

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur

Et de la recherche scientifique



Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electronique

**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
*Master en Electronique***

Option

Electronique des Systèmes Embarqués

Thème

**Outils et algorithmes adaptés pour
l'estimation des signaux ultrasonores**

Présenté par

Foudil Méguellati

Sidali Kouahi

Encadré par

Dr. Hassina Merdjana

Promotion 2020

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, Notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier tout d'abord notre encadreur : Mme Hassina MERDJANA, pour tous ses conseils, son soutien, son aide, et ses orientations.

Nous remercions également les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nous remercions tous les enseignants du département d'électronique et de la faculté des Sciences et de la Technologie et aussi toute notre promotion 2019-2020 Master Electronique.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenues de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes très chers parents pour leur soutien durant toute ma vie d'études et sans Lesquels je n'aurais jamais devenu ce que je suis.

À toute ma famille.

À mon binôme *Sidali Kouahi* et à toute sa famille.

À tous mes amis

À tous les professeurs et enseignants que j'ai eu durant tout mon cursus scolaire et universitaire et qui m'ont permis de réussir dans mes études.

À toutes les personnes qui m'ont accompagnées durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis et collègues d'étude.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce

projet soit possible, je vous remercie.

Foudil Méguellati

Dédicaces

Au nom d'Allah le Miséricordieux le très Miséricordieux

Je dédie très fièrement mon projet comme épreuve de reconnaissance
À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont
donné un modèle exemplaire de labeur et de persévérance.

A mes frères et sœurs

A tous mes proches sans exception

A tous mes amis sans exception

A tous ceux qui nous connaissent.

Sidali Kouahi

Résumé

Le Contrôle Non Destructif (CND) est une étape importante du processus industriel qui permet de contrôler l'intégrité des composants sans les endommager. Dans le domaine du CND, il existe plusieurs techniques de contrôle parmi lesquelles le contrôle par ultrason, modalité qui consiste à émettre des ondes acoustiques dans le matériau à inspecter. Ces ondes se propageant dans le milieu, sont récupérées par le capteur ultrasonore, permettant ainsi, 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.

Pour atteindre cet objectif et 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, Technique du prisme, Vitesse longitudinale, Vitesse transversale, Estimation, Algorithme EM, Caractérisation.

Table des matières

Sommaire	II
Liste des Figures.....	V
Liste des Tableaux.....	VII
Liste des abréviations.....	IIII
Liste des notations	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Le Contrôle Non Destructif

1. Introduction et historique	4
2. Généralités sur le contrôle non destructif (CND)	4
3. Champ d'application du CND	5
4. Techniques du contrôle non destructif	6
4.1 Contrôle visuel	7
4.2 Contrôle par ressuage	7
4.3 Contrôle par flux de fuite magnétique	8
4.4 Contrôle par radiographie	9
4.5 Contrôle par Courants de Foucault(CF)	10
4.6 Contrôle par ultrasons.....	11
5. Défauts détectés en CND	12
6. Conclusion	14

Chapitre 2 : Les Ultrasons

1. Introduction et historique	15
2. Généralités sur les ultrasons	15
2.1 Définition.....	15
2.2 Paramètres de l'onde ultrasonore	16
2.3 Types d'ondes ultrasonores.....	17
3. Production des ultrasons (us).....	21

3.1	Transducteurs piézo-électriques	22
3.2	Types de transducteurs	23
3.3	Faisceau ultrasonore	25
4	Interaction des ultrasons avec la matière.....	26
4.1	Atténuation des ondes ultrasonores	26
4.2	Interaction des ultrasons avec une interface	27
4.2.1	Notion d'interface acoustique	27
4.2.2	Incidence normale	28
4.2.3	Incidence oblique	29
4.2.4	Conversion de mode	30
4.2.5	Notion d'angle critique	32
5	Modes de représentation des ondes ultrasonores	33
6	Utilisation des ultrasons.....	34
7	Choix de la technique de contrôle	34
7.1	Méthode pulse-écho.....	35
7.1.1	Contrôle par contact	36
7.1.2	Contrôle par immersion.....	37
8	Conclusion	38

Chapitre 3 : Algorithmes d'estimation

1	Introduction.....	39
2	Modèle de l'écho ultrasonore.....	39
3	Principe du maximum de vraisemblance	41
4	Méthode des moindres carrés LS	43
4.1	Principe des moindres carrés	43
4.2	Propriétés des estimateurs des moindres carrés	43
4.3	Méthode des moindres carrés généralisés	44
4.4	Méthode des moindres carrés non linéaires.....	44
5	Méthode de Gauss-Newton	45
6	Algorithme Espérance-Maximisation	47
6.1	Théorie de l'algorithme EM	48
6.2	Implémentation de l'algorithme.....	49
6.3	Organigramme	52
6.4	Avantages et faiblesses de l'algorithme EM	53
7	Conclusion	54

Chapitre 4 : Estimation des paramètres des signaux ultrasonores

1. Introduction	55
2. Technique du prisme	55
3. Evaluation des paramètres élastiques des matériaux.....	56
4. Description du montage expérimental	57
4.1 Données expérimentales	58
4.2 Déroulement de l'expérience.....	58
5. Résultats de simulation	59
5.1 Expérience menée sur un échantillon homogène : l'Aluminium	59
5.1.1 Détermination des angles critiques	59
5.1.2 Procédé d'estimation.....	60
6. Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références	68

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1	Principe du Contrôle Non Destructif	5
Figure 1.2	Principe du ressuage	7
Figure 1.3	Détecteur à flux de fuite magnétique.....	8
Figure 1.4	Principe de radiographie	9
Figure 1.5	Principe du CND par Courants de Foucault.....	10
Figure 1.6	Principe de contrôle par ultrason	12

Chapitre 2

Figure 2.1	Fréquence du son.....	16
Figure 2.2	Onde longitudinale.....	18
Figure 2.3	Onde transversale.....	20
Figure 2.4	Effet piézo-électrique direct.....	22
Figure 2.5	Effet piézo-électrique indirect.....	23
Figure 2.6	Transducteur focalisé.....	24
Figure 2.7	Transducteur droit.....	24
Figure 2.8	Géométrie d'un faisceau ultrasonore.....	25
Figure 2.9	Décroissance exponentielles des échos	27
Figure2.10	Réflexion et Transmission à Incidence normale	28
Figure2.11	Transmission et réflexion d'onde à incidence oblique.....	29
Figure2.12	Conversion de mode d'une onde longitudinale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.....	31
Figure2.13	conversion de mode d'une onde transversale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.....	32
Figure2.14	Angles critiques pour une incidence transversale ou longitudinale.....	33
Figure2.15	Exemple de signal A-Scan.....	34

Figure 2.16	Méthode pulse-écho.....	36
Figure 2.17	Contrôle par contact	37
Figure 2.18	Contrôle par immersion.....	37

Chapitre 3

Figure 3.1	Modèle des échos rétrodiffusés	41
Figure 3.2	Organigramme de l'algorithme EM.....	52

Chapitre 4

Figure 4.1	Technique de prisme.....	56
Figure 4.2	Montage de test expérimental	57
Figure 4.3	Intensité des coefficients de réflexion et de transmission pour L'Aluminium.....	59
Figure 4.4	Signal expérimental recueillie pour l'Aluminium.....	60
Figure 4.5	Zoom des ondes réfléchies longitudinale et transversale pour l'Aluminium.....	61
Figure 4.6	Superposition des signaux expérimental et estimé pour l'Aluminium.	62
Figure 4.7	Écho de la face avant du prisme.....	62
Figure 4.8	Écho réfléchi pour l'onde longitudinale.....	63
Figure 4.9	Écho réfléchi pour plusieurs ondes de réflexion.....	63
Figure 4.10	Écho réfléchi pour l'onde transversale.....	63
Figure 4.11	Localisation temporelle et amplitude des échos rétrodiffusés pour L'Aluminium.....	64

Liste des Tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1	Célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents milieux.....	20
--------------------	---	----

Chapitre 4

Tableau 4.1	Paramètres estimés des échos rétrodiffusés pour l'Aluminium.....	64
Tableau 4.2	Valeurs des Paramètres estimés pour l'Aluminium.....	65

Liste des abréviations

CND	Contrôle Non Destructif
MLE	Algorithme espérance-maximisation
EM	Espérance-maximisation
END	Essais non destructifs
VT	Visuel Test
CF	Courants de Foucault
US	Ultrasons
MLE	Maximum Likelihood Estimation
WGN	White Gaussain Noise
AWGN	Additive WGN
LS	Least square (Moindres Carrés)
EQM	L'erreur quadratique moyenne
GN	Gauss-Newton
Onde P	Onde Longitudinale
Onde S	Onde transversale
SUT	Sous Under Test

Liste des notations

λ	Longueur d'onde.
C	La Vitesse de propagation.
f	Fréquence.
Z	Impédance acoustique.
ρ	Masse volumique.
P	Pression acoustique.
I	Intensité.
E	Module de Young.
ρ	La densité du milieu.
L	Longueur .
D	Diamètre de la source.
C	La célérité.
A	Amplitude.
A_0	Amplitude initiale.
α	Coefficient d'atténuation.
x	Distance traversée par l'onde.
R	Coefficient de réflexion.
T	Coefficient de transmission.

α	Facteur de bande passante.
f_c	Fréquence centrale.
φ	Phase.
β	Amplitude.
τ	Temps d'arrivé.
$v(t)$	Bruit blanc additif.
θ	Vecteur des paramètres.
g	Fonction de vraisemblance.
W	Matrice de pondération.
$C_{P,S}$	Vitesse Longitudinale et transversale.
$T_{P,S}$	Temps d'arrivée des ondes longitudinale et transversale.
λ	Coefficient de Lamé.
μ	Module de cisaillement.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Le principe du contrôle non destructif (CND) est de détecter une inhomogénéité dans un milieu sans altérer celui-ci ; dans le cas de contrôles industriels, le but est d'évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité), soit plus précisément pour déclarer la présence de défauts et les caractériser (entaille, fissure, corrosion,...) dans une pièce industrielle. Les enjeux économiques associés au CND sont toujours très importants ; dans certains secteurs, comme le nucléaire ou les transports, en particulier aéronautiques et maritimes, ils se doublent d'un enjeu majeur lié à la sécurité du public.

La méthode ultrasonore consiste à soumettre le matériau étudié à des ondes mécaniques ultrasonores. Ces ondes sont captées par un récepteur pour être enregistrées à l'aide d'une carte d'acquisition ou d'un oscilloscope. Cet enregistrement forme la trace échographique. Les ondes ultrasonores sont générées par un transducteur piézoélectrique qui, excité par une tension électrique, émet une onde mécanique. Le signal électrique d'excitation est délivré par un générateur d'impulsion. Le récepteur est également un transducteur piézo-électrique qui assure le transfert d'une onde mécanique en une onde électrique. Nous distinguons deux techniques d'échographies : l'échographie en réflexion, qui utilise un seul transducteur pour l'émission et la réception, et l'échographie en transmission où l'émetteur et le récepteur sont deux transducteurs distincts.

La méthode ultrasonore s'intéresse aux ondes réfléchies et transmises par le matériau et plus particulièrement aux temps de vol. Ces derniers correspondent aux temps mis par les ondes pour parcourir une certaine distance. La mesure du temps de vol d'une onde permet de remonter à la vitesse des ondes acoustiques dans le matériau considéré, l'épaisseur de la couche étant connue. Dans le cas d'une expérience d'échographie en réflexion, les ondes reviennent vers le capteur après réflexion aux limites des couches de matériaux présentant une différence d'impédance acoustique, celle-ci étant définie comme le produit de la vitesse du son par la densité relative au milieu de propagation. Le rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie sur celui de l'onde incidente définit le coefficient de réflexion. A incidence normale, le coefficient de réflexion s'exprime simplement à partir des impédances acoustiques des deux milieux situés de part et d'autre de l'interface.

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 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.

Les techniques ultrasonores alliées aux méthodes de traitement du signal permettent l'identification ou la reconnaissance de formes et connaissent de ce fait, un essor rapide ces dernières années, non seulement dans le CND des matériaux (identification des défauts) mais également dans des domaines tels que l'acoustique sous-marine (identification d'objets) et l'échographie médicale (identification de tumeurs).

L'objectif de ce travail est la détermination des caractéristiques physiques d'un matériau de nature homogène. 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 [1,2]. A cet effet, et 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. Ensuite, vient l'étape d'estimation des paramètres des signaux ultrasonores. Beaucoup d'algorithmes d'estimation itérative existent en littératures. 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.

Le travail présenté dans ce mémoire s'organise autour de quatre chapitres

Le premier chapitre, aura pour but de donner une idée générale sur le CND, les techniques utilisées dans ce domaine avec leurs avantages et inconvénients et un bref aperçu sur les différents types de défauts.

Le deuxième chapitre, abordera les ultrasons, la nature de ces ondes et leurs caractéristiques, nous citerons également la technique de contrôle par ultrasons et la méthode choisie pour sa mise en œuvre.

Le troisième chapitre, présentera les méthodes d'estimation des paramètres et leurs propriétés, en particulier l'algorithme du maximum de vraisemblance (MLE) et l'algorithme espérance-Maximisation (EM) pour la détermination des caractéristiques des ondes se propagent dans l'échantillon sous test.

Dans le dernier chapitre, on traitera le problème d'estimation des paramètres des signaux ultrasonores moyennant l'algorithme EM. Des résultats expérimentaux seront interprétés mettant en évidence l'efficacité de la technique du prisme pour la caractérisation des matériaux.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Le Contrôle Non Destructif

-
1. Introduction et historique
 2. Généralité sur le contrôle non destructif (CNS)
 3. Champ d'application du CND
 4. Technique du contrôle non destructif
 5. Les défauts détectés en CND
 6. Conclusion
-

1. Introduction et historique

Le contrôle non destructif (CND) est l'ensemble des techniques aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure industrielle sans les endommager, celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques, ou chimiques. Les phénomènes physiques et les techniques sont multiples : procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, radiographie, contrôle par ultrasons, procédés électromagnétiques et les applications sont variées. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits [3].

L'histoire des essais non destructifs (END) commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIX siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la Piézo-électricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du Contrôle Non Destructif ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers et radiographie des soudures. Une importante accélération du progrès et du développement des techniques du Contrôle Non Destructif s'est manifestée ensuite vers les années 1960-1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que les centrales électriques nucléaires ou encore l'aéronautique [4].

2. Généralités sur le contrôle non destructif

Le contrôle non destructif est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit au cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenance. Les méthodes de CND sont utilisées pour évaluer des grandeurs caractéristiques du produit (épaisseur, conductivité, ...etc.), et déceler la présence de défauts et les caractériser. Le contrôle non destructif est très important pour l'industrie et est particulièrement utilisé dans [5].

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- L'industrie navale (contrôle des coques).
- L'aéronautique (ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs).
- L'aérospatiale et l'armée.

- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.).
- Le génie civil.
- Autres (fabrication de mousquetons d'escalade, ouvrages d'art, etc.).

On peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le schéma synoptique de la figure (1.1).

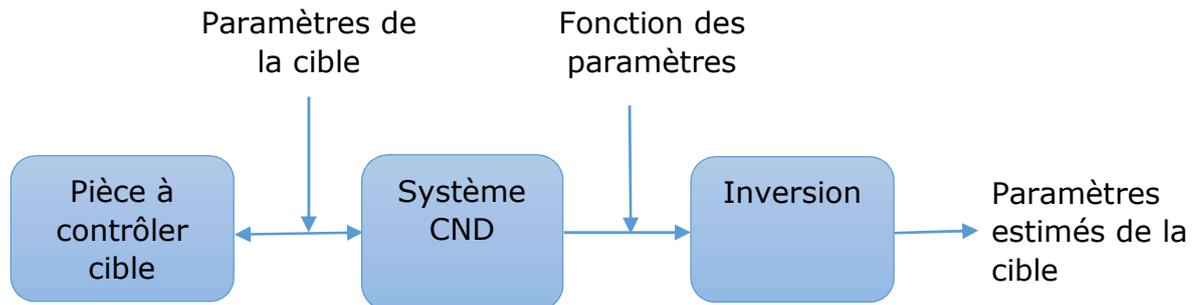


Figure1.1 : Principe du Contrôle Non Destructif.

3. Champ d'application du CND

A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des 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, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), mais aussi désormais des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire) [6].

Le champ d'application du CND est très vaste, il englobe

- La détection et évaluation de défauts.
- La détection de fuite.
- La mesure dimensionnelle.
- La caractérisation d'une structure ou d'une microstructure.

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même

- **Le contrôle en cours de fabrication** : les essais non destructifs au cours de la fabrication apparaissent de plus en plus comme un moyen d'économiser de l'argent, dans la mesure où ils permettent de rejeter les pièces défectueuses avant leur achèvement, plutôt que de contrôler les pièces une fois fabriquées. C'est un procédé souvent automatisé, impliquant alors un appareillage installé en ligne de fabrication, aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.
- **Le contrôle en recette** : procède au respect de conformité des spécifications de qualité définies auparavant, d'un lot de pièces, d'une installation ou d'un ouvrage au moment de la livraison. A ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.
- **Le contrôle en service** : En maintenance prédictive, le CND permet également de réaliser des économies considérables en évitant le remplacement de pièces non défectueuses (ce qui est parfois le cas quand la durée de vie est estimée) et les interruptions imprévues d'activités pour réparation, toujours très coûteuses, lorsqu'une pièce critique casse avant la date estimée. C'est pourquoi les ventes de systèmes de contrôle non destructif augmentent rapidement dans ce domaine [7, 8, 9].

4. Techniques du contrôle non destructif

Les techniques de CND utilisées sont diverses : (le contrôle visuel, la Magnétoscopie, le ressuage, les ultrasons, les courants de Foucault, radiographie) Elles dépendent de la nature même du contrôle envisagé. Ces méthodes exploitent des phénomènes différents et sont le plus souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de la pièce à contrôler (la nature du matériau, forme, ...), du type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur, ...) et des conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué [10].

4.1 Contrôle visuel

Le contrôle visuel est une technique essentielle qui donne un aperçu de l'état extérieur d'une pièce. C'est la plus simple et la plus générale des techniques puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. Le contrôle visuel est destiné à détecter les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Il implique l'utilisation de gabarits et de calibres. L'appareillage comprend des loupes, des caméras vidéo, des miroirs et peut même utiliser des robots pour inspecter des endroits dangereux ou difficiles tels que les réacteurs nucléaires.

Avantages

- Souplesse d'inspection.
- Examen simple, rapide et pas coûteux.

Inconvénients

- Détection limitée aux défauts superficiels
- La surface doit être propre.
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

4.2 Contrôle par ressuage

Le ressuage (en anglais Penetrant Testing) consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchâtes, un liquide mouillant et révèle la présence du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV) ; la pièce étant ensuite examinée visuellement, le principe de cette méthode est présenté dans la figure (1.2) [11].

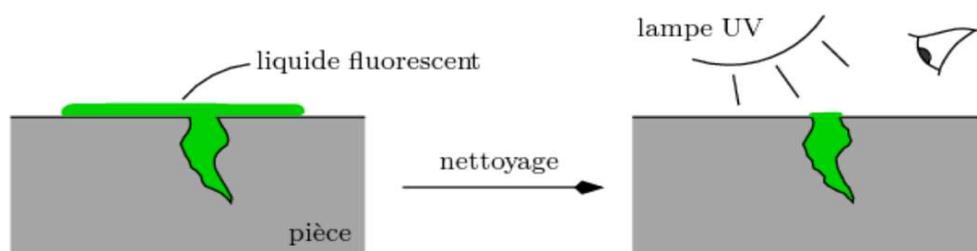


Figure1.2 : Principe du ressuage

Avantages

- Facilité de mise en œuvre.
- Technique rapide et peu coûteuse.
- Applicable à une vaste gamme de matériaux.
- Applicable à des géométries très variées.

Inconvénients

- Plusieurs étapes avec des temps d'attente.
- Détecte seulement les défauts débouchant en surface.

4.3 Contrôle par flux de fuite magnétique

Dans un matériau ferromagnétique, les lignes de champ magnétique s'épanouissent latéralement à la rencontre d'un obstacle (perpendiculaire aux lignes). Cet obstacle peut être constitué d'un défaut débouchant ou sous cutané ce qui correspond à un entrefer (accroissement local de la réluctance du circuit). Le même phénomène de dispersion est observé lorsqu'on est en présence d'une hétérogénéité non ferromagnétique dans un matériau ferromagnétique.

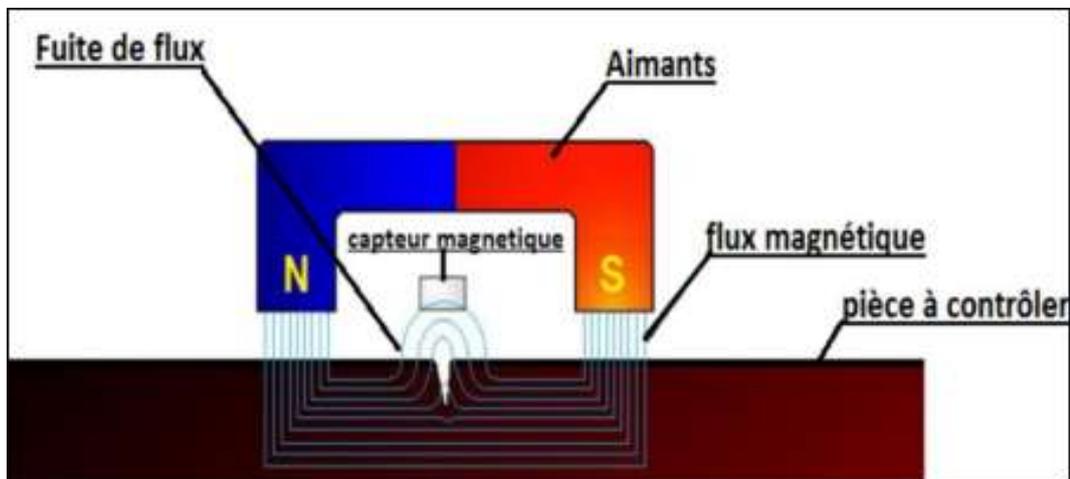


Figure1.3 : Détecteur à flux de fuite magnétique.

Avantages

- Simple, peu coûteux et rapide.
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques.
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée.
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.

4.4 Contrôle par radiographie

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons γ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie. On récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique. La figure (1.4) montre le principe de la radiographie [12].

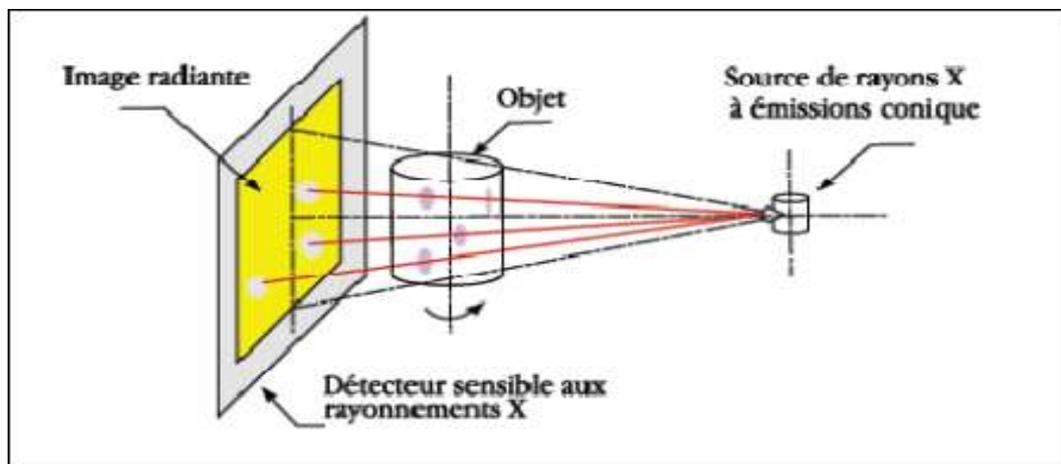


Figure1.4 : Principe de radiographie

Avantages

- Contrôle des objets de forme compliquée.
- Facile à Transporter (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils radioactifs portatifs).
- Apprécier la nature et la taille des défauts.

Inconvénients

- Interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur.
- Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel.
- Technique extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité.

4.5 Contrôle par Courants de Foucault(CF)

Ce type de contrôle s'effectue en excitant par un champ magnétique variable la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation par un défaut des courants induits dans la pièce va se traduire par une modification de l'impédance vue aux bornes du capteur. En agissant sur la fréquence du courant d'excitation et la géométrie des bobines, plusieurs contrôles peuvent être réalisés. Le contrôle par courant de Foucault est l'une des méthodes les plus privilégiées parmi les méthodes électromagnétiques de CND. Cette méthode ne s'applique qu'aux pièces électriquement conductrices et s'adapte très bien aux pièces cylindriques (barres, tubes, ...). Le principe de cette méthode consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps à l'aide d'une bobine (excitatrice) parcourue par un courant électrique variable, ce qui va créer des courants induits dans la pièce à contrôler, la trajectoire de ces courants sera perturbée soit par la géométrie soit par les caractéristiques internes de la pièce.

Les courants de Foucault se développent principalement sur la surface de la pièce à contrôler. Leur densité décroît rapidement à l'intérieur de la cible [13] figure (1.5).

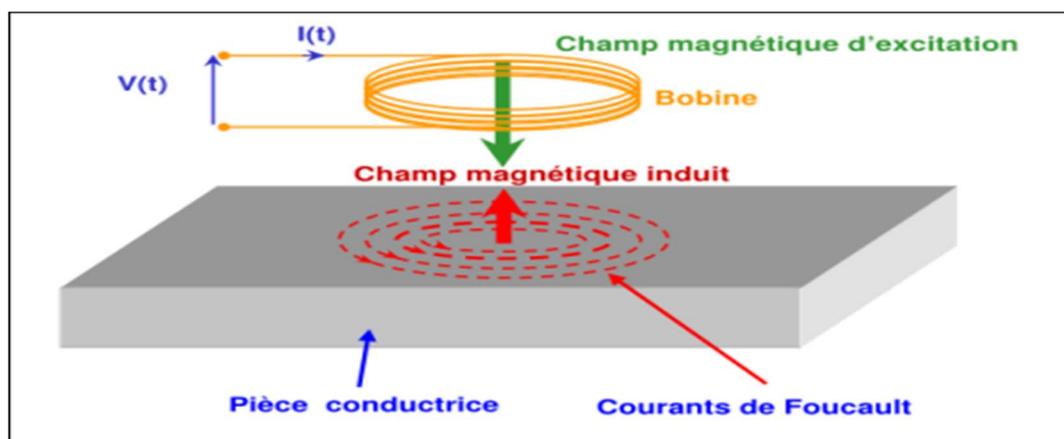


Figure1.5 : Principe du CND par Courants de Foucault.

Avantages

- Rapidité de balayage et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie).
- Détection possible à travers un revêtement surfacique.
- Aucune préparation particulière de la surface à contrôler.
- Qualité de détection indépendante de la vitesse de balayage.
- Traitement informatique avec stockage des données de simulation.
- Contrôle non polluant.

Inconvénients

- Non-linéarité.
- Positionnement.
- Limitée aux matériaux conducteurs d'électricité

4.6 Contrôle par ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts [13].

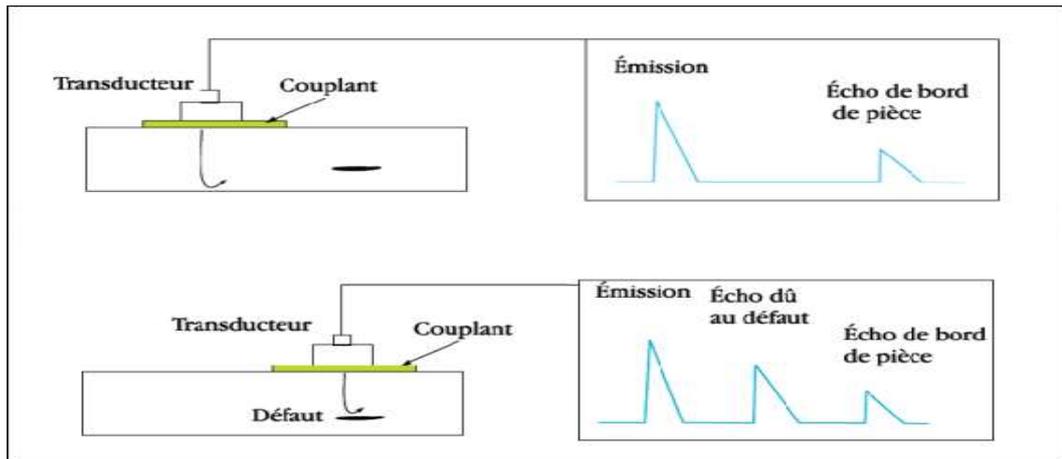


Figure1.6 : Principe de contrôle par ultrason

Avantages

- Ne nécessite qu'une seule face d'accès.
- Plus grande sensibilité de contrôle sur les pièces de forte épaisseur.
- Résultat du contrôle en temps réel.
- Contrôle plus rapide pour des épaisseurs importantes.

Inconvénients

- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité
- Contrôle plus lent pour les faibles épaisseurs.
- Plus faible sensibilité à la détection de porosités.
- Technique souvent très couteuse (investissement, temps de contrôle).

5. Défauts détectés en CND

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. 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. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et les défauts internes [7, 8, 9].

➤ **Les défauts de surface**

Accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes :

- **Les défauts ponctuels** : correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, fissures, 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'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.
- **Les défauts d'aspect**, c'est une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) qui est visible et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

➤ **Les défauts internes**

Ce sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées. 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, l'holographie ou l'imagerie infrarouge.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralités sur le contrôle non destructif CND avec un bref aperçu sur les techniques les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, le flux de fuite magnétique et surtout la technique par ultrason. Pour chaque technique d'inspection, nous avons évoqué les avantages et les inconvénients ainsi que les différents types de défauts détectés en CND.

Chapitre 2

Les ultrasons

-
1. Introduction
 2. Généralités sur les ultrasons
 3. Production des signaux ultrasons
 4. Interaction des ultrasons des ondes ultrasonores
 5. Modes de représentation des ondes ultrasonores
 6. Utilisation des ultrasons
 7. Choix de la technique de contrôle us
 8. Conclusion
-

1. Introduction et historique

L'histoire des ultrasons commence avant la deuxième guerre mondiale, les premiers investigateurs inspirés de la technique du sonar, exploitent les ultrasons de différentes manières afin d'appliquer ce concept aux diagnostics médicaux. En 1929 et 1935, Sokolov a étudié l'utilisation des ondes ultrasoniques en détectant des objets en métal. Mulhauser, en 1931, a obtenu un brevet pour l'usage des ondes ultrasoniques, en utilisant deux capteurs pour détecter des défauts de solides. Firestone en 1940 et Simons en 1945 ont développé l'essai ultrasonique pulsé en utilisant une technique d'impulsion-écho.

Après la fin de la deuxième guerre mondiale, des chercheurs au Japon ont commencé à utiliser les propriétés physiques des ultrasons et les appliquer aux diagnostics médicaux pour faire les premières images de coupes échographiques. Les premiers instruments ultrasoniques ont employé une présentation A-mode avec des spots sur écran d'oscilloscope. Cela a été suivi d'une présentation de B-mode avec une formation d'image bidimensionnelle [5].

2. Généralités sur les ultrasons

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.

Le contrôle par ultrasons, semblable aux techniques de radar ou sonar, consiste à envoyer une impulsion ultrasonore et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées. Cette méthode apporte souvent plus d'informations que les autres. Elle est très efficace, son énorme avantage est que les ultrasons ne sont pas du tout dangereux pour l'homme [14].

2.1 Définition

Les ultrasons sont des vibrations acoustiques de fréquence supérieure à 20kHz. Ces ondes se propagent sur de grandes distances dans les milieux solides, gazeux et liquides à une vitesse qui dépend de la nature du milieu. Le principe du contrôle par ultrasons consiste à générer une onde acoustique dans le matériau à inspecter à

l'aide d'un transducteur émetteur. Ces vibrations de même nature que le son, mais de fréquence trop élevée pour que l'oreille humaine puisse la percevoir.



Figure 2.1 : Fréquence du son.

2.2 Paramètres de l'onde ultrasonore

On peut caractériser une onde ultrasonore par plusieurs paramètres bien précis

❖ Fréquence et longueur d'onde

La fréquence ou le nombre de variations de pression par seconde d'une onde ultrasonore est comprise entre 20KHz et 1GHz. La longueur d'onde est la distance séparant à un instant donné deux points du trajet de l'onde où la pression est la même. Elle est reliée à la fréquence par la formule

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.1}$$

Avec λ : longueur d'onde en m.

c : La vitesse de l'onde ultrasonore m/s.

f : Fréquence en hertz (Hz).

❖ Vitesse de propagation

La vitesse de propagation appelée aussi célérité de l'onde ultrasonore dépend essentiellement des caractéristiques du milieu (élasticité, densité). Elle vaut

$$c = z/\rho \tag{2.2}$$

Avec C : La vitesse de l'onde ultrasonore en m/s.

Z : Impédance acoustique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

ρ : Masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

❖ Impédance acoustique Z

Chaque milieu est caractérisé par une résistance au passage du son appelée impédance acoustique. Elle dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, cette propriété est plus importante dans la transmission de l'énergie. Elle est reliée à l'impédance par la formule

$$Z = \rho \cdot C \quad (2.3)$$

Avec C : La vitesse de l'onde ultrasonore en m/s.

Z : Impédance acoustique en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$.

ρ : Masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

❖ Pression et intensité de l'onde

La pression acoustique p varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore en chaque point. Ce sont les variations de cette pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires et l'intensité d'onde ultrasonore I est la quantité d'énergie sonore qui traverse l'unité de surface par seconde. Elle est reliée à la pression acoustique par l'expression

$$I = \frac{p^2}{2z} \quad (2.4)$$

Avec Z : Impédance acoustique $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$.

P : Pression acoustique $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

I : Intensité en W/m^2 .

2.3 Types d'ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont émises par une source. A partir de celle-ci, elles sont propagées 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 [15]

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

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

❖ Ondes longitudinales ou de compression

Ces ondes ont la propriété de se propager dans les milieux liquides et solides. Leur propagation s'accompagne, en chaque point de la matière, par des mises en compression puis en dilatation de celle-ci conduisant à des variations de volume. Le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde (le déplacement s'accompagne d'une variation de pression), tel qu'illustré à la figure (2.2)

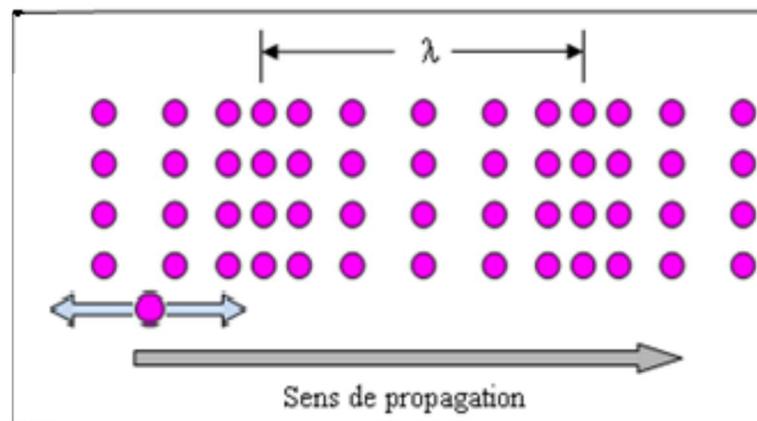


Figure 2.2 : Onde longitudinale.

La vitesse de propagation d'une onde longitudinale notée (C_p ou C_L) est

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.5)$$

Avec E : Module de Young en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$.

ρ : La densité du milieu en kg.m^{-3} .

❖ Ondes transversales ou de cisaillement

Ces ondes ne se propagent que dans les milieux solides. La propagation de ce type d'onde n'entraîne pas des modifications locales du volume du matériau mais simplement une déformation de celui-ci par glissement, Les particules sont animées d'un mouvement alternatif rectiligne autour d'une position d'équilibre, le déplacement de celles-ci se faisant dans des plans perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde tel qu'illustré à la figure (2.3). La vitesse des ondes transversales notée (C_s ou C_T) est donnée par

$$C_T = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \quad (2.6)$$

μ_s Est le module d'élasticité transverse.

Puisque $E = 2\mu_s(1 - \gamma)$ avec γ est le coefficient de poisson, l'équation (2.6) peut s'écrire alors

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\gamma)}} \quad (2.7)$$

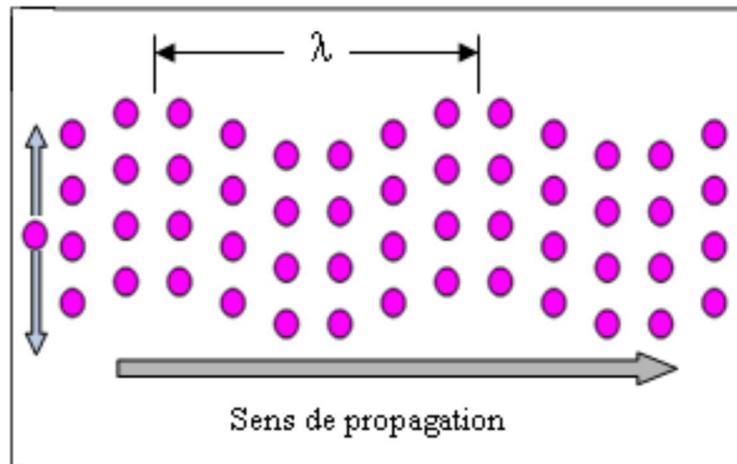


Figure 2.3 : Onde transversale.

Le tableau 1.1 indique la célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents milieux.

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 2.1 : Célérité des ondes longitudinales et transversales pour différents milieux.

❖ Ondes de Lamb ou de plaque

Les ondes de Lamb sont des déformations d'une plaque qui se propagent le long de celle-ci. Le long de l'axe normal à la plaque, elles ressemblent à des ondes stationnaires. Alors que dans un matériau massif, il n'existe que deux ondes (onde de compression et onde transversale) se déplaçant chacune à une vitesse donnée (qui est une propriété du matériau) [16].

❖ Ondes de surface ou de Rayleigh

Les ondes transversales se propagent à la surface libre d'un matériau et n'affectent qu'une couche mince sous-jacente à celle-ci dont l'épaisseur est égale ou peu différente d'une longueur d'onde. Ces ondes sont alors appelées ondes de surface ou de RAYLEIGH et se propagent à une vitesse environ 10 % à celle des ondes transversales lorsqu'elles se déplacent dans un milieu illimité. La trajectoire des particules est la résultante de deux vecteurs déplacement : l'un, le plus important, est perpendiculaire à la surface du matériau, l'autre, de plus faible amplitude, est parallèle à la direction de propagation donc à la surface du matériau.

3. Production des ultrasons (US)

D'une manière générale, la production des ondes ultrasonores de très hautes fréquences fait appel à des transducteurs, terme générale qui désigne tout système qui permet de convertir une forme d'énergie (par exemple électrique) sous une autre forme (par exemple mécanique). Les transducteurs ultrasonores couramment utilisés permettent de transformer l'énergie électrique délivrée par un générateur en énergie acoustique (ultrasons). Ces mêmes transducteurs permettent la conversion inverse énergie acoustique – énergie électrique. Les transducteurs sont basés sur le phénomène de la piézo-électricité. Ils sont de quatre types

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

3.1 Transducteurs piézo-électriques

Les transducteurs piézoélectriques peuvent être utilisés indifféremment comme capteurs ou comme actionneurs. Les transducteurs ultrasonores utilisent essentiellement l'effet piézoélectrique pour convertir l'énergie électrique en un déplacement mécanique. En 1880 Pierre et Jacques Curie, ont mis en évidence l'effet piézoélectrique sur un échantillon de quartz, qui se charge électriquement lorsqu'il est soumis à une contrainte de compression. A l'inverse, une tension électrique appliquée sur le quartz induit une déformation du cristal.

❖ L'effet piézoélectrique direct

Les contraintes mécaniques (compression, dilatation, variation de température) de certains cristaux (le quartz en particulier) font apparaître des charges électriques de signes opposées sur les faces du cristal soumises à la contrainte. Il apparaît un dipôle électrique : on dit que le quartz est piézo-électrique.

Dans les sondes échographiques, le quartz est remplacé par des lames de céramiques << sandwichées >> entre 2 armatures métalliques (module piézo-électrique très supérieur à celui du quartz)

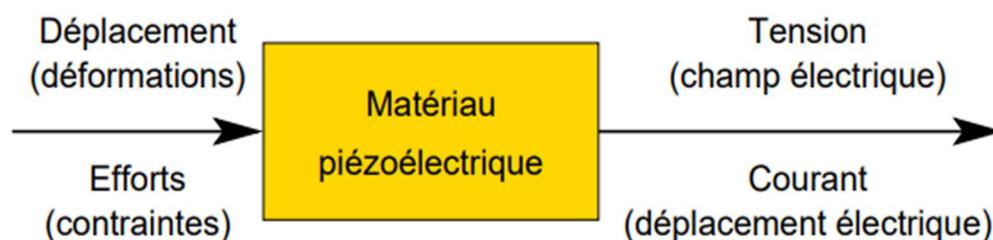


Figure 2.4 : Effet piézo-électrique direct.

❖ 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. Le quartz piézo-électrique varie d'épaisseur sous l'effet d'une différence de potentiel appliquée sur les armatures métalliques accolées aux deux faces du cristal. Cette variation d'épaisseur est proportionnelle à la différence de potentielle imposées aux armatures

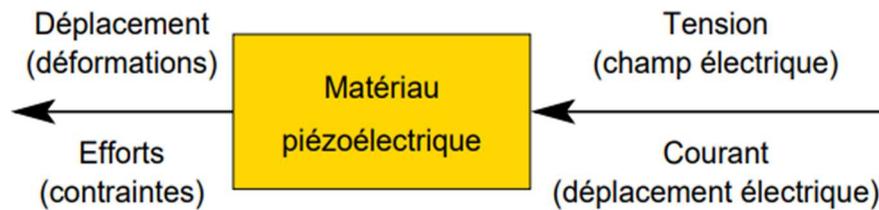


Figure 2.5 : Effet piézo-électrique indirect.

3.2 Types de transducteurs

Selon le matériau, la géométrie de l'élément sondé, les défauts recherchés et la configuration expérimentale requise, différents types de transducteurs sont utilisés.

❖ Les transducteurs focalisés

Les transducteurs focalisés concentrent le faisceau ultrasonore autour d'un point. Par rapport à un transducteur plan, la focalisation a pour effet de rapprocher le dernier maximum de la pression acoustique p sur l'axe acoustique et d'augmenter l'amplitude de ce maximum. La distance focale acoustique (ou plus simplement focale acoustique) est donnée par la position de ce dernier maximum.

Ils sont utilisés afin d'augmenter la finesse de résolution du contrôle. La focalisation est obtenue soit au moyen d'une lame piézoélectrique incurvée, soit par focalisation électronique ou encore grâce à une lentille acoustique.

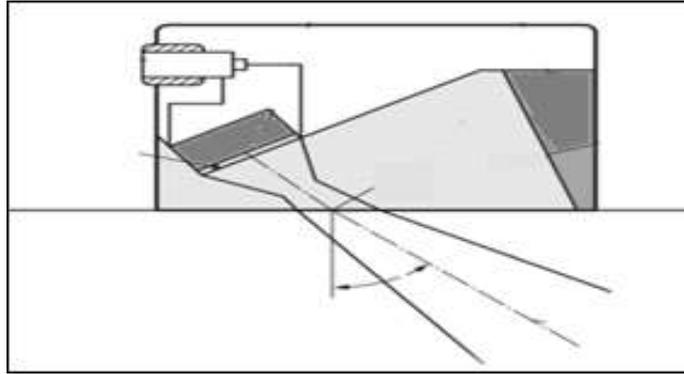


Figure 2.6 : Transducteur focalisé.

❖ Les transducteurs à couplage par air

Ces transducteurs permettent de s'affranchir de la nécessité d'un couplant entre le transducteur et la pièce à contrôler. Toute la difficulté réside dans la très grande différence d'impédance acoustique entre l'air et les matériaux couramment utilisés. Dans ce type de configuration, l'amplitude reçue par le transducteur récepteur est réduite d'un facteur très important par rapport à un couplant classique.

❖ 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.

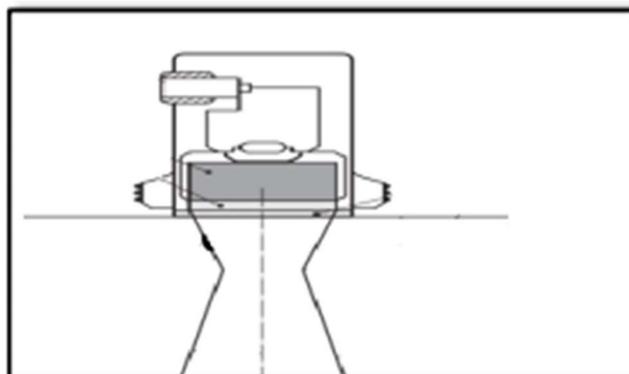


Figure 2.7 : Transducteur droit.

3.3 Faisceau ultrasonore

Les sources ultrasonores présentent une caractéristique directionnelle fortement marquée, les valeurs nominales des amplitudes de pression ne peuvent être détectées que dans un faible secteur de l'espace [16]. La partie la plus importante du champ acoustique, présentant une signification pour le contrôle, se limite à un faible secteur du champ que l'on décrit par le faisceau acoustique. On peut décomposer ce faisceau en deux zones zone de Fresnel et zone de Fraunhofer.

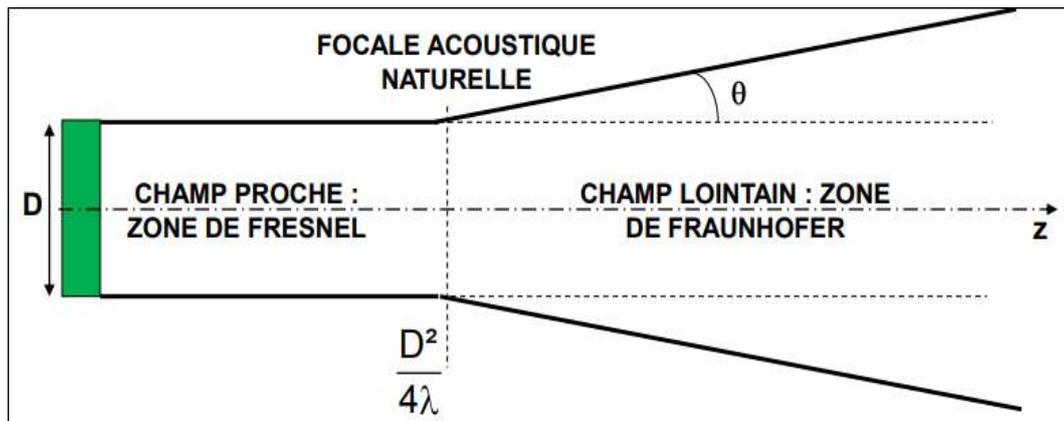


Figure 2.8 : Géométrie d'un faisceau ultrasonore.

- **Le champ proche du transducteur (zone de Fresnel)**, comme l'émetteur a des dimensions limitées, il se produit de nombreuses interférences entraînant de fortes variations d'amplitudes. Ce phénomène est analogue à une onde plane diffractée par une ouverture circulaire. Le champ acoustique est très perturbé et la pression acoustique est constituée par de nombreux maximums et minimums. La zone de forme cylindrique ne présente pas de divergence son étendu dépend du diamètre du cristal, de la fréquence d'émission et de la célérité.

$$L = D^2 \times \frac{f}{4C} \quad (2.8)$$

Avec L : Longueur de la zone.

D : Diamètre de la source.

f : Fréquence.

C : Célérité.

- **Le champ éloigné (zone de Fraunhofer)**, de forme conique, situé juste au-delà du champ proche, loin de la source où l'intensité décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance. La pression acoustique est homogène et caractérisée par une divergence du faisceau selon un angle θ .

$$\sin\theta = \frac{1,22 C}{Df} \quad (2.9)$$

4. 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

4.1 Atténuation des ondes ultrasonores

Dans un matériau idéal sans atténuation, une onde ultrasonore n'est atténuée que du fait de sa divergence. Dans le cas d'une onde plane, la pression acoustique décroît de façon exponentielle en fonction du trajet parcouru par l'onde (Fig. 2.9).

$$A = A_0 e^{(-\alpha x)} \quad (2.10)$$

Avec A : Amplitude à la distance x .

A_0 : Amplitude initiale.

α : Coefficient d'atténuation.

x : Distance traversée par l'onde.

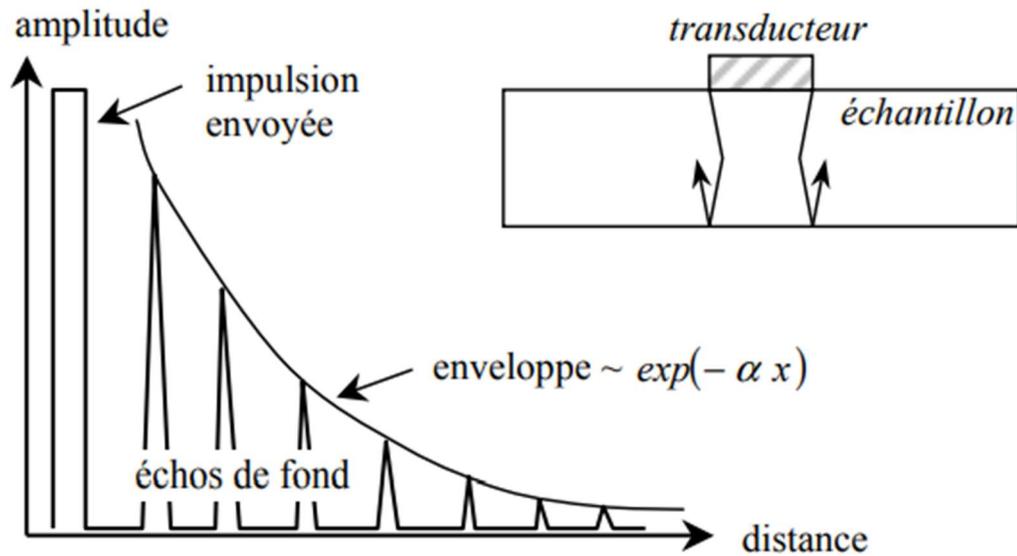


Figure 2.9 : Décroissance exponentielles des échos.

L'atténuation de l'onde est toujours d'autant plus importante que la fréquence est élevée. Cette atténuation est due à deux phénomènes qui se superposent : l'absorption et la diffusion. Aussi, la propagation des ondes acoustiques s'accompagne d'une perte d'énergie mécanique sous forme de chaleur qui se traduit par une atténuation. Cependant, cette dernière est d'autant plus faible que le milieu de propagation est ordonné. En effet, un milieu liquide donne lieu à des pertes plus importantes que dans un solide. Les causes de l'atténuation sont

- La perte d'énergie par effet thermique. En effet, toute vibration entraîne une perte de chaleur.
- La densité du matériau facilite plus ou moins le passage de l'énergie.
- La taille des grains va créer une dispersion.

$\alpha = \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{diffusion}}$. Ce coefficient définit le pouvoir de pénétration des ultrasons et il est proportionnel au carré de la fréquence [18].

4.2 Interaction des ultrasons avec une interface

4.2.1 Notion d'interface acoustique

Quand une onde ultrasonore traversant un matériau rencontre la limite d'un matériau différent perpendiculaire aux ondes, une partie de l'énergie des ondes est réfléchiée vers la source et l'autre partie poursuit son parcours. Le pourcentage de

réflexion par rapport à la transmission est lié à l'impédance acoustique relative des deux matériaux

4.2.2 Incidence normale

Dans ce cas, l'onde incidente est perpendiculaire à la surface de la pièce. Lorsqu'une onde ultrasonore arrive sur une interface placée à un angle droit par rapport à sa direction initiale, une partie est réfléchiée dans le sens opposé et l'autre partie traverse l'interface et continue son chemin sans changer de direction. La quantité de l'énergie ultrasonore réfléchiée ou coefficient de réflexion est directement proportionnelle à la différence d'impédance acoustique (Z_1, Z_2) entre les deux milieux. Si cette différence est grande, alors la plupart de l'énergie est réfléchiée et seule une partie est transmise à travers l'interface. Tandis que si cette différence est petite, la majeure partie de l'énergie est transmise et seule une partie est réfléchiée [19].

Soient I , R et T les amplitudes de l'onde incidente, réfléchiée et transmise respectivement, la relation liant les trois amplitudes est $T = I + R$

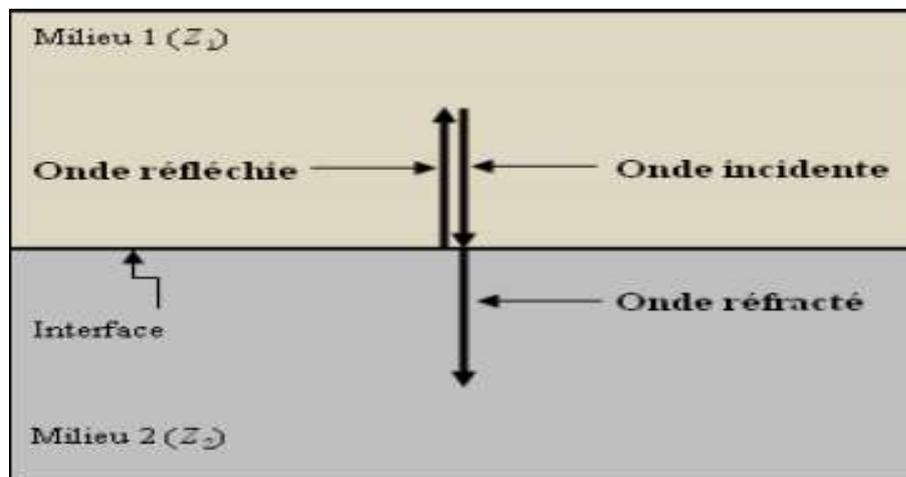


Figure 2.10 : Réflexion et Transmission à Incidence normale.

Le rapport entre l'énergie acoustique de l'onde réfléchiée I_r et celle de l'onde incidente I_i est appelé coefficient de réflexion R donné par

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.11)$$

Avec Z_1 est l'impédance acoustique du milieu 1, Z_2 est l'impédance acoustique du milieu 2.

Le rapport entre l'énergie acoustique de l'onde transmise I_t et celle de l'onde incidente I_i est appelé coefficient de transmission T donné par

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.12)$$

4.2.3 Incidence oblique

Lorsque l'onde ultrasonore arrive obliquement sur la surface de l'interface entre les deux milieux de propagation, il se produit également des phénomènes de réflexion et de réfraction. L'onde incidente à un angle oblique par rapport à l'interface des milieux 1 et 2, se déplace à la vitesse V_1 dans le milieu 1, produit dans le milieu 1 une onde réfléchie et dans le milieu 2 une onde réfractée. Comme le montre la figure (2.10), l'onde réfléchie a la même vitesse V_1 et le même angle que l'onde incidente $\theta_i = \theta_r$, mais l'onde réfractée (transmise) a une vitesse V_2 et un angle β . La loi de Snell-Descartes donne la relation entre les deux vitesses en fonction des angles d'incidence et de réfraction.

$$(\sin\theta_i / \sin\beta) = (V_1 / V_2) \quad (2.13)$$

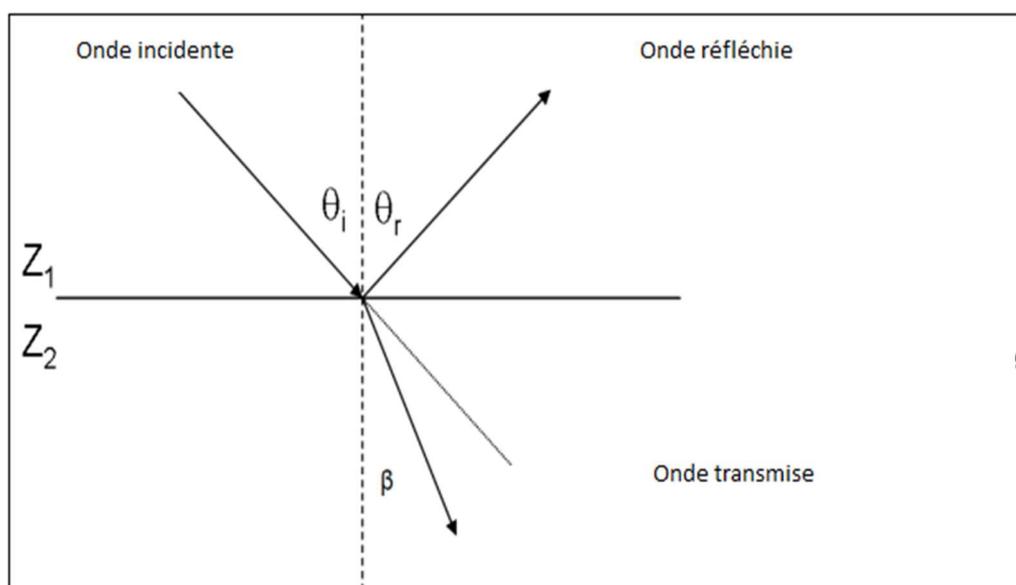


Figure 2.11 : Transmission et réflexion d'onde à incidence oblique.

4.2.4 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 [20].

❖ Onde incidente longitudinale

La figure (2.12) 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

$$\frac{\sin(i)}{V_{1L}} = \frac{\sin(r_T)}{V_{1T}} = \frac{\sin(r_L)}{V_{1L}} = \frac{\sin(R_T)}{V_{2T}} = \frac{\sin(R_L)}{V_{2L}} \quad (2.14)$$

Lorsque l'angle d'incidence est i ; les angles des ondes réfléchies 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.

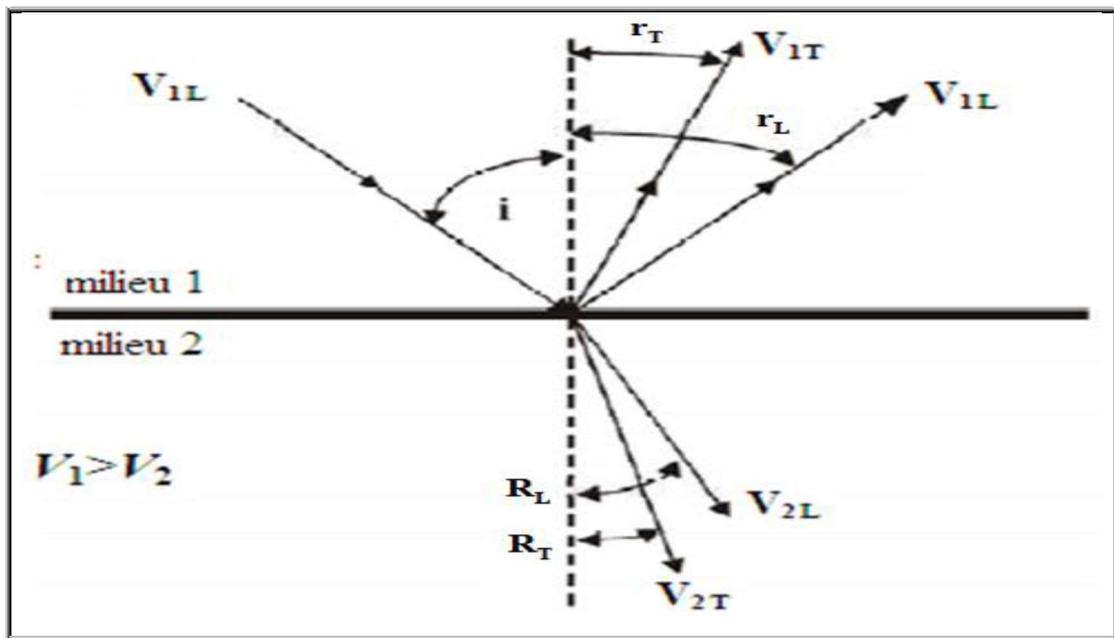


Figure 2.12 : Conversion de mode d'une onde longitudinale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.

❖ Onde incidente transversale

De façon équivalente au cas précédent et dans la figure (2.13), 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

$$\frac{\sin(i)}{V_{1L}} = \frac{\sin(r_L)}{V_{1L}} = \frac{\sin(R_T)}{V_{2T}} = \frac{\sin(R_L)}{V_{2L}} \quad (2.15)$$

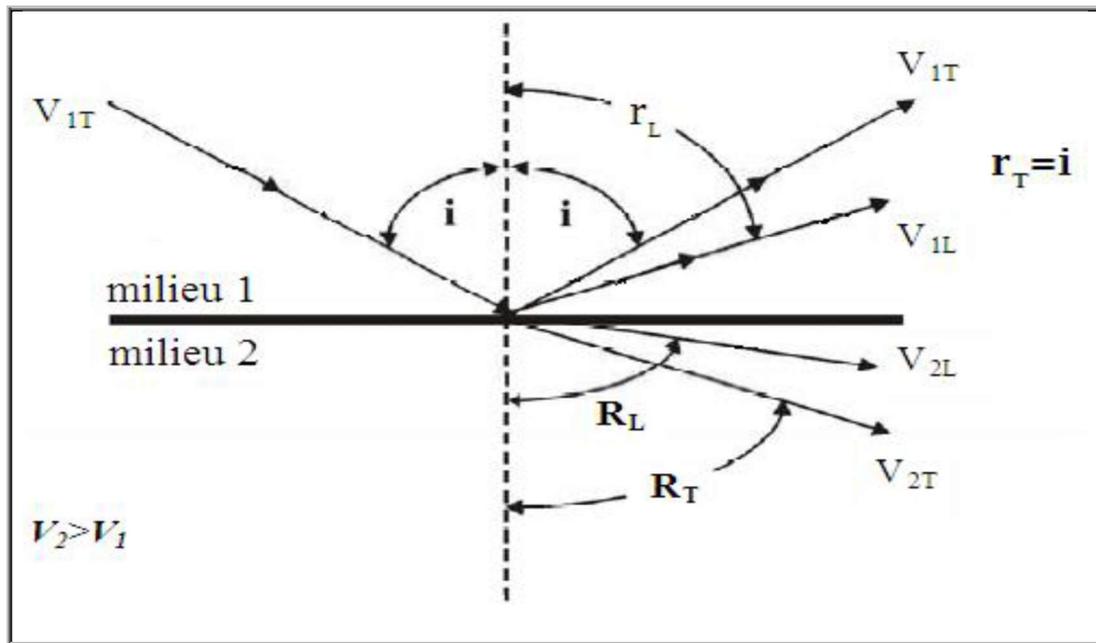


Figure 2.13 : conversion de mode d'une onde transversale incidente dans le milieu 1 à l'interface avec le milieu 2.

4.2.5 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 (2.14), 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'incidence 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 transverses 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 [21].

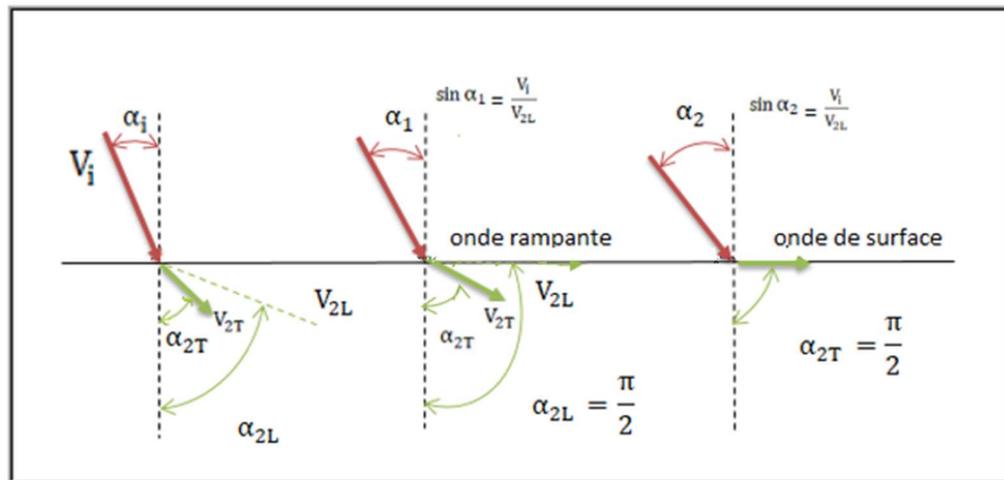


Figure 2.14 : Angles critiques pour une incidence transversale ou longitudinale.

- α_{2L} et α_{2T} augmentent avec α_i
- Quand $\alpha_i = \arcsin\left(\frac{V_i}{V_{2L}}\right) = \alpha_1$ (premier angle critique), $\alpha_{2L} = \frac{\pi}{2}$.
L'onde réfractée suit l'interface (onde rampante).
- Quand $\alpha_i = \arcsin\left(\frac{V_i}{V_{2T}}\right) = \alpha_2$ (second angle critique), $\alpha_{2T} = \frac{\pi}{2}$.
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 réfléchi.

5. 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.

Nous citons les représentations courantes de données ultrasonores : la représentation monodimensionnelle A-Scan et les représentations bidimensionnelles B-Scan, C-Scan et D-Scan.

Le signal A-Scan est une représentation de l'amplitude des échos enregistrés par le récepteur en fonction du temps. C'est un signal monodimensionnel obtenu lorsqu'un tir ultrasonore est réalisé pour une position donnée (x, y) du couple émetteur/récepteur.

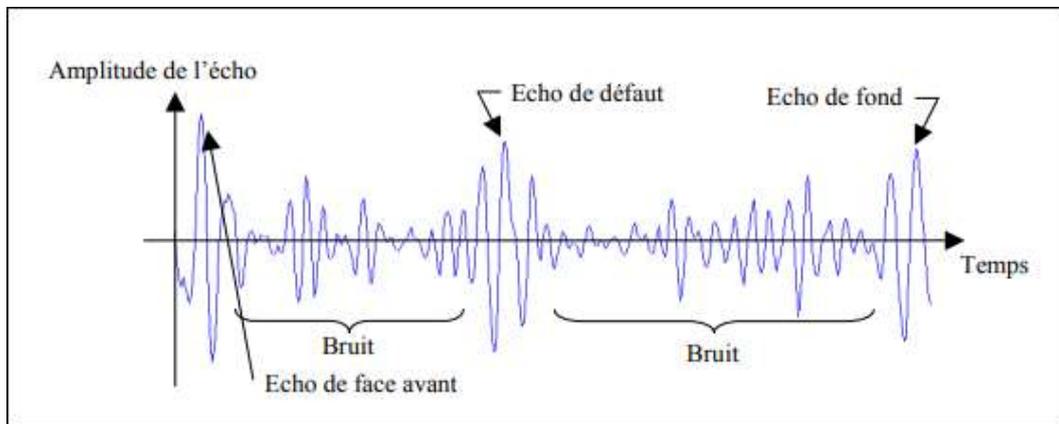


Figure2.15 : Exemple de signal A-Scan

6. Utilisation des ultrasons

Les ultrasons sont très utilisés dans

- L'industrie automobile : pour éviter les obstacles.
- En télédétection : avec le sonar, le sonar est un appareil qui contient un émetteur et un récepteur.
- En médecine : les ultrasons sont employés par l'échographie thérapeutique.
- En télémétrie : pour mesurer les distances, cette technique est similaire au sonar, l'émetteur émet une onde et l'objet le renvoi au récepteur.
- En téléphonie : comme sonnerie inaudible, sous-marine, modulation de lumière.
- Pour certaines activités de loisirs : par exemple la création de brouillard d'eau.

7. 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 contrôle par contact [20].

7.1 Méthode pulse-écho

Cette méthode est la plus utilisée dans le contrôle ultrasonore. Elle est appelée aussi l'échographie et consiste en un seul transducteur émetteur-récepteur dans le cas où le palpeur est appliqué au contact de la pièce par l'intermédiaire d'un film de couplage.

On excite le palpeur au moyen d'une brève impulsion électrique, à laquelle correspond un premier écho appelé écho d'émission ; le train d'onde progresse dans la pièce et en l'absence de défaut, vient frapper la face arrière de la pièce contrôlée, sur laquelle il est réfléchi. Il refait alors la progression inverse jusqu'au palpeur où il génère un signal électrique correspondant à l'écho de fond. En cas de présence d'un défaut dans l'épaisseur de la pièce, celui-ci, quand il est frappé par la bouffée d'onde ultrasonore, est réfléchi en partie, et pendant que le train d'ondes principal poursuit sa propagation vers le fond, l'onde réfléchie sur le défaut revient vers le palpeur où elle génère un écho de défaut.

Du point de vue interprétation, tout se passe comme si les faces avant et arrière de la pièce étaient indiquées par les échos d'émission et de fond, et la présence d'un défaut signalé par un écho dont la position sur l'écran entre les deux autres, est proportionnelle à sa profondeur. Il faut noter que ces distances sur l'écran correspondent à des temps de vol, aller-retour de chaque impulsion ultrasonore.

En résumé, au lieu de détecter, comme dans le cas précédent l'énergie transmise, on cherche l'énergie réfléchiée et on utilise généralement une émission pulsée. Toute variation de cette énergie correspond à la présence d'un défaut.

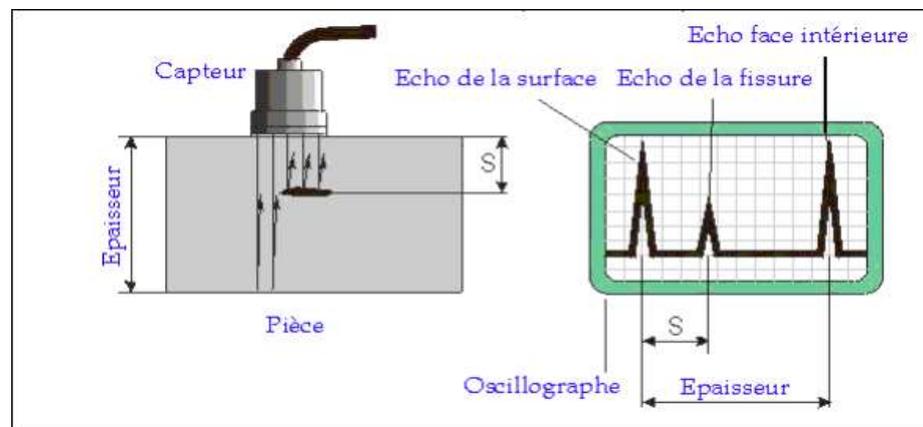


Figure 2.16 : Méthode pulse-écho.

7.1.1 Contrôle par contact

Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison acoustique est assurée par un film de couplage qui est généralement une graisse, une huile ou des gels spéciaux. Cette technique est surtout employée lors de contrôle manuel. Elle ne nécessite qu'un seul transducteur et un appareil de contrôle. Cependant, elle présente deux inconvénients : elle nécessite d'abord l'intervention d'un opérateur qui assure le déplacement du transducteur, deuxièmement, la constante du 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.

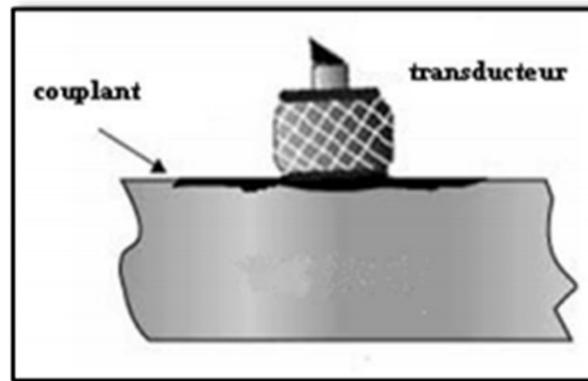


Figure 2.17 : Contrôle par contact

7.1.2 Contrôle par immersion

La pièce à contrôler est immergée dans un liquide de couplage le plus souvent de l'eau parfois du pétrole plus rarement de l'huile. Le palpeur n'étant pas en contact avec la pièce à contrôler la hauteur du fluide intervient dans le trajet parcouru par les ultrasons. Le contrôle par immersion peut s'effectuer selon la position de la pièce de trois manières [22]

- Immersion totale.
- Immersion locale.
- Méthode par jets.

Ce système est réservé aux pièces de faibles dimensions et aux contrôles en série.

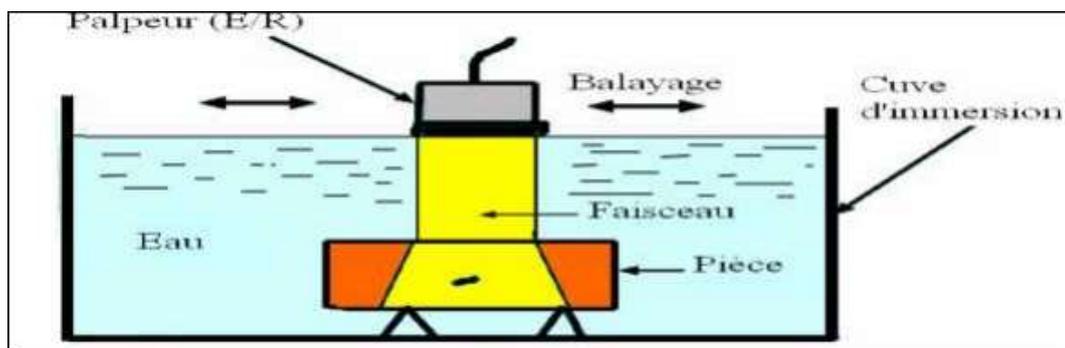


Figure 2.18 : Contrôle par immersion.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le thème sur les ultrasons. Tout d'abord, nous avons donné une brève définition sur les ultrasons, leurs différentes caractéristiques et leurs domaines d'utilisation. Ensuite, nous avons vu les notions de base de la propagation ultrasonore afin de mettre en évidence leur utilisation dans le contrôle non destructif des matériaux, en mettant l'accent sur les méthodes ultrasoniques les plus répandues à cause de leur efficacité, leur précision et leur simplicité. Le contrôle par ultrasons est une méthode technologique efficace, fréquemment utilisée car elle présente de nombreux avantages tels que la facilité de mise en œuvre, la possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler et la capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence de travail. De plus, l'existence de relations entre la propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau permet sa caractérisation ce qui représente l'objectif essentiel de ce mémoire.

Chapitre 3

Algorithmes d'estimation

-
1. Introduction
 2. Model de l'écho ultrasonore
 3. Principe du maximum de vraisemblance
 4. Méthode des moindres carrés
 5. La méthode de Gauss-Newton
 6. Algorithme Expectation-Maximisation EM
 7. Conclusion
-

1. Introduction

Parmi les objectifs du contrôle non destructif, la localisation et la détection des défauts et surtout la caractérisation des matériaux à partir des échos ultrasonores réfléchis lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans ces derniers. Pour cela, on a besoin d'un modèle mathématique dont les paramètres sont liés directement aux propriétés des matériaux testés. Toutefois, ces paramètres sont inconnus et doivent être identifiés à partir de mesures réelles qui peuvent être contaminées par du bruit. Autrement dit, le modèle doit être ajusté. Ceci est l'objectif de ce qu'on appelle l'estimation.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'algorithme d'estimation EM dont le principe est basé sur la méthode du maximum de vraisemblance (MLE) afin de pouvoir estimer les paramètres des ondes ultrasonores. L'estimation précise de ces paramètres permet une meilleure compréhension et interprétation des phénomènes affectant la propagation de l'onde ultrasonore.

2. Modèle de l'écho ultrasonore

Dans les tests ultrasonores à écho pulsé, l'écho rétrodiffusé à partir d'un réflecteur à surface plane peut être modélisé comme [22]

$$x(t) = S(\theta; t) \quad (3.1)$$

$S(\theta; t)$ est appelé modèle d'écho gaussien en raison de la forme gaussienne de son enveloppe donnée par

$$S(\theta, t) = \beta \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \varphi) \exp(-\alpha(t - \tau)^2) \quad (3.2)$$

Les paramètres du signal écho sont

α : Facteur de bande passante ;

τ : Temps d'arrivée ;

f_c : Fréquence centrale ;

φ : Phase ;

β : Amplitude de l'écho ;

Le vecteur de paramètres $\theta = [\alpha \ \tau \ f_c \ \varphi \ \beta]$ contient tous les paramètres inconnus du signal. Le facteur de bande passante α détermine la bande passante de l'écho ou la durée de l'écho dans le domaine temporel. Le temps d'arrivée τ est lié à l'emplacement du réflecteur. La fréquence centrale f_c est régie par la fréquence centrale du transducteur et les caractéristiques de fréquence du chemin de propagation. La phase φ et l'amplitude β sont liées à l'impédance, à la taille et à l'orientation du réflecteur. Ces paramètres ont des significations intuitives pour un réflecteur plan idéal dans un chemin de propagation homogène.

Pour expliquer les effets du bruit sur l'estimation, un processus de bruit peut être inclus dans le modèle. Ce bruit provient de la mesure et peut être caractérisé comme un bruit blanc gaussien additif. L'écho ultrasonore devient

$$X(t) = S(\theta ; t) + v(t) \quad (3.3)$$

$S(\theta ; t)$: Echo gaussien donné par (3.2).

$V(t)$: Bruit blanc additif.

L'équation (3.4) est une version modifiée pour décrire les échos multiples du réflecteur

$$y(t) = \sum_{m=1}^M S(\theta_m; t) + v(t) \quad (3.4)$$

$S(\theta_m; t)$: Modèle M-échos gaussiens.

M : désigne le nombre d'échos gaussiens superposés

$\theta_m = [\alpha_m; \tau_m; f_c; \varphi_m; \beta_m]$ est le vecteur d'échos. Ce vecteur d'écho θ_m indique la forme et la position de chaque écho. Il contient tous les paramètres inconnus du problème : la bande passante α_m , le temps d'arrivée τ_m , la fréquence centrale f_m , la phase φ_m et l'amplitude β_m .

Si on suppose donc, un signal écho de type gaussien pour chaque réflecteur, les échos reçus peuvent être modélisés par M-échos gaussiens superposés de la forme

$$y(t) = \sum_{m=1}^M \beta_m \cos(2\pi f_{c_m}(t - \tau_m) + \varphi_m) \exp(-\alpha_m(t - \tau_m)^2) + v(t) \quad (3.5)$$

Le terme de sommation représente un modèle de signal multiple, le nombre de réflecteurs étant inconnu. Chaque vecteur de paramètres θ_m définit complètement la forme et l'emplacement de l'écho correspondant. Ce système est illustré schématiquement par la figure suivante

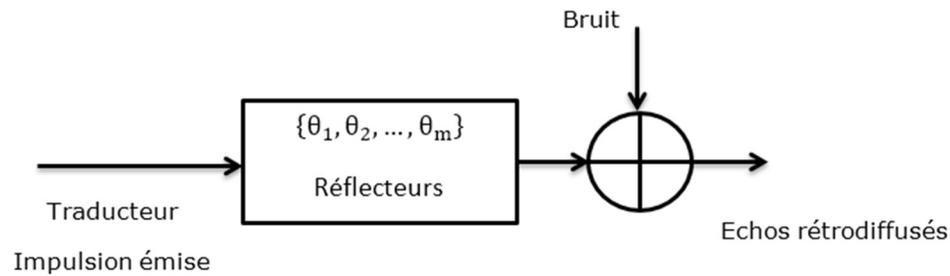


Figure 3.1 : Modèle des échos rétrodiffusés.

3. Principe du maximum de vraisemblance

Le Principe du maximum de vraisemblance vise à rendre la fonction des variables aléatoires la plus grande possible. Cet estimateur est souvent utilisé pour estimer les paramètres de distribution, car il en possède de bonnes propriétés qui sont sans biais et suffisantes et recherchent la moindre variation possible et la propriété la plus importante de non-changement ou de stabilité et il est censé être plus précis que d'autres méthodes d'estimation, en particulier Lors de l'augmentation de la taille de l'échantillon. La première personne à formuler cette méthode est le scientifique C.F.Gauss et elle a été appliquée pour la première fois par le chercheur R.A.Fisher[23].

Soit un modèle de régression simple

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + \mu_t \quad (3.6)$$

Y_t et X_t sont des scalaires.

α et β des paramètres à estimer.

μ_t est identique et indépendamment distribué selon une loi normale.

La méthode du maximum de vraisemblance est la suivante

D'abord, on construit la fonction de vraisemblance qui est définie comme la fonction de densité conjointe des t observations

$$g(y_1, y_2, \dots, y_t; \alpha, \beta, \sigma^2) \quad (3.7)$$

Dans notre cas et à cause du fait que les observations sont indépendantes, cette fonction est calculée comme le produit des fonctions de densité des observations individuelles

$$g(y_1, y_2, \dots, y_t; \alpha, \beta, \sigma^2) = \prod_{i=1}^t g(y_i; \alpha, \beta, \sigma^2) \quad (3.8)$$

Parce que la variable μ_t est distribué selon une loi normale, y_t est aussi distribuée selon une loi normale (une combinaison linéaire de variables normales est aussi normale). Par conséquent la fonction de vraisemblance devient

$$g(y_1, y_2, \dots, y_t; \alpha, \beta, \sigma^2) = \prod_{i=1}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{2\sigma^2}\right\} = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right)^t \exp\left\{-\sum_{i=1}^M \frac{(y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3.9)$$

Ensuite, pour faciliter la solution du problème de maximisation, on calcule le logarithme de la fonction de vraisemblance (les résultats de la maximisation de la fonction de vraisemblance exprimée ou non en logarithmes sont identiques)

$$\ln g(y_1, y_2, \dots, y_t; \alpha, \beta, \sigma^2) = -\frac{t}{2} \ln 2\pi - \frac{t}{2} \ln \sigma^2 - \sum_{i=1}^t \frac{(y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{2\sigma^2} \quad (3.10)$$

Finalement, on maximise le logarithme de la fonction de vraisemblance par rapport aux paramètres inconnus α , β et σ^2 .

$$\max_{\alpha, \beta, \sigma^2} = \left[\text{cte} - \frac{t}{2} \ln \sigma^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \frac{(y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{\sigma} \right] \quad (3.11)$$

4. Méthode des moindres carrés LS

4.1 Principe des moindres carrés [24]

Une méthode d'estimation est toujours basée sur la recherche de la meilleure estimée (notée \hat{r}) de la grandeur r suivant un certain critère d'optimalité. Une des plus anciennes méthodes d'estimation est la méthode des « moindres carrés » développée par KARL GAUSS à la fin du 18^{ème} siècle. Cette méthode est aujourd'hui encore très importante car elle assure une fidélité envers les données (le signal reconstruit est peu différent du signal mesuré).

En l'absence totale d'information sur la solution et sur le bruit, une approche possible est de rechercher le filtre linéaire qui minimise l'erreur résiduelle de reconstruction entre les données mesurées et les données estimées.

$$b^T b = (y - Hr)^T (y - Hr) \quad (3.12)$$

La minimisation de ce critère conduit à la solution

$$\hat{r} = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (3.13)$$

Puisque la matrice H et le vecteur y sont des quantités connues, \hat{r} , l'estimateur des moindres carrés, peut être facilement obtenu. L'inverse existe seulement si aucune colonne de H n'est une combinaison linéaire d'une autre colonne de la même matrice. Il faut noter ici que le nombre de mesures doit être plus grand que le nombre des paramètres à estimer. Cette condition peut être exprimée par un nombre de mesures \geq au nombre de paramètres +1.

4.2 Propriétés des estimateurs des moindres carrés

a) La qualité d'un estimateur peut être quantifiée grâce à l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre la solution estimée et la vraie solution

$$EQM = E(r - \hat{r})^T (r - \hat{r}) = \text{trace} [(H^T R_b^{-1} H)^{-1}]$$

b) L'estimateur non biaisé à variance minimale est égal à l'estimateur des moindres carrés.

c) l'erreur d'estimation est une fonction linéaire des erreurs de mesure.

4.3 Méthode des moindres carrés généralisés

De manière plus générale, une méthode appelée « moindres carrés pondérés » a été développée. Elle est basée sur la minimisation du critère

$$C(b) = (y - Hr)^T W (y - Hr) \quad (3.14)$$

W est une matrice de pondération

La minimisation de ce critère conduit à la solution

$$\hat{r} = (H^T W H)^{-1} H^T W y \quad (3.15)$$

On montre que cet estimateur est non biaisé lorsque les deux conditions suivantes sont remplies : b et H sont statistiquement indépendants et b est à moyenne nulle. L'absence de biais d'un estimateur assure que la fonction de distribution de probabilité de l'estimateur est centrée autour du paramètre recherché

$$E(\hat{r}) = r \quad \text{Si } r \text{ est déterministe.}$$

$$E(\hat{r}) = E(r) \quad \text{Si } r \text{ est aléatoire.}$$

Le meilleur estimateur linéaire non biaisé (c'est-à-dire l'estimateur linéaire non biaisé à variance minimale) est l'estimateur des moindres carrés pondérés dans le cas où la matrice de pondération est égale à l'inverse de la matrice de covariance du bruit (R_b)

$$\hat{r} = (H^T R_b^{-1} H)^{-1} H^T R_b^{-1} y \quad (3.16)$$

L'étude des équations (3.14) et (3.15) montre que, dans le cas d'un bruit blanc ($R_b = \sigma_b^2 I$) ou σ_b^2 est la variance du bruit et I la matrice identité.

4.4 Méthode des moindres carrés non linéaires.

La méthode des moindres carrés non linéaires est une forme des moindres carrés adaptée pour l'estimation d'un modèle non linéaire en n paramètres à partir de m Observations ($m > n$). Une façon d'estimer ce genre de problème est de considérer des itérations successives se basant sur une version linéarisée du modèle initial.

Considérons un jeu de m couples d'observations, $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ et une fonction de régression du type $y = f(x, \beta)$. Cette fonction dépend

des explicatives x mais aussi du vecteur des n paramètres $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ avec $m \geq n$. On souhaite trouver le vecteur de paramètres β qui ajuste au mieux les données, au sens des moindres carrés

$$S = \sum_{i=1}^M r_i^2 \quad (3.17)$$

est minimisée en β , où les résidus r_i sont donnés par

$$r_i = y_i - f(x_i, \beta), \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Le minimum de la somme des carrés des résidus S est atteint lorsque le gradient s'annule (condition nécessaire). Puisque le problème est formulé avec n paramètres, il y a donc n équations normales

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j} = 2 \sum_i r_i \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \right) = 0 \quad (j = 1, \dots, n). \quad (3.18)$$

Dans un système non linéaire, les dérivées $\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}$ dépendent aussi bien des variables explicatives que des paramètres : il faut donc renoncer à résoudre les équations normales aussi simplement que dans le cas linéaire

5. Méthode de Gauss-Newton

En mathématiques, l'algorithme de Gauss-Newton est une méthode de résolution des problèmes de moindres carrés non linéaires. Elle peut être vue comme une modification de la méthode de Newton dans le cas multidimensionnel afin de trouver le minimum d'une fonction (à plusieurs variables). Mais l'algorithme de Gauss-Newton est totalement spécifique à la minimisation d'une somme de fonctions au carré et présente le grand avantage de ne pas nécessiter les dérivées secondes, parfois complexes à calculer.

Dans cette étude, l'algorithme de Gauss Newton (GN) a été utilisé spécialement pour son calcul rapide répondant ainsi à notre problème spécifique.

Pour le modèle d'écho gaussien, la formule d'itération de Gauss Newton permettant l'estimation du vecteur de paramètre peut être écrite comme [25]

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + (H^T(\theta^{(k)}) H(\theta^{(k)}))^{-1} H^T(\theta^{(k)})(x - S(\theta)) \quad (3.19)$$

$H(\theta)$ représente les gradients du modèle des paramètres dans le vecteur de paramètre $\theta [\alpha \ \tau \ f_c \ \varphi \ \beta]$, donné par [23]

$$H(\theta) = \left[\frac{dS(\theta)}{d\alpha} \quad \frac{dS(\theta)}{d\tau} \quad \frac{dS(\theta)}{df_c} \quad \frac{dS(\theta)}{d\varphi} \quad \frac{dS(\theta)}{d\beta} \right] \quad (3.20)$$

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

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

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

Les composantes du vecteur des gradients sont donc :

$$\frac{dS(\theta)}{d\alpha} = -\beta(t - \tau)^2 f(\theta)$$

$$\frac{dS(\theta)}{df_c} = -2\pi\beta(t - \tau) g(\theta)$$

$$\frac{dS(\theta)}{d\tau} = -2\alpha(t - \tau)f(\theta) + 2\pi f_c \beta g(\theta)$$

$$\frac{dS(\theta)}{d\varphi} = -\beta g(\theta)$$

$$\frac{dS(\theta)}{d\beta} = f(\theta)$$

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

Etape 1 : Initialiser le vecteur de paramètre $\theta^{(0)}$ et poser $k=0$ (nombre d'itération).

Etape 2 : calculer les gradients de $H(\theta^{(k)})$ et le modèle $S(\theta^{(k)})$

Etape 3 : Itérer le vecteur de paramètres

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

Etape 4 : Tester la convergence

$$\text{Si } \|\theta^{(k+1)} - \theta^{(k)}\| < \text{tolérance, alors stop.}$$

Etape 5 : Initialiser $k=k+1$ et allez à l'étape 2.

Cette méthode est efficace lorsqu'on veut estimer les paramètres associés à un seul ensemble de mesures. Si plusieurs ensembles de mesures sont mélangés, l'estimation des paramètres associés à chaque ensemble devient plus compliquée, on utilise alors l'algorithme EM.

6. Algorithme Espérance-Maximisation

L'algorithme espérance-maximisation (en anglais expectation-maximization algorithm), souvent abrégé "EM", proposé par Dempster et al en 1977, est une méthode itérative pour trouver des estimations de vraisemblance maximale ou maximale à posteriori (MAP) de paramètres dans des modèles statistiques, où le modèle dépend de variables latentes non observées. On utilise souvent l'algorithme EM pour la classification de données, l'apprentissage automatique, ou la vision artificielle. On peut également citer son utilisation en imagerie médicale dans le cadre de la reconstruction tomographique.

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 d'espérance-maximisation comporte

- Une étape d'évaluation de l'espérance (E), où l'on calcule l'espérance de la vraisemblance en tenant compte des dernières variables observées.
- Une étape de maximisation (M), où l'on estime le maximum de vraisemblance des paramètres en maximisant la vraisemblance trouvée à l'étape E.

Ces deux étapes sont précédées par une étape d'initialisation où les paramètres à estimer sont initialisés. On utilise ensuite les paramètres trouvés dans l'étape M comme point de départ d'une nouvelle phase d'évaluation de l'espérance, et l'on itère ainsi [27].

6.1 Théorie de l'algorithme EM [28]

D'après Dempster, Laird et Rubin (1977), l'algorithme EM est une approche générale qui fait un calcul itératif pour trouver des estimateurs du maximum de vraisemblance lorsque les données sont incomplètes. On l'appelle l'algorithme EM puisque chaque itération de l'algorithme consiste en une étape d'espérance et une étape de Maximisation.

Soit Y , le vecteur aléatoire correspondant aux données observées y , ayant une fonction de densité dénotée $f_c(y/\theta)$, où $\theta = (\theta^1, \dots, \theta^M)^T$ est un vecteur de paramètres inconnus.

Le vecteur des valeurs observées y est incomplet ; c'est-à-dire que certaines de ses données sont manquantes. Si la situation était idéale, toutes les données seraient présentes. Dans ce cas, ce serait le vecteur x qui serait observé. Mais dans les cas qui nous intéressent, c'est y qui est observé et ce dernier a des valeurs manquantes qui sont contenues dans le vecteur y . Donc si on ajoutait le vecteur z au vecteur y , toutes les données seraient présentes et ainsi, le vecteur x serait formé.

Soit $f_c(x/\theta)$, la fonction de densité du vecteur aléatoire X correspondant au vecteur de données complètes x . Alors la fonction de log-vraisemblance qui pourrait être formée pour θ si x était complètement observable est donnée par

$$L_c(\theta/x) = \ln(L_c(\theta/x)) = \ln f_c(x/\theta) \quad (3.21)$$

Aussi, McLachlan et Krishnan (1997) donnent la relation suivante pour la vraisemblance sous les données observées y

$$L(\theta/y) = f(y/\theta) = \int_{X(y)} f_c(x/\theta) dx \quad (3.22)$$

C'est-à-dire que le principe pour calculer $L(\theta/y)$ est que, pour toutes les valeurs manquantes de y , on somme sur toutes leurs valeurs possibles dans $X(y)$.

Plus spécifiquement, McLachlan et Krishnan présentent les étapes E et M de cet algorithme comme suit

Soit $\theta^{(0)}$, une valeur initiale de θ choisie arbitrairement, à laquelle l'algorithme débute. Alors à la première itération, l'étape E (espérance) de l'algorithme EM se calcule comme suit

$$Q(\theta/\theta^{(0)}) = E_{\theta^{(0)}} [L_c(\theta/X)/y] \quad (3.23)$$

Ensuite, l'étape M (Maximisation) maximise (3.23) par rapport à θ . En fait, $\theta^{(1)}$ est choisi selon l'équation $Q(\theta^{(1)}/\theta^{(0)}) \geq Q(\theta/\theta^{(0)})$

A la deuxième itération, les étapes E et M sont refaites, mais cette fois-ci avec $\theta^{(1)}$ au lieu de $\theta^{(0)}$.

Voici donc les étapes E et M pour l'itération (k+1)

- L'étape E : évaluation de l'espérance $Q(\theta/\theta^{(k)})$, ou

$$Q(\theta/\theta^{(k)}) = E_{\theta^{(k)}} [L_c(\theta/X)/y] \quad (3.24)$$

- L'étape M : Choisir $\theta^{(k+1)}$ qui est une valeur de θ qui maximise (2.23), telle que $Q(\theta^{(k+1)}/\theta^{(k)}) \geq Q(\theta/\theta^{(k)})$.

Ces deux étapes sont répétées jusqu'à ce que la différence entre la fonction de vraisemblance de l'itération (k+1) et celle de l'itération (k) ne change pratiquement plus.

$$L(\theta^{(k+1)}/y) - L(\theta^{(k)}/y) \leq \varepsilon$$

Avec ε est une valeur arbitraire positive très proche de zéro.

6.2 Implémentation de l'algorithme

Comme alternative aux méthodes des moindres carrés, on a proposé l'algorithme EM pour l'estimation des paramètres des signaux superposés noyés dans le bruit [29].

L'algorithme EM traduit l'estimation de M-écho superposés par M-écho estimés séparément, Chaque itération de l'algorithme consiste une étape de Maximisation, Nous définissons x_m comme données inobservables et pour le $m^{\text{ième}}$ écho un vecteur bruit blanc b_m .

$$x_m = S(\theta_m) + b_m \quad (3.25)$$

Ces données inobservables représentent un écho simple dans le bruit et se relie aux données observables par la transformation linéaire suivante

$$y = \sum_{m=1}^M x_m \quad (3.26)$$

Avec x_m et y sont des séquences aléatoire gaussiennes.

On a montré qu'on peut calculer le maximum de vraisemblance des paramètres des vecteurs θ_m qui dépendent des données x_m . Le maximum de vraisemblance de θ_m maximise la densité de probabilité associée aux données d'observation x_m cependant, les données d'observations x_m ne sont pas directement disponibles.

Etant donnée la transformation linéaire dans (3.25), l'espérance de x_m peut être calculée en termes de données observées et la valeur courante estimée du vecteur est exprimée par

$$\hat{x}_m^{(k)}(\theta; t) = s(\theta_m^{(k)}; t) + \beta_m \left(y - \sum_{i=1}^M s(\theta_i^{(k)}; t) \right) \quad (3.27)$$

Avec $\sum_{m=1}^M \beta_m = 1$

C'est l'étape d'espérance (étape E) de l'algorithme EM. L'étape de maximisation (étape M) implique la maximisation de la fonction de probabilité liée au vecteur correspondant de paramètre en utilisant le signal estimé de l'étape E [30]. Alors on a M étapes, itérées de vecteur de paramètres θ_m pour la minimisation

$$\theta_m^{(k+1)} = \arg_{\theta_m} \min \left\| \hat{x}_m^{(k)} - S(\theta_m) \right\|^2 \quad (3.28)$$

En résumé, l'algorithme EM permettant l'estimation des paramètres de M écho superposés et bruités, peut être implémenté suivant les étapes suivantes

Etape 1 : Initialiser le vecteur de paramètre $\theta = [\theta_0^{(0)}; \theta_1^{(0)}; \theta_m^{(0)}]$ et poser $k=0$ (nombre d'itérations).

Etape 2 : pour $m = 1, 2, 3, \dots, M$, Calculer l'espérance des échos (étape-E)

$$\hat{x}_m^{(k)} = s(\theta_m^{(k)}) + \frac{1}{M} \left(y - \sum_{i=1}^M s(\theta_i^{(k)}) \right)$$

Etape 3 : $m = 1, 2, 3, \dots, M$, Itérer le vecteur paramètre correspondant (étape-M)

$$\theta_m^{(k+1)} = \arg_{\theta_m} \min \left\| \hat{x}_m^{(k)} - S(\theta_m) \right\|^2,$$

Etape 4 : Tester la convergence : $\| \theta^{(k+1)} - \theta^{(k)} \|^2 \leq \text{tolérance}$, alors stop.

Etape 5 : Si non initialiser $k=k+1$ et aller à l'étape 2.

L'étape-**E** : les signaux d'espérance sont calculés en utilisant le terme y c'est le vecteur d'observation qui contient M -écho plus le bruit et l'estimation courante des paramètres $\theta_m^{(k)}$.

L'étape-**M** : l'étape de maximisation correspond au maximum de vraisemblance d'un écho simple en utilisant les données estimées $\theta_m^{(k)}$, aussi on utilise des signaux estimés. Dans cette étape, $\theta_m^{(k+1)}$ est calculé pour chaque signal comme estimation de maximum de vraisemblance $\theta_m^{(k)}$.

Notons que l'étape M peut être mise en application en utilisant l'algorithme GN (Gauss Newton) développé précédemment pour une estimation d'écho unique. La gaussienne initiale pour l'algorithme serait l'estimation courante actuelle du $m^{\text{ième}}$ ensemble de paramètres et les données seraient l'espérance du $m^{\text{ième}}$ signal écho. Puis, l'algorithme renvoie le Maximum de Vraisemblance pour le $m^{\text{ième}}$ écho. Une fois le MV pour chaque écho est exécuté, l'espérance de chaque écho, dans la prochaine étape-E, $\hat{x}_{m+1}^{(k)}$ peut être calculée par $\theta_m^{(k+1)}$ et ainsi de suite.

Lorsque tous les paramètres sont mis à jour, la norme de l'amélioration des vecteurs de paramètre est comparée à la tolérance fixée par l'utilisateur, pour voir la convergence à l'étape 4 de l'algorithme. Sinon, les étapes 2 et 3 seront répétées en utilisant les paramètres estimés de l'itération précédente.

6.3 Organigramme

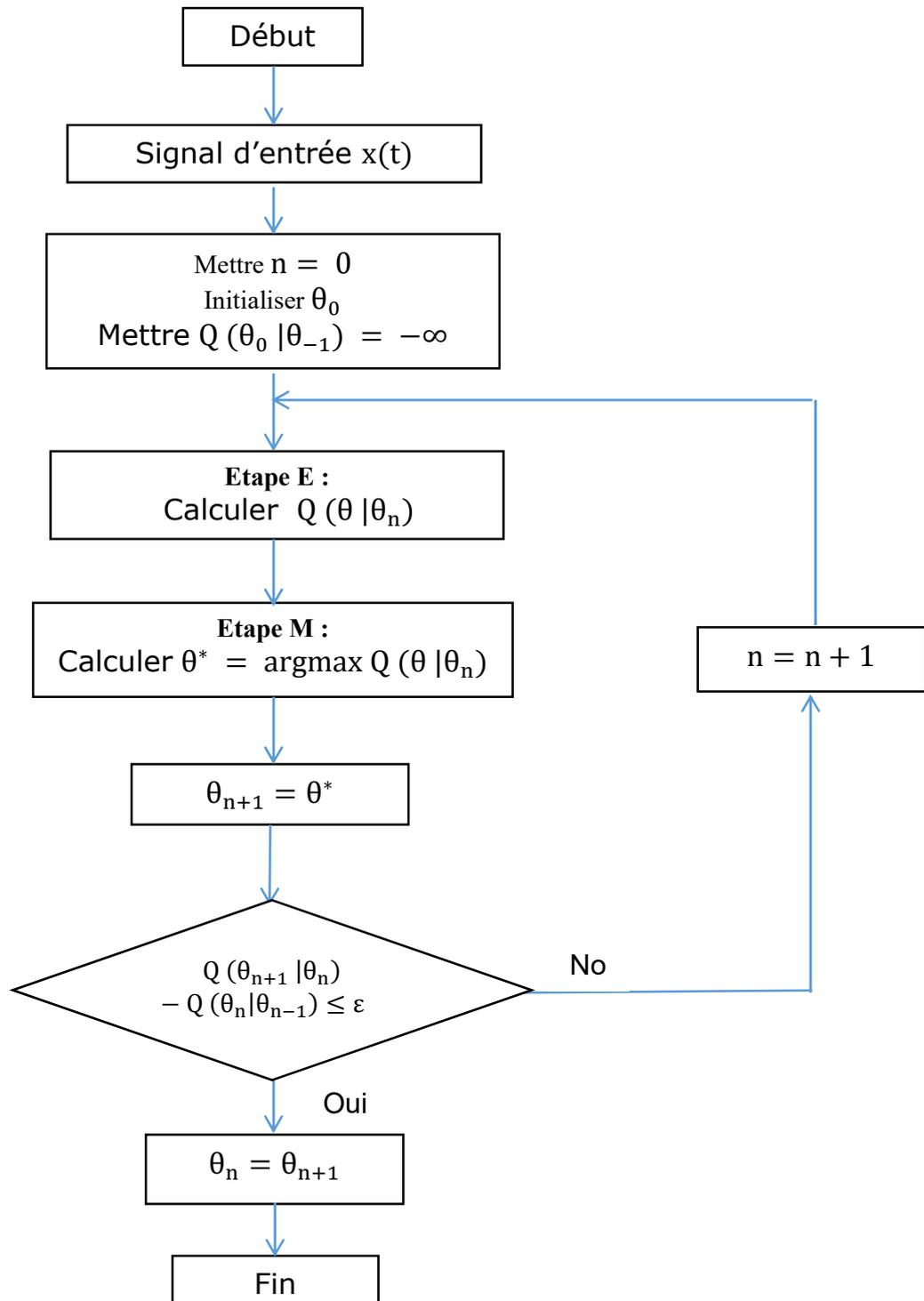


Figure 3.2 : Organigramme de l'algorithme EM

6.4 Avantages et faiblesses de l'algorithme EM

Dans cette section, l'objectif est de donner une idée du potentiel de l'algorithme EM comme outil utile pour l'estimation de paramètres dans des problèmes d'estimation statistique. Quelques critiques de cet algorithme seront aussi mentionnées. L'algorithme EM présente beaucoup d'avantages, on cite

- L'algorithme est plus rapide pour apprendre les modèles de mélange.
- Les caractéristiques globales sont donc bien reproduites par l'algorithme EM.
- Souvent, le problème des données complètes est un problème « classique », donc l'étape M est résolue en utilisant des logiciels statistiques.
- L'algorithme EM est stable numériquement et la vraisemblance en augmentation à chaque itération (sauf à un point fixe de l'algorithme).
- L'algorithme EM converge globalement sous certaines conditions. En effet, en partant d'un point arbitraire $\theta^{(0)}$ dans l'espace du paramètre, la convergence se fait presque toujours à un maximum local.
- L'algorithme EM est souvent facile à programmer.
- L'algorithme EM peut être utilisé pour fournir des valeurs estimées des données manquantes.
- Le coût par itération étant généralement bas, un plus grand nombre d'itérations que les autres méthodes peut donc être exécuté par l'algorithme EM pour un coût donné.

Voici maintenant quelques critiques de l'algorithme

- Dans certains problèmes, l'étape E peut être analytiquement impossible à trouver.
- L'estimation de la matrice de covariance devient très difficile, quand on a de nombreux points par mélange, ou de grande base de travail.
- EM est intéressant et très puissant (application multiple), mais pas de bonne qualité pour des séries avec une grande variance-covariance.

7. Conclusion

L'estimation des paramètres des signaux ultrasonores est une phase fondamentale en contrôle non destructif et l'algorithme d'expectation-maximisation EM est une approche standard très utilisée pour estimer les paramètres des signaux superposés et bruités. C'est pourquoi, nous avons présenté dans ce chapitre toute la théorie nécessaire qui se rapporte à cet algorithme basé sur le maximum de vraisemblance en remplaçant le problème difficile d'estimation par une séquence de problèmes simples.

Estimation des paramètres des signaux ultrasonores

-
1. Introduction
 2. Technique du prisme
 3. Evaluation des paramètres élastiques du matériau
 4. Dispositif expérimental
 5. Résultats de simulation
 6. Conclusion
-

1. Introduction

Dans ce chapitre, un système de mesure non destructif est proposé pour évaluer les propriétés élastiques d'un matériau homogène. Ce système de mesure est basé sur le principe de conversion de mode en utilisant la technique du prisme pour pouvoir évaluer les vitesses des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) correspondantes avec un seul transducteur. Dans la partie expérimentale, l'échantillon sous test (SUT), réalisé sous forme de prisme, est testé en utilisant la technique du prisme. Ensuite, les échos rétrodiffusés sont estimés à l'aide d'un algorithme de Maximisation d'Espérance (EM) puis séparés afin d'extraire les propriétés élastiques souhaitées [31].

2. Technique du prisme

La technique du prisme est basée sur le principe de conversion de mode. Cette technique consiste à mesurer la vitesse des ondes de compression et de cisaillement dans un échantillon sous forme de prisme avec un seul transducteur fonctionnant en émetteur/récepteur. En conséquence, des ondes de compression et de cisaillement vont être générées par conversion de mode de l'échantillon à partir d'un angle d'incidence qui doit être choisi avec une grande précision, augmentant ainsi l'efficacité du système de mesure. En effet, l'angle d'incidence choisi permettra de collecter plusieurs échos rétrodiffusés en une seule manipulation de mesure. L'idée clé de la technique du prisme est que seules les ondes à l'intérieur du prisme avec un angle de réfraction 45° contribuent de manière significative au signal du capteur. Les résultats théoriques de la technique du prisme ont démontré qu'il est possible d'évaluer les vitesses des ondes ultrasonores P et S [32]. La figure (4.1) montre le principe de la technique du prisme.

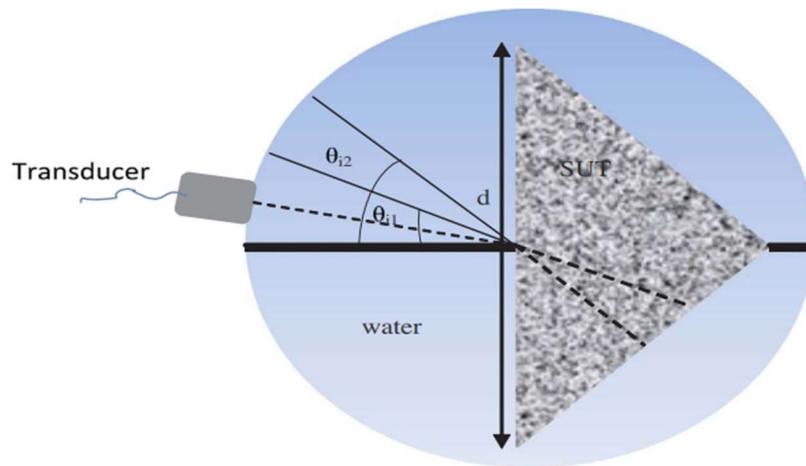


Figure 4.1 : Technique de prisme.

3. Evaluation des paramètres élastiques des matériaux

La technique du prisme fonctionne aussi bien pour les échantillons homogènes que pour les échantillons non homogènes, et par conséquent, les formules (4.1), (4.2) sont suffisantes pour évaluer les vitesses des ondes ultrasonores P et S dans ces deux cas [32]

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

a: La face du prisme.

$T_{P,S}$: Temps d'arrivée des ondes us (ondes longitudinale et transversale).

t : Temps de réflexion totale de la face principale de l'échantillon.

On peut alors calculer les constantes de lamé à partir de ces deux formules

$$\lambda = \rho(c_p^2 - c_s^2) \quad (4.2)$$

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

Où λ est le coefficient de Lamé, μ est le module de cisaillement et ρ est la densité.

Les mesures de vitesse par ultrasons sont utiles pour déterminer plusieurs paramètres du matériau, tel que le module de Young E et le coefficient de Poisson σ peuvent alors être déduites selon les formules suivantes

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

$$\sigma = \frac{c_P^2 - c_S^2}{2c_P^2 - 2c_S^2} \quad (4.5)$$

4. Description du montage expérimental

Une expérience d'immersion basée sur la technique pulse-écho a été menée à l'aide de l'appareillage illustré à la figure (4.2)

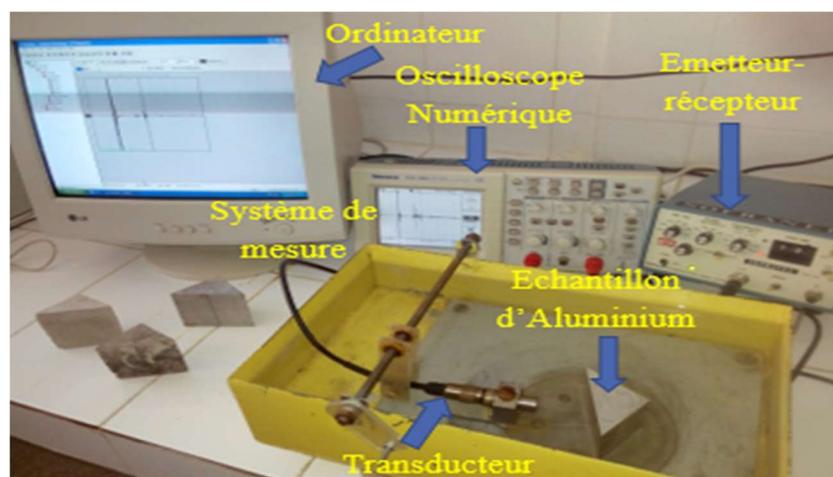


Figure 4.2 : Montage de test expérimental

Cette expérience est basée sur la technique Pulse-écho par immersion qui utilise le principe de réflexion et réfraction des ondes entre deux environnements à interface liquide-solide. On utilise un échantillon sous forme de prisme en Aluminium. Cette expérience ne nécessite qu'un seul transducteur pour générer le signal ultrasonique et détecter les ondes longitudinale et transversale dans l'échantillon par conversion de mode. Les vitesses ont été calculées à partir de l'évaluation des temps de vol de l'échantillon. Le système de mesure se compose de

- Un générateur d'impulsions (Panametrics, émetteur / récepteur, type 5077PR).
- Un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition de données du signal sous forme de fichier Excel (WaveStar).
- Un oscilloscope numérique (Tektronix TDS 1002) pour afficher les échos.
- Un transducteur piézoélectrique de fréquence 1 MHz.

- Une plate-forme fixe (support de prisme) et un réservoir métallique parallélépipédique rempli d'eau.

4.1 Données expérimentales

Les essais expérimentaux ont été réalisés au niveau du laboratoire CND de l'Université de Jijel en utilisant la technique du prisme. On considère un matériau homogène typique par conséquent, l'expérience est été effectuée sur un échantillon d'Aluminium ayant une densité $\rho = 2750 \text{ kg / m}^3$. Ce spécimen est réalisé sous forme de prisme avec une longueur latérale $d = 4,8 \text{ cm}$ en utilisant une boîte de moulage spéciale.

Ensuite, l'échantillon sous test est immergé dans le réservoir d'eau pour des tests par ultrasons utilisant une sonde à ultrasons de fréquence 1 MHz et diamètre 6 mm. Au début de l'expérience, les ondes incidentes du transducteur d'immersion sont générées pour frapper la face principale du prisme. L'angle d'incidence est augmenté jusqu'à l'apparition des échos liés à la fois à l'onde P et l'onde S réfractée.

4.2 Déroulement de l'expérience

L'objectif fondamental de cette expérience est de recueillir, à partir d'un angle d'incidence bien précis, 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.

Tout d'abord, les signaux obtenus subissent un prétraitement : ils 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, ses échos rétrodiffusés seront

visualisés sur un oscilloscope numérique et enregistrés sous format a-scan pour des traitements ultérieurs [19].

5. Résultats de simulation

5.1 Expérience menée sur un échantillon homogène : l'Aluminium

5.1.1 Détermination des angles critiques

Les signaux obtenus sont amplifiés et filtrés à l'aide d'un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 100 MHz pour supprimer le bruit haute fréquence. Les échos rétrodiffusés sont ensuite visualisés sur un oscilloscope numérique et enregistrés au format A-scan. La figure (4.3) montre la variation des coefficients d'énergie de réflexion et de transmission en mode des ondes P (longitudinale) et S (transversale) en fonction de l'angle d'incidence. On remarque qu'il existe deux angles critiques (14° , 29°) pour l'échantillon d'Aluminium.

Après une analyse approfondie, nous concluons que les ondes P et S réfractées ont des comportements différents selon les angles d'incidence. Avant le premier angle critique, l'onde longitudinale P diminue tandis que l'onde transversale S augmente. Entre les deux angles critiques, l'onde P disparaît tandis que l'onde S croît en fonction de l'angle d'incidence. Au-delà du second 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 deux ondes a été fixé à $\theta_{11} = 10^\circ$ pour l'échantillon d'Aluminium.

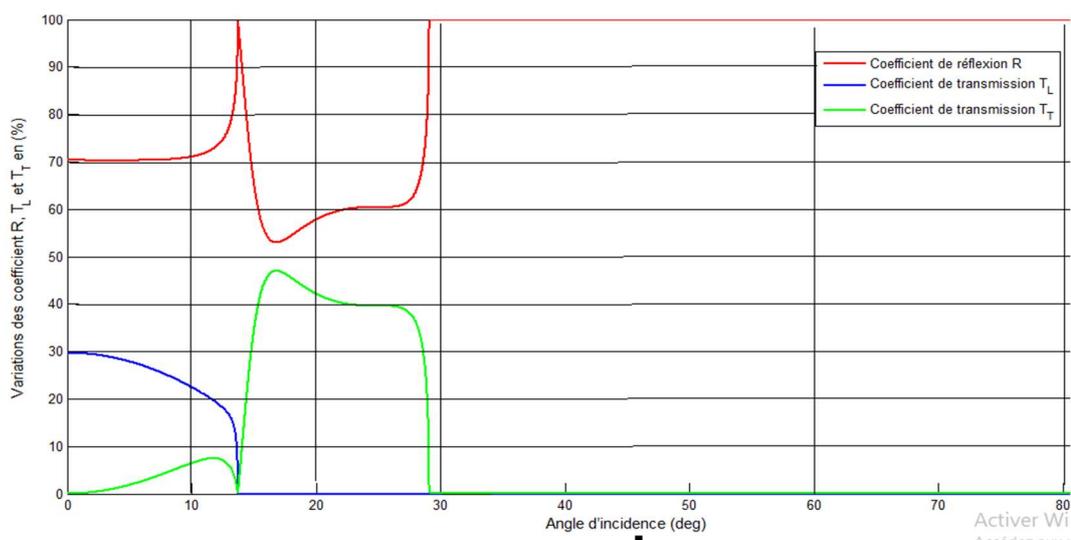


Figure 4.3 : Intensité des coefficients de réflexion et de transmission pour l'Aluminium.

5.1.2 Procédé d'estimation

Les formes d'onde représentées sur la figure (4.4) sont obtenues à partir de mesures effectuées selon trois étapes, en faisant tourner délicatement le transducteur autour de l'échantillon c'est-à-dire en faisant varier l'angle d'incidence délicatement pour pouvoir collecter les deux ondes dans même mesure, tout en supposant une connaissance préalable de l'échantillon à tester. Ces étapes sont

- 1) 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 de l'échantillon).
- 2) L'angle d'incidence est augmenté au fur et à mesure et en utilisant de très petites variations, jusqu'à ce que le premier écho disparaisse et qu'un deuxième peut apparaître 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.
- 3) 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 critique 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

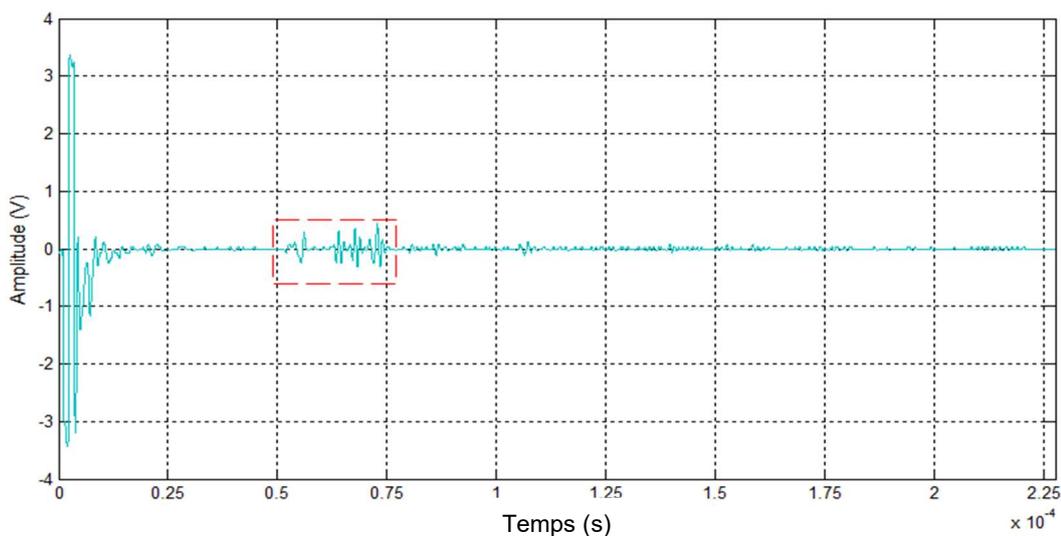
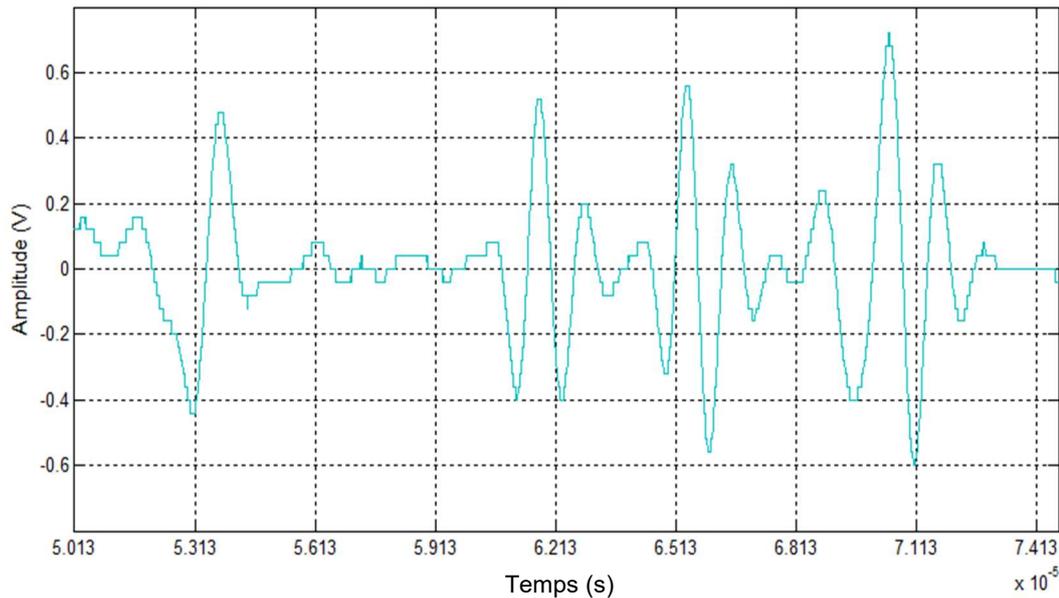


Figure 4.4 : Signal expérimental recueilli pour l'Aluminium.

On montre dans la Figure (4.5) un zoom de la partie encadrée dans la figure (4.4). On obtient ainsi une vue rapprochée des différents échos rétrodiffusés réfléchis.



. **Figure 4.5** : Zoom des ondes réfléchies longitudinale et transversale pour l'Aluminium.

On voit clairement que les échos réfléchis sont superposés et contaminés par des bruits additifs, et seules quatre impulsions peuvent être identifiées de manière distincte

- Le premier écho représente l'écho de la face avant du prisme figure (4.7).
- Le deuxième écho représente l'onde P figure (4.8).
- Le troisième représente les multiples ondes de réflexion figure (4.9) et le dernier représente l'onde S convertie figure (4.10).

Ces échos ultrasonores rétrodiffusés ont été analysés afin de valider le système de mesure proposé. Il convient de noter que la mesure du temps d'arrivée a été affectée par le bruit additif superposé aux ondes ultrasonores P et S. Par conséquent, le signal a été amplifié à 40 dB, filtré avec un filtre passe-bas (fréquence de coupure de 10 MHz) pour éviter le bruit haute fréquence et visualisé avec l'oscilloscope numérique. La figure (4.5) montre clairement les échos mesurés et réfléchis par l'échantillon d'Aluminium. L'écho avant peut être observé avec un retard approximativement égale à 53,40 μ s, l'écho réfléchi pour l'onde longitudinale P est visible à 61,80 μ s. Le temps d'arrivée de l'écho correspondant aux ondes de

réflexion est à 65,70 μs et enfin, l'onde transversale S réfléchie arrive à l'instant approximatif égal à 70,50 μs .

Les résultats de simulation de l'application de l'algorithme EM aux échos rétrodiffusés expérimentaux sont affichés sur la figure (4.6). On peut voir clairement que les signaux ultrasonores traités présentent des formes d'ondes claires et que les échos obtenus sont fidèlement reproduits.

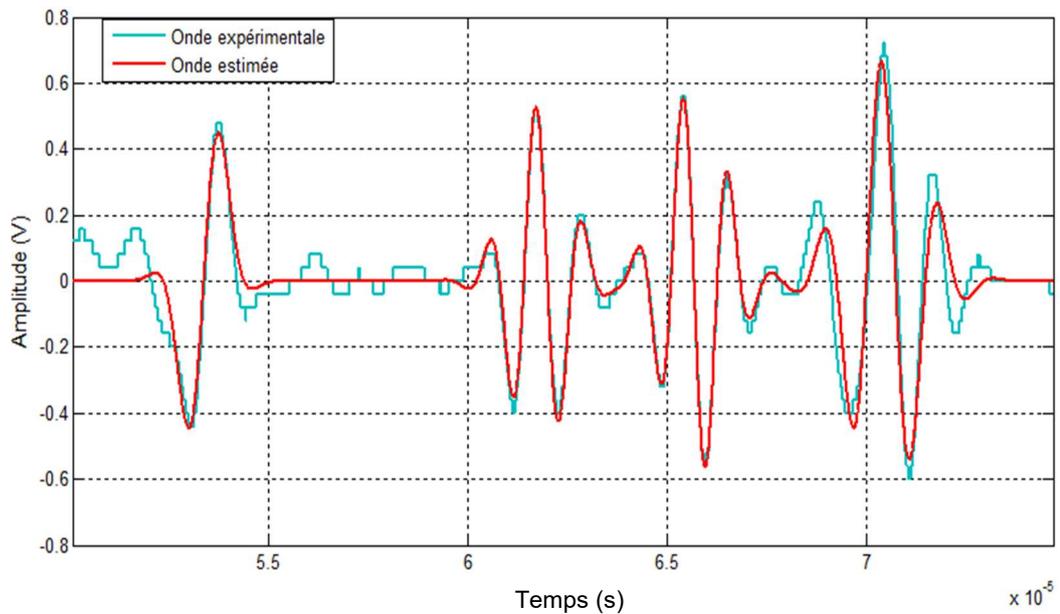


Figure 4.6 : Superposition des signaux expérimental et estimé pour l'Aluminium.

Les quatre figures consécutives suivantes montrent des représentations plus détaillées de chaque onde séparée pour l'Aluminium

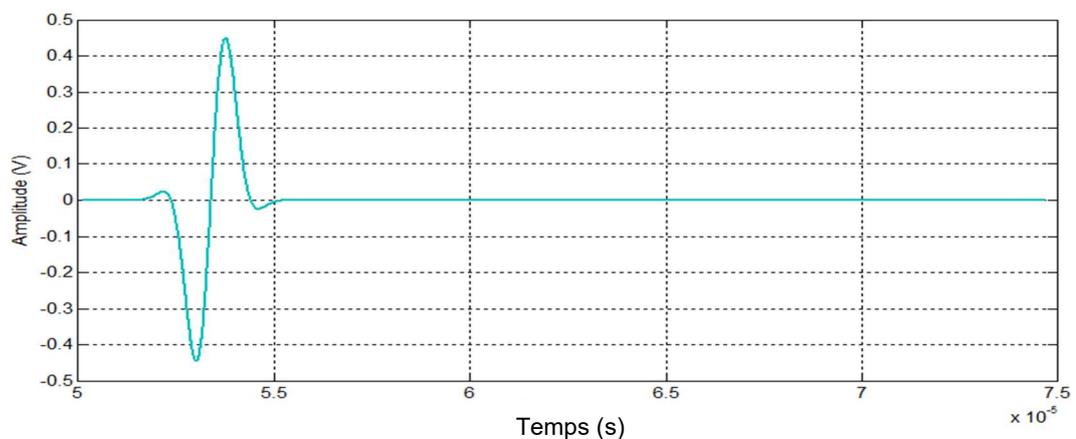


Figure 4.7 : Écho de la face avant du prisme.

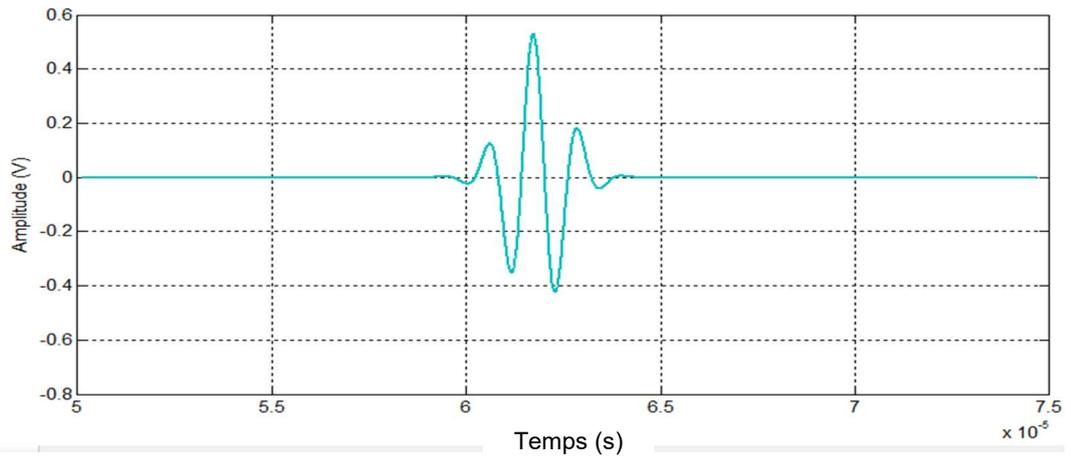


Figure 4.8 : Écho réfléchi pour l'onde longitudinale.

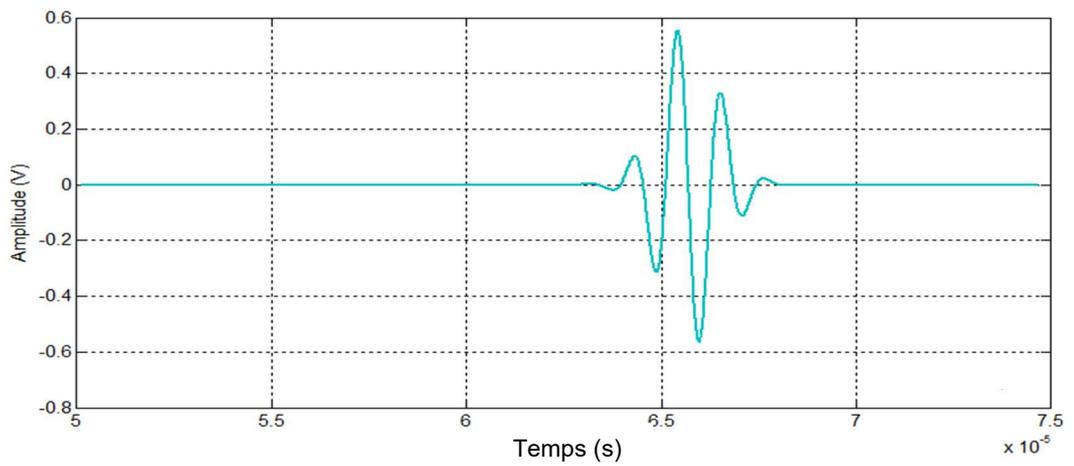


Figure 4.9 : Écho réfléchi pour plusieurs ondes de réflexion.

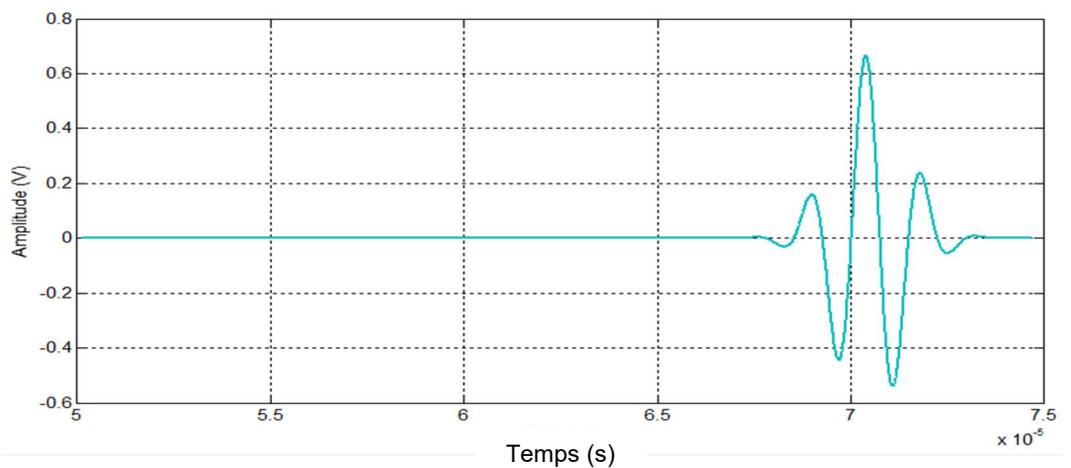


Figure 4.10 : Écho réfléchi pour l'onde transversale.

Les résultats d'estimation des paramètres, calculés par l'algorithme EM sont listés dans le tableau suivant

	Facteur de bande passante (MHz) ²	Temps d'arrivée (μs)	Fréquence centrale (MHz)	Phase (rad)	Amplitude (v)
Écho du prisme avant	2.171	53.340	0.474	4.698	0.681
Écho réfléchi pour l'onde longitudinale	0.937	61.810	0.836	0.465	0.533
Écho réfléchi pour plusieurs ondes de réflexion	0.623	65.710	0.862	7.934	0.599
Écho réfléchi pour l'onde transversale	0.593	70.500	0.674	0.492	0.671

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

La figure (4.11) montre les emplacements temporels et les amplitudes des échos rétrodiffusés pour l'échantillon d'Aluminium.

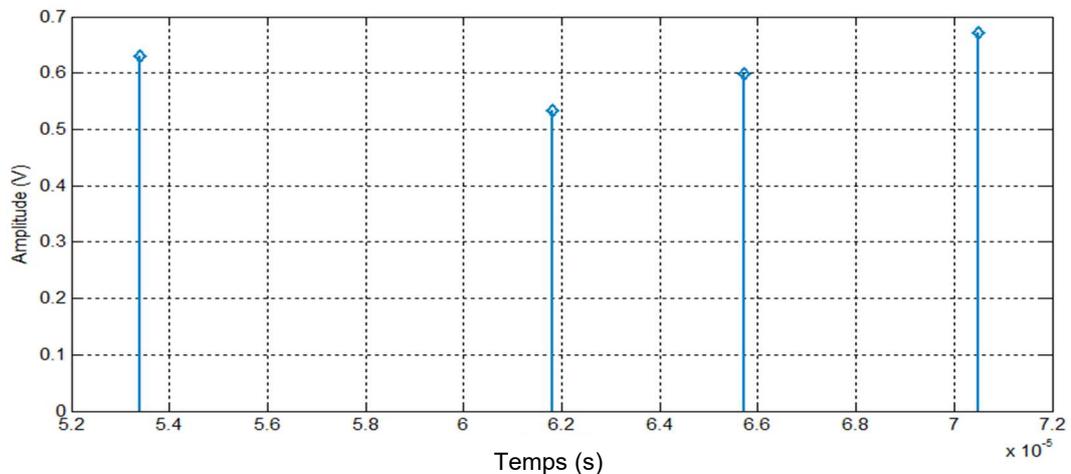


Figure 4.11 : Localisation temporelle et amplitude des échos rétrodiffusés pour L'Aluminium.

A partir de cette localisation temporelle des différents échos, notamment ceux correspondant aux ondes de compression et de cisaillement, les temps d'arrivée peuvent être déterminés et par conséquent, les vitesses des ondes ultrasonores P et S peuvent être facilement évalués d'après l'équation (4.1). Le tableau (4.2) montre les valeurs correspondant aux différents constants élastiques à partir des équation (4.4) et (4.5).

Vitesse longitudinale $c_p(m/s)$	Vitesse transversale $c_s(m/s)$	Densité $p(kg/m^3)$	Coefficient de Young $E(Gpa)$	Coefficient de Poisson σ
6071	2947	2750	92.937	0.345

Tableau 4.2 : Valeurs des Paramètres estimés pour l'Aluminium.

Les vitesses des ondes longitudinales P et transversale S sont calculées à partir de l'évaluation du temps d'arrivée pour l'échantillon d'Aluminium comme indiqué par la formule (4.1). La précision des mesures est déterminée par l'erreur d'estimation de l'heure d'arrivée. En conséquence, la précision des mesures est supérieures à 0,5% pour la densité et à 1,5% pour les vitesses des ondes P et S, ce qui est bien sûr lié à la base de temps choisie. La valeur de 1,5% est calculée à partir des données de la figure (4.6). En guise de conclusion, on peut dire que l'estimation des vitesses des ondes P et S et les propriétés élastiques sont en bon accord avec les valeurs manufacturées.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé la technique de prisme pour caractériser un matériau. On a considéré le spécimen : un échantillon homogène d'Aluminium (sans défaut) sous forme de prisme. On a procédé ensuite à la détermination des vitesses d'ondes longitudinale et transversale à partir du calcul du temps de vol dans le spécimen.

On a décrit par la suite, l'équipement de laboratoire qui a été validé pour la mesure des paramètres ultrasonores du matériau homogène. Le système est basé sur la technique du prisme et l'application de l'algorithme de maximisation d'espérance.

Pour une valeur spécifique de l'angle d'incidence de l'émetteur, les échos rétrodiffusés sont représentés par des échos qui sont : l'écho avant du prisme, l'onde P réfléchi, l'écho réfléchi des ondes de réflexion et enfin l'onde S.

L'algorithme de maximisation EM a été appliqué pour estimer les vitesses des ondes correspondantes. L'expérience a été réalisée sur un échantillon d'aluminium en forme pour démontrer là l'efficacité de ce système de mesure proposé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était d'introduire des outils adaptés pour l'estimation des paramètres des signaux ultrasonores, pour évaluer les propriétés élastiques d'un matériau homogène. Le Principe est basé sur la technique du prisme et l'algorithme de maximisation d'espérance Pour une valeur spécifique de l'angle d'incidence de l'émetteur.

Dans un premier temps, nous avons présenté le contrôle non destructif, on a exposé les différentes techniques passant par leurs inconvénients et leurs avantages. Après, on a focalisé notre étude sur le contrôle non destructif par ultrasons. On a donné une vue générale sur les notions de base de la propagation ultrasonore afin de mettre en évidence leur utilisation dans le contrôle non destructif des matériaux. Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages tels que la facilité de mise en œuvre.

De plus, on a expliqué la théorie se rapportant à l'algorithme EM et on a vu que cette technique est utilisée pour calculer les estimateurs du maximum de vraisemblance lorsque des données sont manquantes.

Une expérience, sur un échantillon d'Aluminium en forme de prisme, a été réalisée pour démontrer l'efficacité du système de mesure proposé. Les échos émis et reçus sont générés en utilisant le même transducteur. Les échos recueillis sont, par la suite, estimés en utilisant l'algorithme EM et séparés, afin d'extraire les paramètres élastiques à partir des vitesses, longitudinale et transversale, évaluées.

Les principaux avantages de ce travail sont que toutes les constantes élastiques ultrasonores peuvent être extraites à partir d'un seul test expérimental, en ce sens que les deux ondes, de compression et de cisaillement, peuvent être collectées ensemble en utilisant une certaine valeur de l'angle d'incidence.

Les résultats obtenus, à partir des échos réfractés, sont encourageants et confirment bien le principe de la technique du prisme et l'efficacité de l'algorithme proposé. comme perspectives à ce travail, on peut envisager l'étude d'un autre matériau et aussi l'application d'autres estimateurs tel que les algorithmes génétiques.

Références

- [1] T. Voigt, S.P. Shah, « Properties of early age Portland cement mortar monitored with shear wave reflection method », ACI Master. J. 101 (2004).
- [2] G. Ye, k. Van Breugel, A.L.A. Fraaij, « experimental study on ultrasonic pulse Velocity evaluation of the microstructure of materials at early age », HERON 46 (2001) 161-167.
- [3] B. Hannouf, A. Zeddou, « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », Thèse de Magister, Université de Jijel, Juin 2018.
- [4] M.S. Soudani, « Contrôle non destructif par ultrasons analyse et diagnostic », Thèse de Magister, Université Cheikh, Arbi Tébessi, Tébessa, 2009.
- [5] CAST – Contrôle non destructif par ultrasons, niveau III pour ingénieur, INSA de Lyon, 1986.
- [6] M. VIENS, « Essais mécanique et contrôle non destructif », Université du Québec, Ecole de Technologie Supérieure.
- [7] J. DUMONT-FILLON, « Contrôle non destructif (CND) », Techniques de L'ingénieur R1400, 1996, pp.1-42.
- [8] M. WANIN, « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1, et partie 2 », Techniques de L'ingénieur R4130 et R4132, 1996, pp. (1-26 et 1-16).
- [9] M. LACROIX, « Essais non destructifs », Techniques de L'ingénieur M110 et M111, juillet 1996, pp.1-21.
- [10] <https://www.techno-science.net/definition/4548.html>.

- [11] O. BENSALAH, « Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentiel », Université de M'sila, Mémoire de Master, 2012/2013.
- [12] C. NOCKEMANN et C. BELLON G.-R. TILLACK, « X-ray modeling for industrial applications. NDT & E International », Octobre 2000.
- [13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_non_destructif, Octobre 2020.
- [14] M. Broniatowski, H. Gayraud, « Le Contrôle non destructif par ultrasons », LSTA-Laboratoire de Statistique Théorique et Appliquée, Université Pierre et Marie Curie ISUP-LSTA, 2014.
- [15] <https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/Chapitre-7/Sous-section-1-1-4.html>.
- [16] E. Dieulesaint et D. Royer, « Ondes élastiques dans les solides. Tome 1 Propagation libre et guidée », Elsevier Masson, 1996, 328 p.
- [17] V. Perrier, « Application de la théorie des ondelettes », Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [18] N. GRENEIR-GH, Pellegrin Tripole-Bordeaux, « Imagerie ultrasonore Edition Eyrolles », France 2003.
- [19] H. Merdjana, « Contribution à La Résolution Des problèmes Liés à La Détection, Modélisation Et Caractérisation Des Défauts par Des Traitements De Signaux », Thèse de Doctorat, Université de Jijel, 2018.
- [20] H. Sadiou, « Estimation des signaux ultrasonores pour la caractérisation des matériaux », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2018.
- [21] 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.

- [22] R. Demirli and J. Saniie «Model-Based estimation of Ultrasonic echoes Part 1: analysis and algorithms », IEEE Trans. Ultrason ferroelect, freq contr, vol. 48, No. 3, 2001, pp.787-802
- [23] R. k. Mehar, D. E. Stepner, and J. S. Tyler, «Maximum likelihood identification of aircraft stability and control derivatives», Journal of aircraft, Vol. 11, No. 2, 1974, pp. 81-89.
- [24] A. Benammar, « Méthodes de traitement des signaux ultrasonores basses sur là de convolution dans la détection des défauts », Thèse de Doctorat en Electronique, Université Saâd Dahlab. Blida, Juin 2010.
- [25] S. M. Kay, « Fundamentals of Statistical Signal Processing », Prentice Hall, 1993.
- [26] R. Demirli and J. Saniie, « Model-Based estimation of Ultrasonic echoes Part 2: analysis and algorithms », IEEE Trans. Ultrason ferroelect, freq contr, vol. 48, No. 3, 2001, pp.787-802.
- [27] G. Celeux, et D. Diebolt, « The SEM algorithm: a probabilistic teacher algorithm derived from the EM algorithm for the mixture problem », Computational Statistics Quarterly (1985).
- [28] M. Isabelle, « Application de l’algorithme EM au modèle des risques concurrents avec causes de panne masquées », Mémoire de Master, Université Laval Québec, Aout 2005.
- [29] M. Mr Chater, « Sélection des services web A base de l’algorithme d’espérance maximisation », Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen, Mémoire de Master 2015.
- [30] M. Feder and E. Weinstein, « Parameter estimation of superinposed signals using the EM algorithm », IEEE Trans. acoust. speech signal processing, vol. 36, No. 4, pp. 477–489, Apr. 1988.

- [31] H. Merdjana, A. Boukabou, M. Grimes, « A high accuracy ultrasonic measurement system using the prism technique », *Measurement*, Vol. 114, 2018, pp. 195-202.

- [32] A. Bouhadjera, C. Bouzrira, « High-frequency ultrasonic testing of young cement-based materials using the prism technique », *NDT & E Int.*, Vol. 38, 2005.

