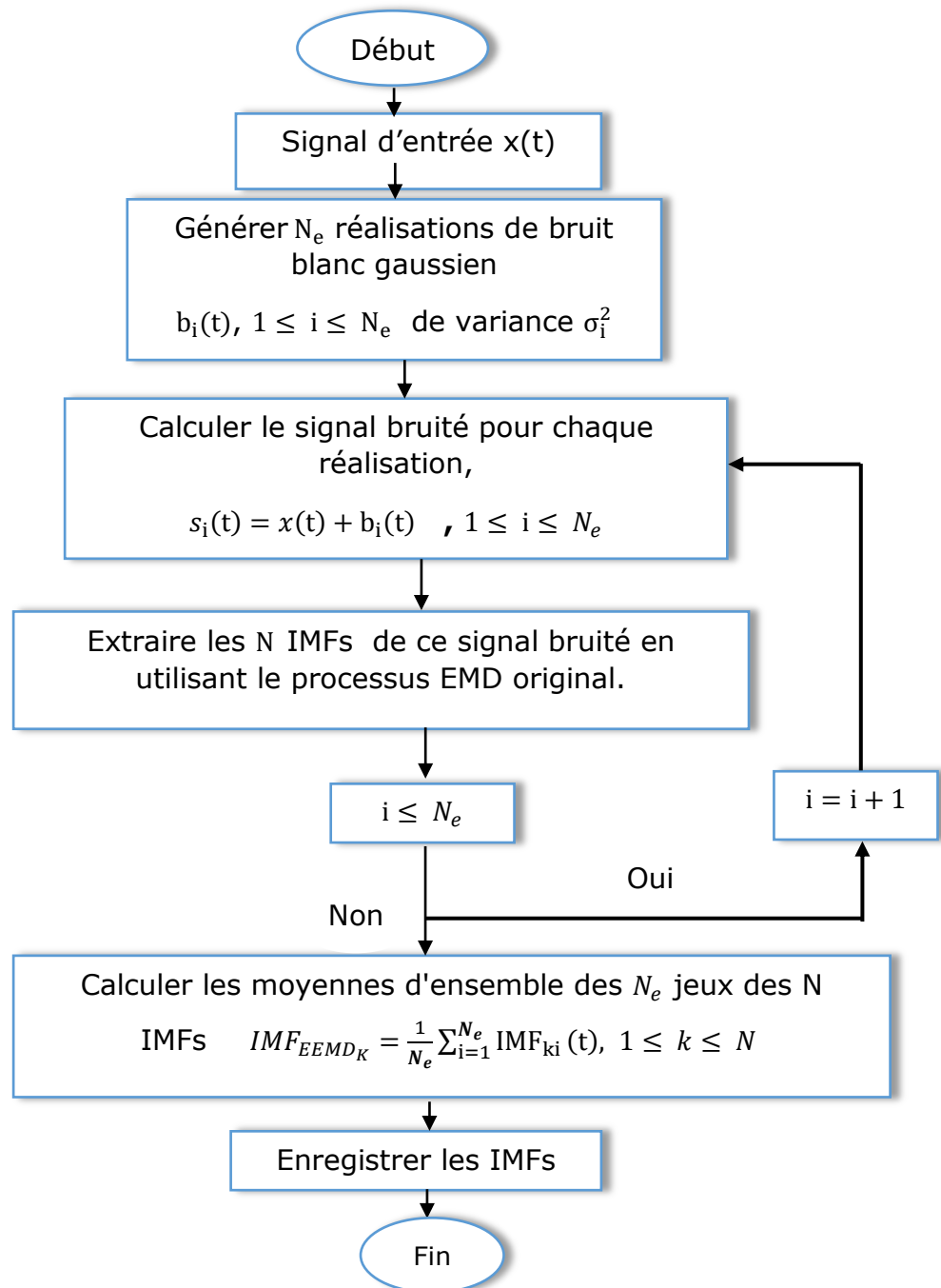


Figure 2.2 : Organigramme de la méthode EEMD.

4. La méthode CEEMDAN (Complementary EEMD with Adaptive Noise)

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 [32] 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.2.6) est décomposée indépendamment des autres réalisations et ainsi pour chaque réalisation, un résidu est obtenu

$$r_k^i(t) = r_{k-1}^i(t) - \text{IMF}_k^i(t) \quad (2.9)$$

Dans la méthode CEEMDAN [32], les modes de décomposition sont notés $\overline{\text{IMF}}_k(t)$ et un premier résidu est calculé

$$r_1(t) = x(t) - \overline{\text{IMF}}_1(t) \quad (2.10)$$

$\overline{\text{IMF}}_1(t)$ 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 $\overline{\text{IMF}}_2(t)$ par moyennage. Le prochain résidu est défini comme

$$r_2(t) = r_1(t) - \overline{\text{IMF}}_2(t) \quad (2.11)$$

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 l'organigramme de la figure (2.3).

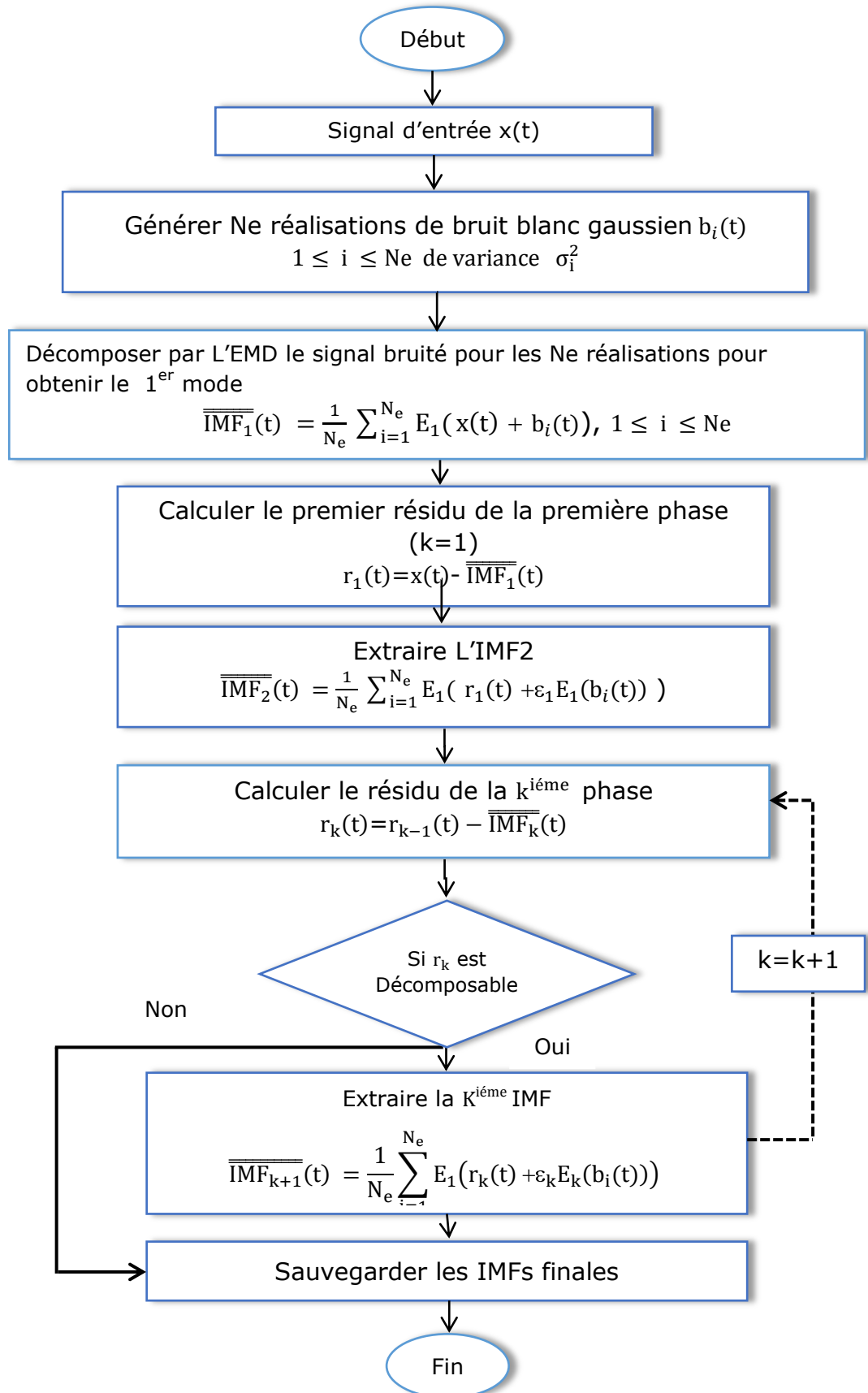


Figure 2.3 : Organigramme de la méthode CEEMDAN.

5. Simulation et Résultats

L'analyse d'un signal ultrasonore nécessite la connaissance d'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 détection et la localisation d'un défaut et la caractérisation d'un matériau.

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 le début de ce chapitre. Une étude comparative entre ces méthodes permettrait de choisir celle qui conviendrait le mieux à ce type de signaux. On note que ces signaux simulés sont similaires à ceux rencontrés dans le CND par ultrasons (signaux réels).

5.1. Modèle d'un signal ultrasonore

Les motifs des échos ultrasonores 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 ultrasonore est essentielle pour déterminer les propriétés de ces échos. Les échos ultrasonores générés ou détectés par des transducteurs piézoélectriques sont modélisés en termes d'échos gaussiens superposés [34]. Chaque écho gaussien dans le modèle est une fonction non linéaire d'un ensemble de cinq paramètres. Dans les tests pulse-écho par ultrasons, l'écho rétrodiffusé d'un réflecteur peut être modélisé comme suit

$$s(t) = \beta e^{-\alpha (t-\tau)^2} \cos (2\pi f_c(t - \tau) + \varphi) \quad (2.12)$$

β est l'amplitude du signal ; α est le facteur de largeur de la bande passante ; τ est le temps d'arrivée ; f_c est la fréquence centrale et φ est la phase.

Les paramètres de ce modèle ont des significations intuitives. La largeur de bande détermine la durée de l'onde mesurée dans le domaine temporel, le temps d'arrivée ou le retard est lié à l'emplacement d'une interface ou d'un défaut (réflecteur), la fréquence centrale est liée à la fréquence centrale du transducteur piézoélectrique ou aux caractéristiques fréquentielles du milieu de propagation, la phase et

l'amplitude donnent des informations sur l'impédance acoustique, la taille, la profondeur et l'orientation d'une interface ou d'un défaut.

Dans le cas où les échos détectés sont corrompus par un bruit, ce dernier sera ajouté au modèle mathématique de l'équation (2.12).

5.2. 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.2.12). 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, les fréquences et les temps d'arrivées sont donnés dans le tableau (2.2).

| Echo | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Temps d'arrivée (s) | 9×10^{-6} | 6.5×10^{-5} | 7×10^{-5} | 8×10^{-5} |
| Amplitude (u.a) | 3 | 2.2 | 1.7 | 1 |
| Fréquence (Mhz) | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 |

Tableau 2.2 : Paramètres du signal simulé.

La figure (2.4) illustre la représentation temporelle et spectrale du signal simulé.

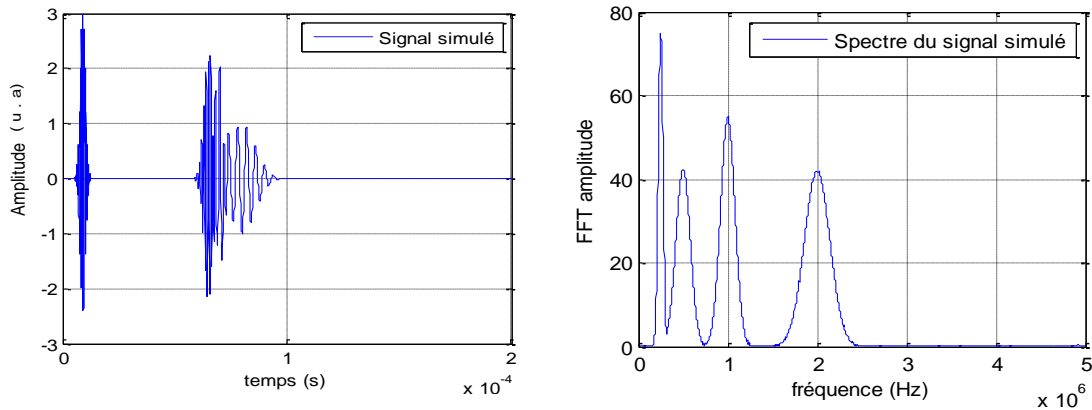


Figure 2.4 : Signal simulé et sa représentation spectrale.

5.3. 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 (2.5). Le spectre fréquentiel pour chaque IMF est ensuite calculé et représenté, sur la figure (2.6), 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 notre objectif est la séparation des 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 2.7). 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 (2.8). On constate que les échos sont bien détectés et séparés à l'exception de l'IMF1 qui contient deux échos à la fois.

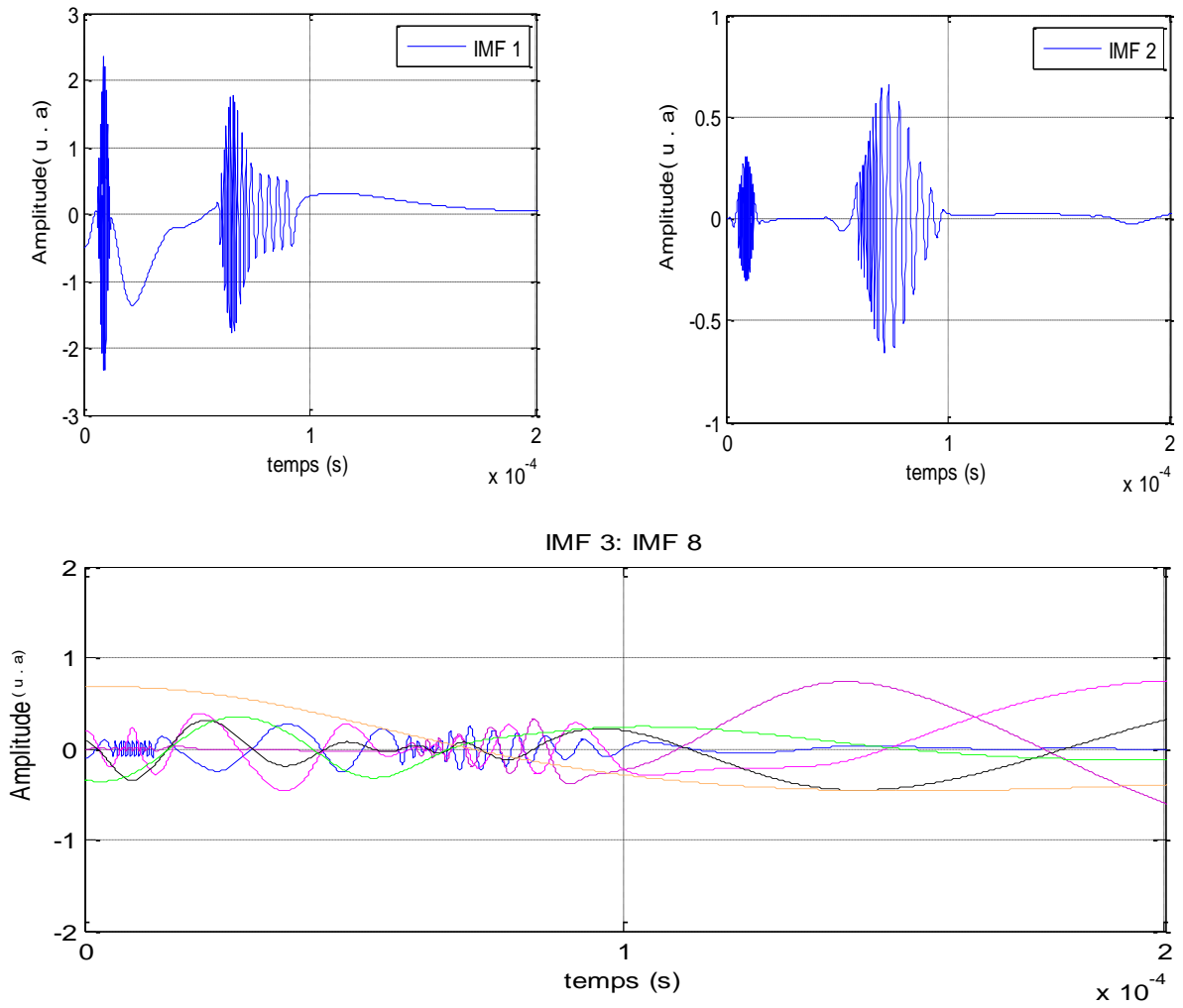


Figure 2.5 : Les IMFs du signal simulé.

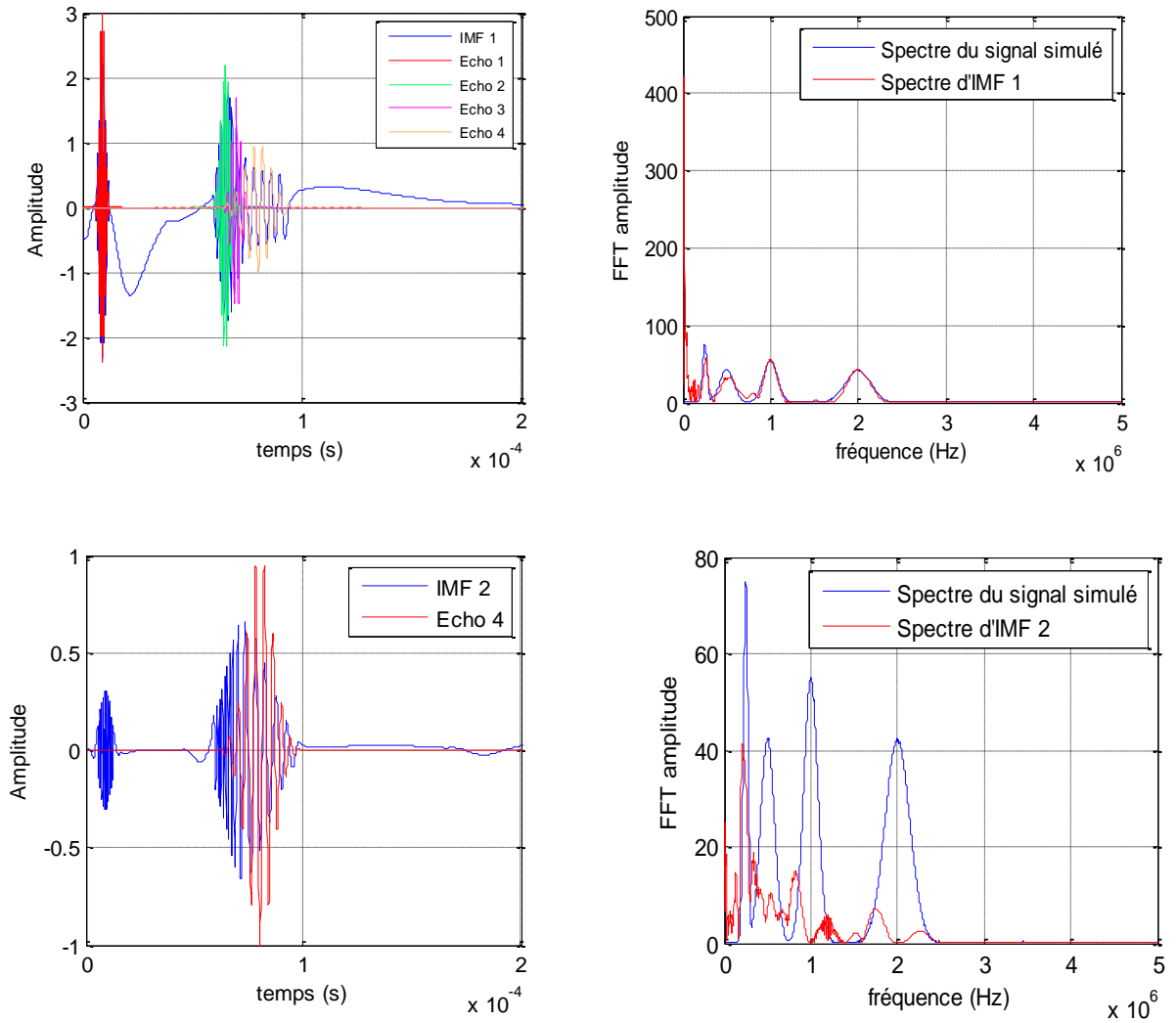


Figure 2.6 : Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à gauche et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à droite.

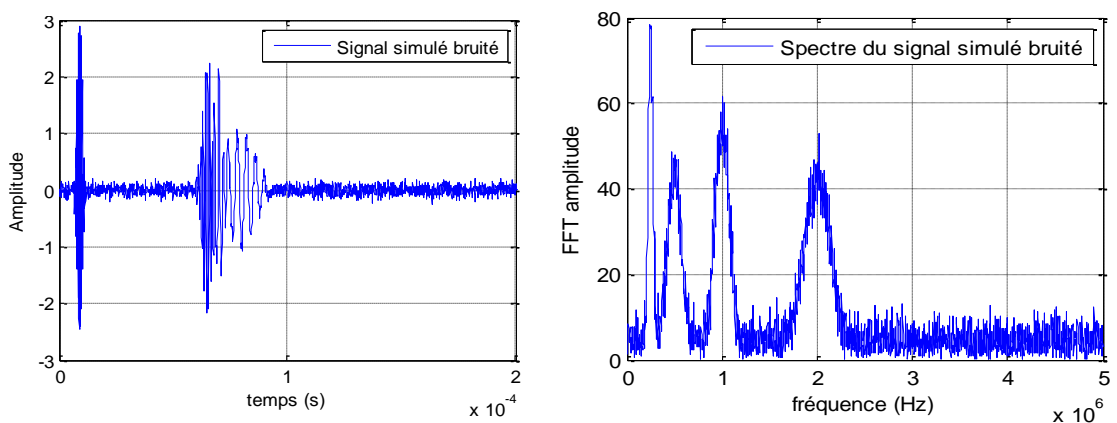


Figure 2.7 : Signal simulé bruité et sa représentation spectrale.

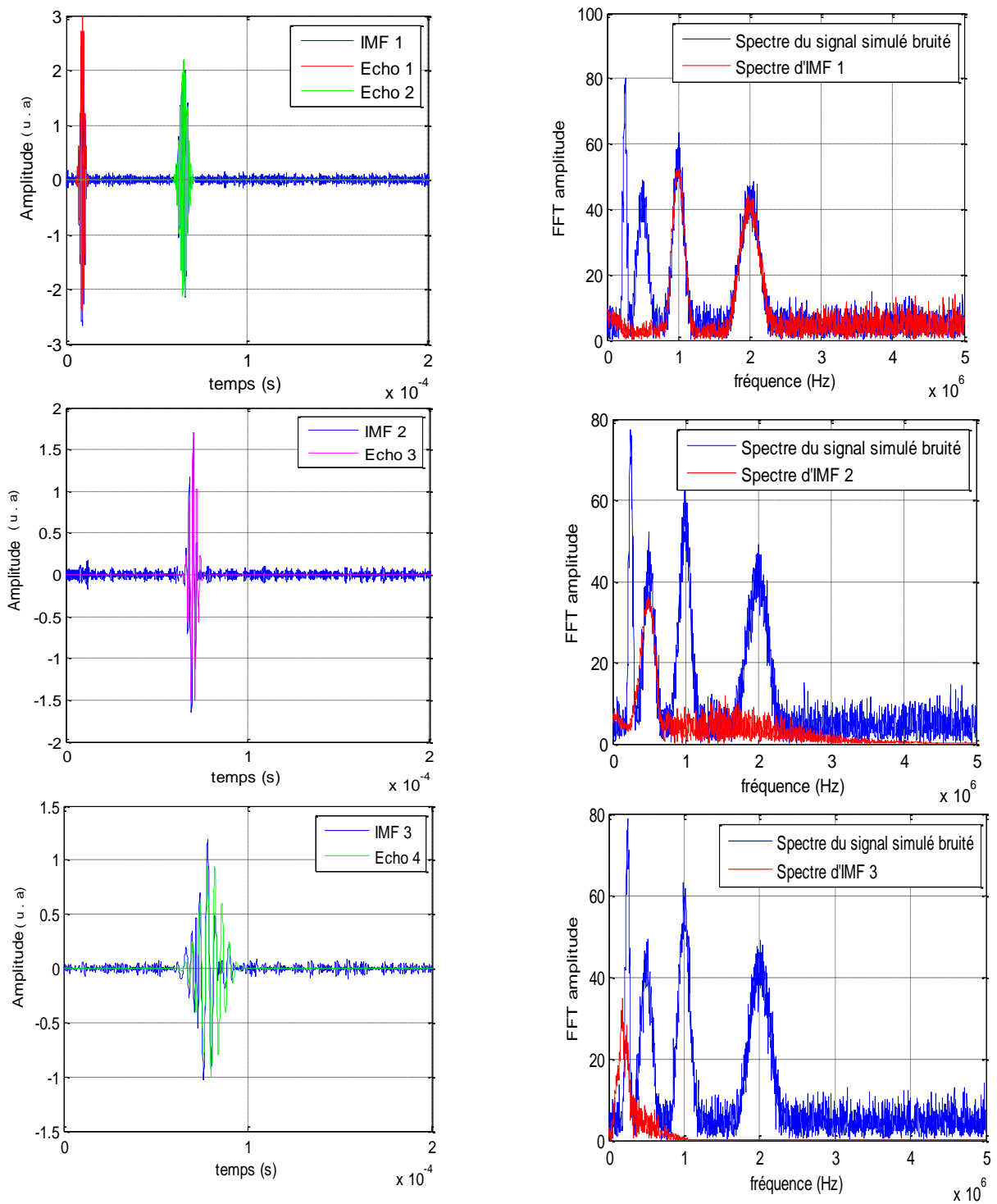


Figure 2.8 : Représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant à *gauche* et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé bruité à *droite*.

- **Interprétation / Inconvénients**

L'EMD décompose le signal simulé en 8 IMFs des plus hautes fréquences vers les plus basses fréquences plus un résidu (Figure 2.5). 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 [25, 26]. 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. A partir du 3^{ème} mode, les composantes présentent de très faibles énergies et des oscillations indésirables.

Un autre inconvénient de l'EMD concerne le critère d'arrêt du processus de tamisage, qui est profondément lié à l'interprétation de la moyenne locale nulle dans la définition d'une IMF. Le critère d'arrêt est cependant nécessaire pour que l'algorithme termine en un nombre fini d'étapes [27-29].

- **Conclusion**

En comparant les résultats obtenus et illustrés par les figures (2.6) et (2.8), 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 le même signal simulé avec les deux variantes assistées par le bruit l'EEMD et la CEEMDAN.

5.4. 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 (2.9). Les représentations temporelles de chaque IMF avec l'écho correspondant ainsi que son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé

bruité sont illustrées dans la figure (2.10). 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.

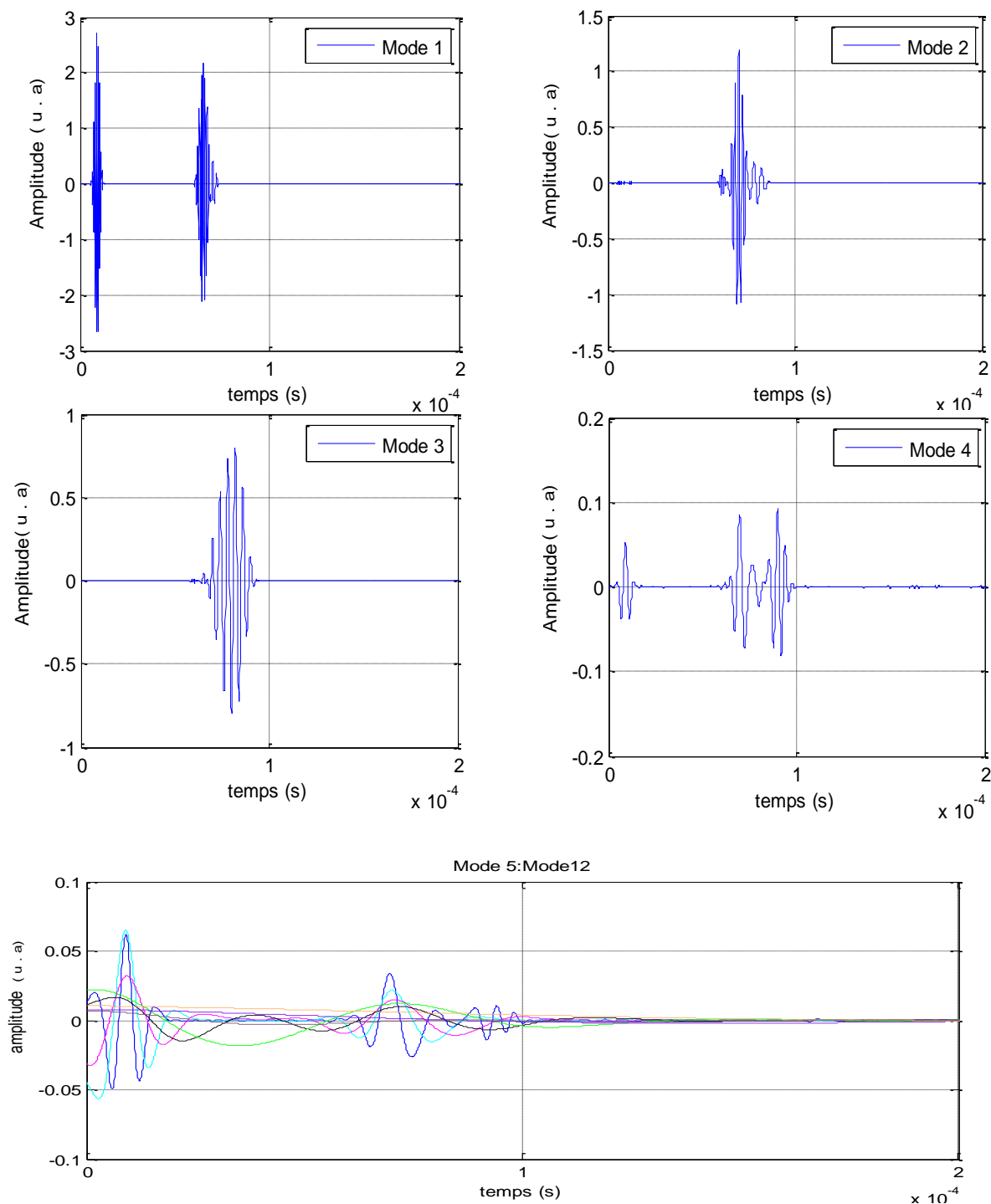


Figure 2.9 : Les modes du signal simulé.

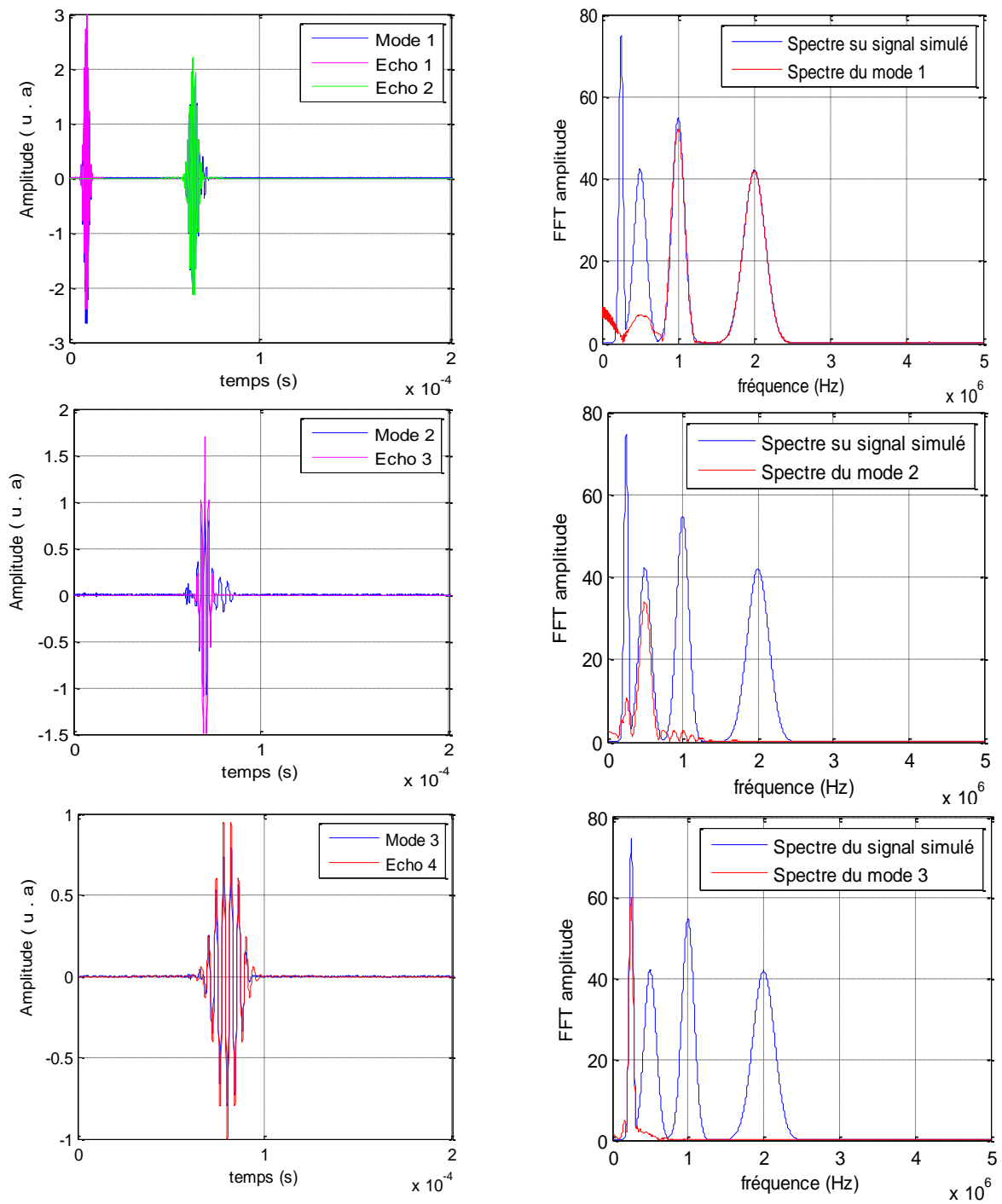


Figure 2.10 : Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à *gauche* et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à *droite*.

- **Interprétation / Inconvénients**

Un nombre total de 12 modes a été obtenu par la décomposition EEMD (figure 2.9). D'une part, les composantes du signal sont bien récupérées et décomposées indépendamment l'une de l'autre (IMF 2 et 3) à l'exception de la première IMF, présentant ainsi le même problème de mixage de modes rencontré avec l'EMD. D'autre part, la décomposition EEMD donne des modes redondants qui sont apparus car différentes réalisations du signal plus le bruit ont produit un nombre différent de modes. A partir du 5^{ème} mode, les composantes possèdent très peu d'énergie et ne contiennent aucune information pertinente du signal.

On remarque aussi que l'amplitude du bruit et le nombre d'essai affectent les résultats de la décomposition. Ainsi, pour décomposer un signal par la méthode EEMD, il faut d'abord choisir le niveau du bruit et le nombre d'essai N_e adéquats car si l'amplitude du bruit est trop petite par rapport à l'amplitude du signal, alors le rajout du bruit n'aura aucun effet sur le mélange de modes. Alors que si l'amplitude du bruit est trop grande par rapport à celle du signal, alors la décomposition EEMD donnera des composantes IMFs redondantes.

- **Conclusion**

Les composantes du signal sont récupérées et décomposées sauf les deux échos 1 et 2 qui sont présents dans le mode 1, réduisant en grande partie, le 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.

5.5. Application de la CEEMDAN sur le signal simulé

Pour améliorer l'algorithme EEMD, on applique la CEEMDAN sur le signal simulé 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 (2.11) et (2.12) respectivement.

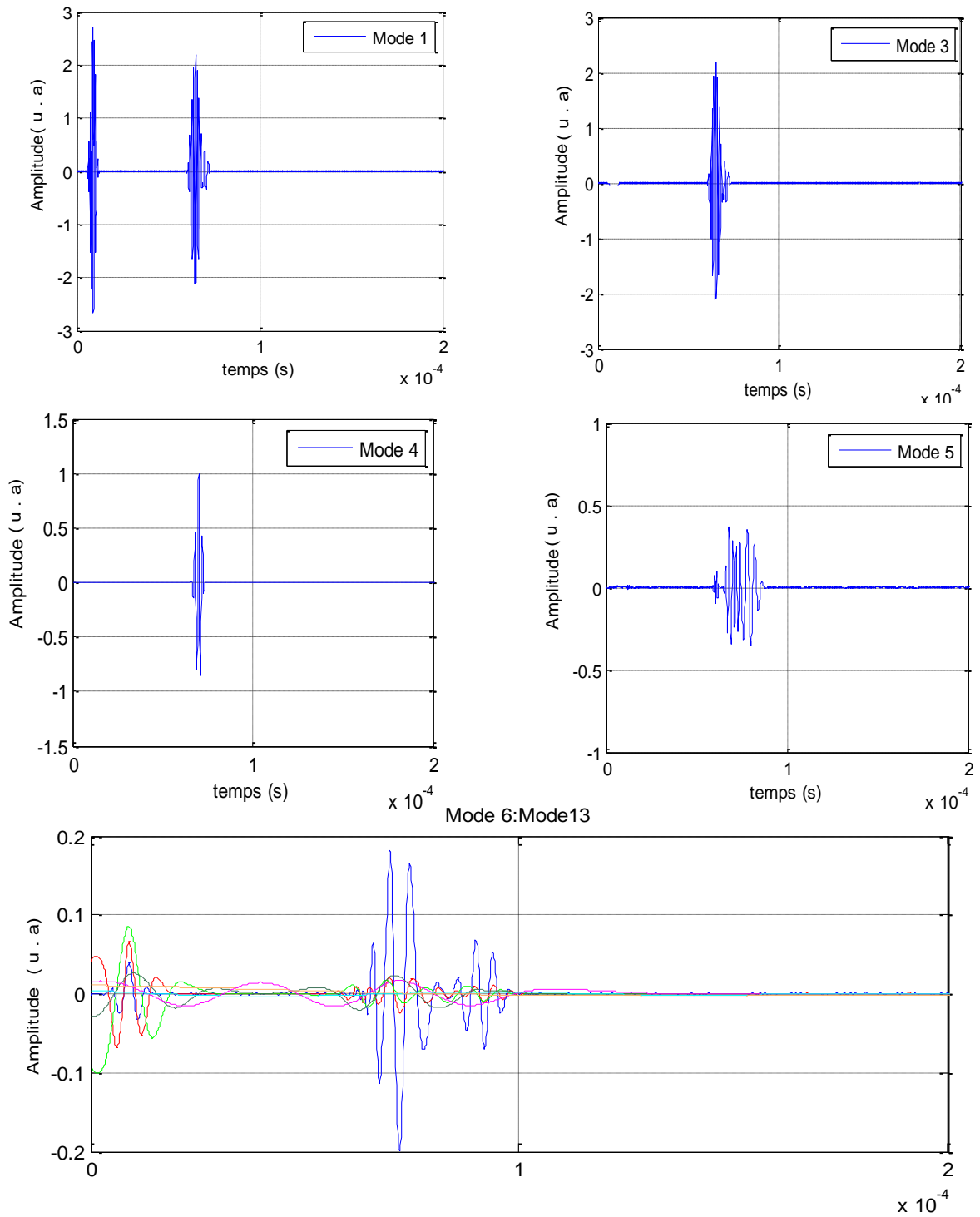


Figure 2.11 : Les modes du signal simulé.

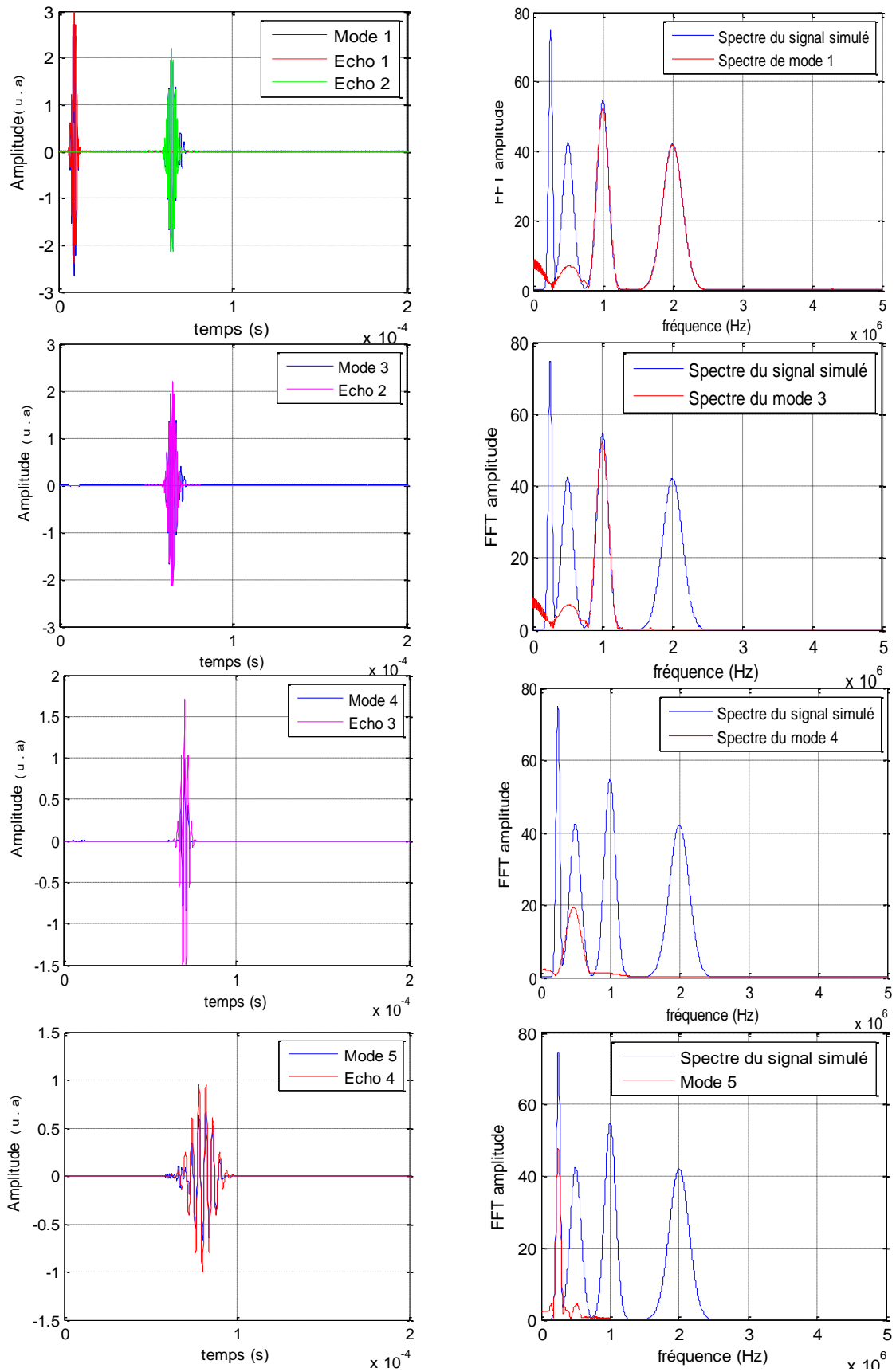


Figure 2.12 : Représentations temporelles de chaque mode avec l'écho correspondant à droite et son spectre fréquentiel avec le spectre du signal simulé à gauche.

- **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.

Ses résultats sont meilleurs avec un nombre d'essais égal à la moitié de celui utilisé par l'EEMD.

6. Reconstruction du signal et estimation de l'erreur

L'extraction des IMFs est non-linéaire, mais leur recombinaison pour la reconstruction exacte du signal est linéaire. Le processus de reconstruction du signal est donné par l'équation suivante [35]

$$x_r(t) = \sum_{j=1}^N \text{IMF}_j + r(t), \quad N \in \mathbb{N}^* \quad (2.13)$$

L'erreur de reconstruction est calculée par la soustraction du signal original et celui reconstruit, et elle est due essentiellement au processus de tamisage. L'estimation des enveloppes repose sur l'interpolation à l'aide des splines cubiques. Le fait d'utiliser les splines au voisinage des singularités introduit un lissage de celles-ci. L'accumulation des erreurs se traduit alors par l'apparition de composants artefacts qui n'ont pas lieu d'exister théoriquement.

$$e(t) = x(t) - \sum_{j=1}^N \text{IMF}_j - r(t), \quad N \in \mathbb{N}^* \quad (2.14)$$

6.1. Etude comparative

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 [38]

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ri})^2} \quad (2.15)$$

N est le nombre d'échantillons du signal simulé, $x_r(t)$ est le signal estimé, $x(t)$ est le signal original. Les valeurs moyennes de la RMSE des trois méthodes sont présentées dans le tableau (2.3).

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-17 | 1.7321e-03 | 4.9005e-17 |

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

7. Analyse des résultats expérimentaux

La méthode de décomposition modale empirique l'EMD et ses deux variantes l'EEMD et la CEEMDAN ont été appliquées, précédemment, sur des signaux simulés. Dans la suite de ce chapitre, on va les appliquer, pour prouver leurs performances, sur deux signaux ultrasonores réels recueillis à partir de deux expériences différentes utilisant la technique pulse-écho. Le premier signal provient d'un échantillon d'aluminium obtenu par la méthode par immersion dans la direction longitudinale. Le deuxième est un échantillon d'acier obtenu par contact dans la même direction. Les deux expériences ont été 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.

7.1. Expérience 01

7.1.1 Déroulement de l'expérience

La première expérience menée est basée sur la technique pulse-écho par immersion (figure 2.13), utilisant le principe de réflexion et de réfraction des ondes ultrasonores entre deux milieux différents liquide/solide séparés par une interface. L'échantillon utilisé est un cube d'Aluminium portant la référence (2017A) 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 empiéter 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, pour que les échos reçus soient des ondes longitudinales. C'est pourquoi l'échantillon a été placé à 4 cm du transducteur. Le signal ultrasonore recueilli contient trois échos qui apparaissent clairement lors de sa réflexion. Ces échos sont respectivement : l'écho d'excitation (E1), l'écho de face (E2) et l'écho de fond (E3).

7.1.2 Description du système de mesure

Le système de mesure est représenté à la figure (2.13). Il est constitué essentiellement d'une cuve comportant le support porte-échantillon. Un transducteur à immersion de fréquence 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).

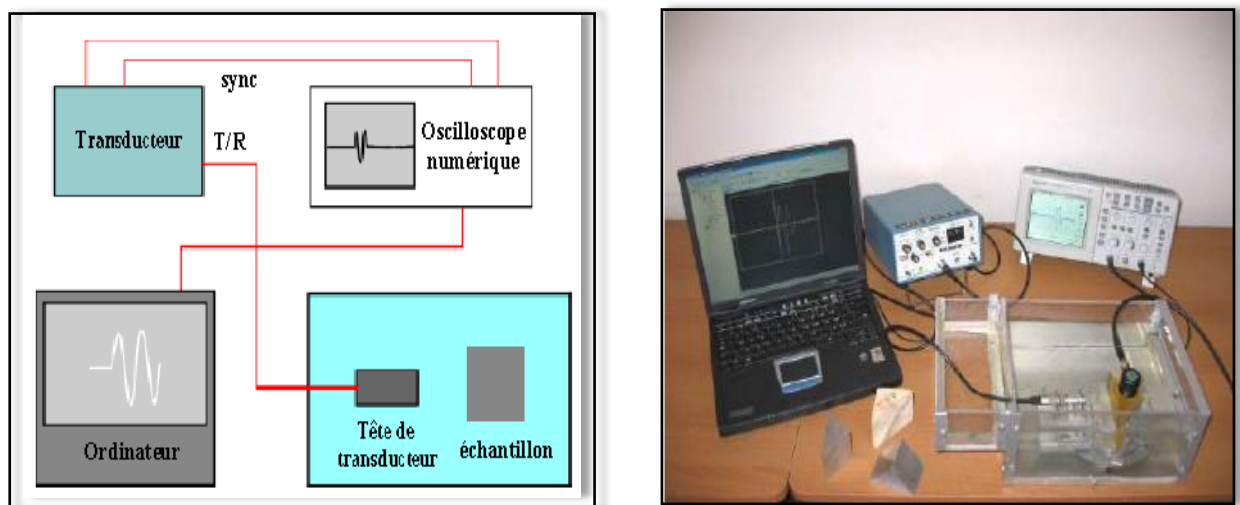


Figure 2.13 : vue générale de l'appareil de mesure et son schéma synoptique.

La figure (2.14) représente le signal envoyé par le transducteur ultrasonore ainsi que l'écho reçu de l'échantillon.

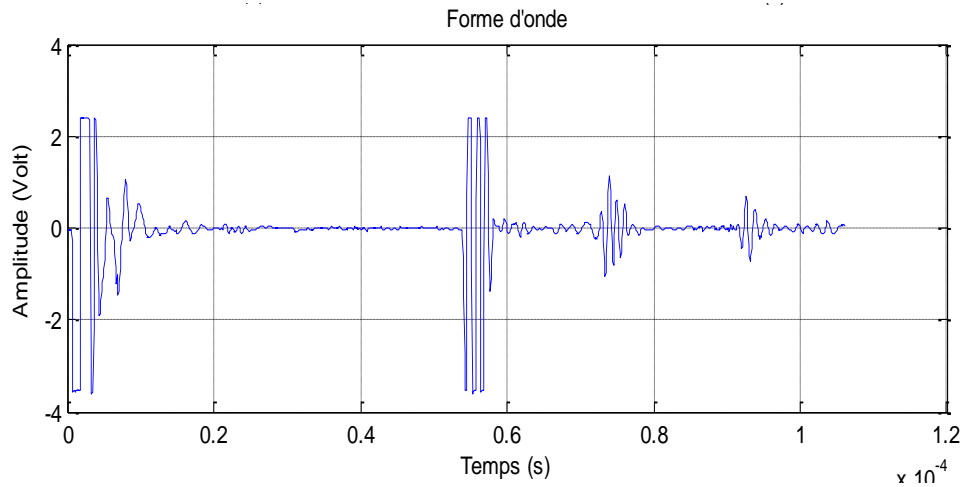


Figure 2.14 : Superposition du signal émis et l'écho reçu.

7.1.3 Caractérisation du matériau

- **Détermination de l'épaisseur de l'échantillon**

A partir de la figure (2.14), on voit que le premier écho représente le signal émis par le transducteur et le deuxième pic est décalé par rapport au premier d'un temps égal à : $t_1 = (56 - 1.9) \times 10^{-6} = 54.1 \mu\text{s}$. Comme la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'eau est égale à 1480 m/s , on obtient donc une interface située à la distance $x_1 = (v \times t_1)/2 = 0.040034 \text{ m}$, donc le premier pic correspond bien à la première face de l'échantillon. 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 6700 m/s , on a le troisième pic qui est décalé par rapport au deuxième de : $t_2 = (73.9 - 56) \times 10^{-6} = 17.9 \mu\text{s}$. 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.

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

- **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

$v_1 = \frac{2d_1}{t_1}$, d_1 est la distance entre le transducteur et la première face de l'échantillon.

La différence entre les maxima des deux premiers échos représente le temps de retard t_2 entre les deux interfaces de l'échantillon. A partir de t_2 , on peut alors calculer la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'Aluminium par la

relation $v_2 = \frac{2d_2}{t_2}$, d_2 est la distance séparant les deux façades de l'éprouvette.

Le facteur « 2 » dans les deux équations explique le trajet aller-retour de l'onde.

D'après la figure (2.14), on peut lire les deux temps : $t_1 = 54.1 \mu\text{s}$ et $t_2 = 17.9 \mu\text{s}$. 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

$$v_1 = \frac{2 \times 0.04}{54.1 \times 10^{-6}} = 1478 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad v_2 = \frac{2 \times 0.06}{17.9 \times 10^{-6}} = 6703.91 \text{ m/s}.$$

Notons que le quatrième écho qui apparaît sur la figure (2.14) représente un écho provenant des réflexions multiples entre les faces de l'échantillon.

7.1.4 Analyse du signal réel de l'Aluminium

- **Application de l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN**

La figure (2.15) représente les résultats de la décomposition du signal reçu par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN et qui permettent bien la séparation des échos réels. Pour plus de détails, on a tracé différentes courbes qui confirment ce constat tout en indiquant les avantages et les limitations de chaque méthode.

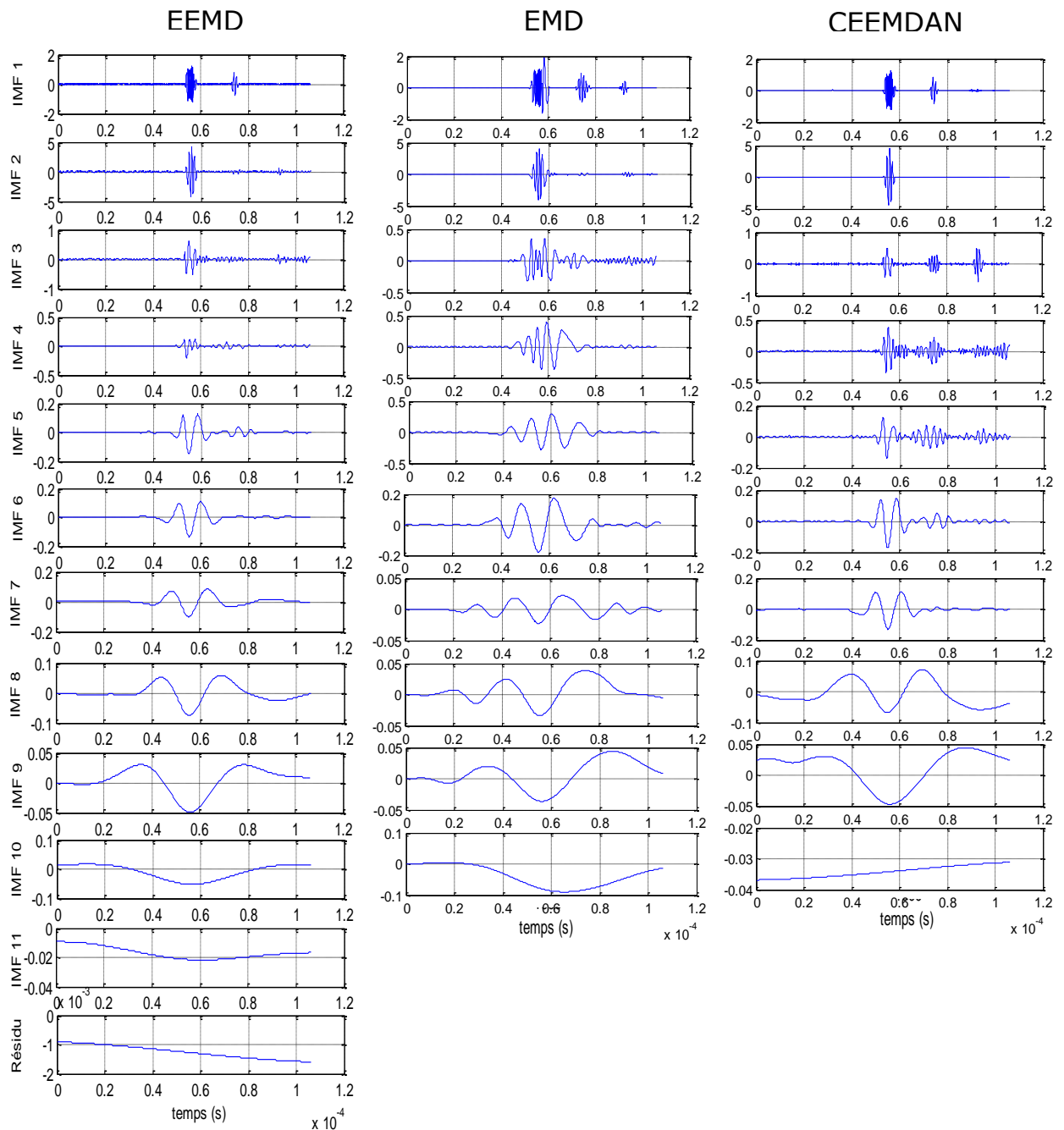


Figure 2.15 : Les IMFs du signal réel reçu obtenues par les trois méthodes.

Les figures de (2.16) jusqu'à (2.18) représentent la superposition des premières IMFs obtenues respectivement par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN avec le signal reçu. La figure (2.19) 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 donc de nombre d'IMFs, ce qui permet de réduire le temps de calcul et le nombre d'IMFs redondants.

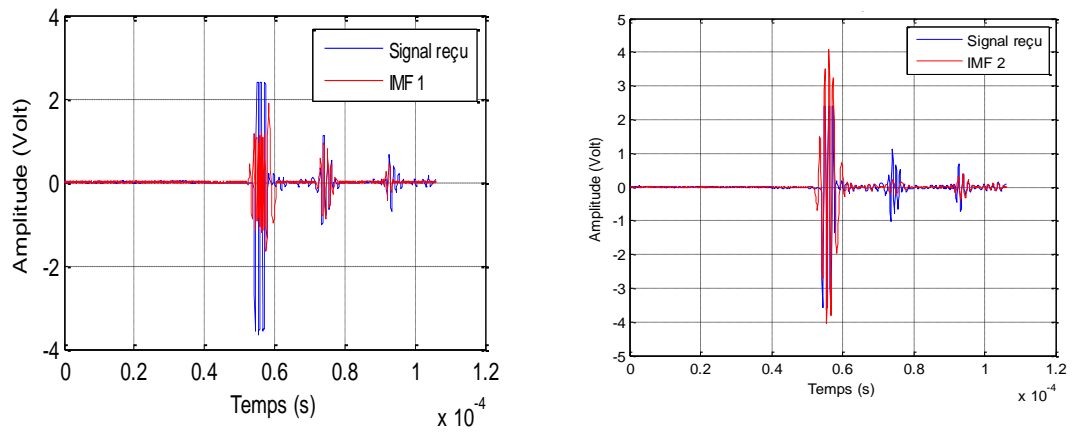


Figure 2.16 : Superposition des deux premières IMFs obtenues par EMD avec le signal reçu.

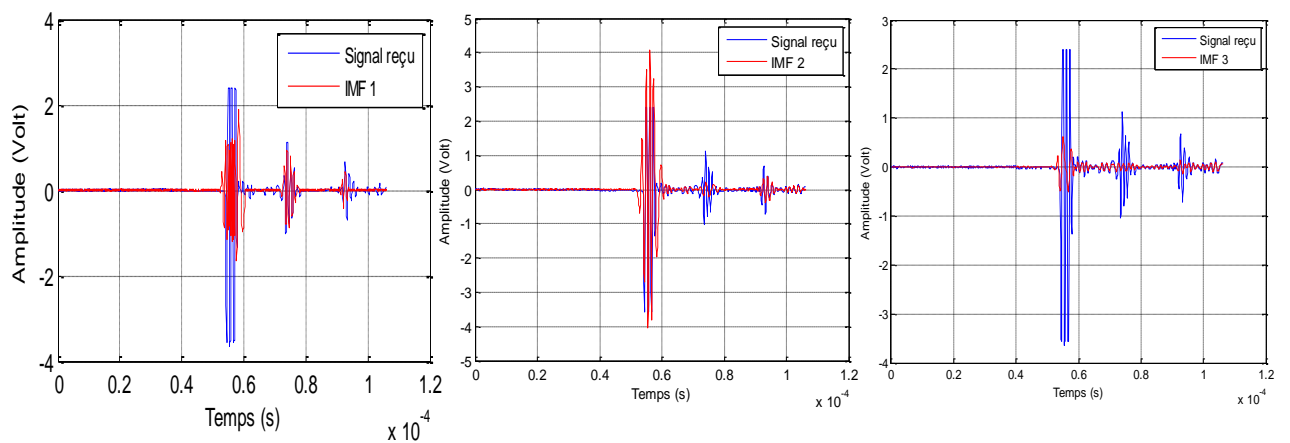


Figure 2.17 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par EEMD avec le signal reçu.

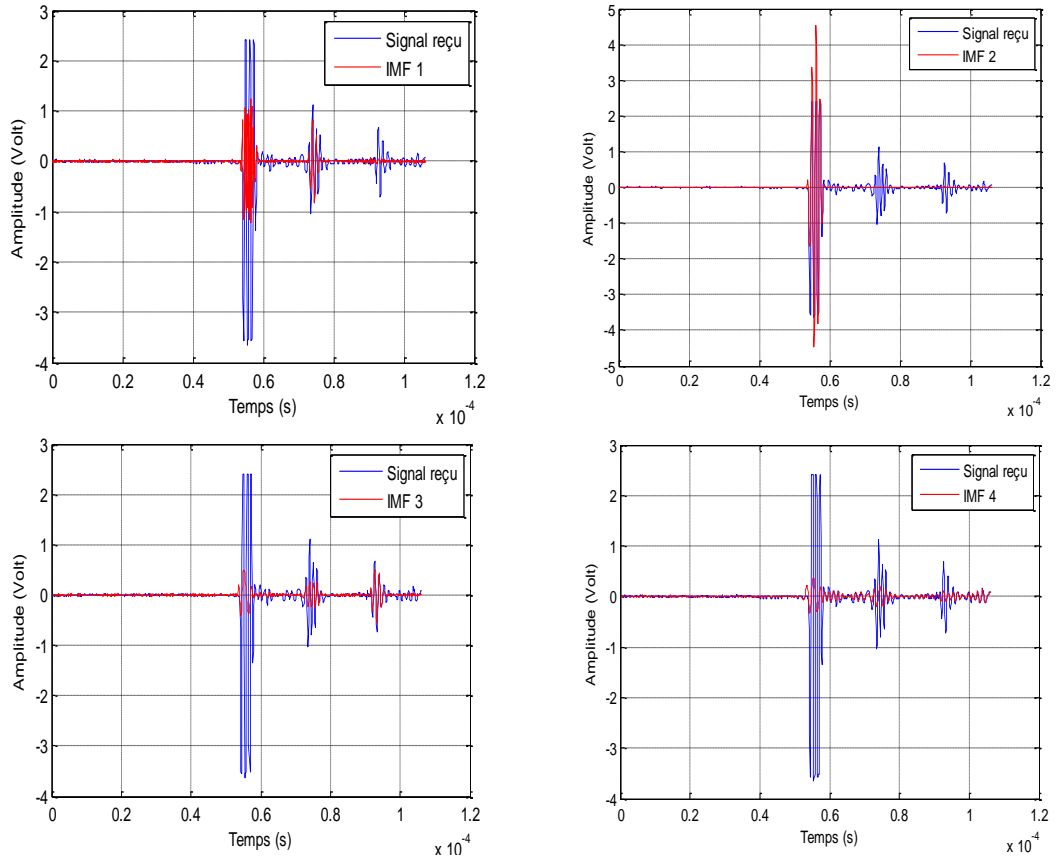


Figure 2.18 : Superposition des quatre premières IMFs obtenues par CEEMDAN avec le signal reçu.

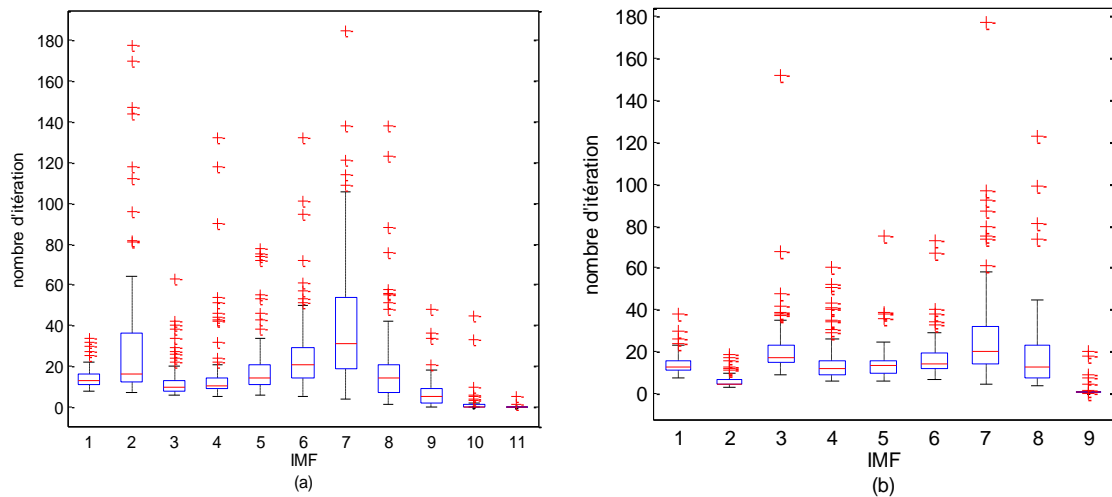


Figure 2.19 : Les IMFs en fonction du nombre d'itérations pour (a) l'EEMD (b) la CEEMDAN

- **Erreur de reconstruction**

D'après la figure (2.20), 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 par le signal simulé.

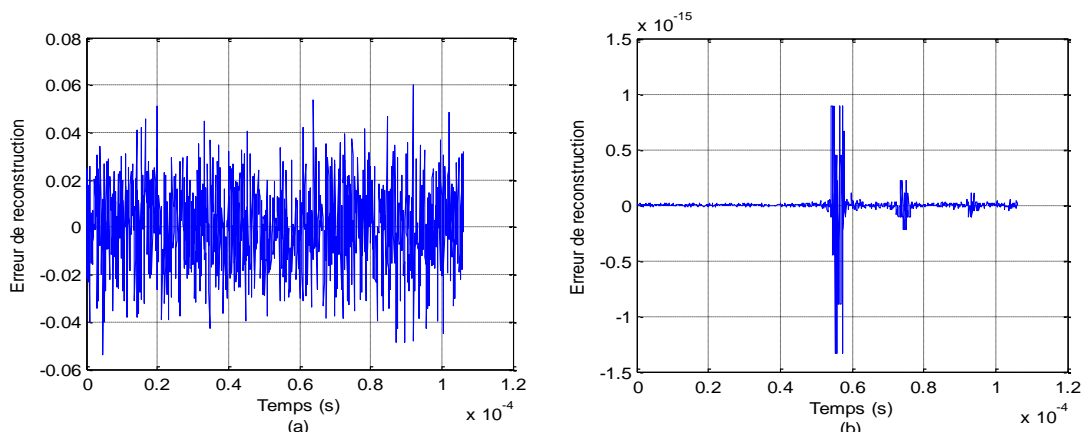


Figure 2.20 : Erreur de reconstruction pour : (a) l'EEMD (b) la CEEMDAN

- **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.

Le tableau (2.4) regroupe les valeurs des vitesses calculées à partir de l'IMF significative pour chacune des trois méthodes.

| Méthode | EMD (IMF1) | EEMD (IMF2) | CEEMDAN (IMF3) |
|---------------|------------|-------------|----------------|
| Vitesse (m/s) | 7643.31 | 6818.18 | 6693.40 |

Tableau 2.4 : calcul de la vitesse de propagation dans l'Aluminium pour les trois méthodes.

On a appliqué l'EMD et ses variantes sur le signal réel provenant d'un échantillon d'Aluminium en vue d'une détection et d'une localisation des échos. Les

performances de la CEEMDAN sont bien meilleures, ce qui prouve son efficacité pour le CND par ultrasons.

7.2. Expérience 02

7.2.1 Déroulement de l'expérience & description du système de mesure

Cette expérience est basée sur la technique pulse-écho par contact (figure 2.21). 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). 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. Le traitement des données acquises est assuré par un ordinateur doté d'un logiciel d'acquisition de données (WaveStar).

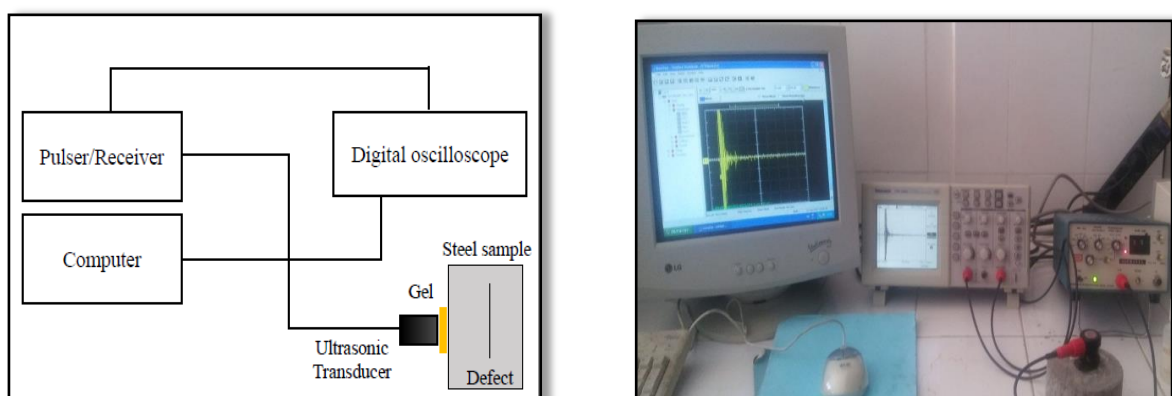


Figure 2.21 : Système de mesure : Schéma synoptique à gauche et vue générale de l'appareil de mesure à droite.

La figure (2.22) illustre l'écho reçu de l'échantillon d'Acier.

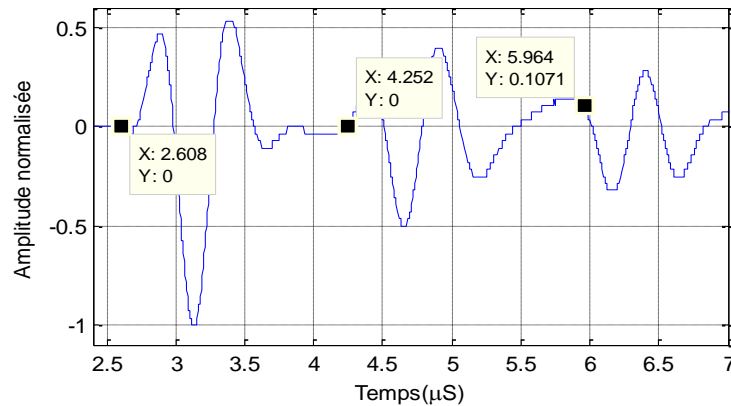


Figure 2.22 : Echo reçu de l'échantillon d'acier.

7.2.2 Caractérisation du matériau

- **Détermination de l'épaisseur de l'échantillon et de la position du défaut**

Dans la figure (2.22), le premier pic représente la première face de l'échantillon, les échos qui suivent sont des pics qui représentent l'intérieur du matériau.

Sachant que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'Acier est égale à 5950 m/s et connaissant la position du deuxième pic qui est décalé par rapport au premier d'un temps égale à : $t_3 = (4.252 - 2.608) \times 10^{-6} = 1.644 \mu\text{s}$. 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 est situé par rapport au deuxième 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 bien 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.

- **Calcul de la vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans l'Acier**

On a démontré que les trois premiers échos représentés dans la figure (2.22), correspondent effectivement à l'écho de la première face, l'écho de défaut et l'écho de la deuxième face de l'échantillon.

L'onde longitudinale se propage dans l'Acier entre la première et la deuxième interface de l'échantillon pendant un temps t_3 avec une vitesse de propagation de $v_3 = \frac{2d_3}{t_3}$ où d_3 est 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 $v_4 = \frac{2d_4}{t_4}$ avec d_4 est la distance entre le défaut et la deuxième face de l'échantillon.

A partir de la figure (2.22), on peut lire les différents instants d'apparition des échos : $t_3 = 1.644 \mu\text{s}$ et $t_4 = 3.356 \mu\text{s}$. Sachant que : $d_3 = 5 \text{ mm}$ et $d_4 = 4 \text{ mm}$, 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 : $v_3 = 6082.725 \text{ m/s}$ et $v_4 = 5959.475 \text{ m/s}$.

7.2.3 Analyse du signal réel de l'Acier

- **Application de l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN**

D'après la figure (2.23), on remarque que les résultats de la décomposition du signal réel reçu par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN permettent bien la séparation des échos réels.

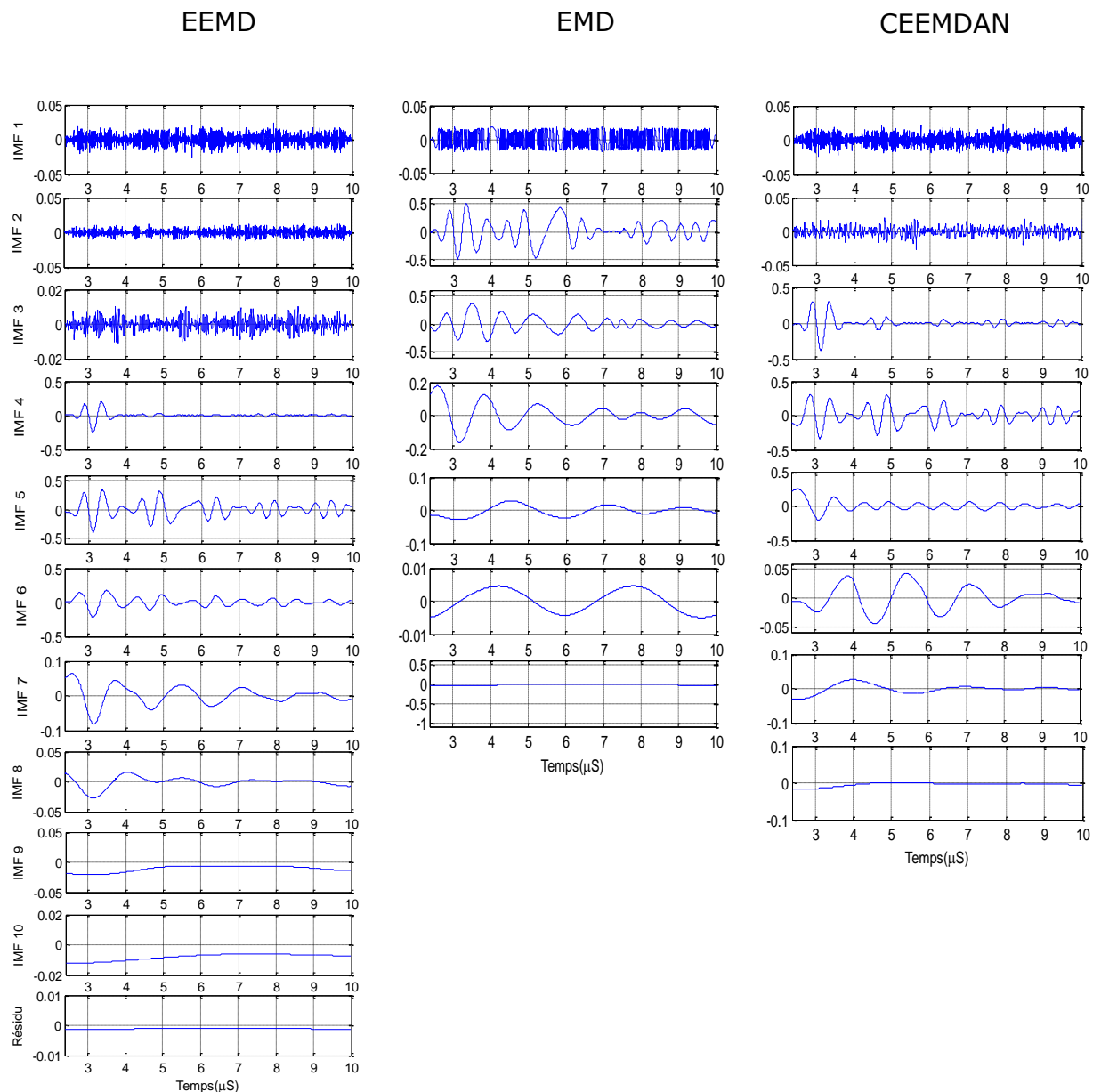


Figure 2.23 : Les IMFs du signal réel reçu obtenues par les trois méthodes.

Les figures de (2.24) jusqu'à (2.26), représentent la superposition des premières IMFs obtenues respectivement par l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN avec le signal reçu.

La figure (2.27) illustre l'effet du nombre d'itérations pour les deux variantes l'EEMD et la CEEMDAN. On constate que cette dernière nécessite un nombre moindre d'itérations et de nombre d'IMFs, ce qui permet de réduire le temps de calcul et le nombre d'IMFs redondants.

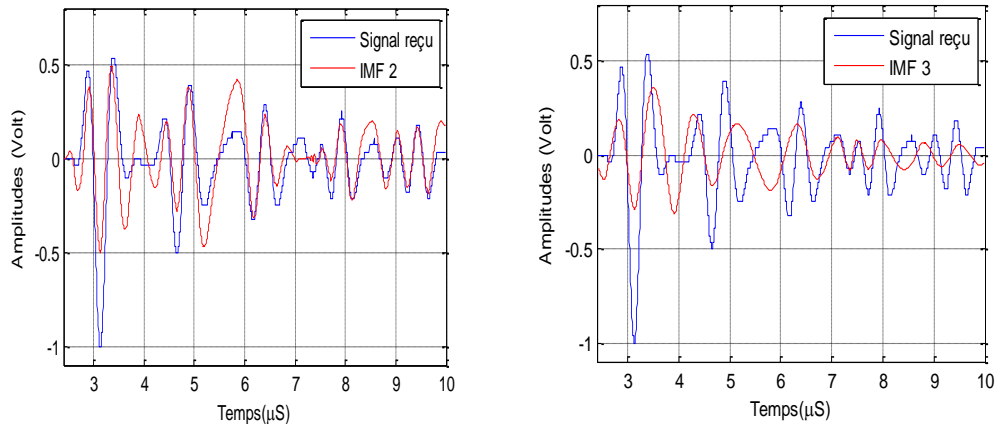


Figure 2.24 : Superposition des deux premières IMFs obtenues par EMD avec le signal reçu.

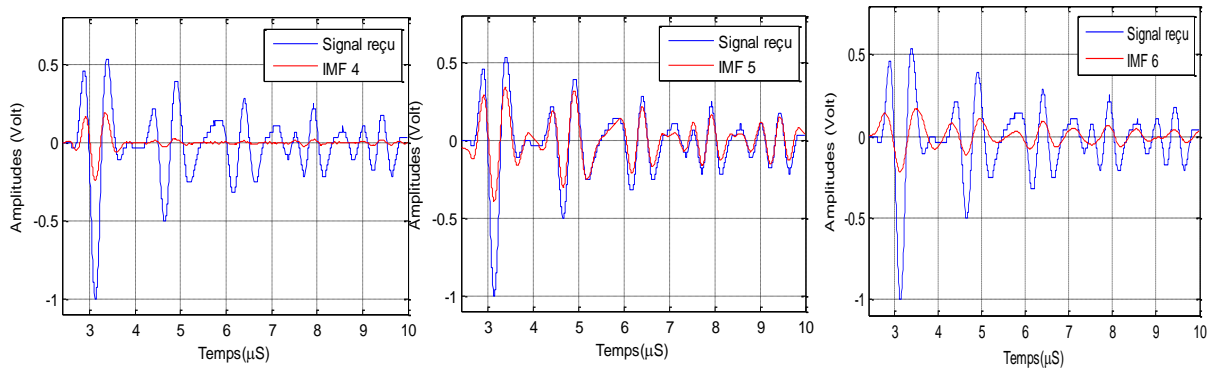


Figure 2.25 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par EEMD avec le signal reçu.

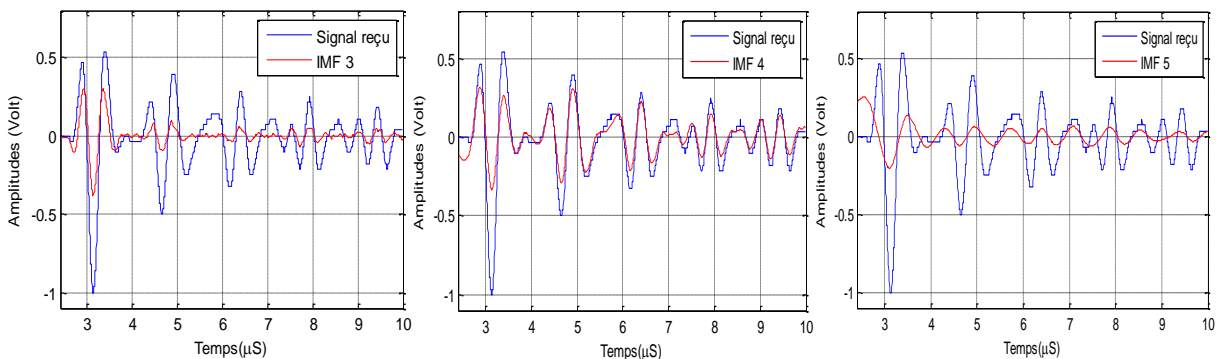


Figure 2.26 : Superposition des trois premières IMFs obtenues par CEEMDAN avec le signal reçu.

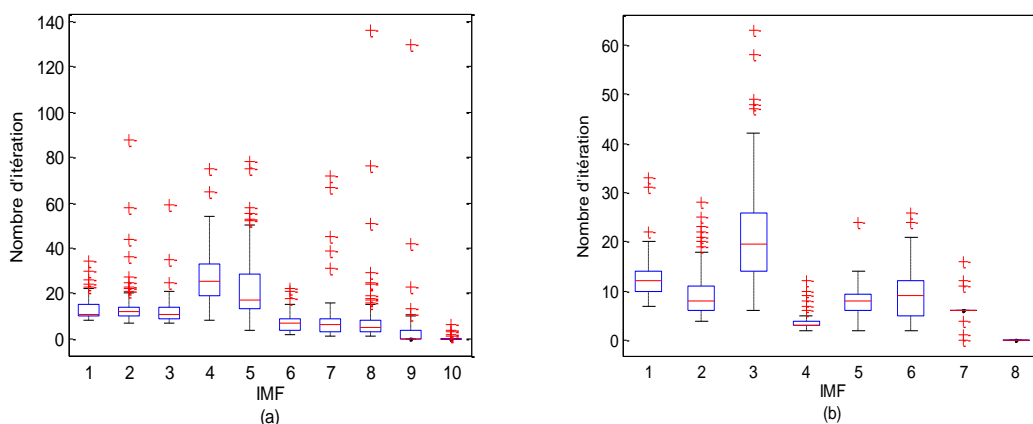


Figure 2.27 : Les IMFs en fonction du nombre d'itérations pour
(a) l'EEMD (b) la CEEMDAN

- **Erreur de reconstruction**

La figure (2.28) montre l'erreur de reconstruction pour la CEEMDAN qui reste toujours faible par rapport à celle de l'EEMD, ce qui confirme bien les résultats obtenus pour le signal simulé.

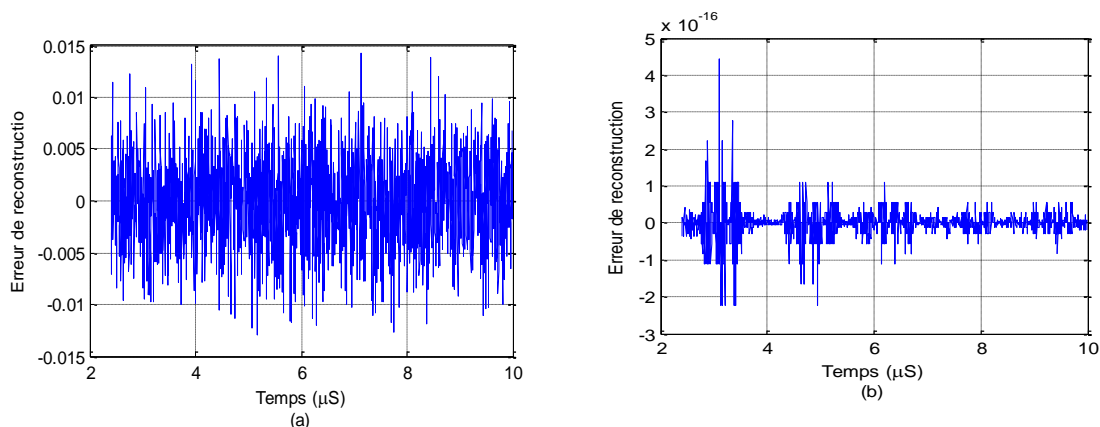


Figure 2.28 : Erreur de reconstruction pour : (a) l'EEMD (b) la CEEMDAN

- **Calcul de la vitesse de propagation longitudinale 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. Le tableau (2.5) regroupe les valeurs des vitesses calculées à partir de l'IMF significative pour chacune des trois méthodes. On constate que la CEEMDAN est bien meilleure pour la localisation des échos, même en présence de défaut, et aussi pour la

détermination des vitesses de propagation de l'échantillon. Toutes ces performances justifient encore son efficacité pour le CND par ultrasons.

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

Tableau 2.5 : calcul de la vitesse de propagation dans l'Acier pour les trois méthodes

8. 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. 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'apparition de tous les échos du signal reçu dans l'IMF1 (mélange de modes) (figure 2.16) et dans l'IMF 2 pour l'échantillon d'acier (figure 2.24). Ce qui montre la non efficacité de l'EMD pour la séparation des échos réels.

L'application de l'EEMD réduit le mixage de mode par rapport à l'EMD mais ne résout pas 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 (figures 2.19 et 2.27). Par conséquent, on peut dire que la CEEMDAN permet d'obtenir moins d'IMFs avec plus d'informations significatives.

Chacune des méthodes utilisées l'EMD, l'EEMD ou la CEEMDAN permet de visualiser les échos des deux faces, avant et arrière de la pièce à contrôler, et détecte l'apparition d'un autre écho qui peut correspondre à un défaut (comme pour l'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 localisation des échos ultrasonores.

9. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, 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 «processus de 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, de nouvelles variantes ont vu le jour et 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.

La suite du chapitre a été consacrée aux signaux réels issus d'expériences utilisant la technique pulse-écho pour caractériser les matériaux. Le premier signal est obtenu à partir d'un cube d'Aluminium (sans défaut) et le deuxième signal à partir d'une plaque d'Acier (avec une fissure au milieu).

Afin de prouver les capacités des méthodes proposées, on a appliqué l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN sur les deux signaux ultrasonores réels, pour vérifier les résultats obtenus sur les signaux simulés. 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 3

Techniques Adaptatives Pour Signaux Non Stationnaires

-
1. Introduction
 2. Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT)
 3. Analyse du signal simulé
 4. Transformée en ondelettes continue
 5. Application de la combinaison EMD/TFCT et EMD/TOC pour le CND
 6. Conclusion
-

1. Introduction

La représentation des signaux stationnaires est une représentation temps-amplitude. Cette représentation n'est pas toujours la meilleure pour toutes les applications en traitement du signal. Dans beaucoup de cas, l'information la plus pertinente est cachée dans sa composante fréquentielle. Le spectre de fréquence d'un signal est constitué par les composantes de fréquence de ce dernier.

Les propriétés des signaux non-stationnaires dépendent du temps. Pour décrire ces signaux, on doit faire appel à des représentations associant le temps et la fréquence.

Les représentations temps-fréquence donnent une image de la répartition de l'énergie d'un signal dans le temps et la fréquence. Ce sont des transformations conjointes du temps et de la fréquence qui fournissent une information sur la façon dont la fréquence du signal varie au cours du temps. Elles ne constituent pas un gain d'informations, mais plutôt une redistribution de l'information contenue dans le signal analysé de façon à en faciliter l'interprétation.

Plusieurs techniques de traitement du signal temps-fréquence ont été proposées dans la littérature et sont appliquées dans divers domaines. Leur utilisation va dépendre de l'application visée et des avantages et des inconvénients de chacune pour faire apparaître les informations recherchées. Parmi ces méthodes, on cite

- La transformée par filtrage numérique à court terme (TFNCT).
- La transformée de Wigner-Ville (TWV).
- La transformée en Ondelettes (WT : Wavelet transform).
- La transformée de Fourier à court terme (TFCT).

Dans ce chapitre 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 Fourier à Court Terme (TFCT) ainsi que la transformée en ondelette continue TOC combinées avec l'EMD.

2. Transformée de Fourier à court terme (TFCT)

Malgré la grande utilisation et l'efficacité de la TF, elle reste inappropriée pour les signaux non stationnaires car elle donne une information précise sur le domaine où elle est représentée (fréquentielle), et pas d'information sur le temps. L'idée d'avoir les informations fréquentielles et temporelles en même temps à pousser Morlet et

Gabor à concevoir des fonctions de base qui se situent à mi-chemin entre le temps et la fréquence [40].

2.1. Intérêt de la TFCT pour les signaux ultrasonores

Les échos ultrasonores sont de nature non-stationnaires, ceci est dû au milieu de propagation non uniforme qui contient des discontinuités provoquant la variation de la fréquence de l'onde reçu par rapport à l'onde émise. Ils sont aussi non linéaires et se forment de plusieurs composantes fréquentielles (signaux multi-composantes). Dans de telles situations, la représentation temporelle classique des échos 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 et partant des propriétés de ces échos et des limitations de la TF, il est naturel de s'orienter vers des représentations conjointes à la fois en temps et en fréquence ou un schéma d'analyse temps-fréquence.

2.2. Définition

Pour répondre au problème de localisation de la transformée de Fourier, D. Gabor a introduit vers les années 40 l'approche de la transformée de Fourier à court terme (TFCT), en anglais Short-Time Fourier Transform (STFT) ou encore transformée de Fourier à fenêtre glissante. La TFCT considère implicitement que l'évolution du contenu fréquentiel du signal est peu conséquente sur l'étendue d'une fenêtre d'analyse. Elle divise le signal en séquences courtes et consécutives, puis calcule la Transformée de Fourier de chaque segment. Mathématiquement, la TFCT peut être interprétée comme une analyse de Fourier de tranches successives pondérées par une fenêtre temporelle qui s'exprime par l'équation suivante

$$X_{\tau}(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} W^*(t - \tau) dt \quad (3.1)$$

τ est le paramètre de translation de la fenêtre, $X_{\tau}(f, \tau)$ Correspond au spectre du signal x autour de τ et W : la fonction fenêtre qui est à choisir.

Au cours de l'analyse par TFCT, le signal est divisé en petits segments. Ensuite, on choisit une fenêtre $w(t)$ de courte durée qui va être décalée le long du signal. Pour une analyse entière, on applique sur chacune des sections, la transformée de Fourier en obtenant ainsi le spectre « local ». La totalité des spectres « locaux »

indique alors comment le spectre varie au cours du temps. Le principe de la TFCT est présenté dans la figure suivante

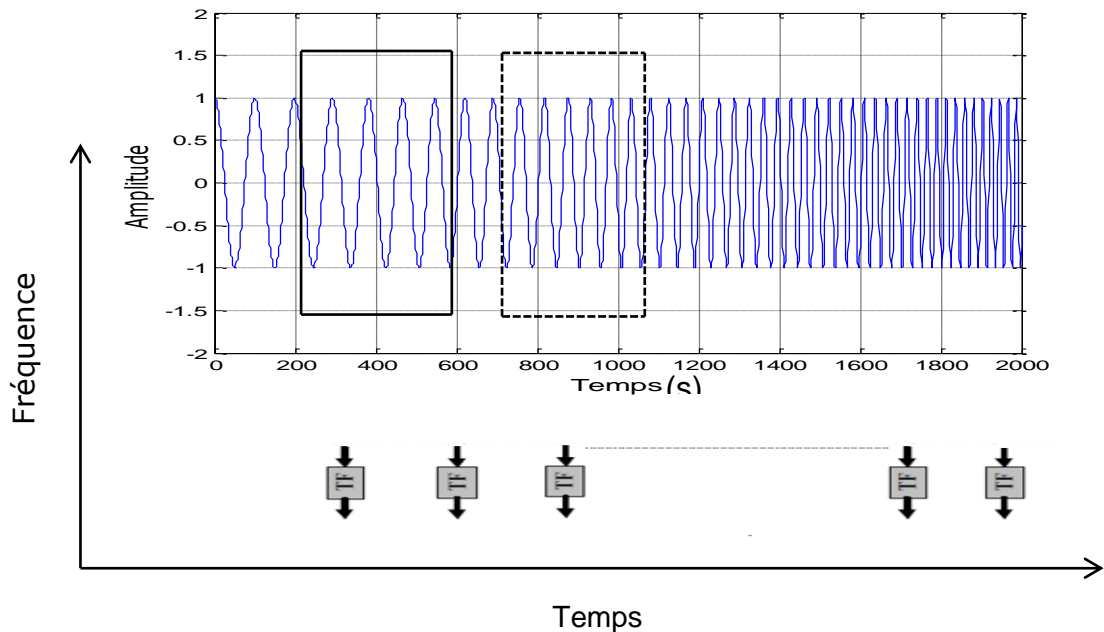


Figure 3.1 : Principe de la transformée de Fourier à court terme.

2.3. Spectrogramme

On définit une densité d'énergie appelée spectrogramme notée PS qui est le module au carré de la TFCT.

$$PS(f, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} W^*(t - \tau) dt \right|^2 \quad (3.2)$$

Le spectrogramme est un diagramme associant à chaque instant t d'un signal, son spectre de fréquences. La résolution en temps et en fréquence du spectrogramme est limitée par le principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor qui stipule que l'on ne peut pas être infiniment précis en temps et en fréquence. Le choix de la taille de la fenêtre pour représenter un signal spectrogramme impose par conséquent un compromis parfois difficile entre la précision de la localisation temporelle et celle de la localisation fréquentielle. Ce choix influe directement sur les propriétés de résolution de la composition.

Les valeurs de la TFCT sont, en général, complexes, le module au carré assure que la valeur du spectrogramme sera toujours une valeur réelle.

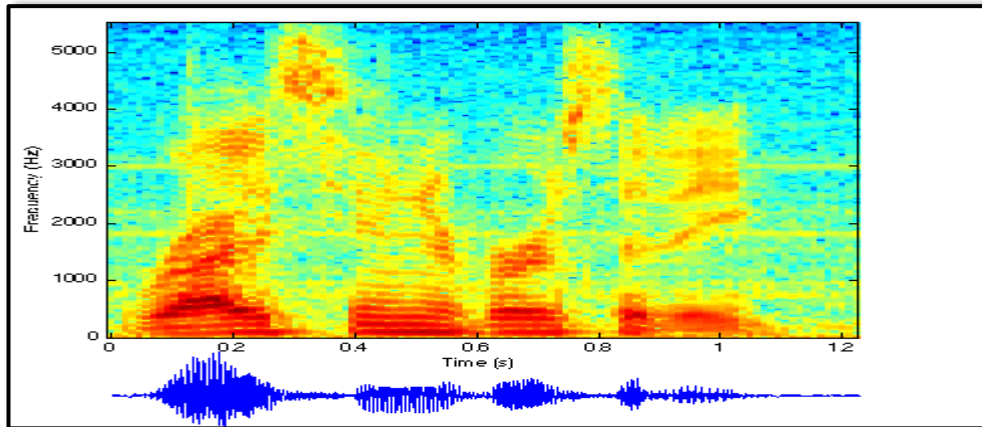


Figure 3.2 : Exemple de spectrogramme.

2.4 Principe d'incertitude d'Heisenberg

Le principe d'incertitude d'Heisenberg joue un rôle important dans la théorie du traitement du signal car il donne une limite à la précision de la localisation dans différentes représentations d'un signal. Ainsi, ce principe montre que l'énergie d'un signal et celle de sa transformée de Fourier ne peuvent être localisées avec une précision arbitraire. De façon plus simple, on peut dire qu'il y a toujours une incertitude sur les mesures en temps et en fréquence d'un signal. Ce théorème est énoncé par [41].

$$\Delta_t \cdot \Delta_f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (3.3)$$

Δ_t et Δ_f sont respectivement, l'écart temporel et fréquentiel dans le plan temps-fréquence.

On ne peut pas connaître la représentation exacte en temps-fréquence d'un signal c'est à dire on ne peut pas connaître quelle composantes spectrales existent à des instant précis du temps. Ce qu'on peut savoir, ce sont les intervalles de temps dans lesquels certaines bandes de fréquence existent [39, 43].

La figure (3.3) montre la représentation temps-fréquence de la TFCT, Les résolutions de la TFCT sont déterminées par la largeur de la fenêtre d'analyse dont le choix est fixé pour toute la durée de l'analyse. Chaque case correspond à une valeur de la TFCT dans le plan temps-fréquence. Les cases possèdent certaines surfaces constantes non nulles qui impliquent que la valeur d'un point particulier dans le plan temps-fréquence ne peut pas être connue. Tous les points dans ce plan qui tombent dans une case sont représentés par une seule valeur sur la TFCT.

Indépendamment des dimensions des cellules, leurs aires sont les mêmes. Le principe d'incertitude d'Heisenberg impose une valeur minimale pour la surface de la case représentant la localisation temps-fréquence d'un atome qui ne permet pas de réduire chaque surface au-dessous de la valeur $(1/4 \pi)$ [43].



Figure 3.3 : Résolution en temps et en fréquence du spectrogramme.

2.5. Fonctions de fenêtrage

Une fonction de fenêtrage est une fonction par laquelle le signal à analyser est multiplié avant d'appliquer la transformée de Fourier. Il existe plusieurs types de fenêtres à savoir la fenêtre rectangulaire, la fenêtre de Hanning, la fenêtre de Hamming et la fenêtre de Blackman. Comme la TFCT fait l'hypothèse de stationnarité durant la durée de la fenêtre, quelle que soit la partie du signal considéré, la longueur de la fenêtre est cependant choisie pour respecter cette hypothèse. Ce choix influence directement sur les propriétés de résolution de la composition ; plus la fenêtre est petite, plus la résolution temporelle est meilleure mais plus la résolution fréquentielle est mauvaise. Si une haute résolution fréquentielle est nécessaire alors une longue fenêtre temporelle sera utilisée et il sera difficile de respecter les hypothèses de stationnarité.

La forme, la longueur de cette fenêtre ainsi que le pas d'incrémentations sont des paramètres fixés avant l'analyse. Ils présupposent une bonne connaissance à priori du signal à analyser. Il est donc nécessaire de définir une fenêtre dont les effets sont limités. Cependant, le choix d'une fenêtre dépend de l'analyse à effectuer et de la nature du signal étudié [43].

2.6 Description de l'algorithme

L'idée de la TFCT est de partager le signal en fractions supposées stationnaires. Pour chaque fraction temporelle, une transformée de Fourier est appliquée. Le signal est découpé au moyen d'une fenêtre « w ».

Les étapes de l'algorithme de la TFCT peuvent être résumées comme suit :

1. Choisir une fonction fenêtre de longueur finie w .
2. Placer la fenêtre sur le début du signal au temps $t=0$.
3. Tronquer le signal en utilisant cette fenêtre.
4. Calculer la TF du signal tronqué, sauvegarder le résultat trouvé.
5. Faire un décalage incrémental de la fenêtre vers la droite.
6. Revenir au pas 3, jusqu'à ce que la fenêtre atteigne l'extrémité du signal.

Pour chaque partie où la fenêtre est centrée, nous obtenons une TF différente.

3. Analyse du signal simulé

3.1. Application de la TFCT au signal simulé

Le signal simulé sur lequel est appliqué la TFCT est le même signal présenté dans le chapitre précédent. Rappelons que ce signal est composé de quatre impulsions gaussiennes du modèle proposé (Eq 2.17). Dans ce qui suit, on va appliquer sur le signal simulé, différents types de fenêtres d'analyse ayant différentes largeurs pour voir leurs effets sur la résolution temporelle et fréquentielle du signal.

- Les fenêtres à tester : Hamming, Hanning et rectangulaire.
- La largeur des fenêtres d'analyse : $N=10$, $N=50$, $N=100$, $N=500$.

Les figures (3.4), (3.5) et (3.6) montrent les résultats obtenus avec la TFCT sur le signal simulé. Les couleurs représentent l'évolution de l'énergie du signal (spectrogramme).

D'après les représentations temps-fréquence du signal simulé avec les trois types de fenêtre de tailles différentes, on remarque que le signal contient les 4 échos, chacun dans sa bande de fréquence. Ces représentations illustrent clairement l'influence de la taille de la fenêtre d'analyse. Dans le cas d'une fenêtre longue, la

résolution temporelle est mauvaise. Il est difficile de localiser les différents échos du signal par contre la résolution fréquentielle est très bonne. Au contraire, si l'on diminue la taille de la fenêtre d'analyse pour améliorer la résolution temporelle, on constate que la résolution fréquentielle est dégradée. On met ainsi en évidence le compromis inévitable entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle, lié à la présence d'une seule fenêtre.

Selon les résultats obtenus, il n'y a pas une grande différence entre les types de fenêtres. La fenêtre de Hanning et Hamming sont plus précises que la fenêtre rectangulaire. Les largeurs $N=50$; $N=100$ donnent une bonne résolution dans le domaine temporel et fréquentiel. La largeur de la fenêtre joue un rôle important dans la justesse du résultat. Le choix dépend de l'analyse à effectuer ainsi que de la nature du signal étudié.

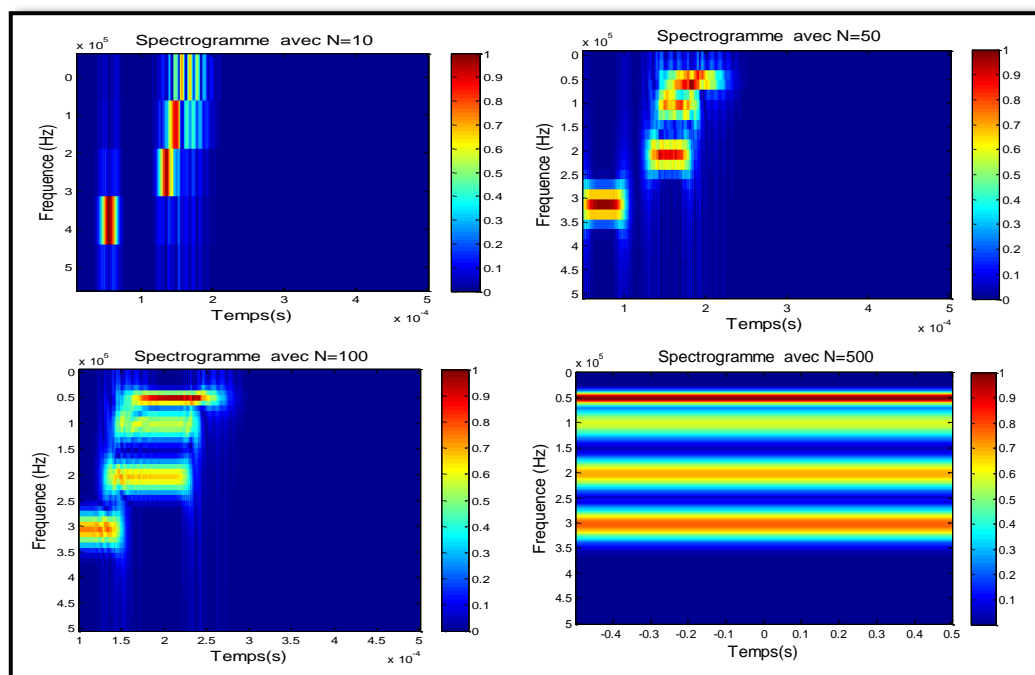


Figure 3.4 : Analyse par TFCT utilisant différentes tailles de la fenêtre rectangulaire.

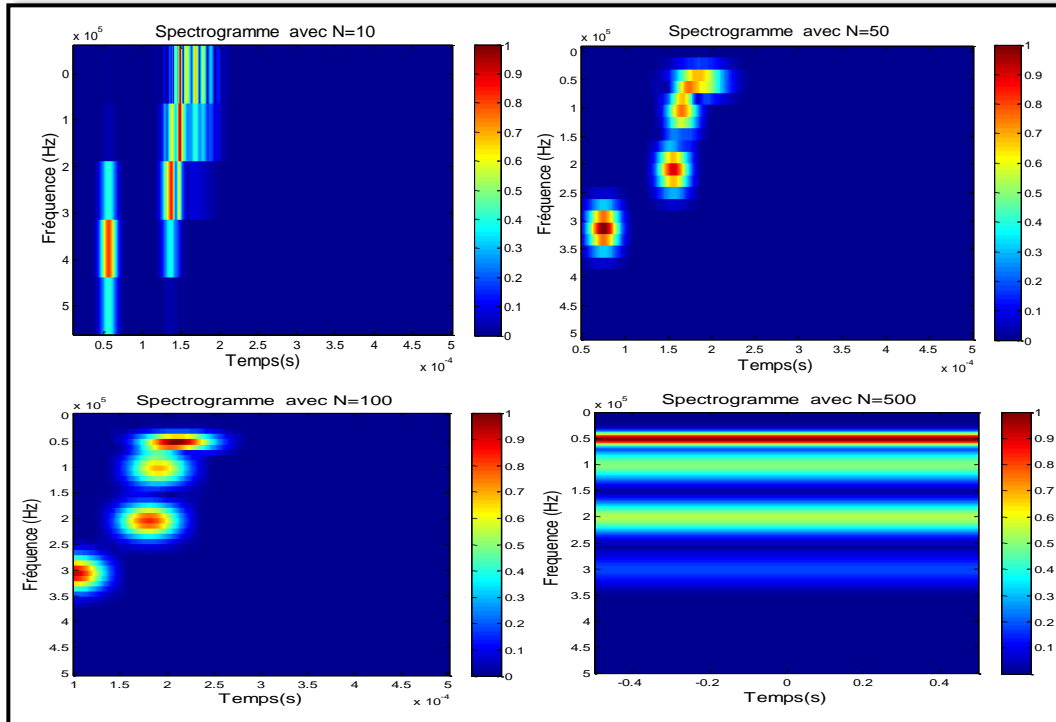


Figure 3.5 : Analyse par TFCT utilisant différentes tailles de la fenêtre de Hamming.

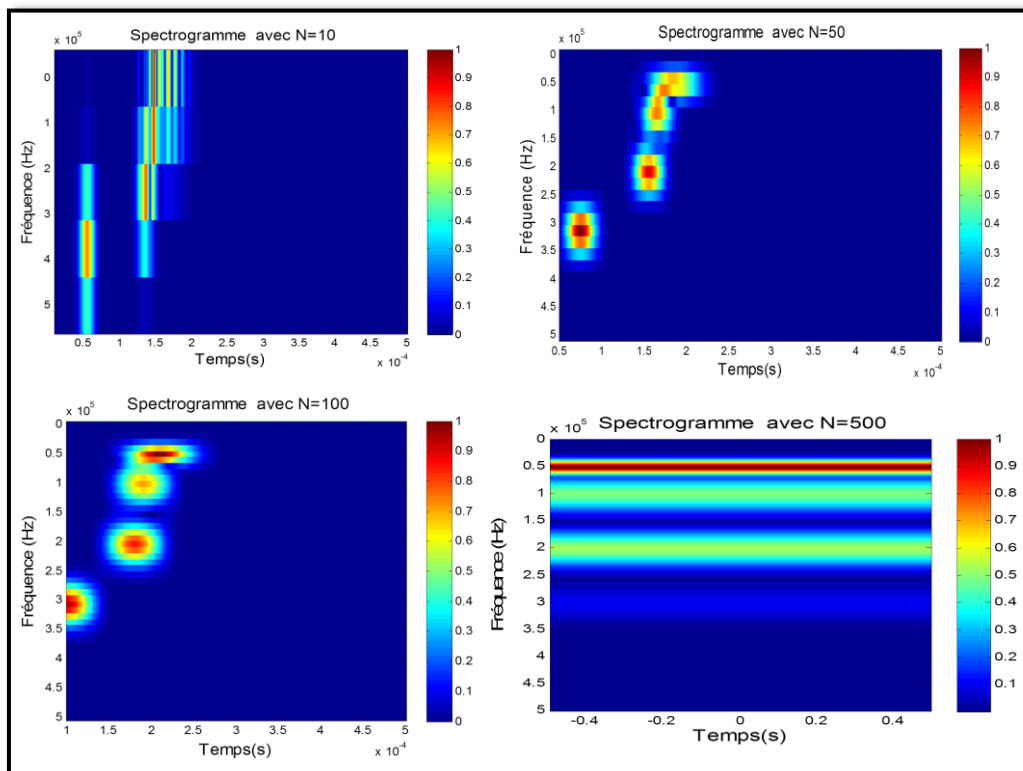


Figure 3.6 : Analyse par TFCT utilisant différentes tailles de la fenêtre de Hanning.

3.2. Combinaison de l'EMD et de la TFCT sur le signal simulé

La décomposition modale empirique EMD décompose le signal original en un nombre restreint d'IMFs, qui sont de la même longueur que le signal original. Les IMFs contiennent l'information fréquentielle simulée des différentes bandes du signal ultrasonore. L'application de l'EMD seule ne suffit pas pour faire une analyse temps-fréquence, pour pouvoir estimer les fréquences des sous bandes d'IMFs et voir leur énergie. Pour cela, nous avons besoin d'un outil d'analyse fréquentiel ou d'analyse temps-fréquence tel que la TFCT. Le principe de cette combinaison EMD-TFCT est représenté sur la figure (3.7).

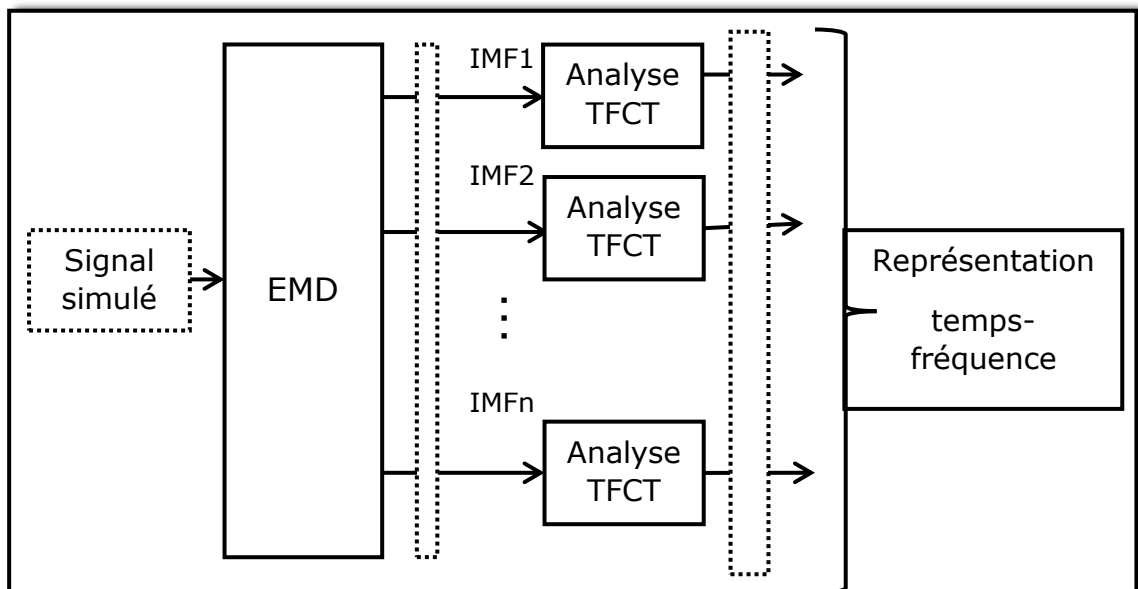


Figure 3.7 : Principe de l'EMD avec la TFCT.

Le principe de l'EMD et de la TFCT est résumé dans les étapes suivantes

- ❖ **Étape 1 :** Décomposer le signal ultrasonore par EMD ou CEEMDAN pour obtenir les sous bandes d'IMFs.
- ❖ **Étape 2 :** Appliquer La TFCT à chaque sous bande d'IMF significative.
- ❖ **Étape 3 :** Détecter les échos de chaque interface pour localiser d'éventuels défauts ou caractériser la matière.

Après avoir décomposé le signal simulé par la méthode CEEMDAN, qui a prouvé son efficacité en annulant le mixage de mode, nous avons appliqué la TFCT à

chaque IMF extraite par CEEMDAN. Les figures (3.8), (3.9) et (3.10) montrent les résultats obtenus avec la TFCT par la fenêtre de Hanning pour chaque IMF. On peut remarquer la localisation des différents échos en temps et en fréquence.

Dans la figure (3.8), on remarque l'apparition des deux échos obtenus, en utilisant des fenêtres de largeurs différentes. Avec une taille $N = 10$, l'écho 1 apparaît à l'instant $t_1 = 0.5 \times 10^{-4}$ s et l'écho 2 à l'instant $t_2 = 1.3 \times 10^{-4}$ s, mais avec les tailles $N=50$, $N=100$, $N=500$, on peut lire leurs fréquences respectives $f_1 = 2 \times 10^5$ Hz et $f_2 = 1 \times 10^5$ Hz.

Dans la figure (3.9), l'écho 3 apparaît dans l'IMF 2 à l'instant $t_3 = 1.6 \times 10^{-4}$ s, avec une fenêtre de taille $N = 10$ ou bien à une fréquence $f_3 = 1 \times 10^5$ Hz pour les autres tailles.

Les mêmes observations sont faites pour l'écho 4 qui apparaît dans l'IMF 3 figure (3.10), à l'instant $t_4 = 1.7 \times 10^{-4}$ s pour une taille $N = 10$ ou à une fréquence $f_4 = 0.25 \times 10^5$ Hz pour les autres tailles de fenêtres.

Il est donc clair que les échos sont bien détectés et localisés en temps et en fréquence conjointement.

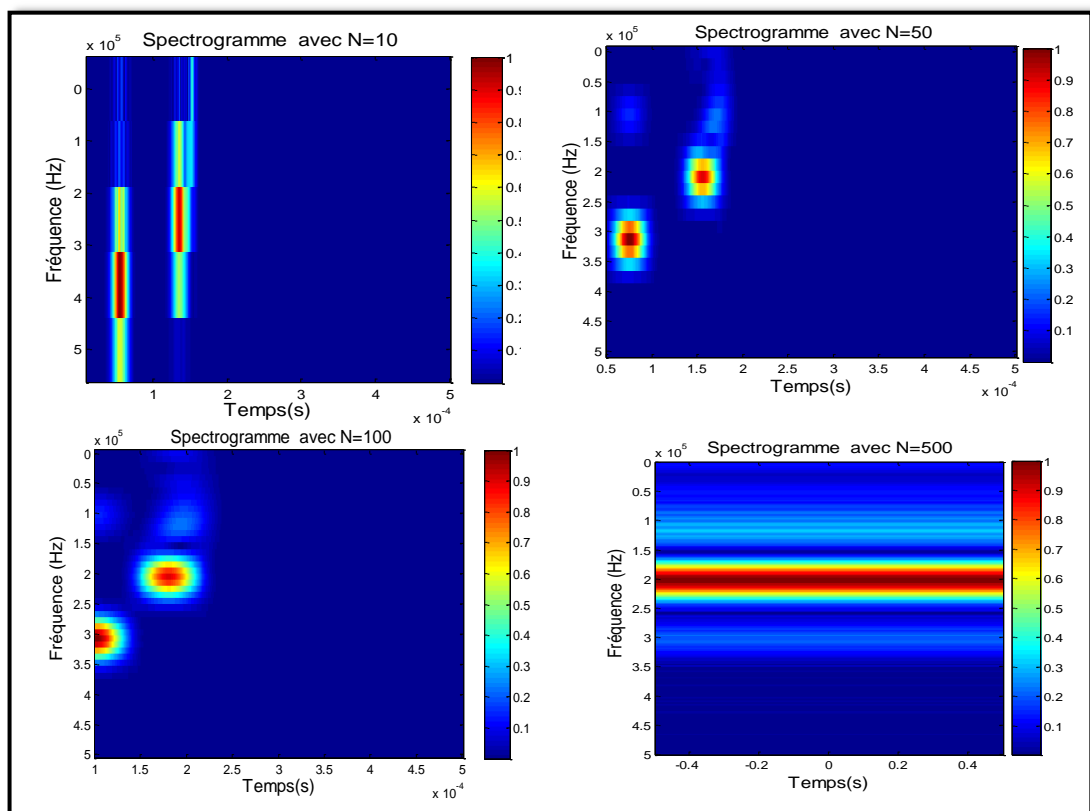


Figure 3.8 : Représentation énergétique de l'IMF1 pour différentes tailles de la fenêtre d'analyse.

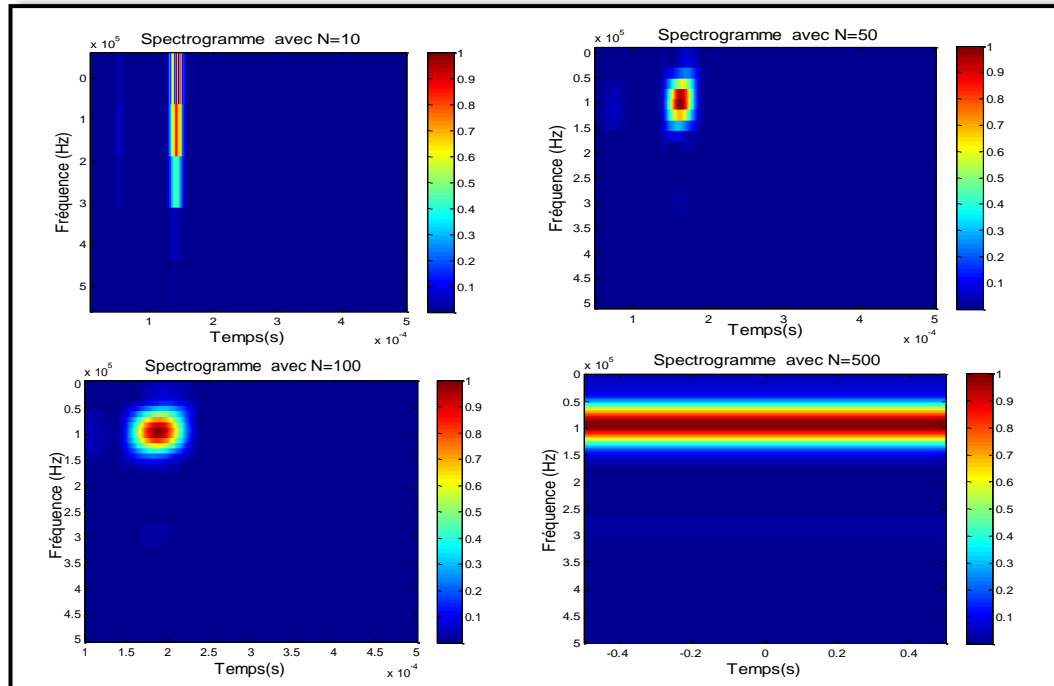


Figure 3.9 : Représentation énergétique de l'IMF2 pour différentes tailles de la fenêtre d'analyse.

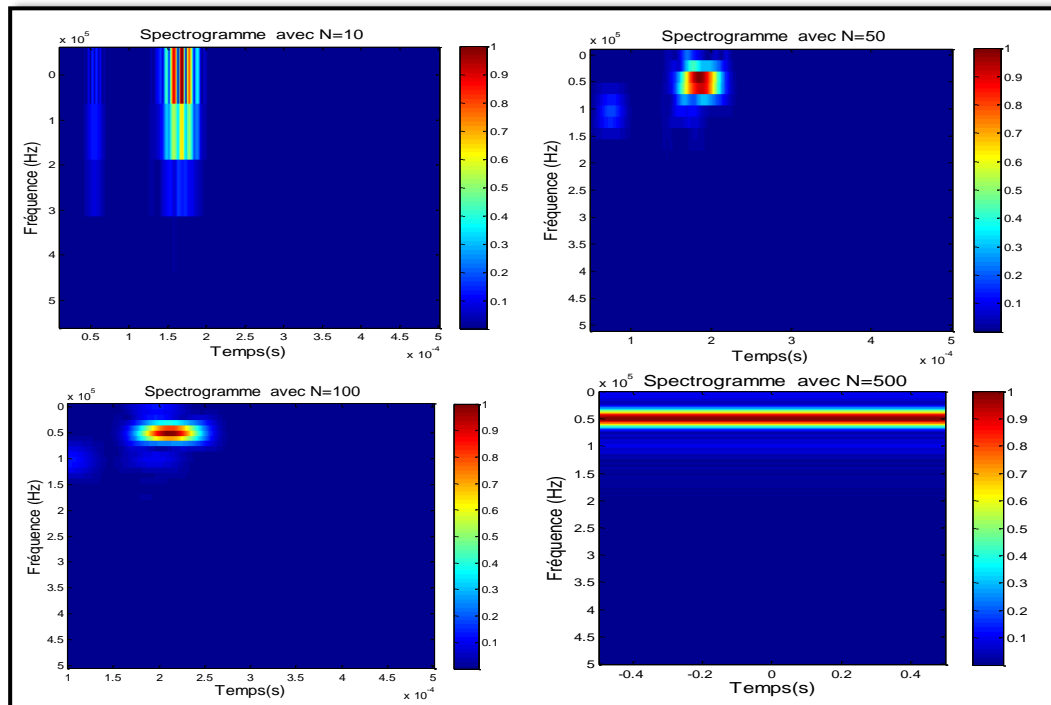


Figure 3.10 : Représentation énergétique de l'IMF3 pour différentes tailles de la fenêtre d'analyse.

4. Transformée en ondelettes continue (TOC)

4.1 Définition

La transformée en ondelettes (TO) permet une analyse des différentes fréquences avec diverses résolutions ; haute résolution fréquentielle en basses fréquences et haute résolution temporelle en hautes fréquences. La transformation en ondelettes revient à projeter le signal à analyser sur une base de fonctions déduites par décalage temporel et dilatation/compression d'une fonction initiale appelée ondelette mère donnée par la formule suivante

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

« b » est un paramètre de position d'ondelette (translation), « 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.

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

Soit ψ une ondelette analysante et f une fonction de $L^2(\mathbb{R})$. 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 [44, 45]

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (3.5)$$

$\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$ est le complexe conjugué de l'ondelette fille et $W_f(a,b)$ représente la corrélation (produit scalaire) de f avec $\psi_{a,b}$ et il est appelé coefficient d'ondelette.

Il existe de nombreuses formes d'ondelettes, le choix de l'ondelette optimale dépend de l'application envisagée. La figure (3.11) montre quelques exemples d'ondelettes.

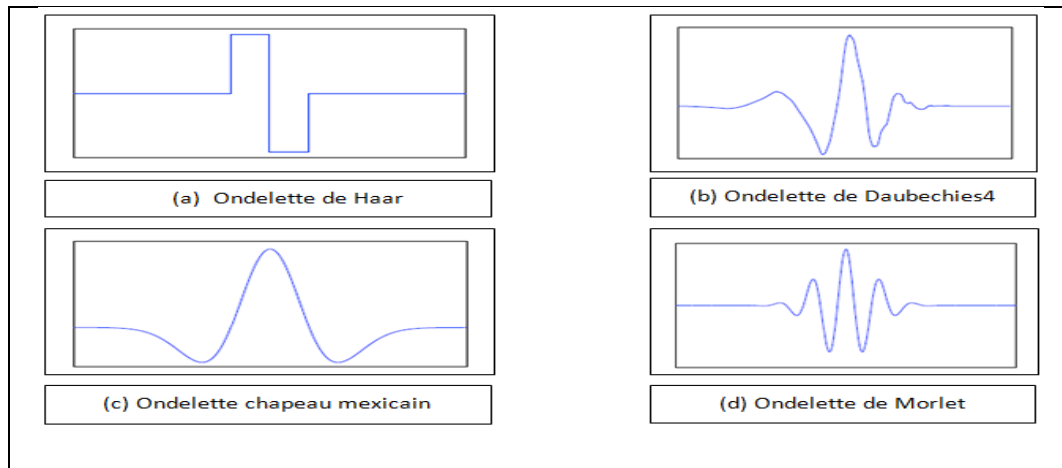


Figure 3.11 : Exemples d'ondelettes.

4.2. Scalogramme

Le scalogramme est défini comme étant le carré du module de la transformée en ondelette, c'est-à-dire $|W(t,a)|^2$. C'est une distribution d'énergie temps-échelle. En considérant que les représentations temporelle et fréquentielle de l'ondelette mère sont concentrées, respectivement, autour de l'instant 0 et d'une fréquence f_0 appelée fréquence centrale, la transformation en ondelettes peut être interprétée comme une représentation temps-fréquence. La variable échelle est alors liée à la fréquence f par la relation $a = \frac{f_0}{f}$.

Le scalogramme obéit également au principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor, figure (3.12).

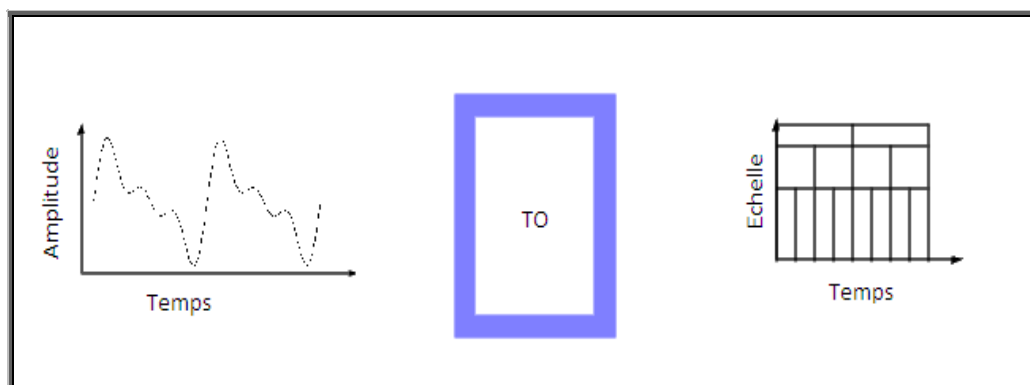


Figure 3.12: Résolution en temps et en échelle du scalogramme.

Malgré son caractère multi-résolution ; la résolution temporelle s'améliore et la résolution fréquentielle se dégrade pour les termes hautes fréquences. Par ailleurs, l'inconvénient majeur de la TO vient de l'absence du critère du choix sur le type d'ondelette mère à utiliser [36].

4.3. Principe de l'algorithme EMD/TOC

L'algorithme EMD/TOC appliqué au CND 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 d'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 d'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 dans la décomposition du signal ultrasonore en plusieurs bandes fréquentielles IMFs, l'estimation des fréquences de motifs essentiels du signal par la TOC et ensuite, la déduction des sous bandes les plus énergiques du signal. Enfin la construction du signal d'approximation S_a se fait 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

$$S_d = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r(t).$$

Il permet également de localiser les échos réfléchis par les interfaces internes ou externes à partir de signal d'approximation, et donc 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 3.2 ainsi que l'organigramme de la figure (3.13).

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;

$$\text{IMF}_{v_j}(t) = \begin{cases} \text{IMF}_j(t) & \text{si IMF}_j \text{ significative} \\ 0 & \text{si Non} \end{cases}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} S_a = \sum_{j=1}^M \text{IMF}_{v_j}(t) \\ S_d = \sum_{i=1}^N \text{IMF}_i(t) + r(t) \end{array} \right.$$

Etape 05 : Détecter les échos de chaque interface pour caractériser le matériau ou localiser d'éventuel défaut.

Tableau 3.1 : Pseudo-code de la méthode EMD/TOC.

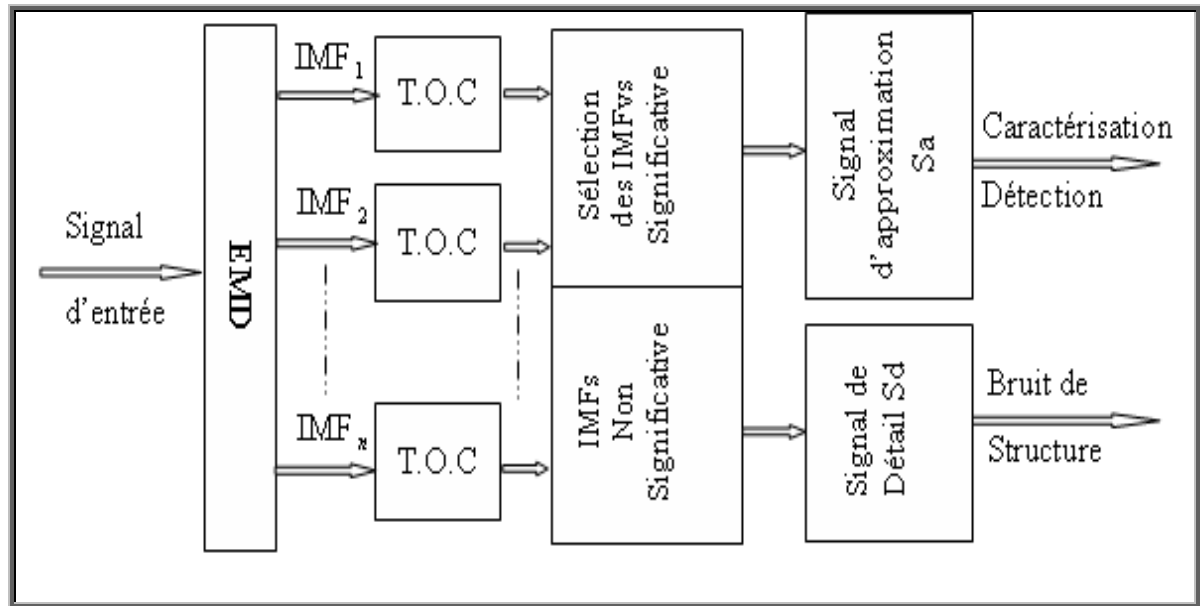


Figure 3.13 : Organigramme de la combinaison EMD/TOC.

5. Application de la combinaison EMD/TFCT et EMD/TOC pour Le CND

Nous allons appliquer, maintenant, la combinaison EMD/TFCT sur les deux signaux réels décrits précédemment dans le chapitre 2 pour pouvoir positionner correctement les échos. Rappelons que le premier signal provient d'un échantillon d'aluminium et le second d'une plaque d'acier.

Comme on l'a dit auparavant, 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 et ainsi, pouvoir 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 fréquentielles 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/TFCT et EMD/TOC.

5.1. Combinaison EMD/TFCT sur les deux signaux réels

5.1.1 Combinaison EMD/TFCT et CEEMDAN/TFCT sur le signal réel

d'Aluminium

Nous commençons d'abord par décomposer le signal reçu de l'échantillon d'aluminium en un nombre de sous bandes adaptées, par EMD ou l'une de ces variantes, ensuite on applique la TFCT pour chaque bande (IMF) afin de localiser l'emplacement temporel et fréquentiel des échos qui composent le signal.

A partir des IMFs obtenues par EMD et CEEMDAN dans le chapitre précédent (figures 2.28 et 2.31), on peut extraire exactement et automatiquement les composantes du signal ultrasonore (les échos du signal), en utilisant la répartition énergétique pour chaque bande de fréquence grâce à la TFCT. On remarque que l'essentiel de l'information du signal est concentrée dans les IMFs les plus énergiques.

Les figures (3.14) et (3.15) montrent clairement l'apparition de l'écho de face E1, et l'écho de fond E2 dans l'IMF1. L'IMF2 contient seulement l'écho E1. Notons que l'énergie de l'onde émise qui se propage dans le milieu n'est pas constante durant sa progression et va s'atténuer jusqu'à disparaître. Les causes de cette atténuation sont la densité du matériau qui va faciliter plus ou moins le passage de l'énergie et aussi la perte d'énergie par effet thermique.

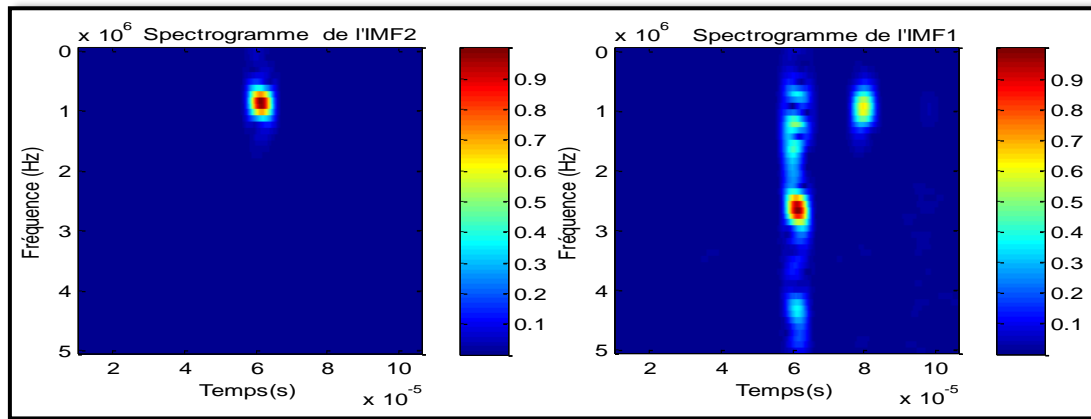


Figure 3.14 : Spectrogrammes des IMF1 et IMF2 avec fenêtre de Hanning N=100.

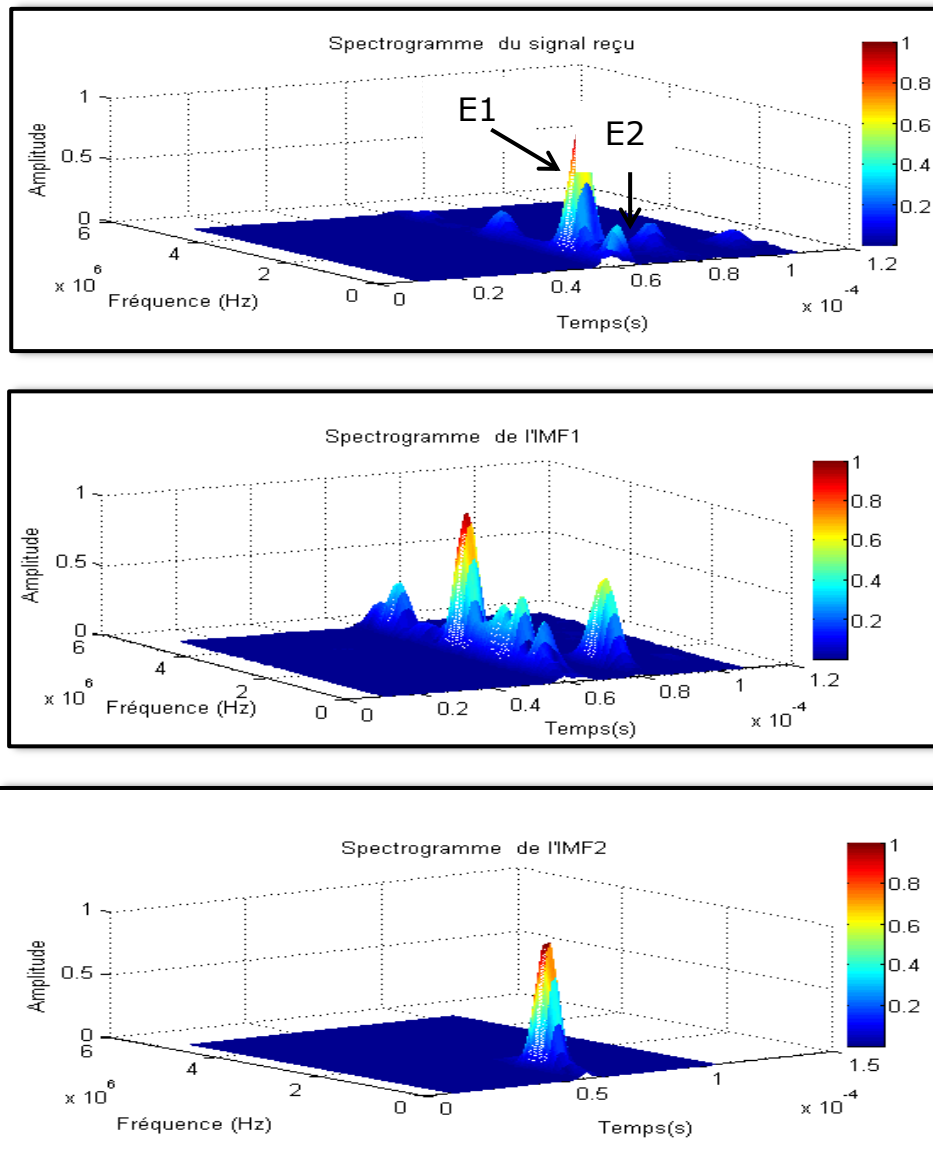


Figure 3.15 : Spectrogramme 3D du signal reçu et des IMFs.

5.1.2. Combinaison EMD/TFCT et CEEMDAN/TFCT pour le signal réel d'Acier

Pour positionner correctement les échos du signal ultrasonore étudié afin de situer le défaut et pouvoir calculer la vitesse de propagation ultrasonore, on a besoin d'analyser et traiter le signal par EMD et la TFCT. Les résultats obtenus après l'application de ces méthodes sont classifiés dans les figures ci-dessous.

La décomposition du signal par EMD et CEEMDAN, en différentes bandes de fréquence sur l'échelle des temps pour obtenir un nombre restreint de fonctions Modales Intrinsèques (IMFs), a prouvé son efficacité dans ce sens figure (2.36) du chapitre 2.

A partir des IMFs obtenus par CEEMDAN, on peut extraire exactement et automatiquement les composantes du signal ultrasonore (les échos du signal) à l'aide de l'énergie de chaque bande, c'est-à-dire que l'essentiel de l'information du signal est concentrée dans les IMFs les plus énergiques. L'IMF1 et l'IMF2 de la CEEMDAN sont bruitées, l'IMF3 et l'IMF4 sont les sous bandes significatives figure (2.39) du chapitre 2.

L'application de la TFCT donne les spectrogrammes illustrés dans la figure (3.16). On distingue mal la répartition énergétique du signal reçu et des IMFs, mais leur répartition en 3D est meilleure figure (3.17).

On observe clairement l'apparition de l'écho de face (E1) dans l'IMF3, l'écho de défaut (E2) et l'écho de fond (E3) dans l'IMF4. Donc, le temps de vol entre l'écho de face E1 et l'écho de fond E3 et la vitesse de propagation ultrasonore dans l'échantillon d'acier peuvent être calculés à partir de cette répartition énergétique des IMFs, comme le montre le tableau (3.1)

| Echo | Paramètres des échos | | | |
|------|----------------------|-------------------|------------|---------------|
| | IMFs | Temps (μs) | Δt | Vitesse (m/s) |
| E1 | 3 | 3 | 3.5 | 5710 |
| E2 | 4 | 6.5 | | |

Tableau 3.2: Paramètres des différents échos.

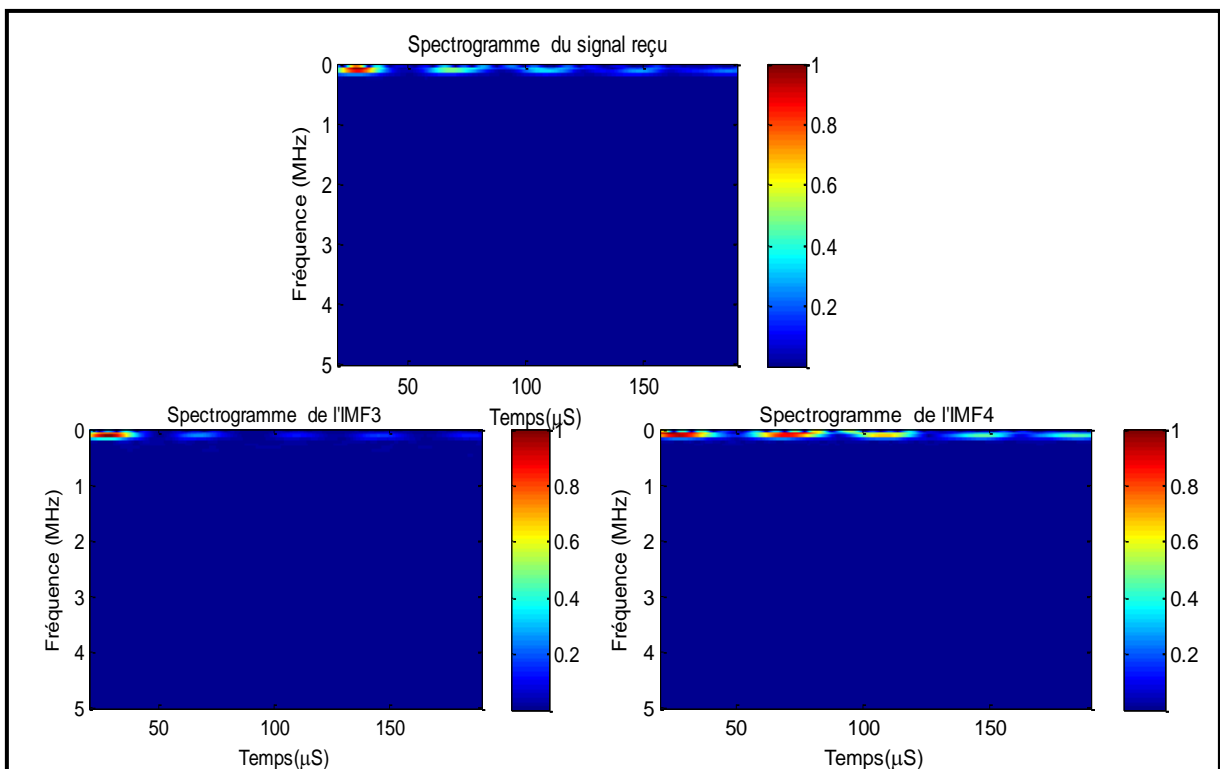


Figure 3.16 : Spectrogramme du signal reçu et des IMFs obtenus par CEEMDAN avec la fenêtre de hanning pour $N=100$.

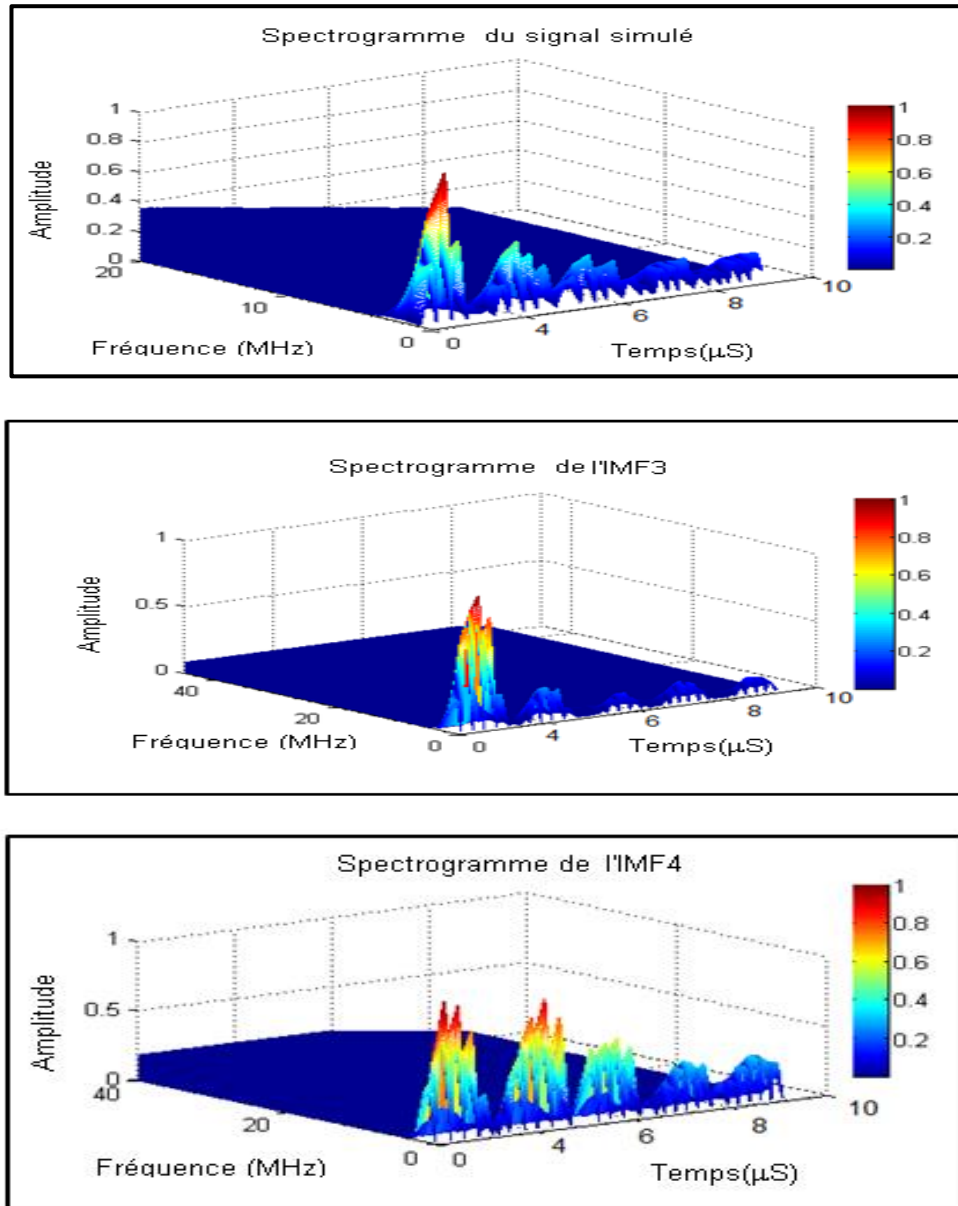


Figure 3.17 : Spectrogramme 3D du signal reçu, de l'IMF3 et l'IMF4.

L'application de la combinaison (EMD/TFCT) sur les signaux réels permet de connaître la position des échos (localisation) et donc attribuer chaque écho à son interface, ce qui va permettre de détecter les défauts dans le matériau contrôlé ou de caractériser cette matière à partir de la vitesse de propagation.

Les deux méthodes sont des techniques simples, puissantes et efficaces pour traiter, localiser les défauts et/ou caractériser les matériaux.

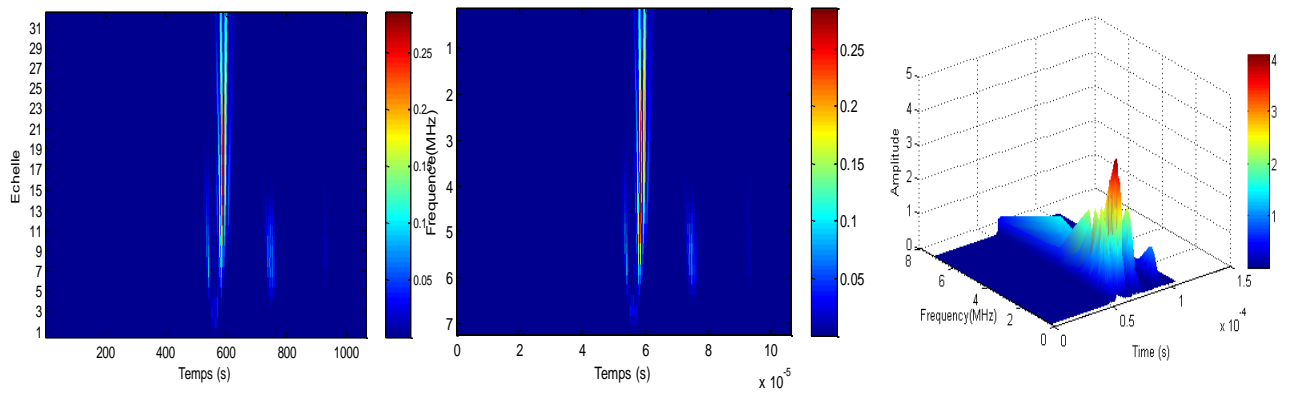
5.2. Combinaison EMD/TOC EEMD/TOC et CEEMDAN/TOC sur les deux signaux réels

L'implémentation de l'algorithme EMD/TOC est faite sur les signaux réels avec l'ondelette mère adaptée aux signaux ultrasonores « Daubechis db4 ».

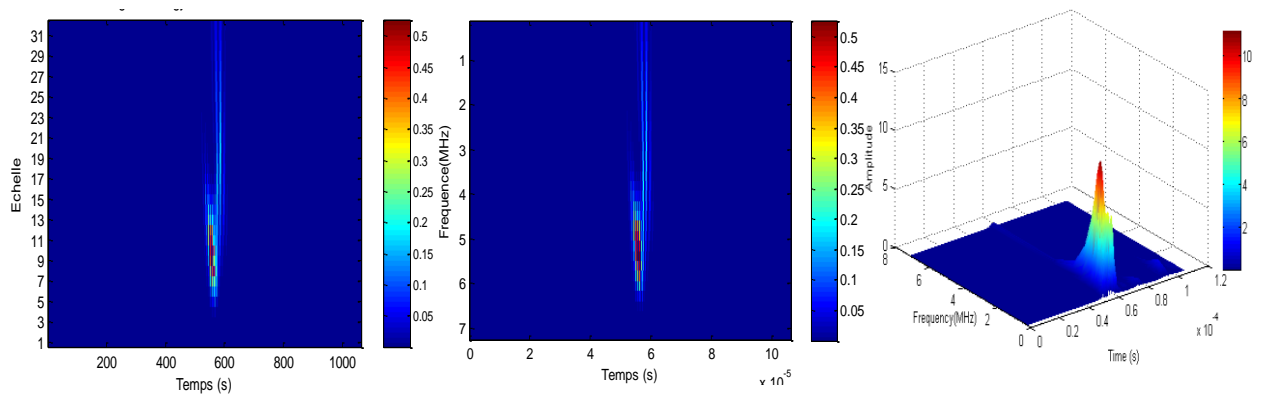
5.2.1. Combinaison EMD/TOC pour les deux signaux réels

Les résultats obtenus par l'application de la combinaison EMD/TOC figures (3.18) et (3.19) montrent que cette combinaison ne donne pas une bonne localisation /détection des échos réfléchis par chaque interface en temps et en fréquence. Aussi elle ne permet pas de localiser correctement les échos des signaux ultrasonores étudiés afin de calculer exactement l'épaisseur relative de l'échantillon d'Aluminium et du défaut dans l'Acier ainsi que leurs vitesses de propagation ultrasonore (calcul du temps de vol) et/ou détection des échos de faces et de défaut pour confirmer les résultats du 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 3.18 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant l'EMD/TOC du signal d'Aluminium

(a) IMF1 (b) IMF2

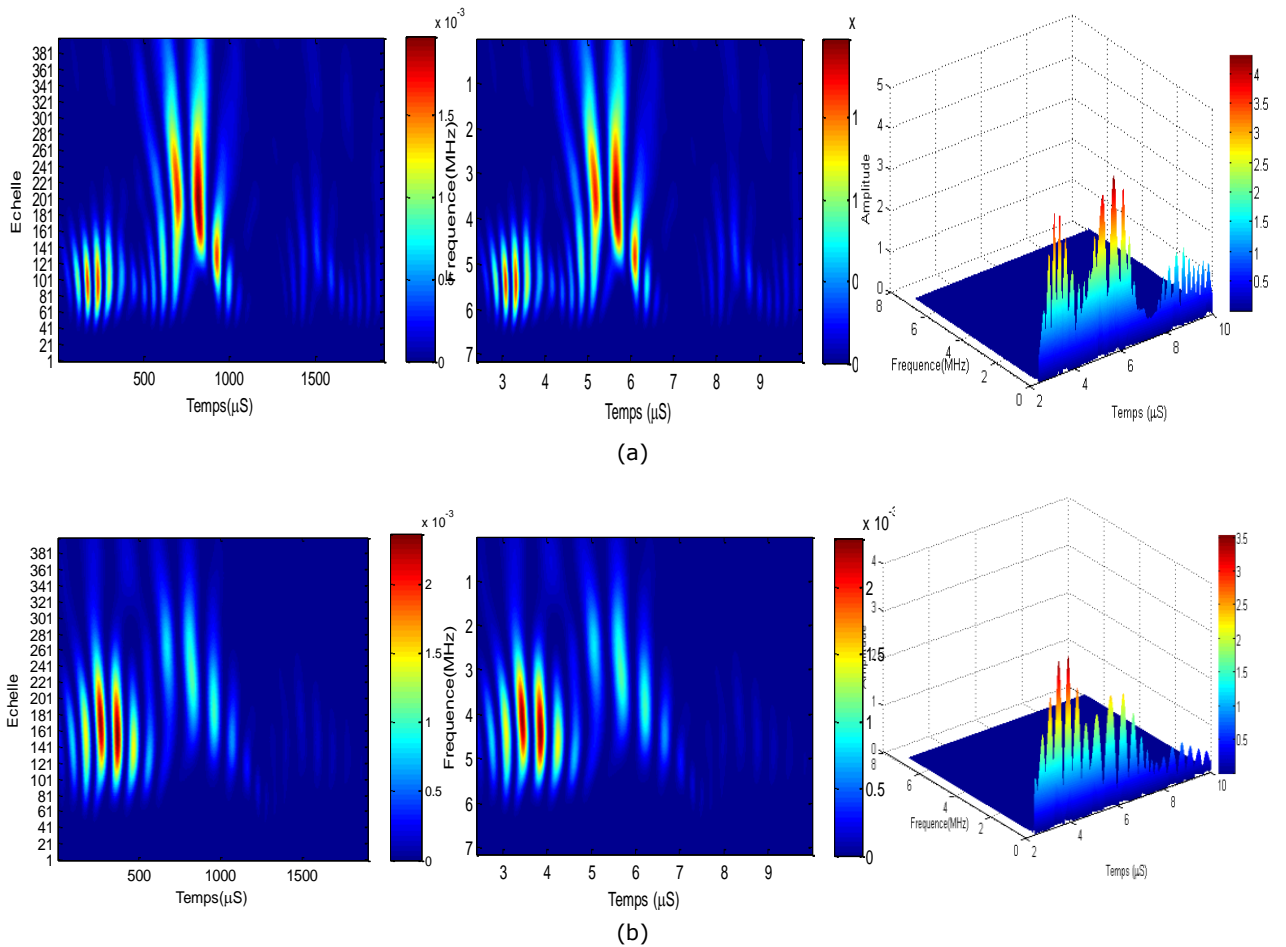


Figure 3.19 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle, Temps-Fréquence et le spectrogramme 3D utilisant l'EMD/TOC du signal d'Acier
 (a) IMF2 (b) IMF3

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 3.3.

| | Signal d'aluminium | | Signal d'acier | |
|----------------------------|--------------------|-------|----------------|-------|
| Echo | 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 3.3 : Calcul du Temps de Vol et Célérité relative pour les deux échantillons par l'EMD/TOC.

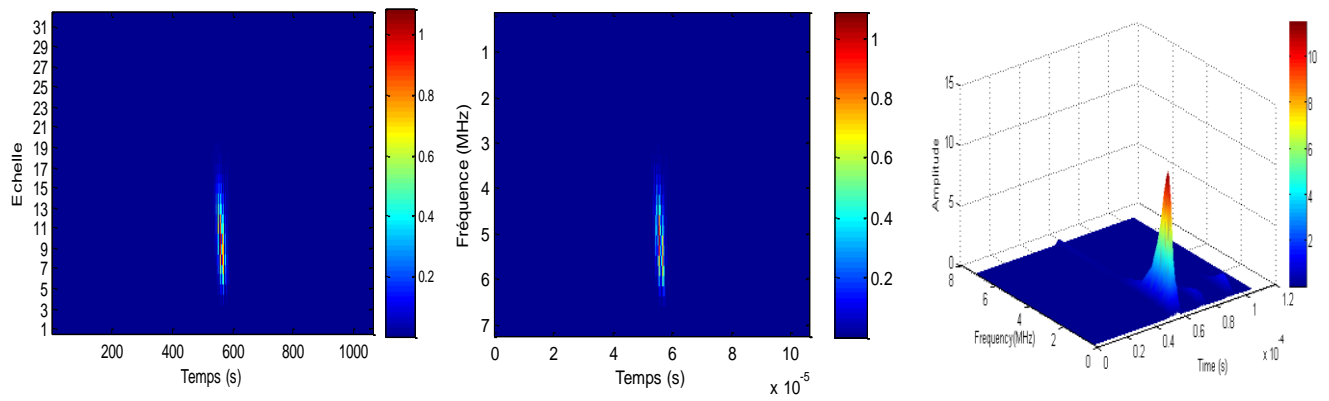
Partant des inconvénients de l'EMD, on s'est proposé de faire une représentation temps-fréquence par la recombinaison des variantes de l'EMD avec la TOC (EEMD/TOC et CEEMDAN/TOC), les résultats seront illustrés dans ce qui suit.

5.2.2 Combinaison EEMD/TOC pour les deux signaux réels

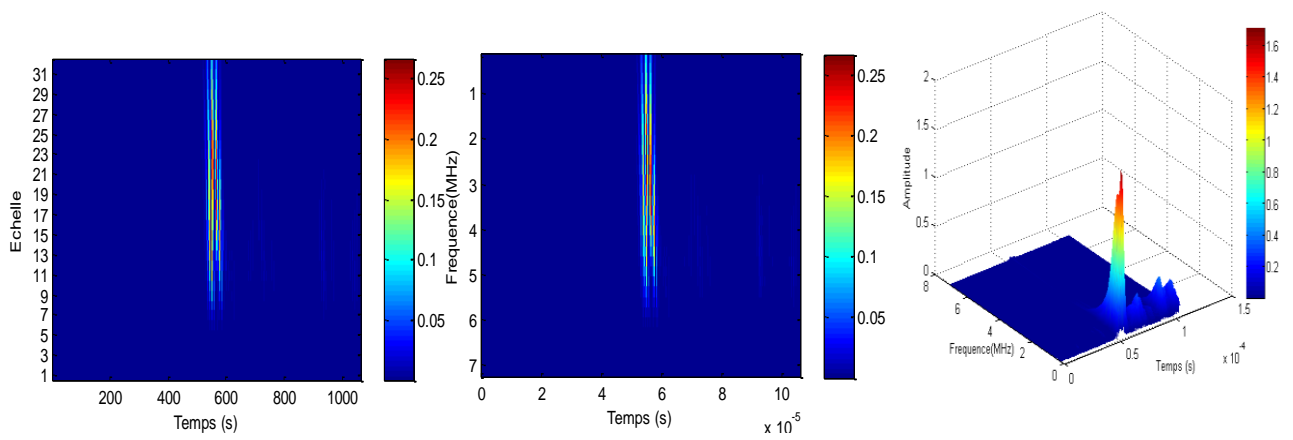
La figure (3.20) montre clairement que l'IMF2, IMF3, IMF4 sont les sous bandes significatives du signal d'aluminium. A partir de ces trois IMFs, on peut détecter/localiser les échos des deux faces avant et arrière en temps et en fréquence, et donc caractériser le spécimen utilisé par le calcul du temps de vol.

La figure (3.21) montre l'apparition de l'écho de la première face dans l'IMF4, l'IMF5 et l'IMF6. L'écho de défaut apparait 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.

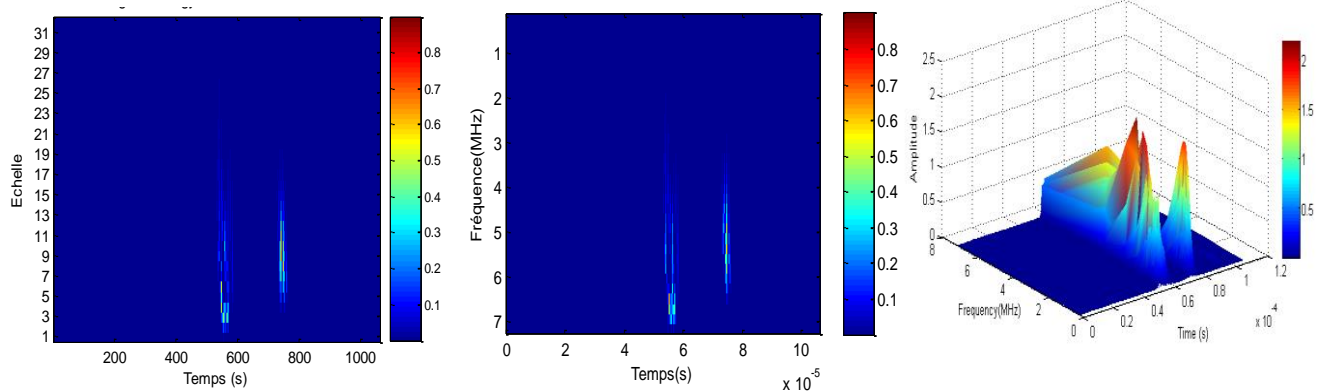
On remarque aussi à partir de ces figures, que l'énergie se manifeste avec le changement de couleur. La grande partie de cette énergie est concentrée dans les IMFs significatives et diminue progressivement pour les autres.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.20 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant l'EEMD/TOC du signal d'Aluminium

(a) IMF1 (b) IMF2 (c) IMF4

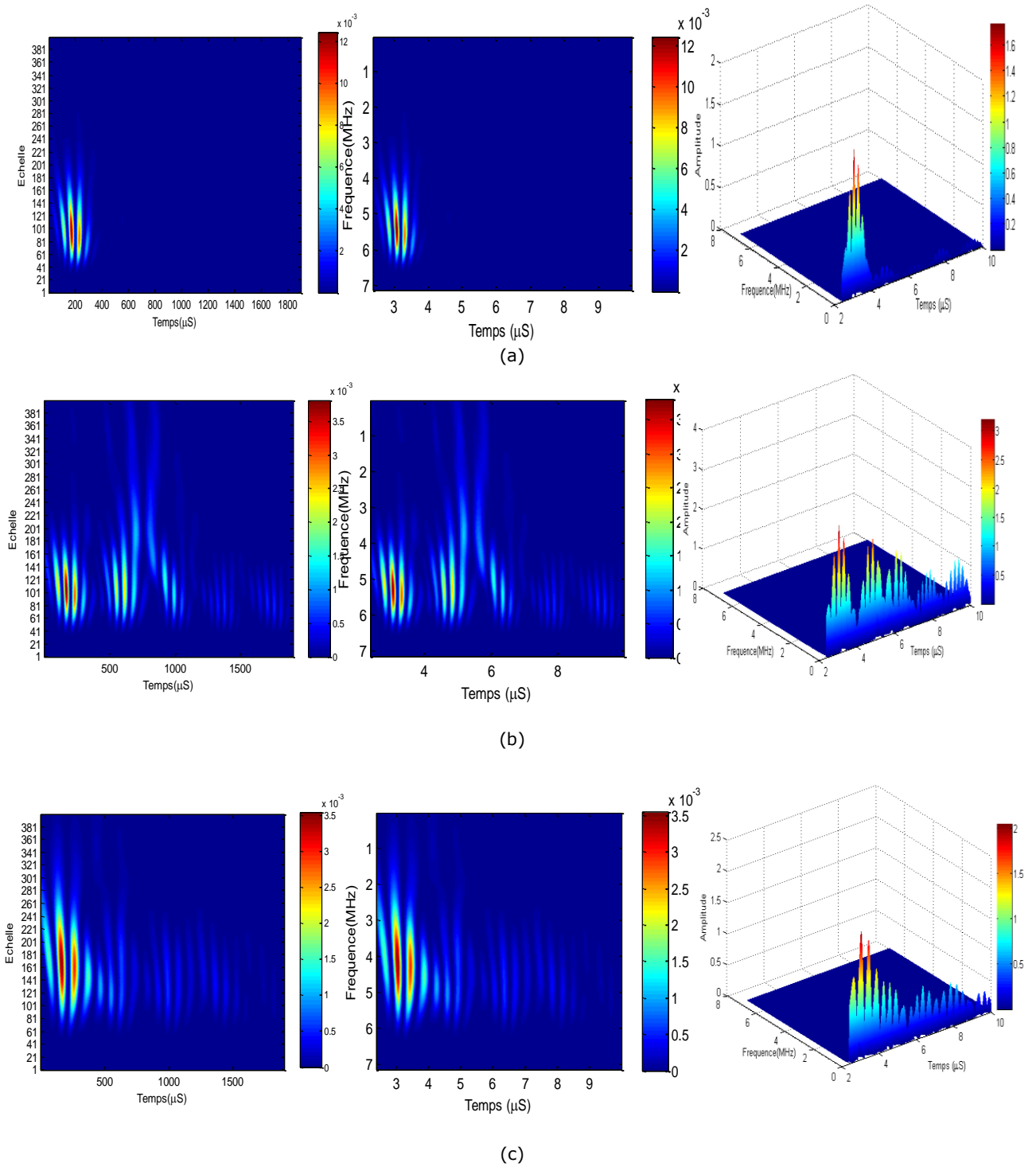


Figure 3.21 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant l'EEMD/TOC du signal d'Acier
 (a) IMF4 (b) IMF5 (c) IMF6

Pour la caractérisation des deux échantillons, on prend les IMFs les plus significatives c'est-à-dire, l'IMF2 pour le signal d'aluminium et l'IMF5 pour le signal d'acier et on calcule le temps de vol entre l'écho de face et l'écho de fond pour le premier et entre l'écho de face et l'écho du défaut pour le deuxième. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 3.4.

| | 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 3.4 : Calcul du Temps de Vol et Célérité relative pour les deux échantillons par l'EEMD/TOC.

5.2.3 Combinaison CEEMDAN/TOC pour les deux signaux réels

Les figures (3.22) et (3.23) montrent la variation de la fréquence observée clairement, lors de l'application de la TOC. Les sous bandes significatives du signal d'aluminium sont illustrées dans l'IMF1, l'IMF2 et l'IMF3 figure (3.22). 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.

La figure (3.23) montre l'apparition de l'écho de la première face dans l'IMF3, l'IMF4 et l'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 elle est faible dans les autres IMFs.

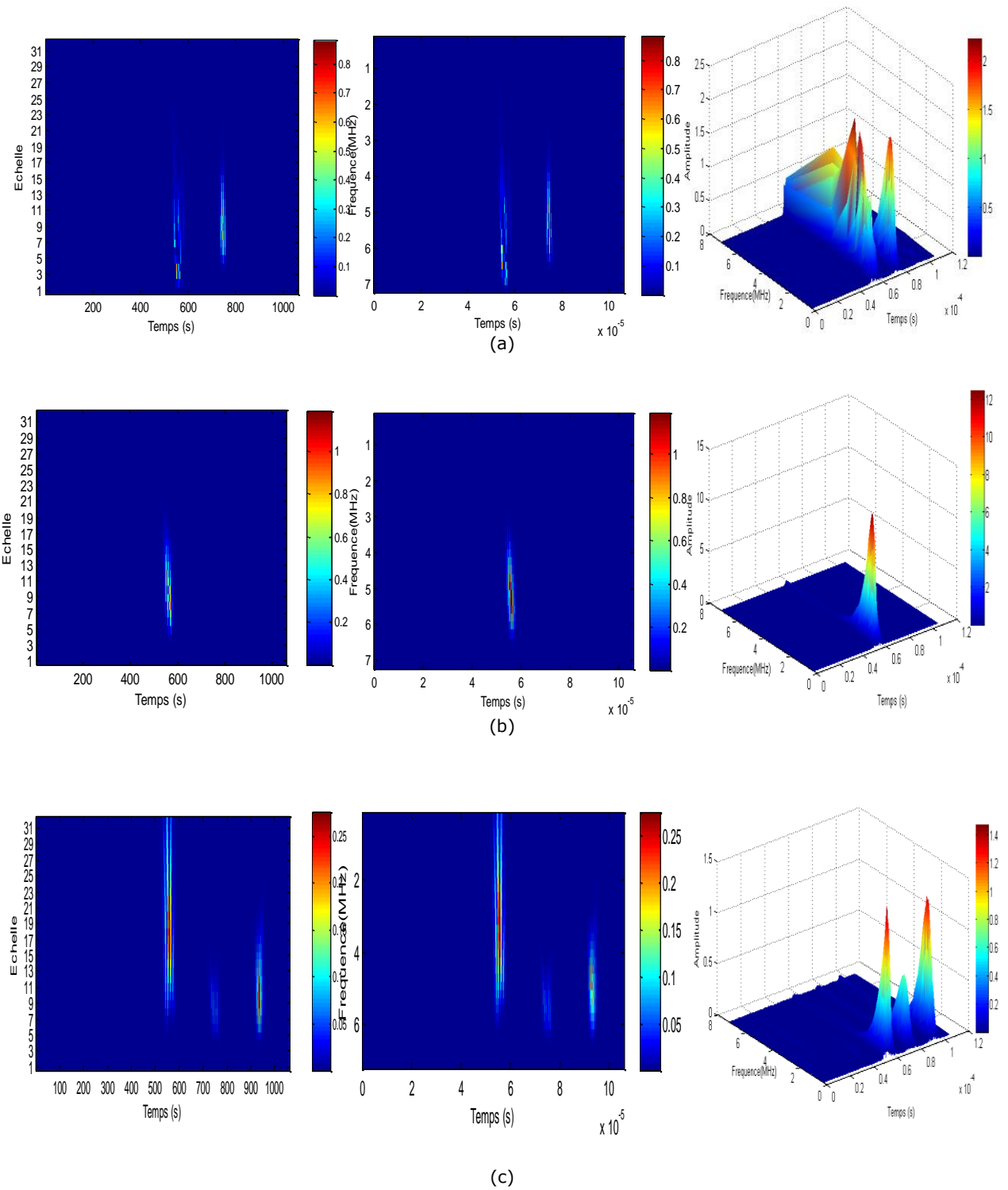


Figure 3.22 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/TOC du signal d'Aluminium

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

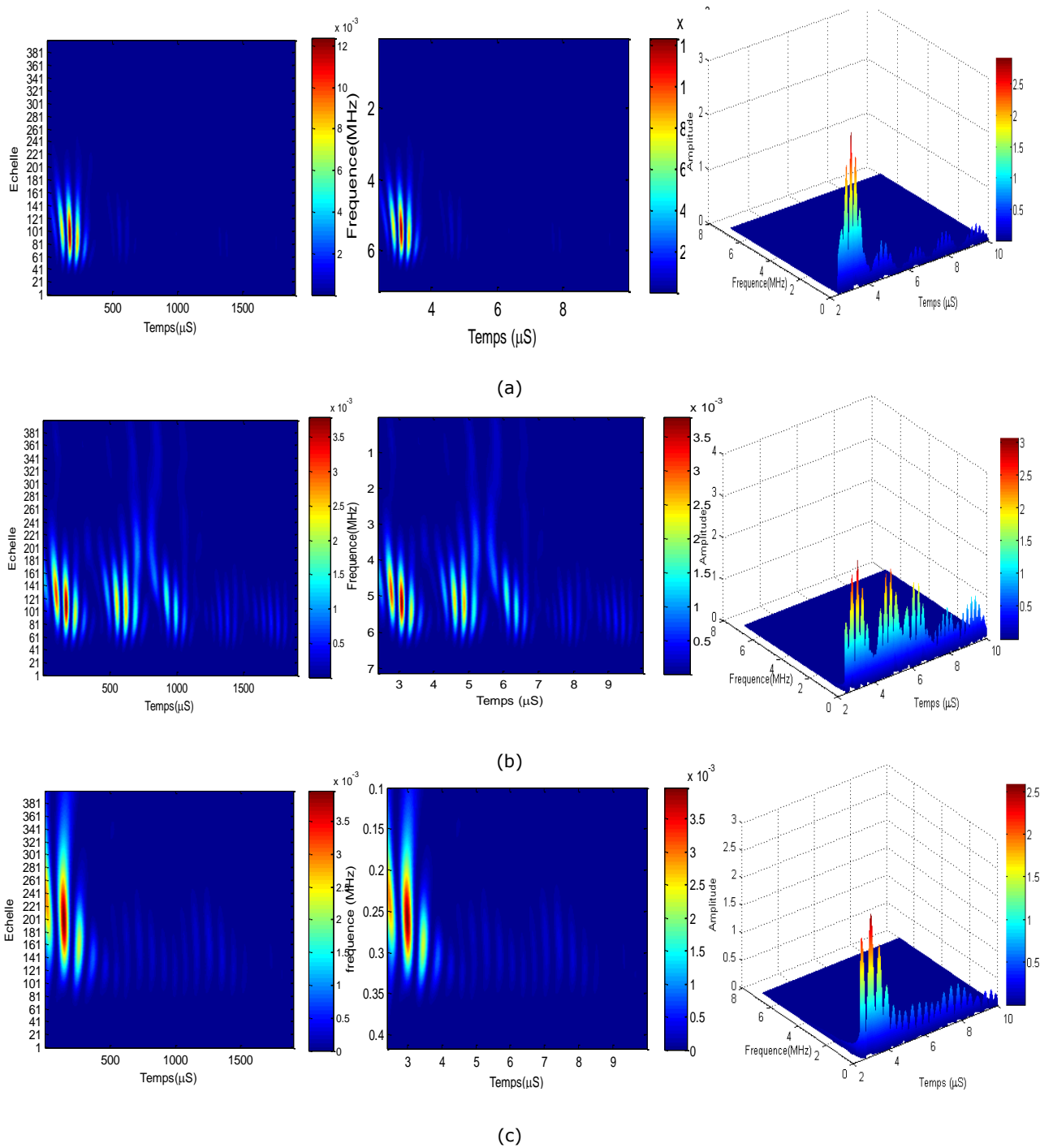


Figure 3.23 : De la gauche vers la droite ; représentation Temps-Echelle et Temps-Fréquence utilisant la CEEMDAN/TOC du signal d'Acier

(a) IMF3 (b) IMF4 (c) IMF5

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 3.5.

| | Signal d'aluminium | | Signal d'acier | |
|-------------------------|--------------------|-------|----------------|-------|
| Echo | 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 3.5 : Calcul du Temps de Vol et Célérité relative pour les deux échantillons par la CEEMDAN/TOC.

6. 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.

L'utilisation de la TFCT ou la TOC comme une analyse temps-fréquence permet d'estimer les fréquences des sous bandes IMFs et de calculer leur énergie.

La combinaison entre la décomposition modale empirique et ses variantes avec la transformée de Fourier à court terme TFCT ou la transformée en ondelettes TOC permet d'avoir une représentation temps-fréquence des signaux ultrasonores. Grâce à cette représentation, on peut déterminer les instants exacts d'apparition des échos, ce qui va faciliter la connaissance de leur position (localisation) et pouvoir ainsi attribuer chaque écho à son interface. Ceci va permettre de détecter les défauts dans le matériau contrôlé ou de le caractériser à partir de sa vitesse de propagation.

Estimation Des Propriétés Elastiques Pour La Caractérisation Des Matériaux

-
1. Introduction
 2. Technique du prisme
 3. Modèle d'un signal ultrasonore
 4. Estimation de la vraisemblance maximale
 5. Algorithme Expectation-Maximisation EM
 6. Dispositif experimental
 7. Résultats de simulation et discussions
 8. Conclusion
-

1. Introduction

Parmi les objectifs du CND par ultrasons, la détermination des caractéristiques physiques des matériaux telles que la densité, le module de Young, le coefficient de Poisson, etc. De ce fait, plusieurs travaux ont été consacrés à démontrer le lien entre la vitesse des ondes ultrasonores et les caractéristiques physiques de ces derniers [47-49].

Dans ce but et afin d'évaluer les propriétés élastiques des matériaux, on propose l'utilisation d'un système de mesure non destructif, basé sur une approche intuitive, qui repose sur le principe de conversion de mode en utilisant la technique du prisme pour la partie expérimentale [50], et un modèle d'estimation de l'écho ultrasonore basé sur l'algorithme EM, concernant la partie simulation. Ce système de mesure a été utilisé avec succès pour évaluer les propriétés élastiques des matériaux de différentes natures (homogènes et non homogènes) fortement atténuants [51].

Dans l'étude expérimentale menée, les échantillons mis sous test, sont réalisés sous forme de prisme. Les échos émis et reçus sont générés en utilisant le même transducteur. Les échos recueillis sont, par la suite, estimés en utilisant l'algorithme de Maximisation d'Espérance (Expectation Maximization, EM) et séparés, afin d'extraire les paramètres élastiques à partir des vitesses, longitudinale et transversale, évaluées [52]. D'après les résultats obtenus, cet algorithme est bien adapté pour extraire les paramètres ultrasoniques souhaités. En fait, il a été démontré que cet algorithme donne de très bons résultats même si les échos recueillis sont corrompus par un bruit blanc gaussien additif (AWGN) avec un rapport signal / bruit (SNR) élevé [53,54].

2. Technique du prisme

La technique du prisme, développée par Bouhadjera et Bouzrira [50], est basée sur le principe de conversion de mode. Cette technique exige le test par immersion, la présence d'un échantillon sous forme de prisme et la présence d'un seul transducteur fonctionnant en émetteur/récepteur. Notre objectif est d'évaluer les deux angles critiques suite à un balayage effectué sur l'angle d'incidence pour pouvoir mesurer la vitesse des ondes longitudinale et transversale de chaque type

d'échantillons. L'efficacité de ce système de mesure repose sur le choix judicieux et précis de l'angle d'incidence qui va permettre de recueillir les échos réfléchis dans une seule manipulation.

La figure (4.1) montre le principe de la technique du prisme [50].

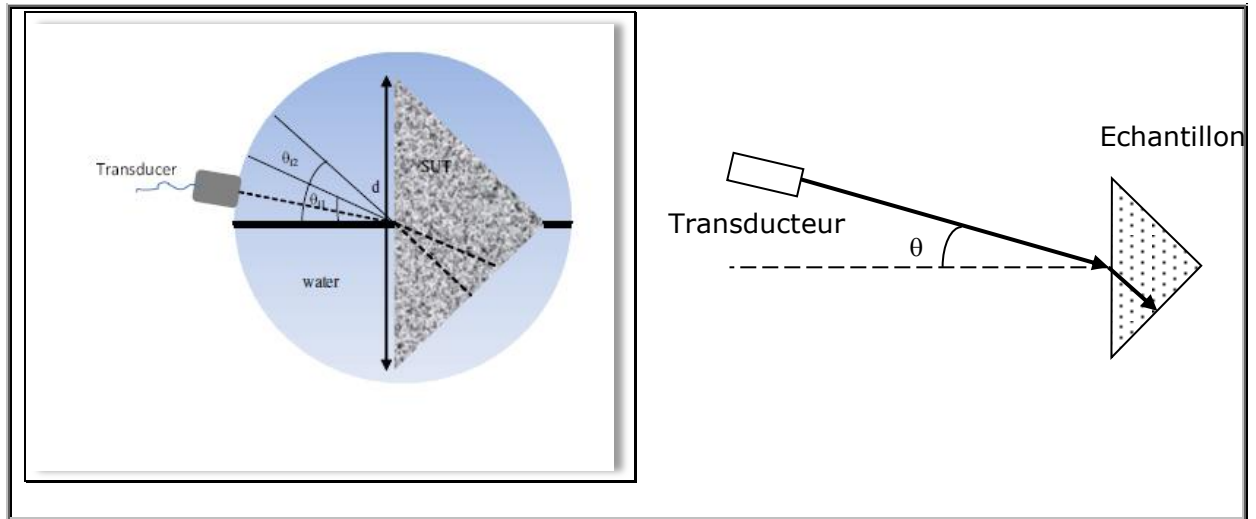


Figure 4.1 : Technique du prisme.

Les résultats théoriques de la technique du prisme ont démontré qu'il est possible d'évaluer les vitesses longitudinale et transversale des ondes ultrasonores en utilisant la formule suivante [50]

$$V_{P,S} = \frac{a}{T_{P,S} - t_1} \quad (4.1)$$

Où a représente la face du prisme, $T_{P,S}$ représente les temps d'arrivée des ondes longitudinale (onde P) et transversale (onde S) extraits des échos recueillis, et t_1 correspond au temps de réflexion totale de la face principale de l'échantillon sous test, qui se produit lorsque l'angle d'incidence est égal à zéro. On peut alors calculer les constantes de Lamé à partir de ces deux formules

$$\lambda_l = \rho (v_p^2 - v_s^2) \quad (4.2)$$

$$\mu = \rho v_s^2 \quad (4.3)$$

où λ_l est le coefficient de Lamé, μ est le module de cisaillement et ρ est la densité.

Les propriétés élastiques telles que le module de Young E et le coefficient de Poisson σ peuvent alors être déduites selon les formules suivantes

$$E = \rho v_s^2 \frac{3 v_p^2 - 4 v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2 v_s^2}{2 v_p^2 - 2 v_s^2} \quad (4.5)$$

D'après les interprétations données dans [50], la technique du prisme fournit de bons résultats pour des échantillons homogènes et non homogènes. Donc, les formules (4.1) – (4.5) sont suffisantes pour évaluer les vitesses longitudinale et transversale des ondes ultrasonores pour les deux cas.

Plus de détails concernant cette technique de mesure et ses principaux avantages par rapport à d'autres techniques ultrasonores bien connues sont données dans les références [50, 51].

3. Modèle du signal ultrasonore

La connaissance du modèle de l'écho ultrasonore est essentielle pour déterminer ses propriétés, puisqu'il fournit des informations précieuses concernant le matériau et le chemin de propagation. Le modèle des échos ultrasonores a été déjà présenté au chapitre 2. Il peut être réécrit sous la forme suivante

$$S(\theta; t) = \beta e^{-\alpha (t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c (t-\tau) + \varphi) \quad (4.6)$$

où $S(\theta; t)$ est l'écho gaussien et $\theta = \{\beta; \alpha; \tau; f_c; \varphi\}$ représente le vecteur de paramètres du modèle lié aux propriétés physiques du matériau étudié.

Dans le cas où les échos détectés sont corrompus par du bruit, le modèle mathématique relatif à cette situation s'écrit alors

$$x(\theta, t) = S(\theta; t) + w \quad (4.7)$$

avec $S(\theta; t)$ le modèle d'écho gaussien donné par l'équation (4.6), $x(\theta, t)$ le modèle d'écho corrompu par le bruit, et w est le bruit blanc gaussien (AWGN) de variance σ^2 et de moyenne nulle.

Une fois les ondes longitudinale et transversale détectées, leurs paramètres seront estimés par l'algorithme d'estimation-maximisation (EM).

4. Estimation de la vraisemblance maximale

Le problème de la maximisation de la vraisemblance consiste à trouver les paramètres qui maximisent la vraisemblance. Plus précisément, on définit une fonction de densité $p(x|\theta)$ qui dépend de l'ensemble des paramètres du vecteur θ .

On suppose que l'ensemble de N données est donné par $X = x_1, \dots, x_N$. Ainsi, la densité de l'échantillon X peut s'écrire sous la forme

$$P(x|\theta) = \prod_{i=1}^N P(x_i|\theta) = f(\theta|x) \quad (4.8)$$

Cette fonction exprime la vraisemblance des paramètres selon les données. C'est la fonction de vraisemblance. Il est plus facile de calculer le logarithme de cette fonction. On utilise donc la log-vraisemblance (log-likelihood) donnée par

$$L(x|\theta) = \ln(f(\theta|x)) \quad (4.9)$$

Le problème se pose alors comme un problème d'optimisation de ces paramètres par rapport à la distribution suivante

$$\theta^{\text{opt}} = \text{Max } L(x|\theta) \quad (4.10)$$

La maximisation de la vraisemblance permet ainsi d'obtenir les paramètres du modèle [54].

5. Algorithme Expectation-Maximisation EM

L'algorithme espérance-maximisation (en anglais expectation-maximization algorithm, souvent abrégé EM), proposé par Dempster et al. en (1977), est un algorithme itératif qui permet de trouver les paramètres du maximum de vraisemblance d'un modèle probabiliste lorsque ce dernier dépend de variables latentes non observables. L'algorithme EM permet donc de compléter une série de données manquantes en se basant sur la vraisemblance maximale (maximum-likelihood estimation) de l'ensemble des données [56]. Il faut noter que l'algorithme EM est une approche standard utilisée pour estimer les paramètres des signaux superposés et bruités par le maximum de vraisemblance en remplaçant le problème difficile d'estimation par une séquence de problèmes simples.

L'algorithme EM tire son nom du fait qu'à chaque itération il opère en deux étapes distinctes [63]

- la phase « Espérance » souvent désignée comme « l'étape **E** ». cette étape procède à l'estimation des paramètres essentiels qui déterminent la fonction de vraisemblance en se basant sur les données observées et la valeur des paramètres déterminée à l'itération précédente ;
- la phase « Maximisation » ou « étape **M** ». Pour sa part, cette étape procède à la maximisation de la vraisemblance rendue désormais possible en utilisant l'estimation des données inconnues, effectuée à l'étape précédente, puis, mise à jour de la valeur des paramètres pour la prochaine itération.

Ces deux étapes sont précédées par une étape d'initialisation où les paramètres à estimer sont initialisés. Le côté itératif de l'algorithme garantit que la vraisemblance augmente à chaque itération, ce qui conduit donc à des estimateurs de plus en plus corrects.

5.1 Aspect théorique [55, 56]

Soit X l'ensemble de données observées incomplètes. On assume qu'il existe un ensemble de données complet $Z = (X, Y)$ où Y représente l'ensemble des données manquantes. On peut donc réécrire la fonction de densité jointe comme suit

$$P(z|\theta) = P(x, y|\theta) = P(y|x, \theta) P(x|\theta) \quad (4.11)$$

De la même façon, la log-vraisemblance de l'ensemble de données complet s'écrit sous la forme

$$L(\theta|Z) = \ln(\theta|x, y) = \ln(P(x, y|\theta)) \quad (4.12)$$

L'objectif est de trouver la valeur espérée de la log-vraisemblance de l'ensemble Z par rapport à l'ensemble Y en se basant sur les données observées X et les paramètres du modèle θ . Le problème est qu'on ne connaît pas les variables cachées, il faut donc utiliser les données et les paramètres d'une itération précédente X et $\theta^{(i-1)}$. La définition de cette espérance est

$$Q(\theta|\theta^{(i-1)}) = E_y [\ln(P(x, y|\theta)) | x, \theta^{(i-1)}] \quad (4.13)$$

où E_Y est l'espérance par rapport à Y , les $\theta^{(i-1)}$ sont les paramètres utilisés pour évaluer l'espérance, et θ représente le vecteur des nouveaux paramètres à optimiser afin de maximiser Q . Dans cette expression, X et $\theta^{(i-1)}$ sont constantes, θ est une variable ajustable et Y est une variable aléatoire gouvernée par la distribution $f(Y | X, | \theta^{(i-1)})$. On peut alors réécrire le terme de droite comme suit

$$E_Y [\ln (P(x,y|\theta) | x, \theta^{(i-1)})] = \int^{y \in Y} \ln (P(x,y|\theta)) f(y|x, | \theta^{(i-1)}) dy \quad (4.14)$$

Cette fonction est déterministe et doit être maximisée. Les étapes de l'algorithme EM sont donc

- Étape **E** : Évaluation de l'espérance $Q(\theta | \theta^{(i-1)})$ selon les données observées et les paramètres disponibles.
- Étape **M** : Maximisation de cette espérance $\theta^i = \max Q(\theta, \theta^{(i-1)})$ en fonction du vecteur θ .

Ces deux étapes sont répétées autant de fois que nécessaire. Chaque itération fait augmenter la log-vraisemblance, donc l'algorithme converge directement vers un maximum local de la fonction de log-vraisemblance jusqu'à ce que la différence entre la fonction de vraisemblance de l'itération (i) et celle de l'itération (i-1) ne change pratiquement plus, c'est-à-dire

$$| \theta^{(i)} - \theta^{(i-1)} | \leq \varepsilon \quad (4.15)$$

où ε est une valeur arbitraire positive très proche de zéro [61].

5.2 Organigramme

La figure (4.2) schématise le fonctionnement de l'algorithme EM [55].

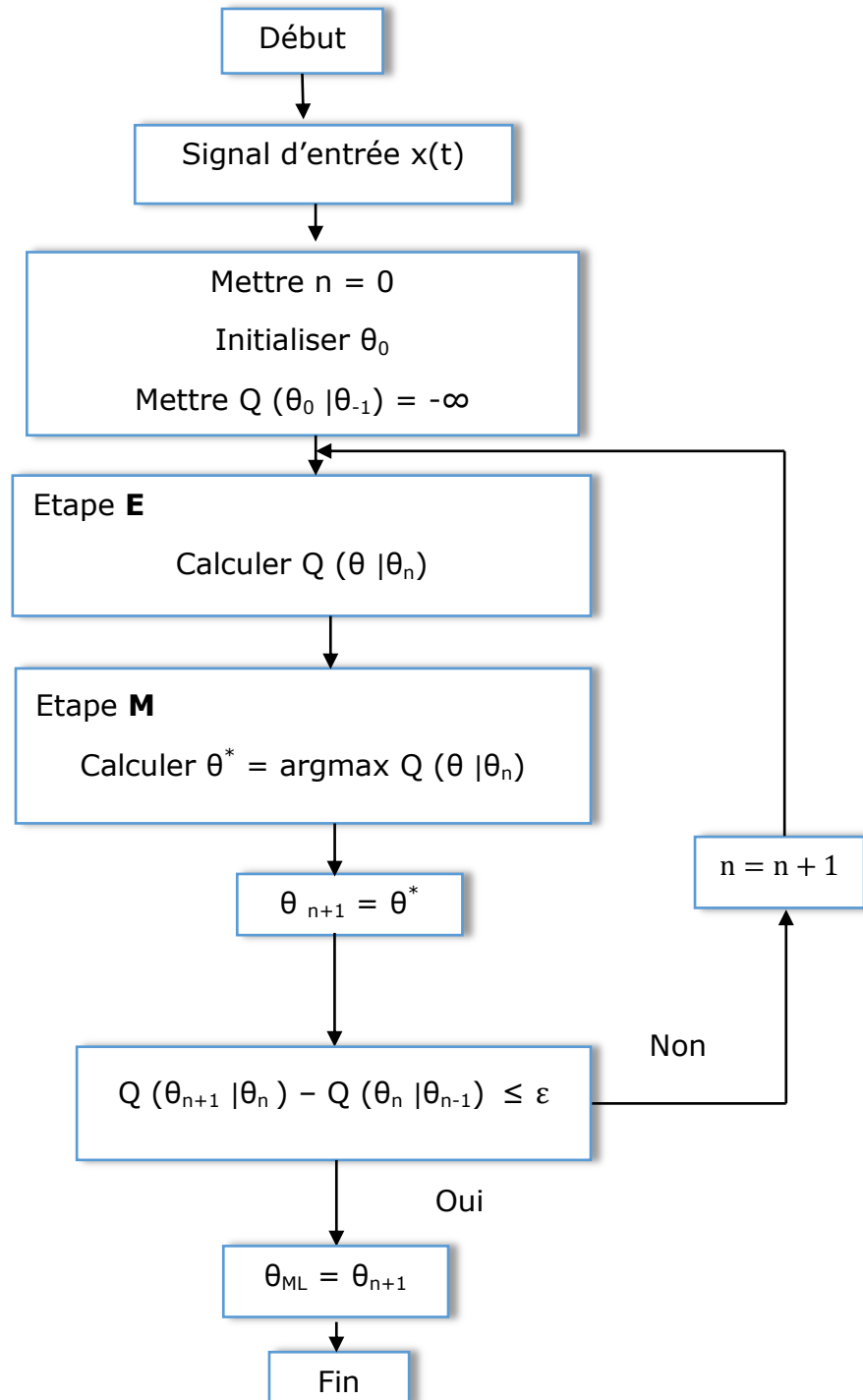


Figure 4.2 : Organigramme de l'algorithme EM.

5.3 Implémentation de l'algorithme

Considérons le modèle gaussien de l'équation (4.7), on définit $x_m(\theta; t)$ comme étant l'écho d'ordre m

$$x_m(\theta; t) = S(\theta_m; t) + w_m \quad (4.16)$$

Les paramètres des ondes longitudinale et transversale sont données par le vecteur de paramètres θ_m exprimé par : $\theta_m = \{A_m; \alpha_m; \tau_m; f_{cm}; \varphi_m\}$ où $m = 1, 2, \dots, M$. Puisque les ondes ultrasonores mesurées par le transducteur peuvent être générées par un mélange de Gaussiennes, alors le modèle de M ondes peut être exprimé par

$$x(t) = \sum_{m=1}^M x_m(\theta; t) \quad (4.17)$$

Rappelons que l'idée de base de l'algorithme EM est de transformer un problème avec des données incomplètes, en un problème de données complètes, dont la fonction log-vraisemblance est facile à calculer et à estimer. En d'autres termes, l'algorithme EM traduit le problème d'estimation de M ondes superposées à un problème d'estimation de M ondes séparées en utilisant les données non observables [57, 64].

L'étape **E** : Dans l'étape d'espérance, x_m est calculé en fonction des données observées et de la valeur actuelle du vecteur des paramètres

$$\hat{x}_m^{(i)}(\theta; t) = S(\theta_m^{(i)}; t) + \beta_m (y - \sum_{l=1}^M S(\theta_l^{(i)}; t)) \quad (4.18)$$

où β_m doit satisfaire $\sum_{m=1}^M \beta_m = 1$.

L'étape **M** : L'étape de maximisation implique la maximisation de la fonction de densité de probabilité associée au vecteur de paramètres correspondant en utilisant le signal estimé dans l'étape **E** [33, 34]. Ainsi, l'étape **M** itère le vecteur de paramètres $\theta_m^{(i)}$ en minimisant la fonction suivante

$$\theta_m^{(i+1)} = \arg_{\theta_m} \min \| \hat{x}_m(k) - s(\theta_m) \|^2 \quad (4.19)$$

La nouvelle itération du vecteur de paramètre m est déterminée en utilisant l'algorithme de Gauss-Newton

$$\theta_m^{(i+1)} = \theta_m^{(i)} + \left(J_{\theta_m^{(i)}}^T J_{\theta_m^{(i)}} \right)^{-1} J_{\theta_m^{(i)}}^T \left(\hat{x}_m^{(i)}(\theta; t) - S(\theta_m^{(i)}; t) \right) \quad (4.20)$$

$$\theta_m^{(i)} = \theta_m^{(i+1)}$$

où $J_{\theta_m^{(i)}}$ est le gradient correspondant à chaque paramètre du vecteur θ .

Notons que la mise en œuvre de l'étape **M** par l'algorithme de Gauss-Newton réduit considérablement la complexité de l'algorithme EM [61]. Pour plus de détails sur l'algorithme de Gauss-Newton, se référer à l'annexe.

5.4 Remarques

La démarche itérative de l'algorithme EM est très astucieuse et débouche sur une amélioration progressive et réciproque du vecteur des données cachées Z et du vecteur de paramètres θ . En effet, on démarre l'algorithme avec une ignorance absolue des données cachées Z en initialisant le vecteur de paramètres θ à une valeur $\theta^{(0)}$ totalement arbitraire. Ainsi, l'algorithme utilise $\theta^{(0)}$ pour estimer Z , puis se sert de \hat{Z} pour réestimer les paramètres en une valeur $\theta^{(1)}$ plus pertinente, et ainsi de suite.

L'algorithme EM présente beaucoup d'avantages, on cite [54]

- Une facilité de mise en application, parce qu'il repose sur des données complètes.
- Programmation facile.
- Stabilité numérique et croissance de la vraisemblance à chaque itération jusqu'au point de convergence sauf en un point fixe de l'algorithme.
- Contrôle de la convergence et des erreurs de programmation.
- Utilisation de l'algorithme EM pour fournir les valeurs estimées des données manquantes.
- La convergence de l'algorithme se fait presque toujours à un maximum local en partant d'un point de départ arbitraire $\theta^{(0)}$.

6. Dispositif expérimental

Le système de mesure employé utilise la technique pulse-écho par immersion basée sur le principe de réflexion et de réfraction des ondes entre liquide-solide. Une vue générale de ce système avec son schéma synoptique est illustrée à la figure (4.3).

Il est constitué essentiellement de

- une cuve métallique à immersion contenant l'échantillon et le transducteur,
- un transducteur piézo-électrique de fréquence 1 Mhz qui joue le rôle d'un convertisseur électrique/ultrason,
- un générateur de signaux ultrasonores (Panametrics PR5052),
- un oscilloscope numérique (TDS de Tektronix 1002) pour visualiser les échos émis et réfléchis,
- un ordinateur muni d'un logiciel (waveStar) pour l'acquisition des données.

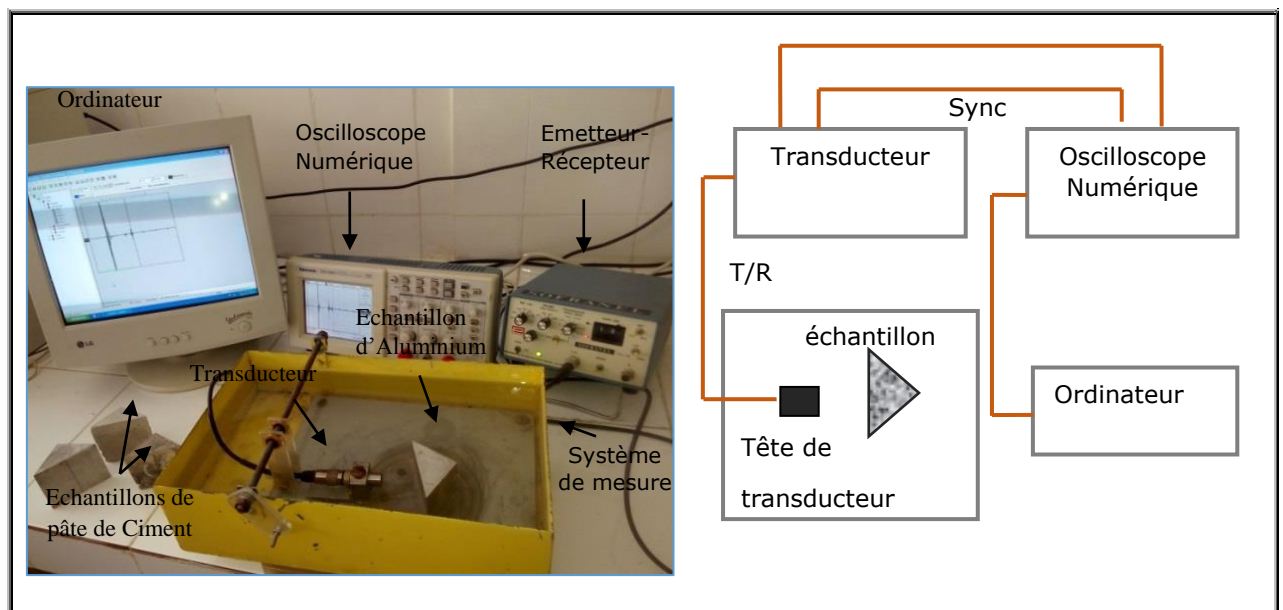


Figure 4.3 : Vue générale du système de mesure avec schéma synoptique.

6.1 Données expérimentales

Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de test non destructif (Laboratoire NDT) de l'université de Jijel en utilisant la technique du prisme.

A cet égard, on a utilisé deux types d'échantillons sous forme de prisme, fabriqués selon un moule spécial de même dimension $d = 4.8$ cm. Le premier échantillon est homogène : il s'agit de l'Aluminium avec une densité $\rho = 2750$ kg/m³; le second est non homogène : la pâte de ciment avec un rapport eau/ciment (E/C) de 40% et une densité $\rho = 1950$ de kg/m³;

- avec un seul transducteur piézo-électrique de fréquence 1 MHz et 6 mm de diamètre pour les deux cas;
- la technique de contrôle est par écho (Pulse echo);
- sa mise en œuvre est en immersion;
- le mode d'excitation est impulsionnel;

6.2 Déroulement de l'expérience

Rappelons tout d'abord l'objectif fondamental de cette expérience. On voudrait à travers cette expérience et à partir d'un angle d'incidence bien précis, recueillir les deux ondes transversale et longitudinale générées par conversion de mode en une seule mesure et au même temps.

Les mesures ont été accomplies en utilisant un seul transducteur pour la génération et la détection des ondes P et S à l'intérieur des échantillons sous test. Durant les deux expériences menées, chaque échantillon est noyé dans l'eau avec le transducteur qui est actionné par une tension du générateur pour envoyer une onde ultrasonore, qui se propage dans l'eau et attaque la face principale du prisme.

Au début de chaque expérience, l'angle d'incidence est fixé à 0° , ensuite, on fait augmenter cet angle progressivement jusqu'à l'apparition simultanée des échos réfractés liés à la fois aux deux ondes transversale et longitudinale.

Les signaux obtenus sont amplifiés et filtrés en utilisant un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 100 MHz pour supprimer le bruit de structure. Par la suite, ces échos rétrodiffusés seront visualisés sur un oscilloscope numérique et enregistrés sous format A-scan pour d'éventuels traitements.

7. Résultats de simulation et discussions

7.1 Détermination des angles critiques

Pour toute interface liquide-solide, l'incidence d'une onde ultrasonore sur cette interface introduit deux angles critiques, l'un pour l'onde longitudinale θ_L et l'autre pour les ondes transversales θ_T . Ces angles correspondent respectivement aux angles d'incidence à partir desquels il n'y a plus d'ondes réfractées longitudinalement et transversalement; ces angles sont appelés angles de réflexion totale car lorsque l'incidence devient supérieure à l'un d'eux, la réflexion est totale

pour le type d'ondes considérées. A partir de l'angle critique correspondant aux ondes transversales θ_{crT} , la réflexion est égale à l'unité. Il n'y aura plus d'énergie qui se propage dans l'échantillon et tout le faisceau incident est réfléchi, mais il faut surtout remarquer, qu'entre les deux angles critiques, les ondes transmises sont uniquement transversales, ce qui est très utilisé en CND par ultrasons car ça facilite l'interprétation des échos [61]. La figure (4.4) illustre schématiquement les variations de l'intensité des coefficients de réflexion R et de transmission en mode longitudinal T_L , et de transmission en mode transversal T_T en fonction de l'angle d'incidence pour les deux échantillons soumis au test.

Comme on peut le constater, il existe deux angles critiques pour les deux cas (14° , 29°) pour l'Aluminium et (24° , 40°) pour la pâte de ciment. On voit bien que les deux ondes transversale et longitudinale ont des comportements différents selon les angles d'incidence.

Avant le premier angle critique, l'onde longitudinale diminue pendant que l'onde transversale augmente. Entre les deux angles critiques, l'onde longitudinale disparaît tandis que l'onde transversale croît selon toujours l'angle d'incidence.

Au-delà du deuxième angle critique, les deux ondes disparaissent et deviennent des ondes de surface.

Après de nombreux tests, l'angle d'incidence pour collecter avec précision les ondes longitudinale et transversale a été fixé à $\theta_{i1} = 10^\circ$ pour l'aluminium et à $\theta_{i2} = 13^\circ$ pour la pâte de ciment.

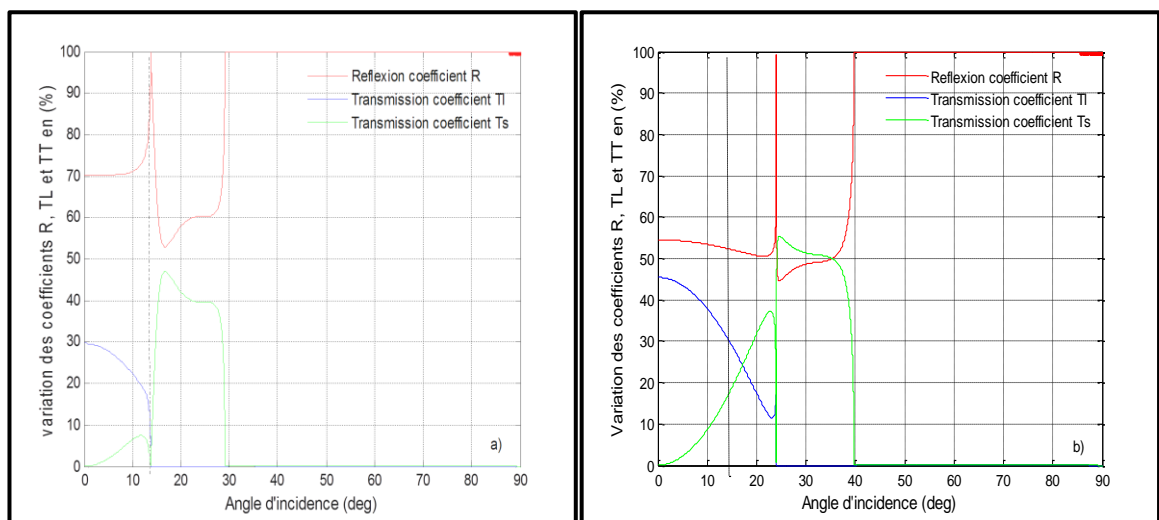


Figure 4.4 : Intensité des coefficients de réflexion et de transmission pour
(a) Aluminium (b) Pâte de Ciment

7.2 Procédé d'estimation

Les échos représentés dans la figure (4.5) sont obtenus à partir de mesures effectuées selon trois étapes, en faisant tourner délicatement le transducteur autour de chaque échantillon c'est à dire en faisant varier l'angle d'incidence délicatement pour pouvoir collecter les deux ondes dans une même mesure, tout en supposant une connaissance presque exacte de l'échantillon à tester. Ces étapes sont

(i) Les mesures doivent être effectuées sous incidence normale (angle d'incidence égal à zéro) et les informations récupérées correspondent au premier écho (réflexion sur la face)

(ii) L'angle d'incidence est augmenté au fur et à mesure mais en utilisant de très petites variations, jusqu'à ce que le premier écho disparaisse et qu'un deuxième écho apparaisse correspondant à l'onde longitudinale. D'autres échos peuvent apparaître mais sachant, à priori, le type de matériau testé, le risque d'erreur est presque nul.

iii) L'angle d'incidence est à nouveau augmenté jusqu'à ce que le deuxième écho disparaisse et un troisième écho apparaisse. Cet écho sera considéré comme étant l'onde transversale. Comme pour l'onde longitudinale, un bon choix des angles critiques et de l'angle d'incidence est exigé. De toute évidence, on peut voir que les signaux expérimentaux obtenus sont composés de plusieurs échos réfractés.

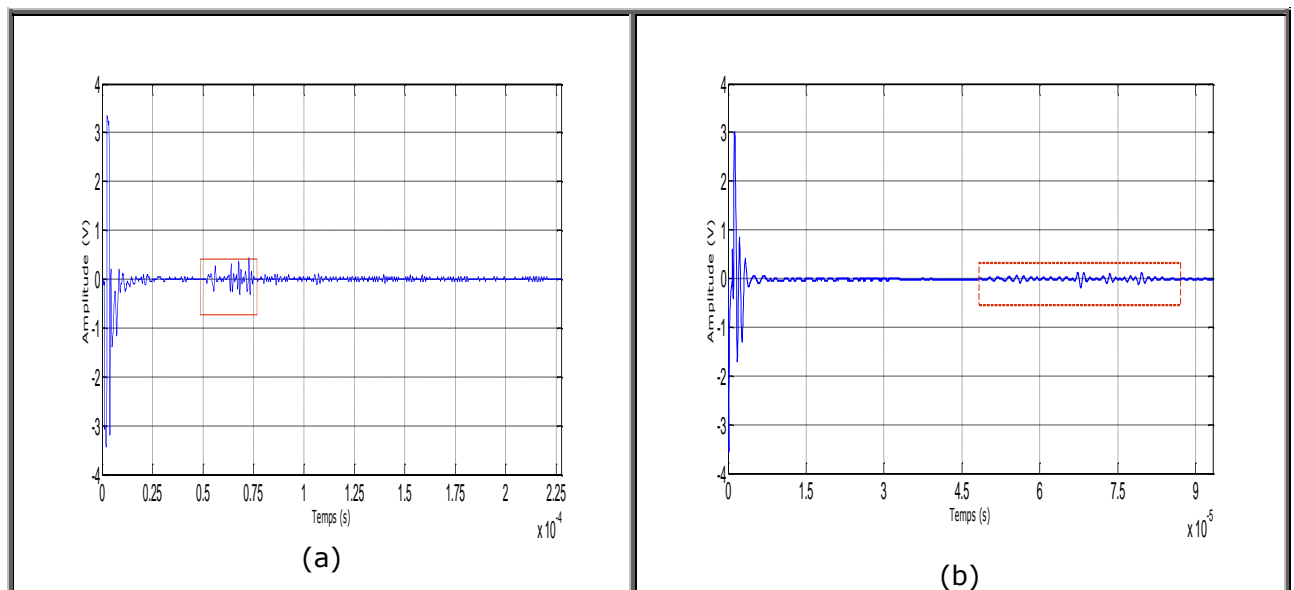


Figure 4.5 : Signaux expérimentaux recueillis pour : (a) Aluminium (b) Ciment.

En agrandissant la partie encadrée, on obtient une vue rapprochée des différents échos représentés dans la figure (4.6). On voit clairement des échos réfléchis qui sont superposés et contaminés par un bruit additif mais, seulement quatre impulsions peuvent être distinctement identifiées.

Le premier écho représente l'écho de face du prisme; le deuxième écho est celui de l'onde longitudinale P, le troisième représente les réflexions multiples et le dernier correspond à l'onde transversale convertie S.

Ces échos ultrasonores rétrodiffusés ont été analysés, afin de valider le système de mesure proposé. Notons que la mesure du temps d'arrivée a été affectée par le bruit additif superposé à ces différents échos. C'est pourquoi, un traitement préalable du signal reçu est nécessaire. La figure (4.6 (a)) montre clairement les échos mesurés et réfléchis par l'échantillon d'Aluminium. L'écho de face peut être observé avec un retard d'environ $53,40 \mu\text{s}$, l'écho réfléchi pour l'onde longitudinale P est visible à $61,80 \mu\text{s}$, le temps d'arrivée de l'écho réfléchi correspondant aux réflexions multiples est de $65,70 \mu\text{s}$ et enfin, l'onde transversale S est réfléchie à $70,50 \mu\text{s}$. La figure (4.6 (b)) représente les échos mesurés et réfléchis par la pâte de ciment. Évidemment, quatre temps d'arrivée peuvent être identifiés pour les différents échos réfractés ; ils sont donnés par : $56,20 \mu\text{s}$, $68,00 \mu\text{s}$, $73,30 \mu\text{s}$ et $79,70 \mu\text{s}$.

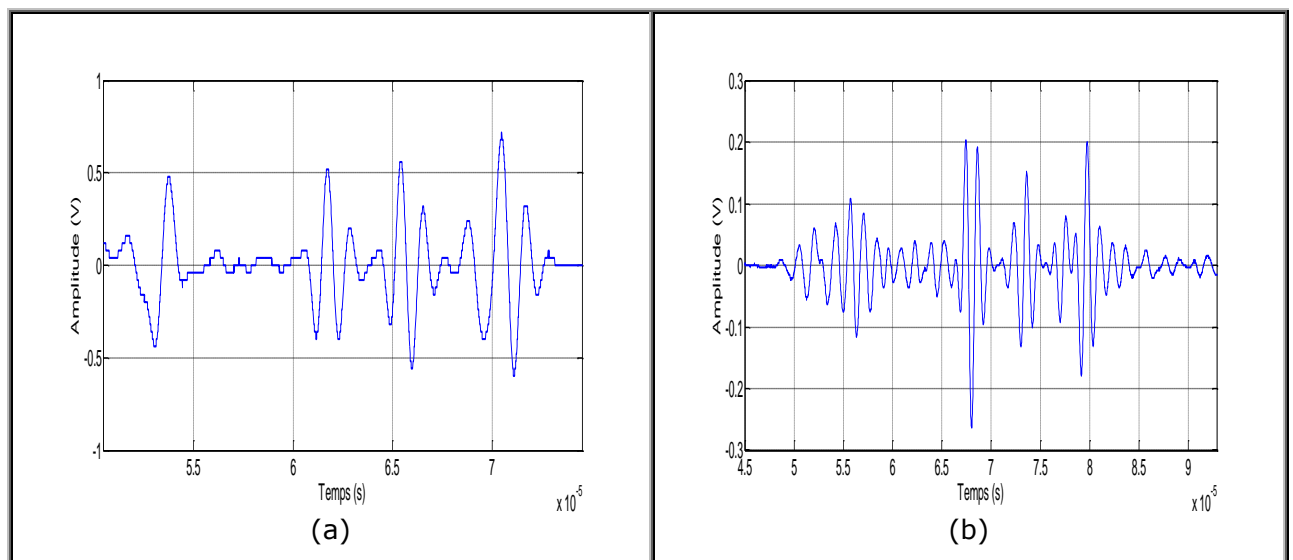


Figure 4.6 : Zoom des ondes réfléchies longitudinale et transversale pour
(a) Aluminium (b) Pâte de Ciment

L'application de l'algorithme EM aux deux signaux expérimentaux permet d'obtenir les résultats affichés sur la figure (4.7). On voit bien que les signaux traités présentent des formes d'ondes claires (plusieurs échos superposés) et que les échos estimés obtenus sont exactement et fidèlement reproduits, même en présence de bruit additif AWGN avec un SNR approximativement égal à 10 dB.

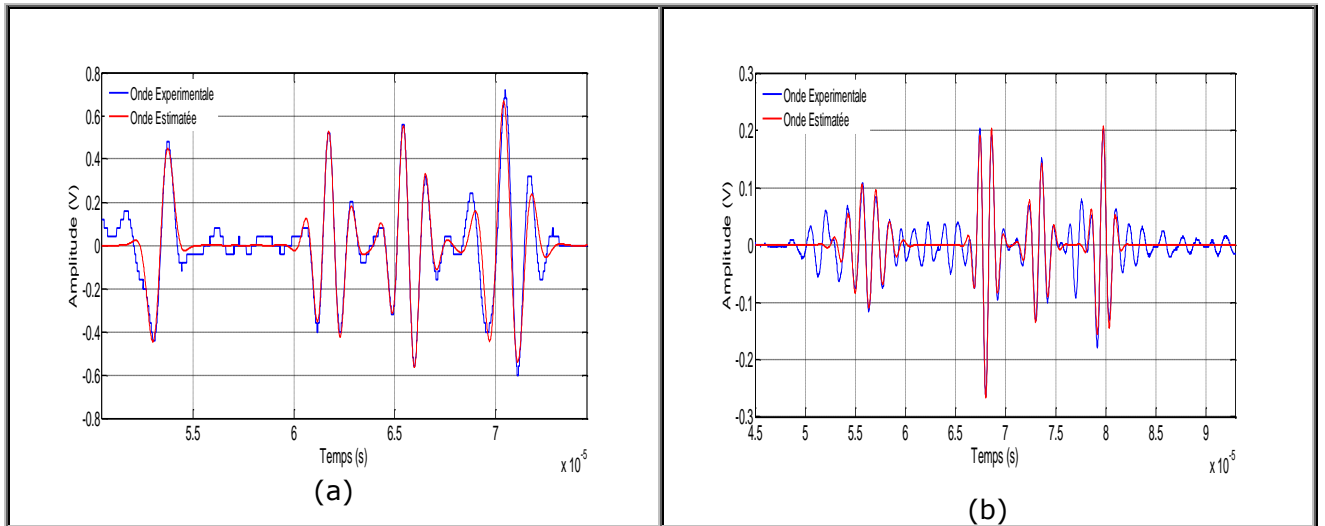


Figure 4.7 : Superposition des deux signaux expérimental et estimé pour

(a) Aluminium (b) Pâte de ciment.

Les quatre ondes ont pu être séparées avec succès. Des représentations plus détaillées de chaque onde séparée pour l'Aluminium et la pâte de ciment sont données dans les figures (4.8) et (4.9), respectivement.

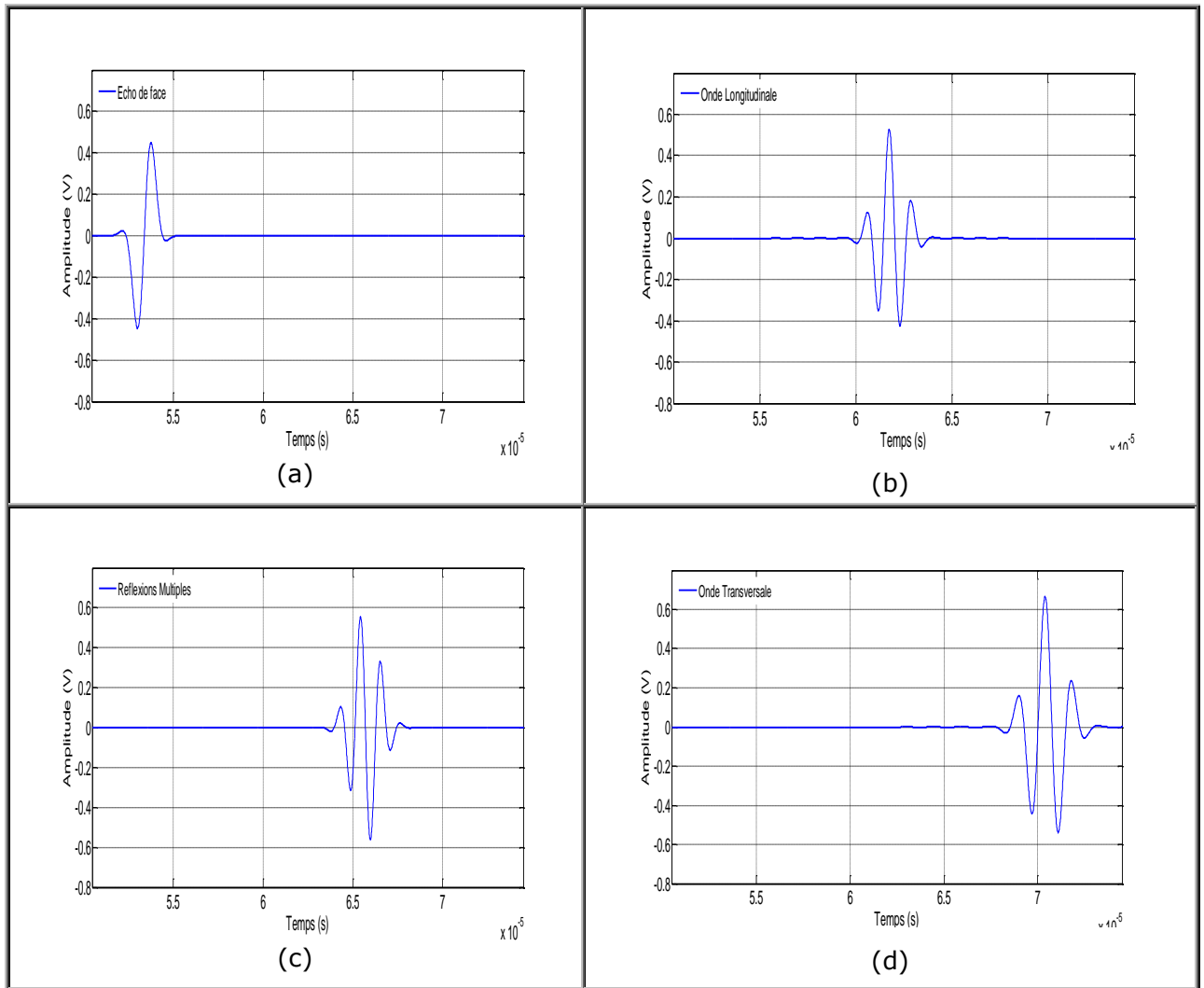


Figure 4.8 : Echos séparés temporellement pour l'Aluminium : (a) Echo de face
(b) Onde longitudinale; (c) Réflexions multiples; (d) Onde transversale.

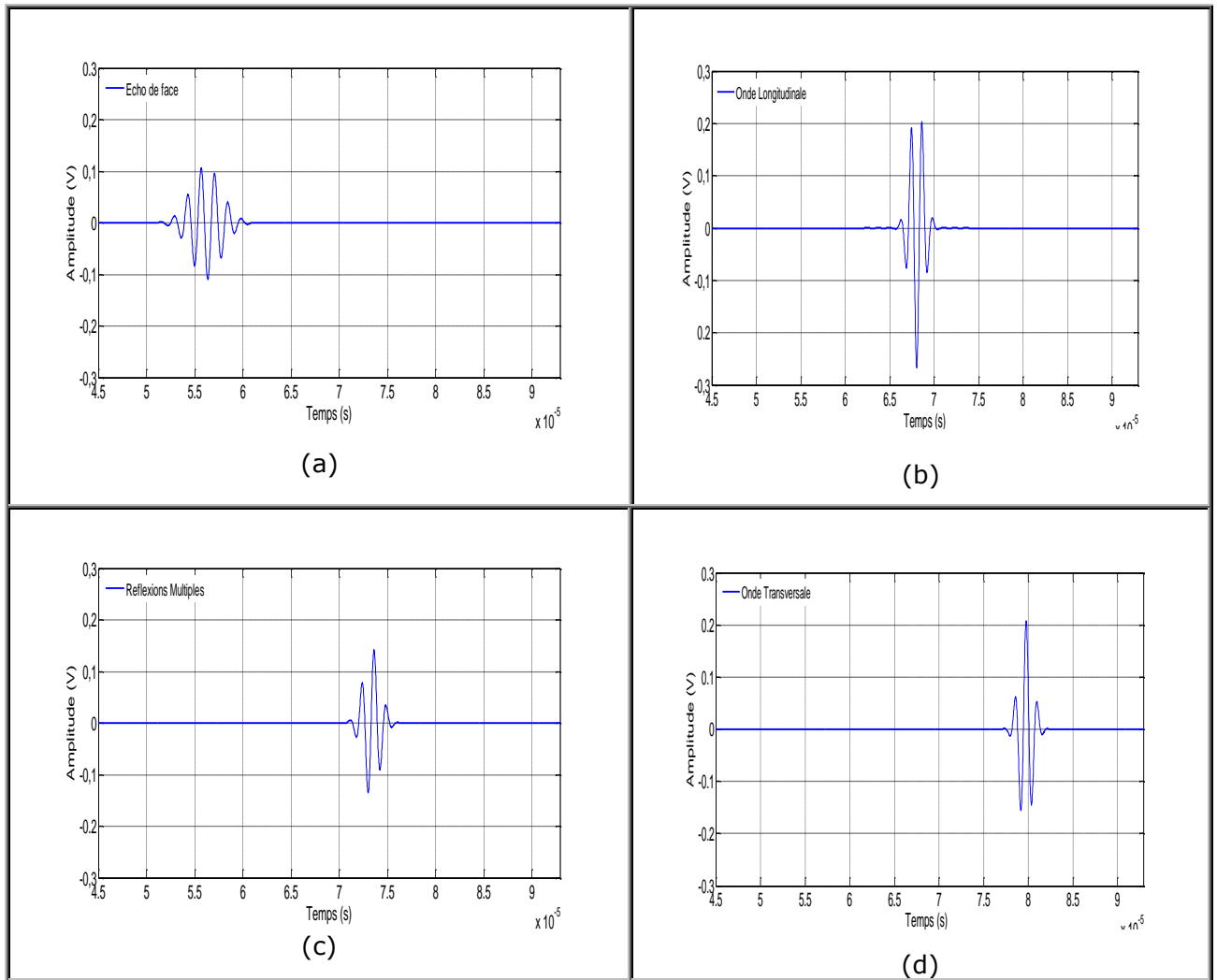


Figure 4.9 : Echos séparés temporellement pour la pâte de ciment : (a) Echo de Face; (b) Onde longitudinale; (c) Réflexions multiples; (d) Onde transversale.

Les résultats d'estimation des paramètres, pour chaque type d'échantillon, calculés par l'algorithme EM sont listés dans les tableaux suivants

| | Largeur de bande (MHz) ² | Temps d'arrivée (μ s) | Fréquence centrale (MHz) | Phase (rad) | Amplitude (V) |
|-----------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|
| Echo de face | 2.171 | 53.340 | 0.474 | 4.698 | 0.681 |
| Onde longitudinale | 0.937 | 61.810 | 0.836 | 0.465 | 0.533 |
| Reflections multiples | 0.623 | 65.710 | 0.862 | 7.934 | 0.599 |
| Onde transversale | 0.593 | 70.500 | 0.674 | 0.492 | 0.671 |

Tableau 4.1 : Paramètres estimés des échos rétrodiffusés pour l'Aluminium.

| | Largeur de bande (MHz) ² | Temps d'arrivée (μ s) | Fréquence centrale (MHz) | Phase (rad) | Amplitude (V) |
|----------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------|
| Echo de face | 0.195 | 56.200 | 0.716 | 3.860 | 0.111 |
| Onde longitudinale | 0.801 | 68.050 | 0.813 | 3.294 | 0.266 |
| Reflexions multiples | 0.635 | 73.333 | 0.779 | 1.365 | 0.147 |
| Onde transversale | 0.868 | 79.710 | 0.789 | 6.060 | 0.208 |

Tableau 4.2 : Paramètres estimés des échos rétrodiffusés pour la pâte de Ciment.

La figure (4.10) montre les emplacements temporels ainsi que les amplitudes des échos rétrodiffusés pour les deux échantillons.

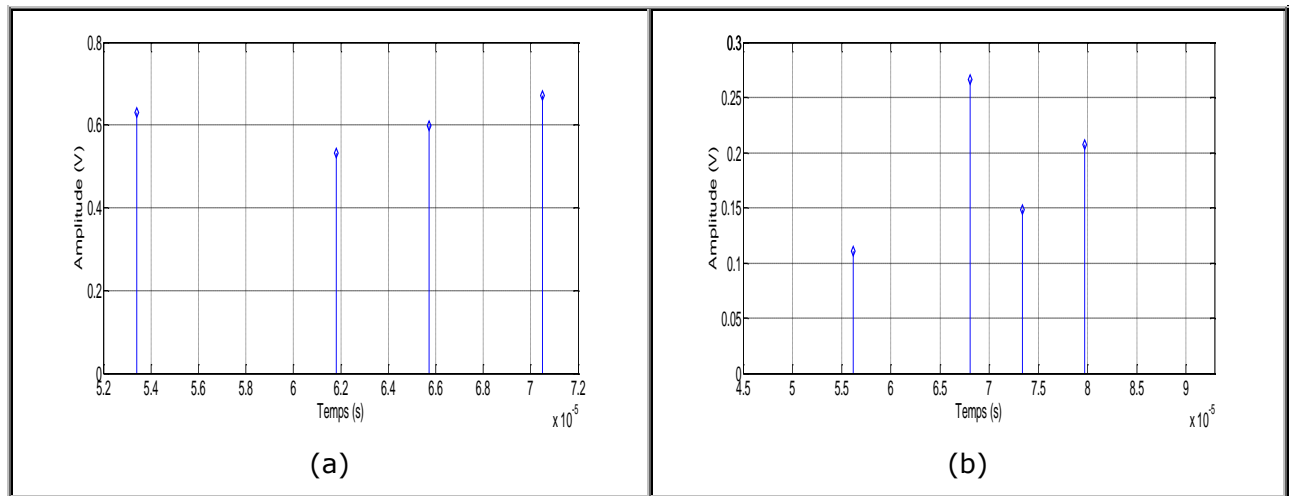


Figure 4.10 : Localisation temporelle et amplitudes des échos rétrodiffusés

(a) Aluminium (b) Pâte de Ciment.

A partir de la localisation temporelle des différents échos, notamment ceux correspondant aux deux ondes longitudinale P et transversale S, on peut déterminer le temps d'arrivée et, par conséquent, les vitesses des ondes ultrasonores P et S peuvent être déduites facilement.

Le tableau 4.3 montre les valeurs correspondant aux différentes constantes élastiques pour les deux spécimens étudiés.

Les vitesses des ondes longitudinale et transversale ont été calculées à partir de l'évaluation du temps d'arrivée pour chaque échantillon comme indiqué par l'équation (4.1).

| Caractéristiques Matériau | Vitesse longitudinale Vp(m/s) | Vitesse transversale Vs(m/s) | Densité ρ (Kg/m ³) | Module de Young E(GPa) | Coefficient de Poisson σ |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|---------------------------------------|
| Aluminium | 6071 | 2947 | 2750 | 92.937 | 0.345 |
| Pâte de ciment | 4250 | 2145 | 1950 | 36.233 | 0.329 |

Tableau 4.3 : Valeurs des paramètres estimés pour l'Aluminium et la pâte de Ciment.

D'après les valeurs calculées, on peut dire que les vitesses estimées des ondes P et S et les propriétés élastiques sont en bon accord avec les valeurs théoriques.

8. Conclusion

L'estimation des paramètres des signaux ultrasonores est une phase fondamentale en contrôle non destructif, c'est pourquoi nous avons présenté dans ce chapitre un système de mesure permettant d'évaluer les paramètres ultrasonores de deux échantillons fortement atténuants, l'un homogène et l'autre non homogène.

Le principe de ce système est basé sur la technique du prisme, utilisée pour évaluer les propriétés élastiques des matériaux par l'algorithme d'expectation-maximisation EM.

Pour une valeur spécifique de l'angle d'incidence de l'émetteur, on peut collecter les deux ondes longitudinale et transversale simultanément. Ensuite, l'application de l'algorithme d'espérance-maximisation permet de séparer les différents échos, et par la suite estimer correctement leurs paramètres.

Deux expériences ont été menées sur deux échantillons en forme de prisme, le premier homogène « l'aluminium » et le second non homogène « la pâte de ciment » pour démontrer l'efficacité du système de mesure proposé.

Le principal avantage de ce système est que les constantes élastiques des deux

matériaux peuvent être extraites à partir d'un seul test expérimental, c'est-à-dire que les deux ondes longitudinale et transversale peuvent être collectées ensemble en choisissant une valeur adéquate de l'angle d'incidence.

Les résultats théoriques de la technique du prisme sont en accord avec les résultats de simulation. En effet, les résultats obtenus, à partir des échos réfractés pour les deux échantillons, confirment bien le principe de la technique du prisme qui pourrait être considérée comme une méthode fiable pour obtenir des données justes, nécessaires pour des tests de qualité pour l'homogénéité des matériaux.

Conclusion Générale Et Perspectives

-
1. Conclusion générale
 2. Perspectives
-

1. Conclusion Générale

Le travail effectué dans cette thèse concerne la caractérisation des matériaux et la détection des défauts en utilisant le contrôle non destructif ultrasonique pour différents échantillons. L'objectif principal est d'exploiter des outils de traitement et d'analyser 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 incités à choisir des méthodes appropriées pour faire les traitements sur les résultats expérimentaux. Pour ce faire, on a utilisé des méthodes basées sur l'analyse temporelle et fréquentielle dans le plan temps-fréquence et temps-échelle, puisque ces techniques ont prouvé leur succès dans la localisation des échos en temps et en fréquence. Pour l'estimation des paramètres et la détermination des caractéristiques des ondes se propageant dans le matériau, on a opté pour l'utilisation de l'algorithme EM dans le but de déterminer les vitesses des ondes longitudinales (ondes P) et transversales (ondes S) et extraire les propriétés élastiques souhaitées grâce au système de mesure non destructif proposé basé sur la technique du prisme et la conversion de mode.

Après avoir donné quelques notions de base sur le CND et les ultrasons, la première contribution consistait à faire l'étude de trois méthodes de décomposition, à savoir l'EMD, l'EEMD et la CEEMDAN pour la séparation des échos et les appliquer sur des signaux ultrasonores synthétiques, similaires à ceux rencontrés dans le domaine du CND par ultrasons, ensuite sur des signaux 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.

L'EMD 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.

En outre et en vue de réduire les limitations des trois méthodes citées, on a proposé l'application des algorithmes temps-fréquences pour une meilleure résolution dans les deux domaines. On a appliqué la TOC et la TFCT combinées avec ces méthodes. Ainsi la EMD/TOC est une combinaison de la transformée en ondelette et de 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 EMD/FTCT est une combinaison de la transformée de Fourier à court terme et de l'EMD afin de donner une image de la répartition de l'énergie d'un signal dans le temps et la fréquence.

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.

En ce qui concerne l'estimation des propriétés élastiques pour la caractérisation des matériaux, en utilisant la technique du prisme, un choix adéquat de l'angle d'incidence de l'émetteur est exigé pour pouvoir collecter les deux ondes longitudinale et transversale simultanément. L'application de l'algorithme d'espérance-maximisation EM permet la séparation des différents échos ce qui permet par la suite d'estimer correctement leurs paramètres. Deux expériences ont été menées sur deux échantillons en forme de prisme, le premier homogène « l'aluminium » et le second non homogène « la pâte de ciment » pour démontrer l'efficacité du système de mesure proposé.

Les résultats obtenus grâce à cette technique sont très encourageants et montrent l'efficacité et l'importance du système proposé dans l'estimation des paramètres ultrasonores des matériaux.

2. Perspectives

A l'issu de ce travail, de nouvelles perspectives de recherche peuvent être ouvertes telles que

- La détection et la localisation de défauts pour d'autres types de matériaux fortement non homogènes.
- Le système de mesure proposé peut être intégré dans une carte d'acquisition de

données où les techniques de conditionnement de signaux peuvent être ajoutées pour une précision accrue du système. Cette technologie peut également être appliquée pour tester le comportement des matériaux sous des contraintes élevées. Cela aidera à prendre une décision rapide en cas de mauvais bétonnage accidentel sur les sites de construction et réduira le retard dans le temps d'exécution des grands projets de construction civile.

- Estimation des défauts dans des applications en temps réel.

Annexe

Algorithme De Gauss-Newton

Description de l'algorithme de Gauss-Newton

L'algorithme de Gauss-Newton (GN) est une méthode d'optimisation très souvent employée pour l'estimation de paramètres par le maximum de vraisemblance.

Dans le cas où le modèle d'observation est donné par

$$x = s(\theta) + b \quad (\text{A.1})$$

x est le vecteur d'observation, b est le vecteur de bruit, θ est le vecteur de paramètres et $s(t)$ est le vecteur d'onde ultrasonore transmise ou reçue par un transducteur défini par

$$S(\theta, t(nT)) = \beta \cos(2\pi f_c(t(nT) - \tau) + \varphi) \exp(-\delta(t(nT) - \tau)^2) \quad (\text{A.2})$$

$t(nT)$ sont les échantillons discrets du temps t et T est la période d'échantillonnage. Les paramètres de l'onde sont stockés dans le vecteur de paramètres θ .

Pour trouver les valeurs du vecteur de paramètres θ , deux problèmes principaux doivent être résolus. En premier lieu, la transformation de l'espace des paramètres à l'espace du signal est non linéaire, et la transformation de l'espace du signal à l'espace des paramètres est également non linéaire et n'a aucune solution explicite. En second lieu, le bruit inclus dans le signal mesuré dégrade les résultats d'estimation. Pour remédier à ces deux problèmes, on utilise l'algorithme du maximum de vraisemblance.

La formule itérative de cet algorithme est

$$\theta^{k+1} = \theta^k + (H^T(\theta^k) H(\theta^k))^{-1} H^T(\theta^k) (x - s(\theta)) \quad (\text{A.3})$$

où $H(\theta)$ représente le vecteur des gradients du modèle, il est donné par

$$H(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{ds(\theta)}{d\delta} & \frac{ds(\theta)}{d\tau} & \frac{ds(\theta)}{df_c} & \frac{ds(\theta)}{d\varphi} & \frac{ds(\theta)}{d\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Ce vecteur peut être calculé numériquement, ou bien analytiquement pour accélérer l'algorithme GN en introduisant les deux fonctions suivantes

$$f(\theta) = \cos(2\pi f_c(t - \tau) \exp(-\delta(t - \tau)^2)) \quad \text{et} \quad (\text{A.5})$$

$$g(\theta) = \sin(2\pi f_c(t - \tau) \exp(-\delta(t - \tau)^2))$$

Les composantes du vecteur des gradients sont donc :

$$\begin{aligned} \frac{ds(\theta)}{d\delta} &= -\beta(t - \tau)^2 f(\theta) \\ \frac{ds(\theta)}{df_c} &= -2\pi\beta(t - \tau)g(\theta) \\ \frac{ds(\theta)}{d\tau} &= -2\delta(t - \tau)f(\theta) + 2\pi f_c \beta g(\theta) \\ \frac{ds(\theta)}{d\varphi} &= -\beta g(\theta) \\ \frac{ds(\theta)}{d\beta} &= f(\theta) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

En résumé, l'algorithme GN peut se dérouler à travers les cinq étapes suivantes

Étape 1 : Initialiser le vecteur des paramètres $\theta = \theta^{(0)}$ et poser $k=0$ (nombre d'itérations),

Étape 2 : Calculer les gradients de $H(\theta^{(k)})$ et le modèle $S(\theta^{(k)})$,

Étape 3 : Itérer le vecteur de paramètres :

$$\theta^{k+1} = \theta^k + (H^T(\theta^k) H(\theta^k)^{-1} H^T(\theta^k) (x - s(\theta)))$$

Étape 4 : Tester la convergence : $\|\theta^{(k+1)} - \theta^{(k)}\| < \text{Tolérance}$,

Étape 5 : Mettre $k = k+1$ et allez à l'étape 2.

Afin d'accélérer et/ou d'améliorer l'estimation des paramètres, l'utilisation d'information à priori peut être utilisée en initialisant l'algorithme par les paramètres de l'impulsion d'excitation. Ensuite, l'algorithme GN débute la procédure d'estimation, l'information tirée des premières itérations de moins en moins d'importance, alors que les dernières itérations, qui apportent une information plus précise de la valeur à estimer, ont un poids relatif de plus en plus important.

Références Bibliographiques

- [1] J. Perdijon, « Le contrôle non destructif par ultrasons », Hermes, 1993.
- [2] M. Broniatowski, H. Gayraud, « Le contrôle non destructif par ultrasons », LSTA - Laboratoire de Statistique Théorique et Appliquée 2014.
- [3] J. Dumont-Fillon, « Contrôle non destructif (CND) », Techniques de l'ingénieur 1996.
- [4] J. Perdijon, « Aide-mémoire du contrôle des matériaux », Dunod, Collection Aide-mémoire de l'ingénieur, Paris 2003.
- [5] C. Budnick, « Essais non destructifs- Contrôle par ultrasons », Techniques de l'ingénieur, 1997.
- [6] M. Charfaoui, « Essais non destructifs », Edition T.I France, 2006
- [7] [http://www.cofrend.com/contrôles non destructifs / méthodes de contrôle/courant-Foucault/#](http://www.cofrend.com/contrôles_non_destructifs_méthodes_de_contrôle/courant-Foucault/#).
- [8] J.M. Jancovici, « Rappels théoriques de la propagation des ondes », Université J. Fourier Grenoble, France 2003.
- [9] B.B et Goodman J.E, « Ultrasons de haute intensité », Application industrielles, Ed Dunod, Paris 1971.
- [10] N. Grenier-GH, Pellegrin Tripole-Bordeaux, « Imagerie ultrasonore », Edition Eyrolles , France 2003.
- [11] Loic Brancheriau, « Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites », Montpellier 2013.
- [12] E. CARCREFF, « Déconvolution adaptative pour le contrôle non destructif par ultrasons », Thèse Doctorat, Université de Nantes Angers Le Mans, 2014.
- [13] M. Grimes « Utilisation des Techniques Numériques pour la Modélisation de la Propagation du Champ Acoustique dans les Matériaux » Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2013.
- [14] J. Krautkramer, H. Krautkramer, « Ultrasonic Testing of Materials », Springer-Verlag, New York, 4th ed., 1990.
- [15] S. Chatillon, « Etude d'un système de contrôle par ultrasons des pièces de géométrie complexe à l'aide de traducteurs de contacts intelligents », Thèse de Doctorat France, 2000.
- [16] R. DRAI, « Techniques de traitement des signaux ultrasonores appliquées en Contrôle Non Destructif des matériaux » Thèse Doctorat en Electronique,

Université de Houari Boumediene USTHB, Alger, 2005.

- [17] A. Thioune, « Décomposition Modale Empirique et Décomposition Spectrale Intrinsèque : Applications en traitement du signal et de l'image » Thèse de Doctorat, Université Paris Est Val-de-Marne Créteil, 2015.
- [18] T. Oberlin, « Approches mathématiques pour la décomposition modale empirique », Université Joseph Fourier, Grenoble 2010.
- [19] B. Esterni, « Empirical Mode Decomposition » ; Université Joseph Fourier. Rapport de stage à l'INRIA, 2003.
- [20] G. Rilling, « Décomposition Modale Empirique Contributions à la théorie, l'algorithme et l'analyse des performances » Thèse de Doctorat, Université Lyon-Ecole Normale Supérieure de Lyon, 2007.
- [21] J.C. Cexus, « Analyse des signaux non-stationnaires par transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser et transformation de Huang-Teager (THT) » Thèse de Doctorat, Université de Rennes1, 2005.
- [22] N. Hamdad, « Transformée de Huang-Hilbert : Application à la détection des défauts » Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2003.
- [23] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M.C. Wu, H.H. Shih, Q. Zheng, N.C. Yen, C.C. Tung, 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.
- [24] 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.
- [25] J. Zhang, R. Yan, R.X. Gao, Z. Feng, « Performance enhancement of ensemble empirical mode decomposition » *Mechanical Systems and Signal Processing.*, 24 (7): 2104-2123, 2010.
- [26] W. Mohguen, « Améliorations de la méthode EEMD » Mémoire de Magister, Université Setif-1, 2014.
- [27] P. Flandrin, G. Rilling, P. Gonçalvès, « Empirical mode decomposition as a filter bank » *IEEE Signal Processing Letters* 11(2):112–114, 2004.
- [28] Q. Chen, N. Huang, S. Riemenschneider, Y. Xu, « A spline approach for empirical mode decompositions » *Advances in Computational Mathematics* 24, pp 171–195, 2006.

- [29] O. Niang, E. Delechelle, J. Lemoine, « A spectral approach for sifting process in empirical mode decomposition » *IEEE transactions on signal processing.*, 58(11), November 2010.
- [30] Z. Wu, N.E. Huang, « Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Adv. Adapt. Data Anal.*, 1 (1): 1–41, 2009.
- [31] M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, P. Flandrin, « A Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise » *IEEE Ann. Int. Conf. on acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP'11.*, 4144-4147, 2011.
- [32] N. E. Huang, J. R. Yeh, J. S. Shieh, « Complementary ensemble empirical mode decomposition a novel noise enhanced data analysis method », *Advances in Adaptive Data Analysis.*, Vol. 2, No. 2, 135–156, 2010.
- [33] R. Demirli, J. Saniie, « Model-Based Estimation of Ultrasonic Echoes Part I: Analysis and Algorithms », *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 48, no. 3, 2001.
- [34] Y. Lu, R. Demirli, 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.
- [35] J. Zhang, R. Yan, R.X. Gao, Z. Feng, « Performance enhancement of ensemble empirical mode decomposition », *Mechanical Systems and Signal Processing.*, 24 (7): 2104-2123, 2010.
- [36] E.H. El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, J.F. 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*, 2011.
- [37] D. Duhamel, « Analyse des signaux », *Ecole d'ingénieur, France*, 2013.
- [38] H. Mahgoun, « Analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances » *Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Setif1*, 2013.
- [39] R. Polokar, « The wavelet tutorial » [http:// engineering .rowan.edu /polikar/wavelets/W_tutorial.html](http://engineering.rowan.edu/polikar/wavelets/W_tutorial.html).
- [40] Ch. Bernard, « Ondelettes et problèmes mal posés : la mesure du flot optique et l'interpolation irrégulière », *Ecole polytechnique France, Thèse doctorat en Mathématiques appliquées*, 1999.

- [41] J. Demaeyer, M. Bebronne, S. Forthomme, « Les ondelettes » Deuxième candidature en sciences physiques, Université libre de Bruxelles, Printemps des sciences 2003.
- [42] R. Poliker, « The wavelet Tutorial » <http://rowan.edu/polika/Wavelet/>.
- [43] T. Alani, « Introduction aux ondelettes (Wavelets) : Deuxième partie : Quelques concepts généraux de la théorie des ondelettes » Département Informatique ESIEE-Paris.27.
- [44] R. Alt, « La transformation en ondelettes », Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- [45] V. Perrier, « Application de la théorie des ondelettes » Enseignement UNESCO Traitement du signal et des images numériques » Tunis, ENIT, 14-18 mars 2005.
- [46] C. Hellier, « Handbook of Nondestructive Evaluation » second ed, McGraw-Hill Education, 2012.
- [47] T. Voigt, S.P. Shah, « Properties of early age Portland cement mortar monitored with shear wave reflection method » ACI Mater. J. 101 (2004).
- [48] G. Ye, K. Van Breugel, A.L.A. Fraaij, « Experimental study on ultrasonic Pulse Velocity evaluation of the microstructure of cementitious materials at early age » HERON 46 (2001) 161–167.
- [49] S. Kahraman, « A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws » J. S. Afr. Inst. Min.Metall.107 (2007) 427–430.
- [50] A. Bouhadjera, C. Bouzrira, « High-frequency ultrasonic testing of young cement-based materials using the prism technique » NDT&E Int. 38 (2005).
- [51] A. Bouhadjera, F. Schubert, « An ultrasonic mode conversion technique for characterizing prism-shaped material samples - experimental and numerical results, in: Proceedings of the 3rd European Conference on Non-Destructive Testing, 2006.
- [52] **H. Merdjana, A. Boukabou, M. Grimes, « A high accuracy ultrasonic measurement system using the prism technique, Measurement 114 (2018) 195-202.**
- [53] M. Welling, The Expectation Maximization (EM) algorithm, California Institute of Technology, 136-193, 2016.

- [54] G. J. McLachlan, T. Krishnan, « The EM Algorithm and Extensions, New Jersey, Wiley, 2th ed., 2008.
- [55] X. Urli, « Algorithme d'espérance maximisation (EM) pour l'imputation de données », Desjardins Gestions d'actif, 2007.
- [56] F. Santos, « L'algorithme EM » CNRS, UMR 5199 PACEA, 2015.
- [57] J. L. Crowley « Mélange de Gaussiennes et L'Algorithme EM (Expectation-Maximization) » ENSIMAG 2005
- [58] Frank Dellaert, « The Expectation Maximization algorithm » Georgia Tech. February 2002.
- [59] J. A. Bilmes, « A Gentle Tutorial of the EM Algorithm and its Application to Parameter Estimation for Gaussian Mixture and Hidden Markov Models » International Computer Science Institute, 1999.
- [60] M. Grimes, A. Bouhadjera, T. Benkedidah, S. Haddad, « Ultrasonic method for Determination of elastic moduli-numerical simulation and experimental results » Russ. J. Nondestruct. Test. 47 (2011) 78–92.
- [61] M. Grimes, A. Bouhadjera, S. Haddad, T. Benkedidah, « In vitro estimation of fast and slow wave parameters of thin trabecular bone using space-alternating generalized expectation-maximization algorithm » Ultrasonics 52 (2012) 614–621.
- [62] G. Trtnik, M. Gams, « Ultrasonic assessment of initial compressive strength gain of cement based materials » Cem. Concr. Res. 67 (2015) 148–155.
- [63] I. Ziskind, M. Wax, « Maximum likelihood localization of multiple sources by Alternating projection » IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Process. 36 (1988).
- [64] J. Martinsson, F. Hägglund, J.E. Carlson, « Complete post-separation of Overlapping ultrasonic signals by combining hard and soft modeling » Ultrasonics 48 (2008).
- [65] D. Kim, « Classification of ultrasonic NDE signals using the EM and LMS algorithms » Mater. Lett. 59 (2005) 3352–3356.
- [66] M.R. Hoseini, X. Wang, M.J. Zuo, « Estimating ultrasonic time of flight using Envelope and quasi maximum likelihood method for damage detection and assessment » Measurement 45 (2012) 2072–2080.

Abstract Ultrasonic nondestructive control (CND) consists of emitting acoustic waves in the material to be inspected. Recovered waves by the ultrasonic sensor allows us detecting defects in the material, locate changes in its properties or simply to characterize it. Various signal processing techniques are then used to better interpret the signals from different CND systems and improve their resolution such as the empirical mode decomposition EMD and its variants such as the EEMD and the CEEMDAN, the short-term Fourier transform TFCT and the continuous wavelet transform TOC. These methods have been applied to prove effectiveness in CND. To be able to characterize the materials and to evaluate their elastic properties, a non-destructive measurement system based on the mode conversion principle was developed for the determination of longitudinal and transverse wave velocities.

ملخص يقوم الفحص غير التهديمي عن طريق الموجات فوق الصوتية بإرسال الموجات في المواد التي يراد معاينتها. تسمح الموجات المسترجعة بواسطة جهاز استرجاع الموجات فوق الصوتية بالكشف عن العيوب في المواد وتحديد التغيرات في خصائصها، أو تمييزها. لذلك تم استخدام تقنيات مختلفة في معالجة الإشارات لتفسير أفضل لهذه الإشارات الصادرة من مختلف أنظمة الفحص غير التهديمي وتحسين تحليلها مثل EMD, EEMD, CEEMDAN وتحويلات فورييه على المدى القصير TFCT والتحويل الموجي المستمر TOC والتي تعتبر جميعها أساليب متقدمة لمعالجة الإشارات نظراً لفعاليتها في الفحص غير التهديمي. ولوصف المواد وتقييم خصائصها المرنة، تم اقتراح نظام قياس غير تهديمي يستند على مبدأ تحويل الوضعيات وذلك لتحديد سرعة الموجات الطولية والعرضية في آن واحد.

Résumé Le CND par ultrasons consiste à émettre des ondes acoustiques dans le matériau à inspecter. Les ondes récupérées par le capteur ultrasonore permettent de détecter les défauts dans le matériau, localiser des changements dans ses propriétés, ou simplement le caractériser. Diverses techniques de traitement du signal sont alors employées pour mieux interpréter les signaux issus des différents systèmes du CND et améliorer leur résolution telles que la décomposition modale empirique EMD et ses variantes l'EEMD et la CEEMDAN, la transformée de Fourier à court terme TFCT et la transformée en ondelettes continue TOC, qui sont des méthodes avancées du traitement du signal. Ces méthodes ont été appliquées afin de prouver leur efficacité en CND. Pour pouvoir caractériser les matériaux et évaluer leurs propriétés élastiques, un système de mesure non destructif basé sur le principe de conversion de mode a été utilisé pour la détermination simultanée des vitesses longitudinale et transversale.