

Université 8 Mai 1945 - Guelma
Facultés des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de MASTER
Option : Maintenance Industrielle

Présenté par : **ZEDDAM Mabrouk**

**Localisation des défauts dans les structures par
Ultrasons**

Sous la direction de :
Pr OUELAA Nouredine

Année Universitaire : 2014/2015

Remerciements

Ce travail a été accompli au Laboratoire Mécanique et Structure LMS de l'Université 8 Mai 1945 – Guelma.

Je tiens tout d'abord à remercier en premier lieu Allah, le dieu de l'Univers.

Je tiens à remercier vivement le Professeur OUELAA Nouredine de l'Université de Guelma, pour avoir proposé et diriger les travaux de cette étude. Je le remercie pour son accueil au laboratoire LMS, je le remercie aussi pour son aide et ses encouragements et ses conseils tout au long de mes études. C'est donc pour moi un grand plaisir qu'il ait accepté.

Je remercie Dr BADIDI BOUDA Ali, Maître de recherche et directeur de la division de Caractérisation et d'Instrumentation du Centre de recherche scientifique et technique en Soudage et Contrôle - CSC Cheraga, pour m'avoir accueilli dans laboratoire d'étalonnage des équipements de CND.

Merci également aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et évaluer ce mémoire.

Je remercie aussi tous les enseignants du département Génie Mécanique de l'université de Guelma, pour leurs contributions à notre formation.

Je remercie le chef de département Génie Mécanique pour m'accepter de suivre l'étude en Master 2, et me faciliter l'inscription.

Merci à tous mes collègues étudiants.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidés, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Mabrouk Z.

Sommaire

Liste des figures, photos, et tableaux

Notations et symboles

Introduction 01

Chapitre I. Synthèse bibliographique des travaux 03

Chapitre II : Bases physiques des ultrasons et le principe de contrôle 10

II.1. Types d'ondes 10

II.1.1. Les ondes longitudinales 10

II.1.2. Les ondes transversales 10

II.1.3. Les ondes de surface (ondes de Rayleigh) 11

II.1.4. Les ondes de plaques (ondes de Lamb) 11

II.2. Propagation des ultrasons 12

II.2.1. Les modes de propagation des ondes ultrasonores 12

II.2.2. Description du faisceau ultrasonore émis par un transducteur 12

II.2.3. Notion de l'impédance acoustique 14

II.2.4. Atténuation des ondes ultrasonores 15

II.2.5. La réflexion et la réfraction des ultrasons 16

II.3. Génération des ultrasons 17

II.3.1. La piézoélectricité 17

II.3.2. Les Palpeurs ultrasonores 17

II.4. Les méthodes de contrôle par ultrasons 18

II.4.1. Contrôle par réflexion 18

II.4.2. Contrôle par transmission 19

II.5. Les différentes techniques de contrôle par ultrasons 19

II.5.1. Contrôle par contact 19

II.5.2. Technique de contrôle par immersion 19

II.5.3. Contrôle automatique des grandes structures par Ultrasons 19

II.5.4. La technique TOFD 20

II.6. Les modes de représentation 20

Représentation A 20

Représentation B 20

Représentation C 20

Représentation 3D 21

Chapitre III : Les méthodes de recherche et évaluation des défauts 22

III.1. Défauts typiques des soudures 22

III.2. Principe de la détection d'un défaut 23

III.2.1. Localisation des défauts (méthodes générales) 23

Localisation avec palpeur droit 23

Localisation avec palpeur d'angle 23

Pitch & Catch 23

III.2.2. Détermination de la position des défauts dans la soudure	24
1. Le graphique	25
2. Le calcul direct	25
III.2.3. Dimensionnement des défauts	26
1. Méthode à -6 dB	26
Dimensionnement à -6 dB (palpeur droit)	27
Dimensionnement à -6 dB (cas du palpeur d'angle)	27
2. Méthode par comparaison à des défauts types (courbe DAC)	28
DAC Palpeurs droits	28
DAC Palpeurs d'angles	29
3. Méthode par comparaison avec l'écho de fond	31
4. L'effet goniométrique-miroir	31
III.2.4. Distinction entre défaut volumique et non volumique	32

Chapitre IV : Localisation et Identification des Défauts par le Contrôle non Destructif

Étude expérimentale	33
VI.1. Dispositif de contrôle ultrasonore	33
VI.2. Paramètres de réglage et d'étalonnage d'un appareil à ultrasons	34
VI.2.1. Types d'étalons	34
VI.2.2.Étalonnage	34
VI.2.3.Étalonnage de l'appareil en ondes transversales	36
VI.2.4. Détection de défauts dans le bloc étalon	37
VI.3. Contrôle de soudures	42
VI.3.1. Contrôle des zones adjacentes par ondes longitudinales	42
VI.3.2. Lignes de balayage pour le contrôle en ondes transversales	42
VI.4. Localisation et estimation des défauts de soudure dans une pièce	43
VI.4.1. Localisation et estimation du premier défaut	44
VI.4.2. Localisation et estimation du deuxième défaut	47
VI.4.3. Résultats de mesures	49
VI.5. Conclusion et Interprétation des résultats	49
 Conclusion	 50
Références Bibliographiques	51

Liste des figures, photos, et tableaux

Chapitre I

Fig. I.1 : Principe de la méthode des rechargements de rails	04
Fig. I.2 : Traducteur multiéléments linéaire pour contrôle des rechargements de rails	04
Fig. I.3 : Illustration d'une acquisition bruitée (OL 0°, fréquence 5 MHz)	06
a) représentation de type A ;	
b) b) représentation de type B	
Fig. I.4 : Micrographies du matériau	07
a) état de réception ;	
b) b) après traitement thermique à 1150°C	
Fig. I.5 : Evolution des échos de fond successifs pour un contrôle à 5 MHz	08
a) matériau à l'état de réception avec taille de grains 220 µm ;	
b) taille de grains 450 µm	
Fig. I.6 : Exemple de microstructure des soudures étudiées	09
(a) Macrographie	
(b) et (c) description en sous-domaines homogènes orthotropes	
(d) Simulation de la propagation	

Chapitre II

Fig. II.1 : Ondes longitudinales	10
Fig. II.2 : Ondes transversales	10
Fig. II.3 : Ondes de Rayleigh	11
Fig. II.4 : Ondes de Lamb - a) mode symétrique, b) mode antisymétrique	11
Tableau. II.1 : Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores	12
Fig. II.5 : Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores	12
Fig. II.6 : Intensité acoustique sur l'axe du faisceau (champ rapproché et champ éloigné)	12
Fig. II.7 : L'influence de fréquence et le diamètre de source US sur l'angle d'ouverture	13
Fig. II.8 : La variation de l'amplitude de l'onde émise en fonction de la distance parcourue	15
Fig. II.9: Réflexion et réfraction des ondes ultrasonores en incidence oblique	16
Fig. II.10: Structure d'un palpeur ultrasonore	17
Fig. II.11: Principe de contrôle ultrasonore	18
Fig. II.12 : Contrôle par réflexion	18
Fig. II.13 : Contrôle par transmission	19
Fig. II.14 : Principe de la technique T.O.F.D	20
Fig. II.15 : Les différents modes de présentation d'un sondage à ultrasons	21

Chapitre III

Fig.III.1 : Défauts dans une soudure	22
Fig. III.2 : Localisation avec palpeur droit	23
Fig. III.3 : Localisation avec palpeur d'angle	23
Fig. III.4 : Localisation par perte de signal (Pitch & Catch)	23
Tableau III.1: le choix de l'angle de réfraction du palpeur en fonction de l'épaisseur de la tôle ...	24

Fig. III.5 : Positionnement d'un défaut par procédé graphique	25
Fig. III.6 : Positionnement d'un défaut par le calcul direct	25
Fig. III.7 : Dimensionnement d'un défaut long par la méthode à -6 dB	27
Fig. III.8 – Détermination des dimensions d'un défaut avec un palpeur d'angle	27
Fig. III.9 : Cale étalon pour palpeur droit	28
Fig. III.10 : Réseau de courbes DAC	28
Fig. III.11 : Cale étalon pour palpeur d'angle	29
Fig. III.12 : Mise en œuvre pratique pour palpeur d'angle	29
Fig. III.13 : Cale particulière pour traducteur d'angle	30
Fig. III.14 : Conversion de mode de vibration pour palpeur d'angle	30
Fig. III.15 : Principe de l'effet goniométrique-miroir	31
Fig. III.16 : l'effet goniométrique-miroir pour la détection de la défectuosité plane	31
Fig. III.17 : distinction entre défauts volumiques et non volumiques	32
a)- défaut ponctuel b)- défaut allongé	

Chapitre IV

Photo .IV.1 : Dispositif de contrôle par ultrasons (labo. LMS)	33
Photo. IV.2 : Types d'étalons	34
Photo. IV.3 : Étalonnage de l'appareil à ultrasons	36
Photo. IV.4 : Recherche d'un trou de diamètre 50mm sur la cale	37
Photo. IV.5 : Recherche de l'entaille sur la cale	38
Photo. IV.6 : Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale	39
Photo. IV.7 : Recherche de l'entaille sur la cale : mesure ½ bond	40
Photo. IV.8 : Recherche de l'entaille sur la cale : mesure 1 bond	41
Fig. IV.1 : Vérification de l'absence de défauts sur la zone adjacente de soudure	42
Fig. IV.2 : Zone de balayage	42
Photo IV.9 : La pièce avant le soudage	43
Photo IV.10 : La pièce après le soudage	43
Fig. IV.3 : Repérage de la pièce soudé	43
Photo. IV.11 : Recherche du premier défaut	44
Fig. IV.4 : Schéma représentatif de mesure suivant l'axe y	45
Fig. IV.5 : Schéma représentatif de mesure suivant l'axe x	46
Photo .IV.12 : Recherche du deuxième défaut	47

Notations et symboles

	la longueur d'onde
V	la vitesse de propagation des ultrasons dans le milieu considéré
V_L	la vitesse des ondes longitudinales
V_T	la vitesse des ondes transversales
V_R	la vitesse des ondes de Rayleigh
t	le temps de vol des ondes ultrasonore
E	module d'Young
†	le coefficient de poisson
...	la masse volumique
	l'angle d'étalement ou de divergence du faisceau
N	la distance limite du champ proche
D	le diamètre de la source (le diamètre du palpeur)
Z	l'impédance acoustique
A₀	l'amplitude de l'intensité acoustique incidente
A_R	l'amplitude de l'intensité acoustique réfléchie
A_T	l'amplitude de l'intensité acoustique transmise
R	le coefficient de réflexion
T	le coefficient de transmission
r	le coefficient d'atténuation des ondes ultrasonore
P	le parcours ultrasonore mesurée sur l'écran
d	la distance entre le défaut et le palpeur
h	la profondeur à laquelle se trouve le défaut
	l'angle de réfraction du faisceau ultrasonore
H	l'amplitude de l'écho
H_{max}	l'amplitude maximal de l'écho affiché sur écran
H_{max}/2	la moitié de l'amplitude maximal de l'écho affiché sur écran

Introduction

Le contrôle par ultrasons est l'un des méthodes de contrôle non destructif. Son principe repose sur la propagation des ondes ultrasonores dans le matériau pour détecter et localiser les défauts éventuels de plus petites dimensions. La propagation d'une onde n'implique pas le déplacement de la matière, mais le déplacement de l'énergie. En envoyant une quantité d'énergie dans le matériau, et de récupérer cette énergie qui devient alors porteuse d'informations.

Cette méthode est utilisée dans l'ensemble des secteurs industriels, surtout pour contrôler des pièces à coût de production élevé, ou des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (pétrochimie, nucléaire, canalisation de gaz, l'aéronautique, ... etc.)

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques de fréquence supérieure à 20 *kHz*. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde. Les fréquences utilisées lors d'un contrôle par ultrasons ne comprennent pas toute la gamme des ultrasons, mais varient entre 0.5 à 15 MHz. Cela n'est pas un hasard, mais cette gamme de fréquence réalise un bon compromis entre l'absorption et la détection des petits défauts. La limite inférieure de 0.5 MHz ne permet pas de détecter les défauts qui ont une taille inférieure à la longueur d'onde. Par exemple, une onde d'une fréquence de 0.5 MHz ne permet pas de détecter les défauts qui ont une taille inférieure à 12 millimètres dans l'acier avec $V_L=5900\text{m/s}$ (la longueur de l'onde ultrasonore dans un milieu est reliée à une fréquence donnée par la relation $\lambda = V/f$), avec V est la vitesse des ultrasons dans le milieu en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, et f la fréquence d'émission en Hz.

La limite supérieure de 15 MHz permet la détection des défauts de plus petites tailles, mais l'augmentation de la fréquence impose alors l'augmentation de l'absorption, et donc de la limitation de la profondeur accessible aux ultrasons.

Le contrôle par ultrasons présente par rapport aux autres techniques, les avantages suivants :
Aucun danger des ultrasons en comparaison avec les rayons x, grande sensibilité de contrôle, pouvoir de pénétration important, résultat de contrôle en temps réel. Lors du contrôle ultrasonore, on doit résoudre différents problèmes tels que : La détection des défauts, la localisation des défauts, l'identification du type du défaut, le dimensionnement des défauts, la décision d'acceptation ou de refus du défaut.

Le mémoire est composé d'une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion.

L'introduction précise le cadre et le but de travail.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique de certains travaux de recherche dans le domaine CND par ultrasons.

Le deuxième chapitre traite de la théorie des ultrasons et les bases physiques de contrôle par ultrasons, et le comportement des ondes ultrasonores aux interfaces, ainsi de la génération des

ultrasons et les différents types de palpeurs usuels. Ce chapitre comprend aussi les méthodes de contrôle par ultrasons, et les différentes techniques de mise en œuvre dans le contrôle ainsi les différents modes de propagation.

Le troisième chapitre consacre à la recherche et localisation, et dimensionnement des défauts. On a bien détaillé certaines méthodes de localisation et de dimensionnement des défauts dans les pièces soudées. Ces techniques s'avèrent efficaces pour la détection les défauts éventuels à l'intérieur d'une pièce sans l'endommager.

Le quatrième chapitre consacre à l'étude expérimentale, il traite de la recherche et dimensionnement des défauts dans les pièces métalliques et dans la soudure. Les mesures sont réalisées sur une cale étalon, et une éprouvette en acier contenant deux défauts de soudure.

Cette étude se termine par une conclusion.

Synthèse bibliographique

Nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine de contrôle non destructif par ultrasons, dont le but est de détecter et de localiser et d'évaluer les défauts dans les pièces et les structures. L'ensemble des travaux se sont basés sur l'étude de l'atténuation des ondes ultrasonores dans le matériau, ou le développement des techniques de traitement de signaux afin de réaliser des outils de mesures adaptés pour le suivi du comportement des structures.

Dans le présent travail, une synthèse de certains travaux de recherche dans le domaine CND par ultrasons est présentée.

S. Mabrouk [1] dans son mémoire de Magister qui consacré sur la compréhension des défauts associés à la fabrication des pipelines dans l'entreprise ALFAPIPE à Annaba, et l'étude de la fiabilité. Selon lui, lors de procédé de fabrication, différents types de défauts sont observés et qui sont soumis à la norme d'acceptation de défauts. Dans ce mémoire, elle concentre sur les méthodes des rayons X et celle de la méthode par ultrasons. Elle présente une étude statistique relative aux défauts détectés dans les pipelines, afin de préparer une base de travail pour le calcul de fiabilité. D'après leur étude, elle trouve que les défauts obéissent à une loi normale dans leur distribution. Puis utiliser un logiciel Phimeca pour traiter une étude paramétrique qui permet de voir l'influence de chaque paramètre considéré sur les autres et le calcul de l'indice de fiabilité β .

P. Bolland [2]. Dans sa thèse de doctorat, il a présenté l'étude de détection, caractérisation et localisation de défauts en imagerie ultrasonore tridimensionnelle. Il a utilisé la technique T.O.F.D basée sur l'exploitation des ondes diffractées par les extrémités de fissures, et avec une approche basée sur la transformée de Hough pour la reconnaissance de formes et de courbes en traitement d'images (recherche de formes paramétrées dans une image). Donc, le but est de développer une méthode pour détecter et localiser des défauts plans (fissures).

Dans son étude, il a développé un algorithme qui permet d'interpréter au mieux les informations contenues dans une acquisition des données de type tridimensionnelles, les données sont constituées d'une succession d'images représentant des plans parallèles du volume inspecté. Les algorithmes réalisés utilisent pour cela les informations basées sur la forme et le contour d'un défaut dans une image et ses plans voisins. Une recherche de forme tridimensionnelle permet de détecter des défauts partiellement visibles par un opérateur. Le traitement tridimensionnel de données issues de CND, permet d'exploiter de nombreuses informations contenues dans les acquisitions et évite les inspections multiples pour détecter la présence d'un défaut. Et pour cela, il exploite le traitement bidimensionnel mis au point afin de réaliser un traitement tridimensionnel des données (les informations liant les plans entre eux sont exploitées et combinées à celles contenues dans chaque plan).

Ph. Brédif, et Al [3]. Dans l'article « Développement d'une méthode de contrôle des rechargements de rails ». Un transducteur multiéléments linéaire est utilisé qui déplace uniquement suivant l'axe du rail pendant qu'un balayage électronique est réalisé dans le plan perpendiculaire du rail (figure I.1).

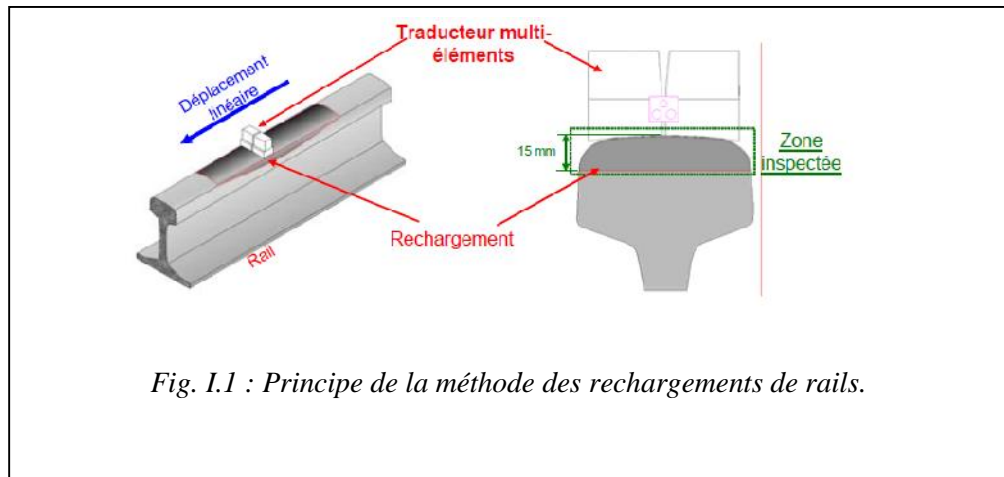


Fig. I.1 : Principe de la méthode des rechargements de rails.

Le transducteur multiéléments de contact qui est développé pour cette application (Figure I.2), présente une forme cylindrique afin de focaliser naturellement les ultrasons dans le plan perpendiculaire du rail. La focalisation dans le plan incident est assurée par l'application de lois de retards. Dans le but de s'adapter au mieux à la surface des rails présentant une géométrie dégradée, le transducteur présente une flexibilité partielle assurée par une articulation centrale, améliorant ainsi le couplage entre le sabot et la surface d'inspection

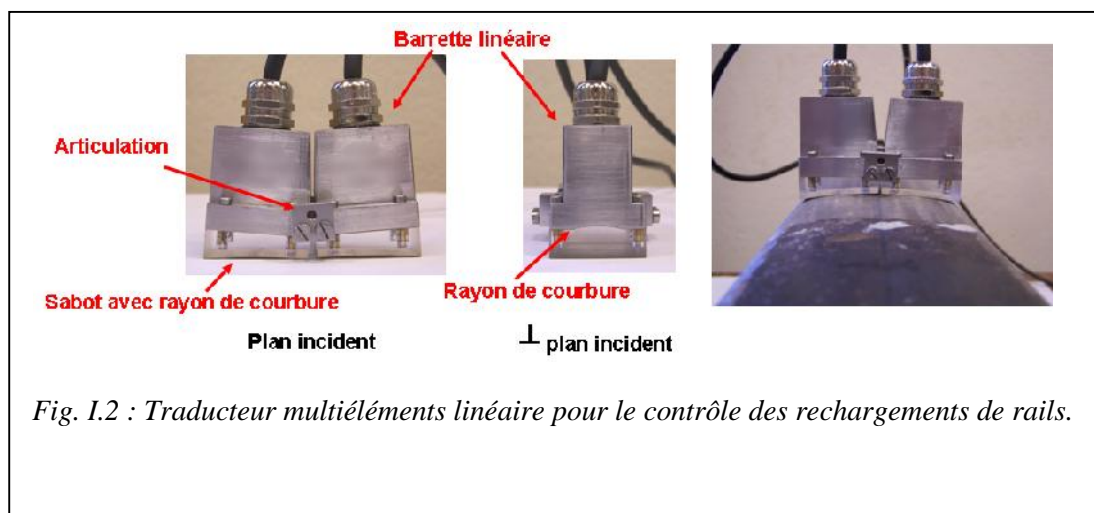
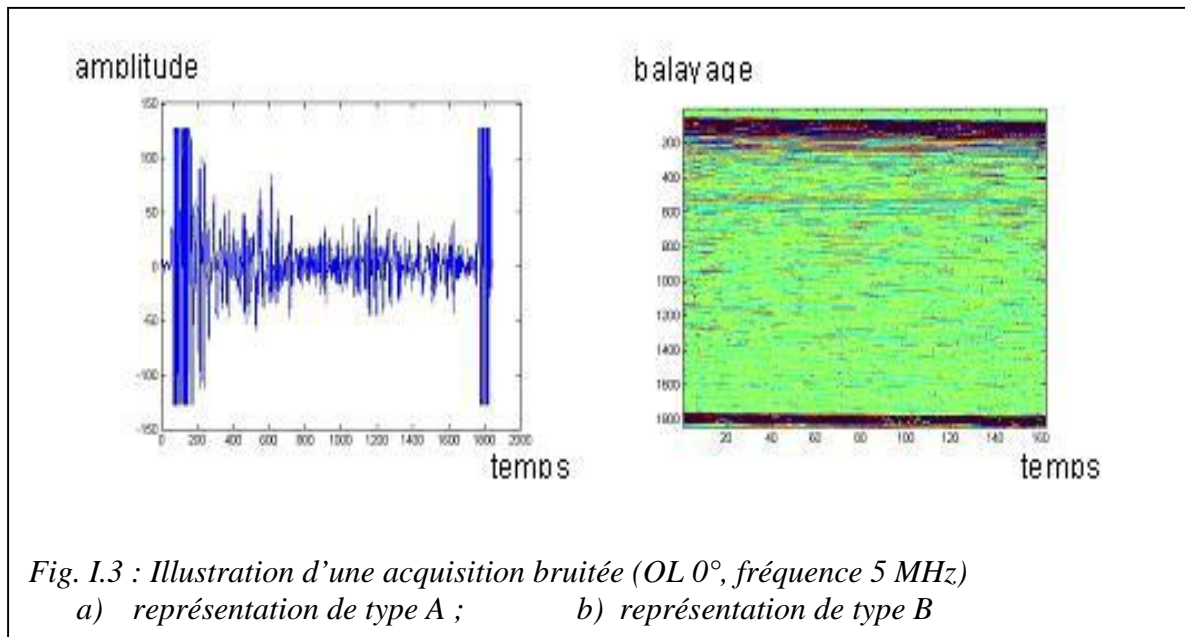


Fig. I.2 : Transducteur multiéléments linéaire pour le contrôle des rechargements de rails.

Plusieurs configurations de contrôle ont été définies à l'aide des outils de simulation du logiciel CIVA afin d'inspecter les différentes régions du champignon du rail. Le transducteur génère ainsi successivement des ondes longitudinale à 0° sous la table de roulement, des ondes longitudinales réfractées pour inspecter les premiers millimètres du rechargement et un balayage angulaire sous chacun des congés latéraux. La sonde est ensuite déplacée le long du rail tout en répétant ces trois configurations d'inspection.

La caractérisation mise en œuvre a pour objectif de localiser les défauts, de les classer suivant leur taille et de déterminer leur concentration par zone. Compte tenu des dimensions de la tache focale du faisceau ultrasonore et des défauts, il n'est pas possible de dimensionner ces derniers par une méthode telle que la méthode à -6 dB. La technique de dimensionnement employée ici est donc basée sur le fait que l'amplitude des échos de défauts est liée à leur taille, en supposant que leur géométrie est assimilable à une sphère. La corrélation entre la taille et l'amplitude est alors établie en utilisant des défauts étalons de dimensions connues (DAC). Cette méthode de dimensionnement peut être mise en œuvre à condition de pouvoir décorrélérer les variations d'amplitude dues à la taille des défauts de celles dues aux champs ultrasonores (effets de champ). Pour ce faire, une technique de traitement de données a été développée et mise en œuvre afin de corriger le second effet. La première partie de ce traitement consiste à définir une DAC (Depth Amplitude Compensation) propre à chaque tir pour compenser les variations de sensibilité du champ en profondeur. La seconde partie du traitement a pour objet de compenser les variations de sensibilité entre les différents tirs par l'application d'une normalisation. Compte tenu du nombre élevé de tirs et de la géométrie du rail, les déterminations de la DAC et de la normalisation entre les tirs ne peuvent être déterminées expérimentalement. Pour ces raisons, les outils de simulation ont été mis en œuvre. Ainsi pour chaque tir, la courbe DAC a été définie en simulant le champ ultrasonore le long du trajet ultrasonore principal. La courbe Amplitude (temps) obtenue de cette manière le long du trajet permet de définir la DAC. Les calculs de simulation fournissent de plus les variations de sensibilité existant entre les tirs. Il est alors possible d'en déduire les facteurs de normalisation applicables entre ceux-ci.

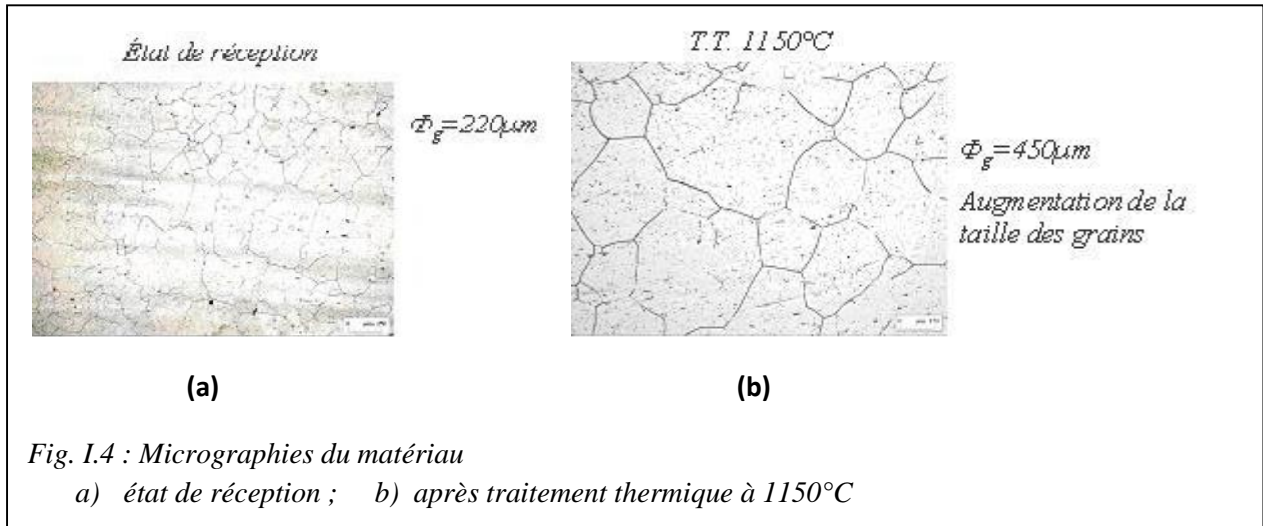
N. Feuilly, et Al [4]. Dans leur étude qui traite le lien entre le bruit ultrasonore rétrodiffusé et la microstructure des matériaux polycristallins. Dans la structure des matériaux polycristallins, et qui peut dans certaines conditions conduire à un phénomène de diffusion de l'onde ultrasonore qui se traduit par une atténuation et un bruit de structure (partie du signal rétrodiffusé interceptée par le transducteur, mode pulse-écho) importants. Les contrôles industriels effectués sur divers composants ont démontré l'importance de ce phénomène pouvant éventuellement conduire à des interprétations erronées : les signaux renvoyés par les défauts peuvent être noyés dans les échos de bruit de structure résultant de l'interaction entre l'onde et le matériau. L'amélioration des performances du contrôle par ultrasons de ces composants passe donc par une compréhension des phénomènes physiques en jeu. Ainsi, il est nécessaire de faire le lien entre les caractéristiques microstructurales des matériaux et les caractéristiques acoustiques du faisceau ultrasonore. Des contrôles industriels sur divers composants ont démontré l'importance de ces phénomènes physiques qui peuvent diminuer les performances de ceux-ci. Dans une première approche, le matériau polycristallin étudié est l'alliage Inconel 600, qui possède une structure isotrope et homogène. Des éprouvettes présentant des tailles de grains différentes ont été caractérisées et analysées expérimentalement, afin de mesurer l'atténuation ultrasonore et le bruit de structure rétrodiffusé. Le bruit rétrodiffusé correspond à la partie du signal ultrasonore rétrodiffusé par la structure et interceptée par le transducteur. Sur une représentation de type B (figure I.3), elle se présente sous la forme d'échos d'amplitude plus ou moins importante.



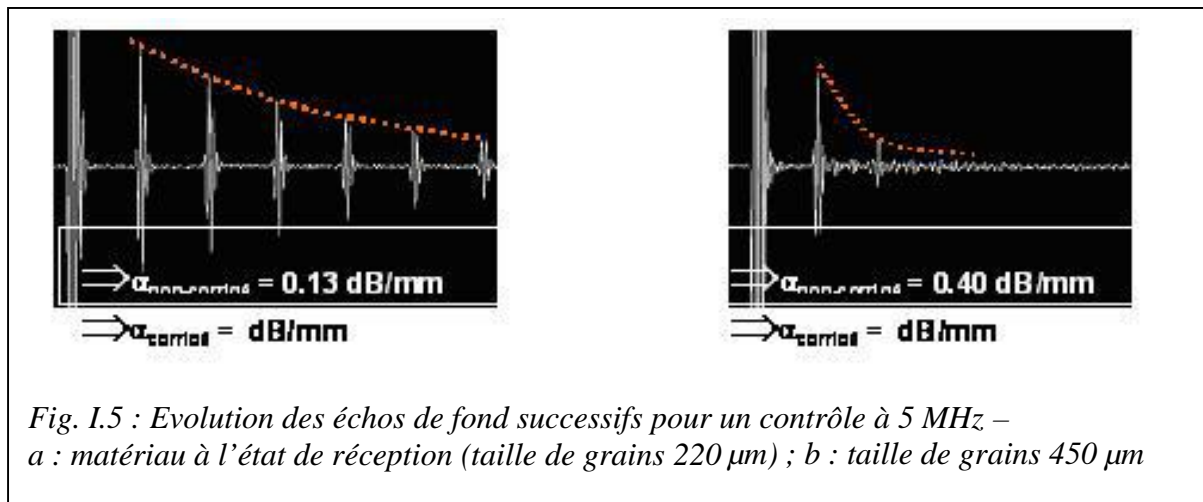
Les hypothèses simplificatrices pour modéliser l'interaction du faisceau ultrasonore avec la microstructure du matériau:

- Le matériau étudié est isotrope et homogène ;
 - L'effet de divergence du faisceau est négligé devant le phénomène de diffusion, dans le calcul de l'atténuation ;
- Hypothèse de « diffusion simple »
- On se place dans le domaine fréquentiel de Rayleigh
 - Les diffuseurs sont faibles (*Approximation de Born* : l'onde incidente est équivalente à l'onde totale en un point) ;
 - Les sauts d'impédance sont faibles entre les différentes phases du matériau étudié.

En fait, l'hypothèse de diffusion simple considère qu'une onde diffusée une première fois par un grain ne sera pas perturbée par la suite. Mais les modèles théoriques proposés sont rarement associés à une validation expérimentale. De plus, l'hypothèse de diffusion simple demande à être vérifiée. Enfin, le phénomène de diffusion est généralement traité sous l'angle de l'atténuation et rarement sous l'angle bruit de structure. Les auteurs ont étudié ce phénomène sous les deux angles en cherchant à les corréler à la microstructure du matériau, sans a priori sur la diffusion simple ou multiple. Ils ont cherché notamment à isoler les phénomènes de diffusion des autres contributions (divergence,...). Une caractérisation fine du matériau est nécessaire pour proposer un modèle de bruit pertinent, et l'influence de la fréquence doit aussi être étudiée. Pour se situer dans l'ensemble des domaines fréquentiels possibles, deux solutions sont envisageables : jouer sur la taille moyenne des grains du matériau ou faire varier la bande fréquentielle des transducteurs. Ils ont choisi dans un premier temps d'étudier un matériau à structure isotrope et homogène. Il s'agit de l'Inconel 600, sous forme de barre laminée à chaud de diamètre 135mm et à matrice austénitique. A l'état de réception, la taille moyenne des grains est estimée à 220µm.



Une décroissance exponentielle de l'amplitude des échos de fond successifs. Pour remonter à l'atténuation par diffusion du matériau, il faudra appliquer des corrections à la valeur mesurée à partir de la décroissance des échos successifs. Ces corrections ont pour objet de prendre en compte les coefficients de transmission et de réflexion aux différentes interfaces et la divergence du faisceau en champ lointain. La figure I.5 indique que l'atténuation augmente avec la taille des grains.



M-A. Ploix [5]. Dans sa thèse de Doctorat. Il expose la problématique liée au contrôle non destructif par ultrasons des matériaux anisotropes hétérogènes tels que les soudures multi passes en acier inoxydable austénitique. Le travail consacre sur la mesure de l'atténuation des ondes longitudinales par la technique la plus couramment utilisée pour la caractérisation des matériaux. Elle s'effectue en immersion, en transmission et en incidence normale, et est basée sur la comparaison entre le faisceau propagé dans l'eau et le faisceau ayant traversé l'échantillon inséré entre l'émetteur et le récepteur. Il présente la méthode de calcul de la vitesse de phase et de l'atténuation à partir de ces deux mesures, et exploiter ces résultats en les intégrant au code de calcul ATHENA.

La description de la microstructure des soudures. La soudure est divisée en sous-domaines homogènes orthotropes. Le nombre de sous-domaines est fonction du degré d'hétérogénéité de la soudure.

Dans chacun de ces domaines, une orientation particulière des grains (notée ω dans le tableau de la Figure I.6-b) est déterminée par le biais de méthodes numériques d'analyse d'image à partir de la macrographie de la soudure étudiée dans la figure I.6-a. Les valeurs des constantes d'élasticité, liées au repère défini par la structure locale (angle ω), sont supposées invariantes d'un sous-domaine à l'autre. Les sous-domaines sont donc simplement désorientés les uns par rapport aux autres.

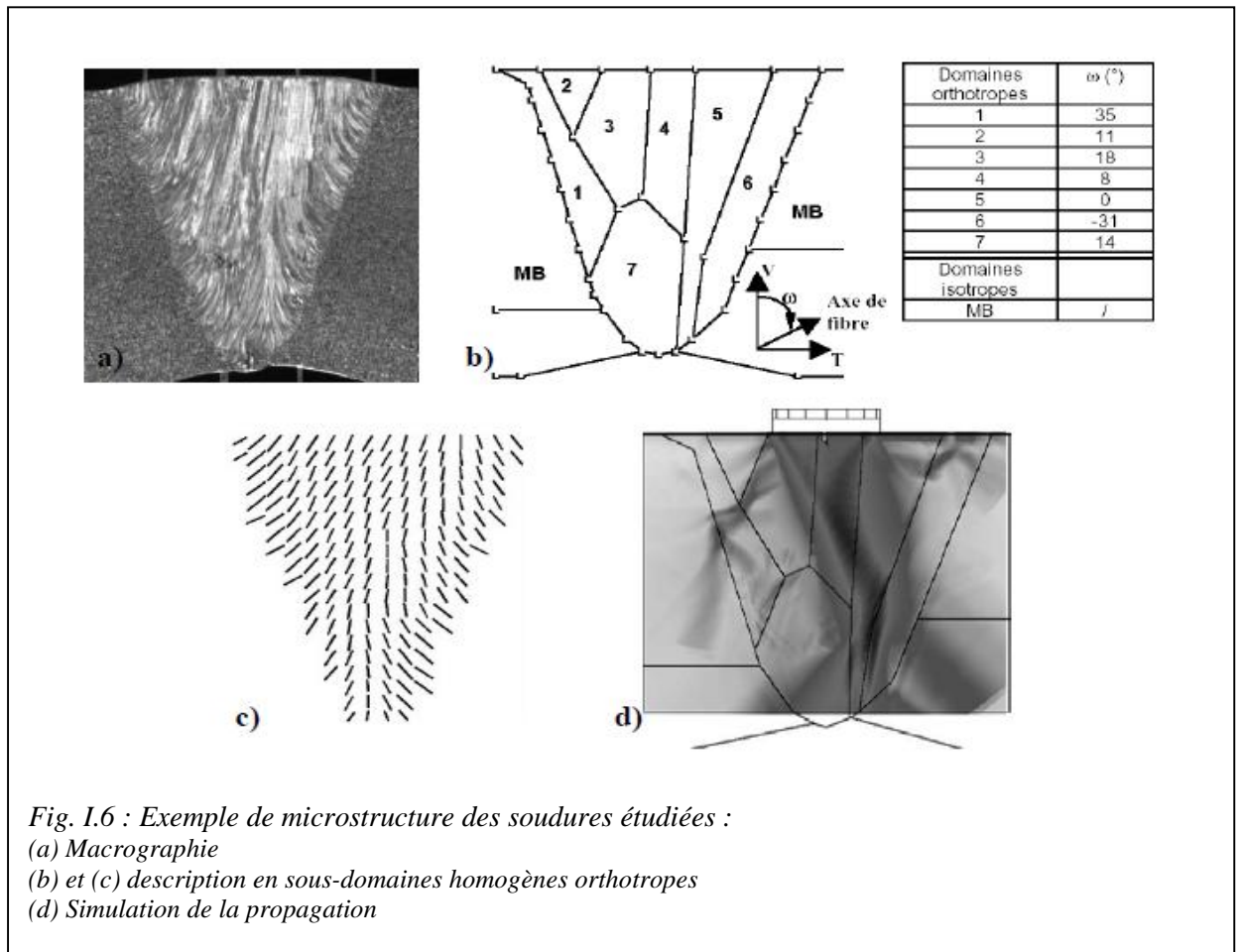


Fig. I.6 : Exemple de microstructure des soudures étudiées :
 (a) Macrographie
 (b) et (c) description en sous-domaines homogènes orthotropes
 (d) Simulation de la propagation

ATHENA simule la propagation des ondes ultrasonores dans un plan de symétrie de matériaux hétérogènes anisotropes complexes, en particulier dans les soudures étudiées. Le code est basé sur l'hypothèse que le milieu peut être décrit par un nombre fini de domaines homogènes anisotropes. Il prend également en compte les interactions entre le faisceau et des défauts pouvant avoir des géométries complexes. La simulation fournit une très bonne prédiction des déviations et des divisions du faisceau (Figure I.6-d), ainsi que des temps de vol. En revanche, les amplitudes obtenues ne sont pas représentatives des amplitudes réelles pouvant être recueillies in situ. En effet, le modèle actuel simule les effets de divergence du faisceau et de diffusion aux frontières des différents domaines en raison des sauts de propriétés élastiques. Par contre, il ne prend pas en compte la diffusion aux joints des grains à l'intérieur de chaque domaine du matériau traversé.

R. Draï [6]. Dans sa thèse Doctorat a exposé les problèmes liés à la détection d'un seul écho noyé dans le bruit de structure. il a développé un algorithme basé sur la TOD "transformée en ondelettes discrète", le filtre de Wiener et la technique SSP "Split Spectrum Processing", qui a été appliqué sur des signaux contenant un seul écho de défaut.

Dans la 1^{ère} étude basé sur l'utilisation de la méthode TOD : méthode de la décomposition et de la reconstruction du signal par la transformée en ondelettes discrète associée au calcul de la moyenne des signaux reconstruits. Les résultats en valeurs des gains en dB obtenus en fonction du taux du bruit injecté au signal utile sont satisfaisants, le gain atteint environ 30 dB. Ces résultats sont satisfaisants jusqu'à un taux de bruit de 80%. Au delà de 100%, l'algorithme devient inefficace.

Dans la 2^{ème} étude, l'auteur a constaté que l'application du filtre de Wiener idéal (c'est à dire la connaissance des spectres respectifs du bruit et du défaut) permet l'évaluation du SNR pour toutes les fréquences. Par contre, l'estimation de la bande passante avec les trois techniques : l'auto-corrélation avec fenêtre mobile, la technique d'écart type avec fenêtre mobile et la technique d'entropie avec fenêtre mobile, devient difficile lorsque la fréquence centrale du défaut se rapproche de la fréquence centrale de bruit. En dehors de cette bande, le SNR est appréciable et permet d'améliorer la détectabilité des défauts. Enfin, la technique de l'entropie a donné le meilleur SNR pour toutes les fréquences et nous recommandons l'utilisation de cet algorithme pour la détection de bande de fréquence optimale

Enfin, dans la 3^{ème} étude, l'auteur montre que les résultats obtenus par la technique SSP sont satisfaisants pour la détection d'un seul écho. Après une analyse statistique, il a constaté que la SSP à Q-constant était la plus robuste, et il est remarqué que les algorithmes développés ne donnent pas satisfaction quant à la détection de deux ou plusieurs échos. Ces algorithmes détectent l'écho de défaut possédant l'amplitude la plus élevée.

S. Laddada [7]. Dans sa thèse Magister, il présente une étude qui porte sur l'évaluation ultrasonore des défauts artificiels, du type délaminage, rainure, ou défauts adjacents débouchant, contenus dans des échantillons en composite stratifié et en acier. Il a exploité la méthode d'analyse par ondelettes aux signaux ultrasonores en vue d'extraire l'information sur l'état du matériau examiné. Un programme de calcul sous MATLAB a été conçu et appliqué pour la détermination des coefficients de détails de la transformée en ondelettes. La décomposition en ondelettes orthogonales du signal a permis de déterminer, à chaque niveau de résolution, les approximations et les informations de détails du signal considéré. Les coefficients calculés de la transformée en ondelettes ont été utilisés pour la détection et la localisation des positions de défauts.

Bases physiques des ultrasons et le principe de contrôle

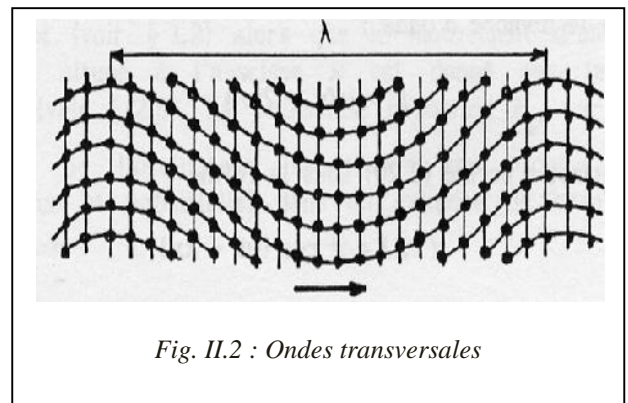
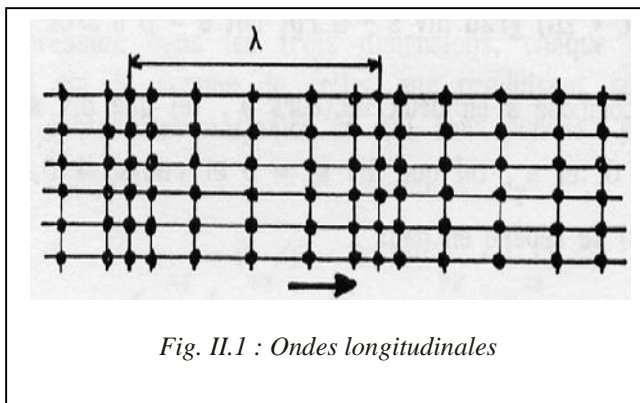
Introduction

Les ondes ultrasonores qui sont des vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du support matériel. En contrôle industriel, les types d'ondes les plus utilisés sont : les ondes longitudinales appelées ondes de compression ou ondes de dilatation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement.

II.1. Types d'ondes

II.1.1. Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration est la même que celle de la propagation (les ondes se propagent parallèlement à la direction de vibration et perpendiculaire à la surface de contrôle) (fig. II.1). Les plans des particules se déplacent l'un par rapport à l'autre en modifiant leur distance.

II.1.2. Les ondes transversales se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration (fig. II.2). Les plans des particules glissent l'un par rapport à l'autre en conservant leur distance. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.



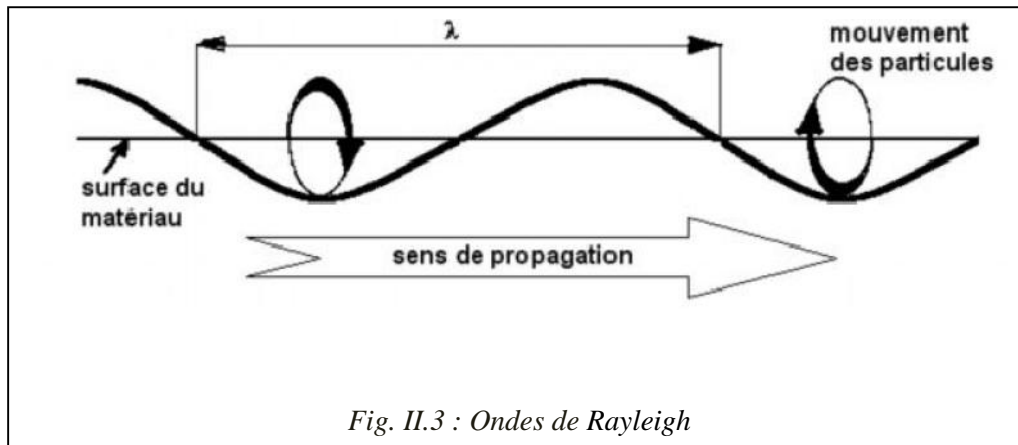
Par démonstration en théorie des milieux élastiques, la vitesse des ondes longitudinales et transversales sont liées aux caractéristiques mécaniques du matériau ; (le module d'Young E , et coefficient de poisson σ , la masse volumique ρ)

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1 - \sigma)}{\rho(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

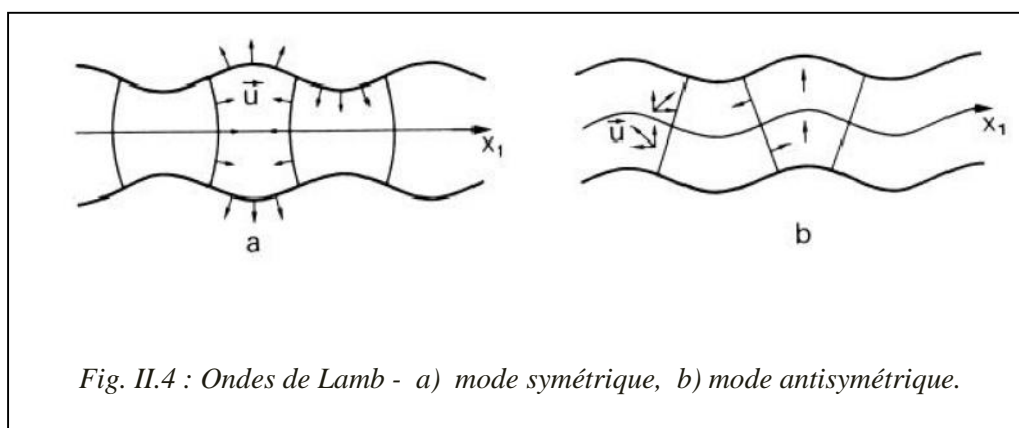
$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}}$$

Compte tenu des deux relations précédentes, on constate que V_L est supérieure de 50 à 100 % à V_T . Ce facteur est d'une grande importance dans la pratique pour différencier les deux types d'ondes

II.1.3. Les ondes de surface dites ondes de Rayleigh (fig. II.3) : Elles affectent la surface sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde. Le mouvement est simultanément parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation (résultat de la superposition d'une onde longitudinale et d'une onde transversale de même fréquence déphasée de $\pi/2$) ce double mouvement explique la très grande sensibilité à toute discontinuité de surface. Pour la plupart des matériaux on a approximativement $V_R \approx 0.9 V_T$



II.1.4. Les ondes de plaques ou ondes de Lamb, correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque. On distingue deux grandes familles d'ondes de Lamb, suivant que la plaque vibre en conservant un plan de symétrie (modes symétriques ou de compression) ou non (modes antisymétriques ou de flexion), les deux modes symétriques et antisymétriques sont représentés sur la (fig. II.4).



II.2. Propagation des ultrasons

II.2.1. Les modes de propagation des ondes ultrasonores

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dépend du mode de vibration des particules ainsi que la nature du milieu. Elle est donc différente d'un milieu à l'autre, ce qui implique une conséquence très importante : lorsqu'un faisceau ultrasonore frappe obliquement une surface de séparation entre deux milieux différents, quatre faisceaux sont créés, deux réfractés et deux réfléchis, pour chacun d'eux, longitudinal et transversal.

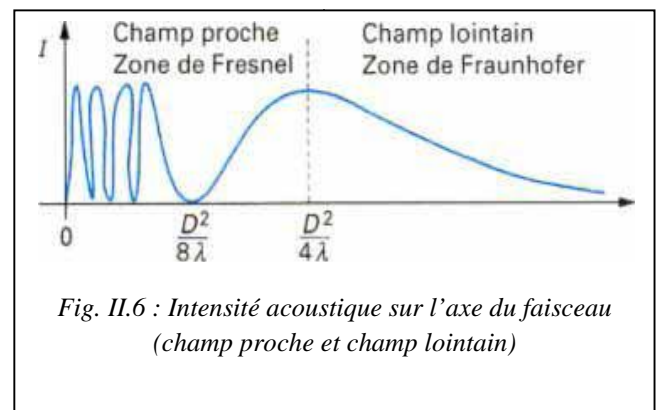
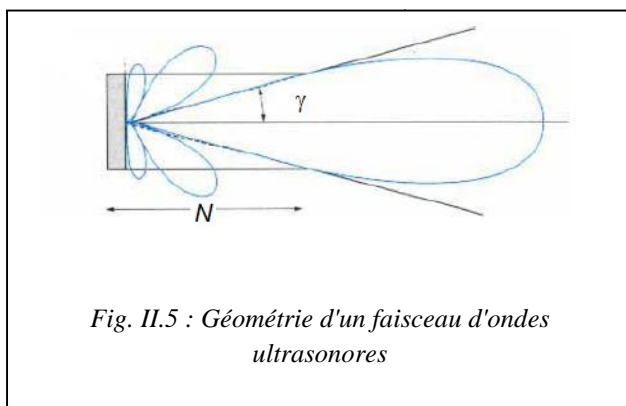
Le tableau II.1 donne quelques exemples de vitesses moyennes V_L et V_T pour les matériaux les plus utilisés en CND. Il s'agit de valeurs moyennes, car les paramètres élastiques des matériaux dépendent de l'état physique et chimique de ceux-ci.

Vitesses et impédance acoustique (Valeurs moyennes)				
Matériau	Masse volumique (10^3 kg/m^3)	Vitesse V_L (m/s)	Vitesse V_T (m/s)	Impédance acoustique Z ($10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Acier	7.8	5920	3240	46
Fonte	7.2	4600	2150	33
Aluminium	2.7	6300	3100	17
Cuivre	8.9	4700	2250	42
Laiton	8.5	4500	2100	38
Béton	2.5	4500		11
plexiglas	1.2	2700	1100	3.2
Verre	2.5	5650	3400	14
Huile	0.8	1500		1.2
Eau	1.0	1480		1.5
Air	$1.29 \cdot 10^{-3}$	333		$4 \cdot 10^{-4}$

Tableau. II.1 : Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores

II.2.2. Description du faisceau ultrasonore émis par un transducteur

Les ultrasons se propagent essentiellement en ligne droite selon un faisceau plus ou moins étalé, constitué d'un lobe principal dans lequel la plus grande partie de l'énergie est concentrée (fig. II.5) et (fig. II.6). C'est cette propriété qui les rend utiles pour localiser les défauts.



Champ proche (zone de Fresnel) : irrégularité de l'amplitude de l'écho sur l'axe (succession de maxima et minima dans la direction de propagation)

Champ éloigné (zone de Fraunhofer) : élargissement continu du lobe centrale d'où l'élargissement du faisceau par un angle d'étalement ou de divergence γ tel que :

$$\gamma \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Note

1. En raison de la complexité du spectre d'énergie dans le champ proche, il est conseillé de faire le contrôle dans la zone de champ éloigné

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

N : la distance limite du champ proche
 D : le diamètre de la source.

2. Dans le champ éloigné, l'amplitude sur l'axe décroît de façon régulière quand on s'éloigne le traducteur

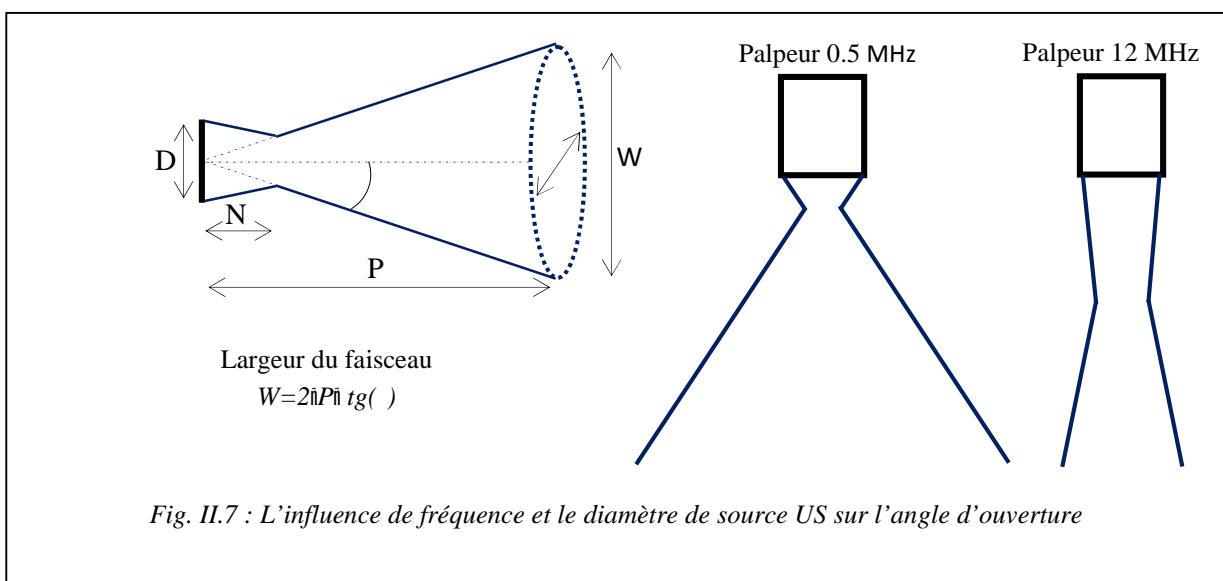
Angle d'ouverture du faisceau ultrasonore

Compte tenu les trois relations suivantes :

$$\{\lambda = v/f, N = \frac{D^2}{4\lambda}, \gamma \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}\}$$

On peut déduire que

$$\begin{aligned} f \downarrow &\Rightarrow \lambda \uparrow \Rightarrow N \downarrow \text{ et } \gamma \uparrow \\ f \uparrow &\Rightarrow \lambda \downarrow \Rightarrow N \uparrow \text{ et } \gamma \downarrow \\ D \downarrow &\Rightarrow N \downarrow \text{ et } \gamma \uparrow \\ D \uparrow &\Rightarrow N \uparrow \text{ et } \gamma \downarrow \end{aligned}$$



II.2.3. Notion de l'impédance acoustique

L'impédance acoustique caractérise la résistance d'un milieu au passage du son. Elle est définie par la relation $Z = \rho \cdot V$

ρ la masse volumique du milieu

V la vitesse des ultrasons dans le milieu considéré

Pour une incidence normale : le coefficient de réflexion R défini comme le rapport entre l'amplitude de l'intensité acoustique réfléchie A_R et l'amplitude de l'intensité acoustique incidente A_0 , et le coefficient de transmission T défini aussi comme le rapport entre l'amplitude de l'intensité acoustique transmise A_T et l'amplitude de l'intensité acoustique incidente A_0 , sont données par les relations suivantes

$$R = \frac{A_R}{A_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \left(\frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \right)^2$$

$$T = \frac{A_T}{A_0} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4 \cdot \rho_1 V_1 \cdot \rho_2 V_2}{(\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)^2}$$

$$R + T = 1$$

ρ_1 et ρ_2 sont les masses volumiques et V_1 et V_2 les vitesses des ultrasons (longitudinales ou transversales selon le type de l'onde), l'onde se propageant du milieu 1 vers le milieu 2.

On en déduit pour une fissure (interface solide-gaz) que $R \approx 1$, c.-à-d, la réflexion est quasiment totale, et en raison de la conservation de l'énergie transportée par les ondes, l'amplitude de l'onde transmise devient très petite.

NB on constate ici que l'avantage de contrôle par ultrasons, c'est la grande sensibilité pour la détection des défauts dans les matériaux. Mais aussi, l'accroissement du coefficient de réflexion pose aussi des problèmes dans la pratique. En raison de la rugosité de surface de la pièce à contrôler et/ou le contact n'est pas parfait, et donc création de couche d'air à l'interface entre le palpeur et la pièce qui impose une forte réflexion des ondes, et ne les laisse pas passer ; pour assurer le passage des ultrasons, on doit appliquer un agent de contact (graisse, eau, huile) sur la surface. Si la valeur de l'impédance acoustique $Z = \rho \cdot V$ du couplant est plus élevée, cela fait diminuer le coefficient de réflexion à des valeurs acceptables.

II.2.4. Atténuation des ondes ultrasonores:

L'amplitude d'une vibration qui se propage dans un milieu, n'est pas constante au cours du temps, elle s'atténue le long de son parcours. Les causes principales de cette atténuation sont:

L'absorption : l'absorption est due à une conversion de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Cette absorption est proportionnelle à la fréquence.

La diffusion : la diffusion de l'onde (énergie déviée de sa direction) suite aux imperfections du matériau (joints de grains qui créent une dispersion, ...)

L'atténuation de l'amplitude d'une onde ultrasonore suit la loi exponentielle de la forme

$$A_x = A_0 \exp(-\alpha x)$$

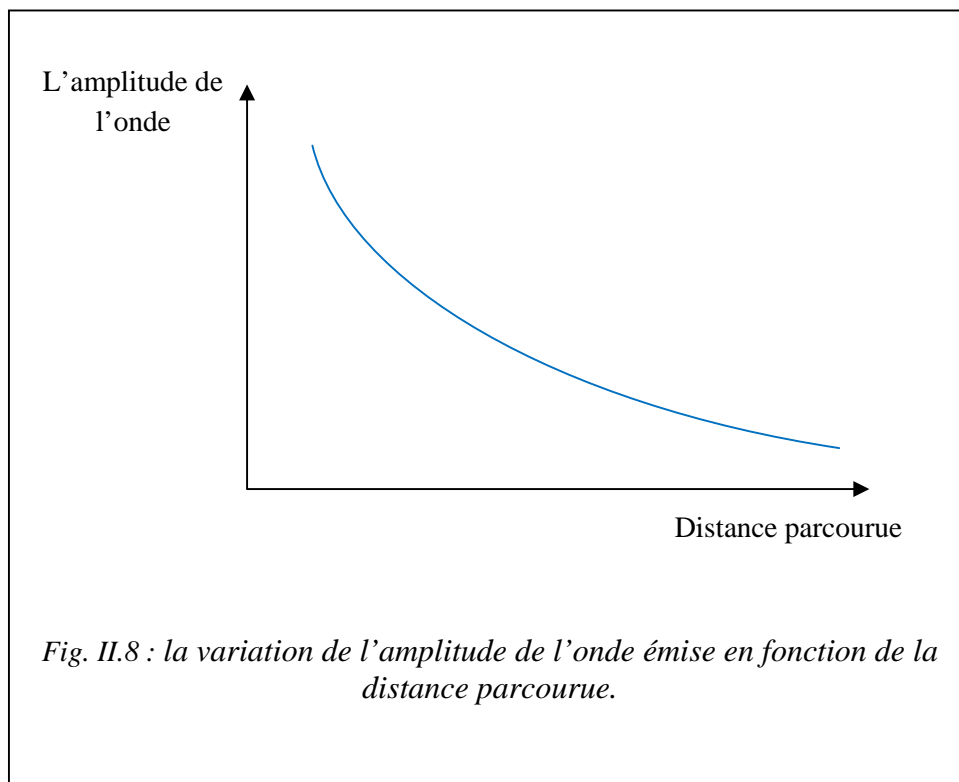
x : épaisseur traversée

A_x : est l'amplitude de l'onde à la distance $x + x_0$

A_0 : est l'amplitude de l'onde à la distance x_0 .

α : coefficient d'atténuation, généralement exprimé en Neper ou en dB par unité de longueur.

La figure II.8 décrit la variation de l'amplitude de l'onde émise en fonction de la distance parcourue.



II.2.5. La réflexion et la réfraction des ultrasons :

Une onde ultrasonore longitudinale incidente sous un angle oblique sur une interface se divise en deux ondes réfléchies et en deux ondes transmises. Chaque paire comprend une onde longitudinale et une onde transversale. L'onde transversale transmise est supprimée pour une incidence normale. Et l'onde longitudinale transmise disparaît si elle dépasse un angle critique qui dépend du rapport des vitesses des ultrasons dans les deux milieux considérés, cet effet est utilisé par les palpeurs à incidence oblique.

Les orientations des faisceaux d'ondes réfléchies et réfractées sont définies par les lois de (Descartes-Snell), bien connues en optique, et où l'indice optique est ici remplacé par la vitesse V des ondes. On a les relations entre angles de réfraction et vitesse de l'onde

$$\frac{\sin \alpha_i}{V_i} = \frac{\sin \alpha_{1L}}{V_{1L}} = \frac{\sin \alpha_{1T}}{V_{1T}} = \frac{\sin \alpha_{2L}}{V_{2L}} = \frac{\sin \alpha_{2T}}{V_{2T}}$$

- α_i : angle d'incidence dans le milieu 1
- α_{2L} : angle de réfraction de l'onde longitudinale dans le milieu 2
- α_{2T} : angle de réfraction de l'onde transversale dans le milieu 2
- V_{2L} : vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans le milieu 2
- V_{2T} : vitesse de propagation de l'onde transversale dans le milieu 2

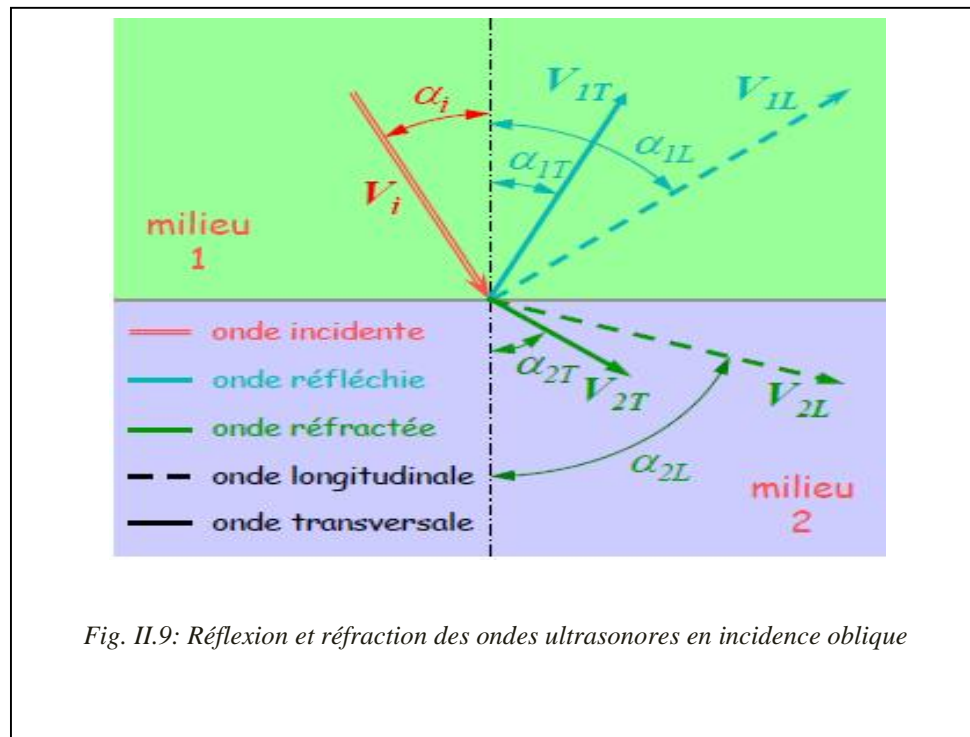


Fig. II.9: Réflexion et réfraction des ondes ultrasonores en incidence oblique

Ces considérations sont extrêmement importantes dans la pratique. Pour un angle d'incidence compris entre les deux angles critiques, l'existence d'un seul faisceau réfracté est utilisée pour simplifier les interprétations de signaux ultrasonores en éliminant un des modes vibratoires, au-delà desquels les ondes réfractées ne peuvent exister (le calcul de la condition sur les sinus).

II.3. Génération des ultrasons

II.3.1. La piézo-électricité :

C'est la propriété réversible que possèdent certains cristaux, à cause de manque de symétrie dans leur structure. Lorsque le matériau subit à une sollicitation mécanique (compression, cisaillement), il engendre un potentiel électrique proportionnel aux contraintes qu'il subit. La réciprocity du phénomène, si le matériau soumet à un potentiel électrique, il change de forme, et produit des vibrations mécaniques.

II.3.2. Palpeur piézoélectrique

Le palpeur est l'outil véritable de contrôle. Il est constitué autour d'une pastille piézoélectrique circulaire ou rectangulaire taillée dans le matériau piézoélectrique choisi, dont les faces parallèles sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est placée sur un bloc amortisseur réalisé en matériau dense et très absorbant (par exemple, métal lourd ou sel métallique noyé dans une résine). L'ensemble de ces deux éléments et une bobine d'accord sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique et une face de protection devant la pastille piézoélectrique. Cette face avant joue le double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité. Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résines, carbures non métalliques...).

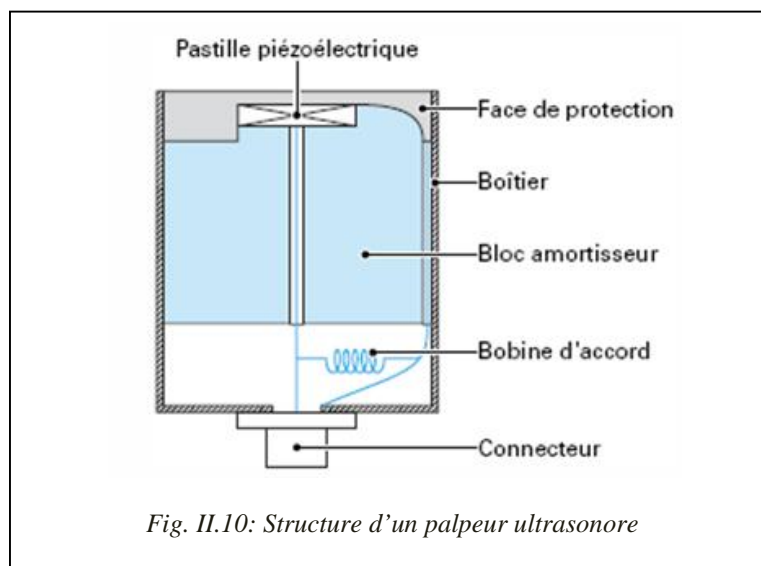


Fig. II.10: Structure d'un palpeur ultrasonore

Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques adaptées aux

Mode d'utilisation : contrôle par contact ou en immersion,

Nature du produit à sonder

Défauts

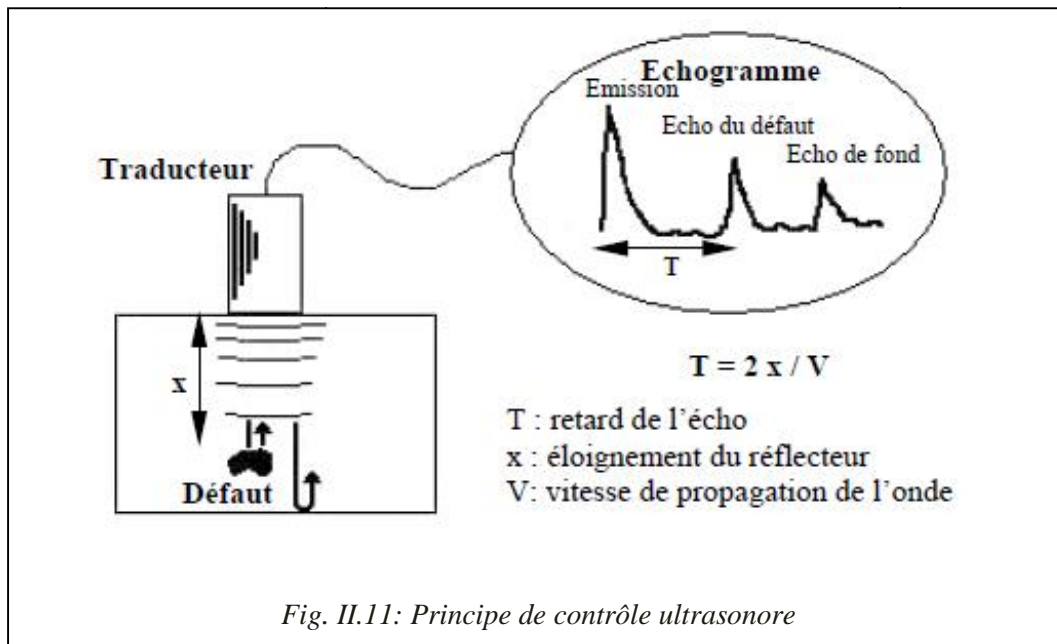
Les palpeurs les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants : palpeur droit cylindrique, palpeur d'angle à sabot, palpeur droit focalisé, palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE). Certaines applications particulières font appel à des palpeurs spéciaux tels que les palpeurs droits rectangulaires, les palpeurs à focalisation cylindrique, Palpeurs EMA, Palpeurs lasers...

Les caractéristiques déterminantes d'une sonde ultrasonore: sa fréquence d'oscillation et son diamètre, la distance focale pour un palpeur focalisé, et l'angle de réfraction pour les palpeurs d'angle.

II.4. Les Méthodes de contrôle par ultrasons

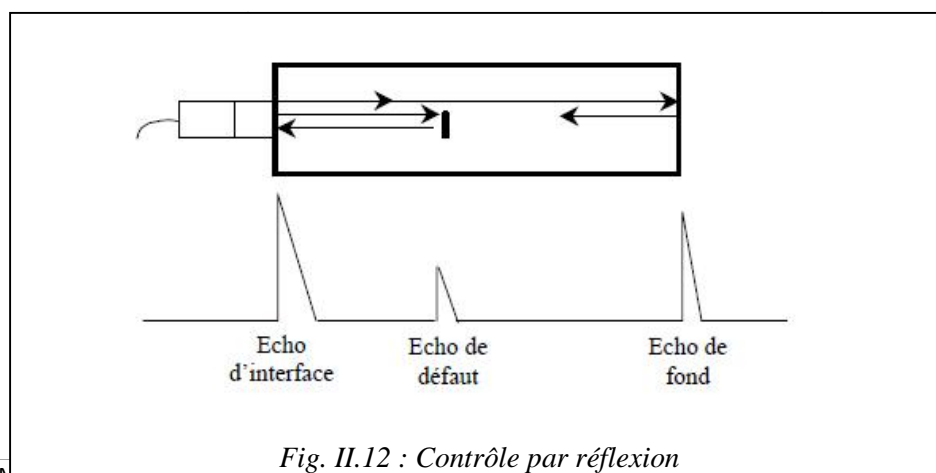
Les ondes ultrasonores se propagent dans un matériau. A l'émission, le traducteur génère une onde ultrasonore par effet piézoélectrique, et à la réception, le traducteur convertit l'énergie mécanique en signal électrique.

Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation des ondes (figure II.11). Le contrôle par ultrasons a donc pour principe d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les modifications apportées à la progression des ondes ultrasonores.



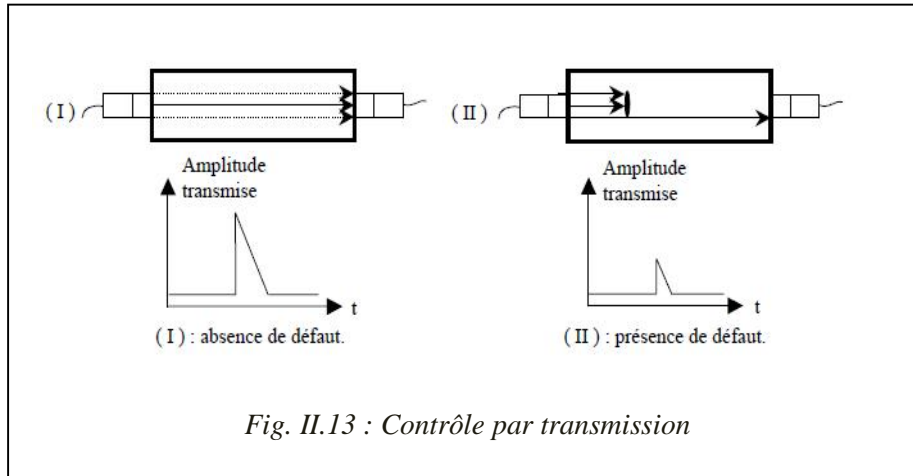
II.4.1. Contrôle par réflexion

Cette mesure utilise un seul palpeur qui est alternativement émetteur et récepteur (figure II.12). Il émet une onde ultrasonore longitudinale qui se propage dans la pièce à contrôler et de direction perpendiculaire à la surface à examiner. Toute discontinuité du milieu sondé entraîne la réflexion d'une partie de l'onde ultrasonore. L'analyse a pour but ensuite d'évaluer les échos réfléchis. La mesure de l'intervalle de temps séparant le signal électrique d'entrée et le signal électrique de retour indique la position en profondeur du défaut. L'amplitude et la forme des échos de défauts sont caractéristiques de la nature et de la dimension des défauts.



II.4.2. Contrôle par transmission

Dans certains cas, en lieu et place d'une analyse des ondes renvoyées vers le palpeur émetteur, on utilise un second palpeur placé à l'opposé du premier et qui sert uniquement de récepteur. Les impulsions ultrasonores reçues par ce palpeur permettent de caractériser la transmission des ultrasons au travers de la pièce. Quand un défaut intercepte le signal, une partie de l'énergie ultrasonore est arrêtée et par conséquent, l'énergie parvenant au capteur récepteur est diminuée.



Son inconvénient réside sur la diminution du signal obtenu qui peut être la conséquence de nombreux autres phénomènes telle que le mauvais couplage entre les palpeurs et la pièce, aussi le changement de l'état de surface du métal, le désalignement des palpeurs émetteur récepteur, et non pas toujours à la présence d'un défaut.

II.5. Les différentes techniques de contrôles ultrasonores

II.5.1. Contrôle par contact

Le traducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison 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 c.-à-d. lorsque le déplacement est assuré par un opérateur.

II.5.2. Contrôle en immersion

Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau additionnée d'un mouillant. Cette technique assurée la mobilité sur 3 axes à ces palpeurs, et aussi la facilité d'utiliser des palpeurs focalisés.

II.5.3. Contrôle automatique des grandes structures par Ultrasons

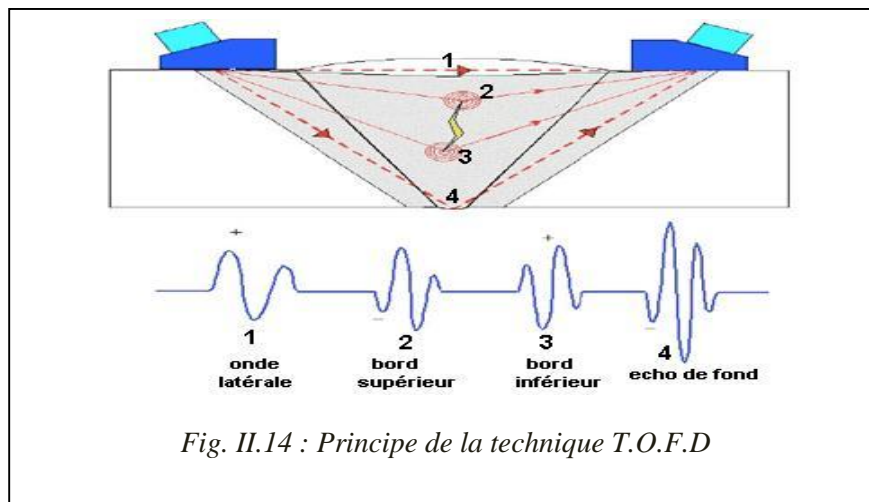
C'est un système de chantier entièrement automatisé permettant d'analyser des surfaces importantes horizontales ou verticales sur des structures métalliques. Il est constitué d'un robot roulant magnétique et d'une instrumentation de contrôle ultrasonore informatisée. La mécanique de support de traducteur est conçue pour franchir des soudures ou des obstacles de surface. Ce robot est configurable pour des mesures de profils B-Scan (mesure d'épaisseur en fonction d'une longueur parcourue) ou pour des cartographies C-Scan (mesures de surfaces de corrosion ou détection / localisation / caractérisation de défauts, fissures...). Cet ensemble est principalement dédié aux analyses et expertises par Ultrasons pour des tubes de grand diamètre (en interne ou externe), des structures planes, des fonds ou toits de réservoir, des viroles et des parois de cuve.

II.5.4. La technique TOFD

TOFD est l'acronyme de "Time-of-Flight Diffraction", c.-à-d. Mesure du temps de vol de l'onde diffractée. La méthode TOFD exploite les phénomènes de diffraction générés par les extrémités des défauts.

Méthode de dimensionnement de défauts basée sur la mesure du temps de vol et non l'amplitude avec deux transducteurs utilisés en tandem, et pitch and catch

Le contrôle s'effectue au moyen de deux transducteurs ultrasonores mis en opposition, l'un fonctionnant en émission, l'autre en réception. Les transducteurs sont placés à égale distance de part et d'autre de la soudure à examiner, de façon à couvrir toute l'épaisseur de la pièce à contrôler. L'image obtenue est une représentation transversale de la soudure.



II.6. Les modes de représentation

Les données issues d'une acquisition peuvent être représentées sous la forme d'un ensemble de signaux monodimensionnels, ou sous forme d'une image permettant une visualisation simple et interprétation rapides des informations

II.6.1. Représentation A :

Le signal A-Scan est une représentation de l'amplitude des échos enregistrés par le récepteur en fonction du temps, il s'agit d'un sondage. C'est un signal monodimensionnel obtenu lorsqu'un tir ultrasonore est réalisé pour une position donnée (x, y) du couple émetteur/récepteur. L'appareil à ultrasons permet de visualiser sur l'écran le parcours du faisceau dans la pièce. Le mode de représentation A-Scan est à la base de toutes les méthodes d'exploitation et d'interprétation de données ultrasonores en contrôle non destructif.

II.6.2. Représentation B :

Une cartographie B-Scan est une image engendrée par la succession des A-Scan selon la direction principale de balayage de la surface contrôlée (on obtient une carte des échos)

II.6.3. Représentation C :

Une cartographie C-Scan est obtenue à partir des signaux A-Scan en effectuant la projection, sur un plan parallèle à la surface de contrôle, du maximum relevé sur les signaux A-Scan associé à chaque position (x, y) des capteurs

II.6.4. Représentation 3D :

Une représentation tridimensionnelle est un mélange des représentations B et C. Cette représentation nécessite un contrôle automatique de l'objet, et un ordinateur pour traiter les informations.

La figure. II.15 montre les différents modes de présentation d'un sondage à ultrasons

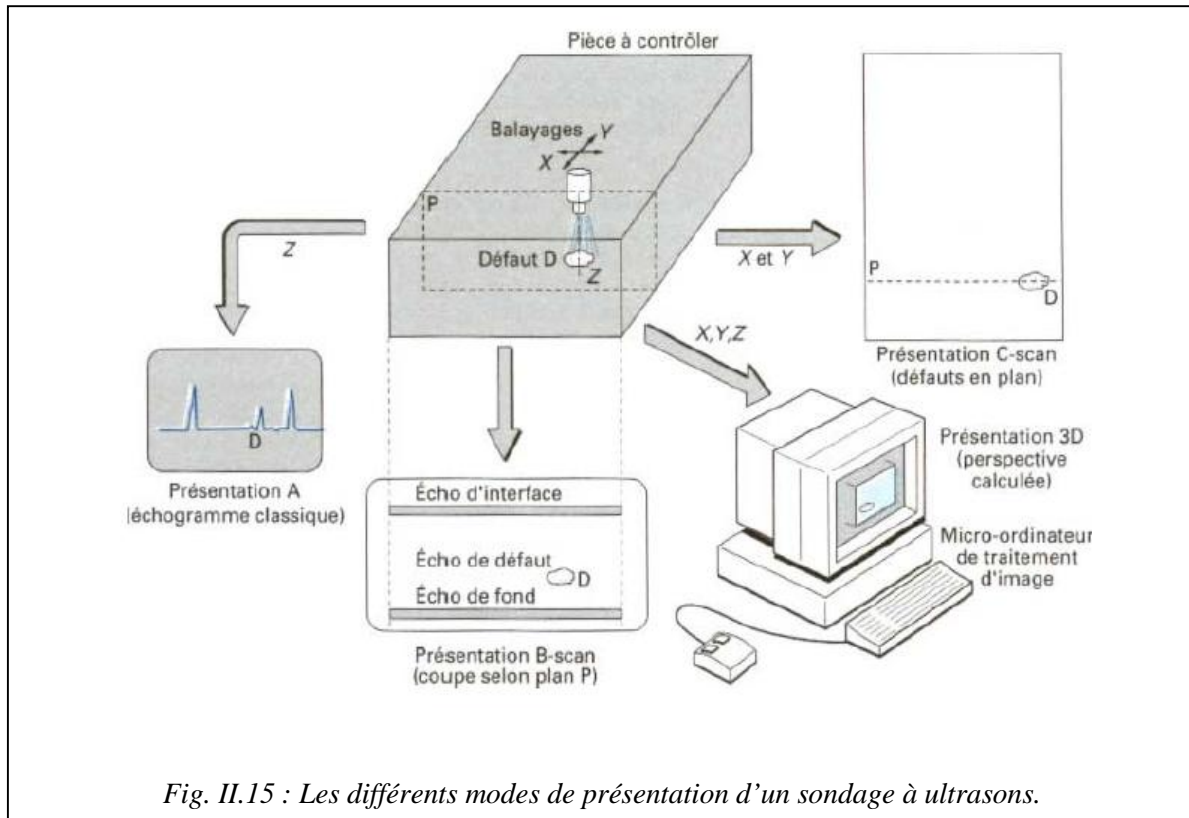


Fig. II.15 : Les différents modes de présentation d'un sondage à ultrasons.

Conclusion

Les méthodes de contrôle non destructif par ultrasons permettent de tester une structure sans provoquer de modification irréversible. Elles représentent donc un enjeu industriel important du point de vue économique. On a abordé dans ce chapitre les bases physiques des ultrasons et les différentes méthodes et techniques de contrôle ultrasonore.

Les méthodes de recherches et d'évaluations des défauts

III. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour but de fournir des informations concernant la santé des pièces contrôlées. Il évalue les défauts dans une pièce durant son cycle de vie, afin de définir si celle-ci est toujours utilisable suivant les critères mécaniques associés lors de sa conception. Donc la recherche de défauts dans les matériaux constitue une des préoccupations majeures dans plusieurs de secteurs de l'industrie

III.1. Défauts typiques des soudures

La figure III.1, montre les défauts les plus usuels rencontrés dans une soudure:

Fissuration : fissures dans le métal fondu ou dans la zone thermiquement affectée

Soufflures : inclusions gazeuses sous forme de cavités

Inclusions solides : restes d'autres matières étrangères

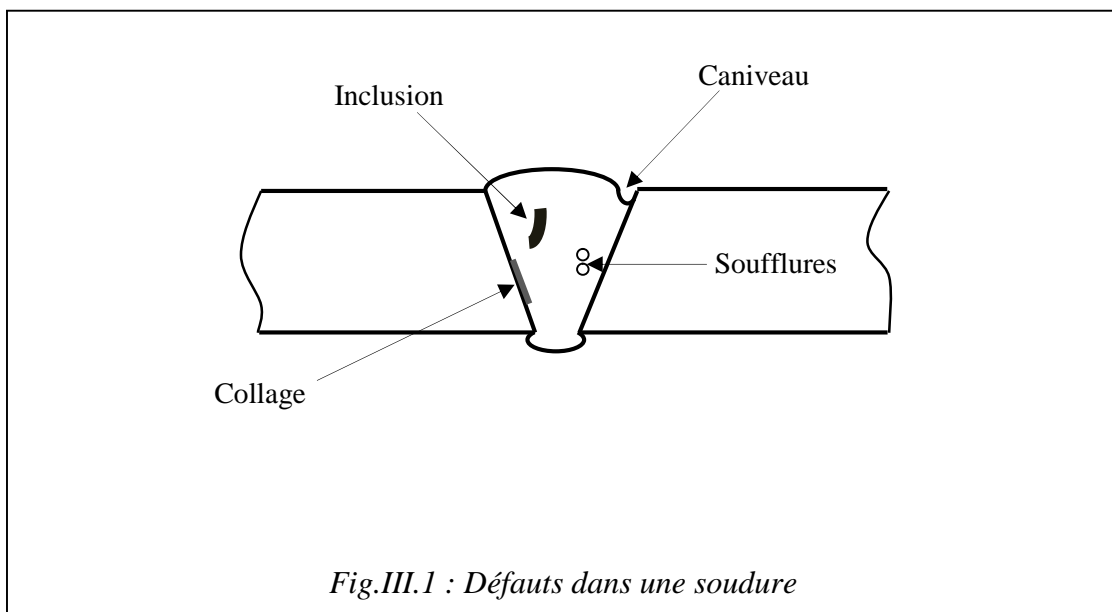
Manque de fusion ou collage : discontinuité de métal, avec manque de liaison soit entre la soudure et une face du chanfrein (entre le métal déposé et le métal de base), soit entre deux passes.

Manque de pénétration : absence de matière à la racine des chanfreins (entre les deux bords), ce défaut est très dangereux car il réduit la section résistance du cordon et il se situe en racine du cordon où les concentrations de contraintes sont importantes. De plus, ce défaut est à l'origine d'entailles qui peuvent servir d'amorces de rupture par fatigue

Excès de pénétration : présence de bourrelets plus ou moins importants à l'envers de la soudure.

Caniveaux : sillons plus ou moins profond apparaissant le long des rives du joint (bordure du cordon), ils sont dus à un courant de soudage trop intense

Défauts d'alignement.



III.2. Principe de la détection d'un défaut

Nous verrons tout d'abord l'évaluation de la position d'un défaut, puis nous décrirons en détail les différentes méthodes utilisables pour évaluer les dimensions des défauts.

III.2.1. Localisation des défauts (méthodes générales)

Localisation avec palpeur droit (ondes longitudinale OL)

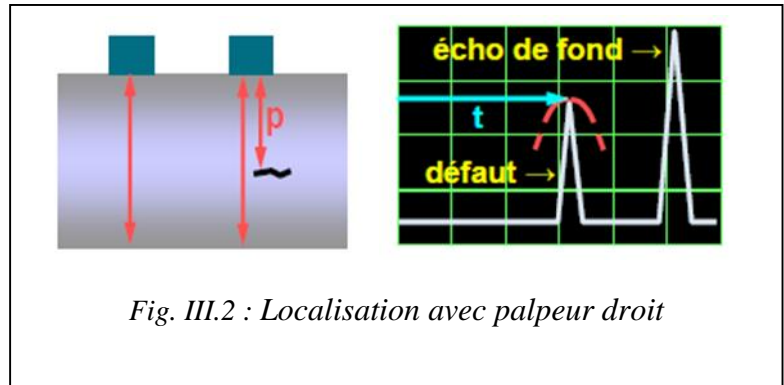
Mesure d'épaisseur
Recherche de défauts laminaires
Recherche de défauts volumiques

$$P = (V_L * t) / 2$$

P : le parcours ultrasonore

V_L : la vitesse d'onde longitudinale

t : le temps de vol.

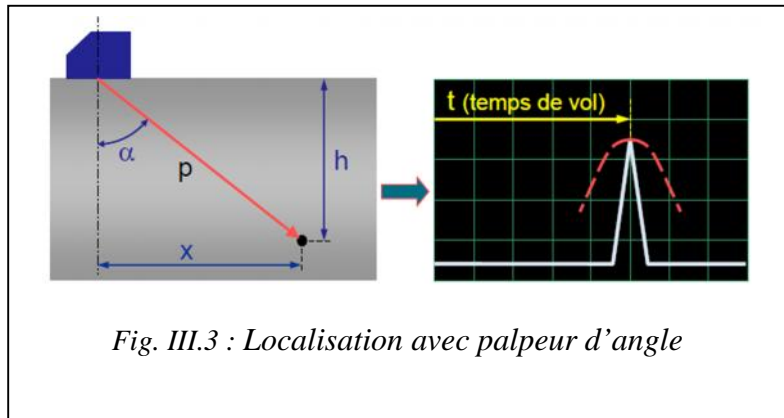


Localisation avec palpeur d'angle (ondes transversales OT)

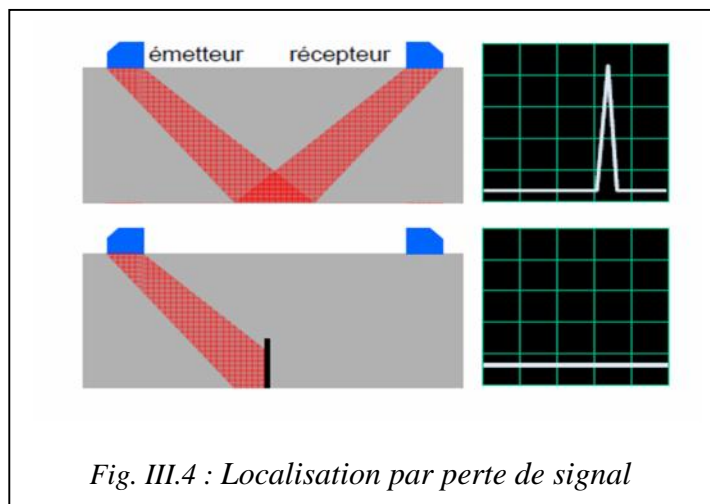
$$x = P \sin \alpha$$

$$h = P \cos \alpha$$

$$P = (V_T * t) / 2$$



Pitch & Catch : Détection par perte de signal. Si le palpeur récepteur ne reçoit pas le signal émis par le palpeur émetteur, cela veut dire qu'il y a un obstacle (défaut).



III.2.2. Détermination de la position des défauts dans la soudure

Une discontinuité correspond à une variation d'impédance acoustique au sein du matériau. Très souvent, elle est liée à la présence de défauts dans les pièces. Si les variations d'impédances sont importantes, l'onde réfléchie aura une grande amplitude. Sur l'appareil de contrôle cela se traduira par une hauteur d'écho importance.

Lorsque le sondage se fait en direct, en déterminer la position de défaut à partir du parcours ultrasonore (la distance direct entre point d'émergence et le défaut). Par contre lorsque le sondage ne se fait pas en direct (rebond) il est recommandé de tracer un dessin à l'échelle de la pièce pour connaître le trajet de l'onde ultrasonore.

Balayage autour des défauts de soudure avec ondes transversale OT

Selon la largeur de la soudure et la largeur du palpeur, il peut être nécessaire d'effectuer deux balayages parallèles ou plus dans chaque sens

Si les deux faces de l'assemblage soudé sont accessibles, on utilisera l'examen en trajet simple à partir de chacune d'elles.

Le palpeur est choisi afin de permettre l'exploration conformément au plan de sondage. Il s'agit essentiellement de palpeurs à ondes transversales inclinées selon un ou deux angles différents, et en complément un palpeur à ondes longitudinales droites.

L'angle de réfraction en ondes transversales est choisi en fonction principalement de l'épaisseur de la tôle.

D'une façon générale, plus l'épaisseur est faible, plus l'angle est grand.

A titre d'exemple, le tableau III.1 donne quelques valeurs généralement utilisées

Epaisseur de plaque (mm)	Angle de réfraction dans l'acier (°)	Distance du balayage pour contrôler en 1 bond (mm)
< 30	70	80 à 165
30 à 60	60	105 à 210
> 60	45	> 210

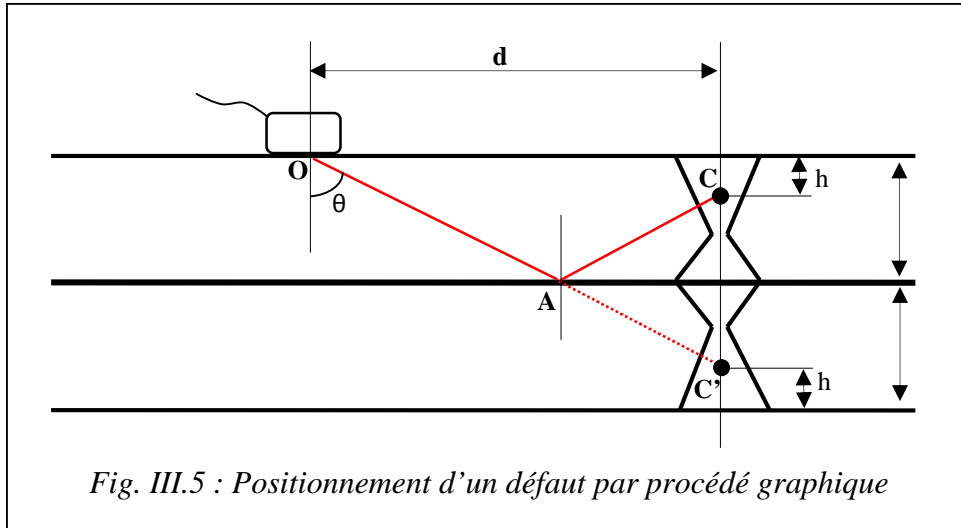
Tableau III.1 : le choix de l'angle de réfraction du palpeur en fonction de l'épaisseur de la tôle.

L'angle nominal réfracté en ondes transversales est noté sur le capot du traducteur pour application dans l'acier. Il est différent pour d'autres matériaux du fait de la différence de vitesse de propagation des ondes transversales.

Pour les soudures, on peut utiliser Par exemple les méthodes suivantes :

1. Le graphique (fig. III.5)

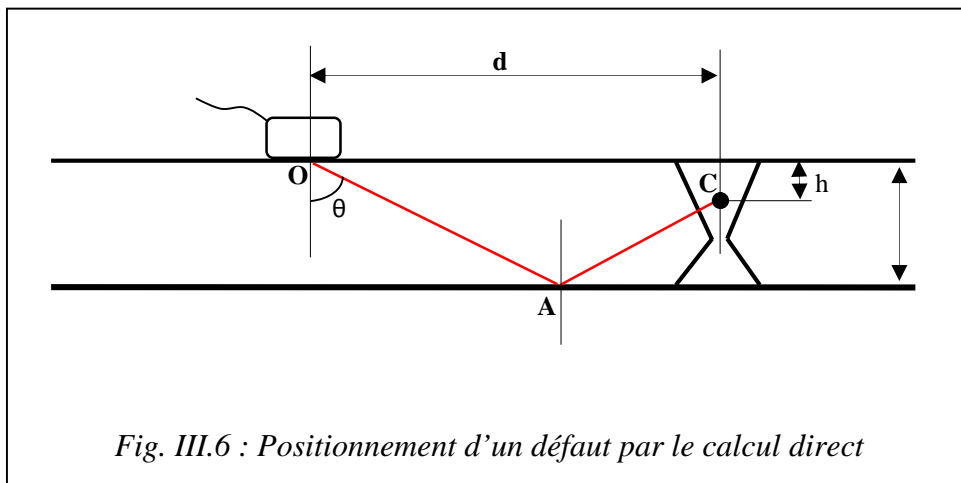
On trace le dessin de la soudure et de son symétrique, et on trace ensuite la droite **OA** qui fait un angle θ avec la normale au point **O** et sur cette droite on porte la distance **OC'=P** mesurée sur l'écran. Il suffit alors de mesurer sur le dessin les valeurs de la position **h** du défaut par rapport à la face supérieure de la pièce et **d** sa position par rapport au traducteur



2. Le calcul direct (fig. III.6)

Sur l'écran de l'appareil à ultrasons on lit la valeur de la distance **P=OA+AC**. On peut déterminer la distance **d** et la profondeur **h** à laquelle se trouve le défaut. Des considérations géométriques simples conduisent à :

$$\begin{cases} d = P \cdot \sin \theta \\ h = 2e - P \cdot \cos \theta \end{cases}$$



D'autres méthodes sont utilisées pour le positionnement des défauts : le calque, la règle

III.2.3. Dimensionnement des défauts

La détermination de la position d'un défaut ne présente pas actuellement un gros problème au contrôleur. Ce n'est pas de même pour évaluer ses dimensions, car plusieurs facteurs liés soit au défaut lui-même (orientation, planéité,...), soit au matériau sondé (atténuation, diffraction, anisotropie,...), ainsi qu'au mode de contrôle utilisé et à l'interprétation des résultats. Donc la détermination des dimensions des défauts est une opération qui reste approximative

Les méthodes proposées pour l'évaluation des dimensions des défauts :

- Méthode à -6 dB
- Méthode par comparaison à des défauts types (DAC)
- Méthode par comparaison avec l'écho de fond
- L'effet goniométrique- miroir

III.2.3.1. Méthode à -6 dB :

Cette méthode consiste à déplacer le palpeur autour du défaut. On recherche tout d'abord la position x_1 qui donne un écho H_1 d'amplitude maximale, on se déplace ensuite par rapport à la position x_1 de la quantité x telle que l'axe du faisceau est tangent au bord du défaut, l'écho H_2 reçu sera lui aussi la moitié de H_1 (fig.III.7)

Soit $X_1 = 20 \log(H_1/H_0)$ l'amplification de l'appareil, exprimée en dB dans le 1^{er} cas

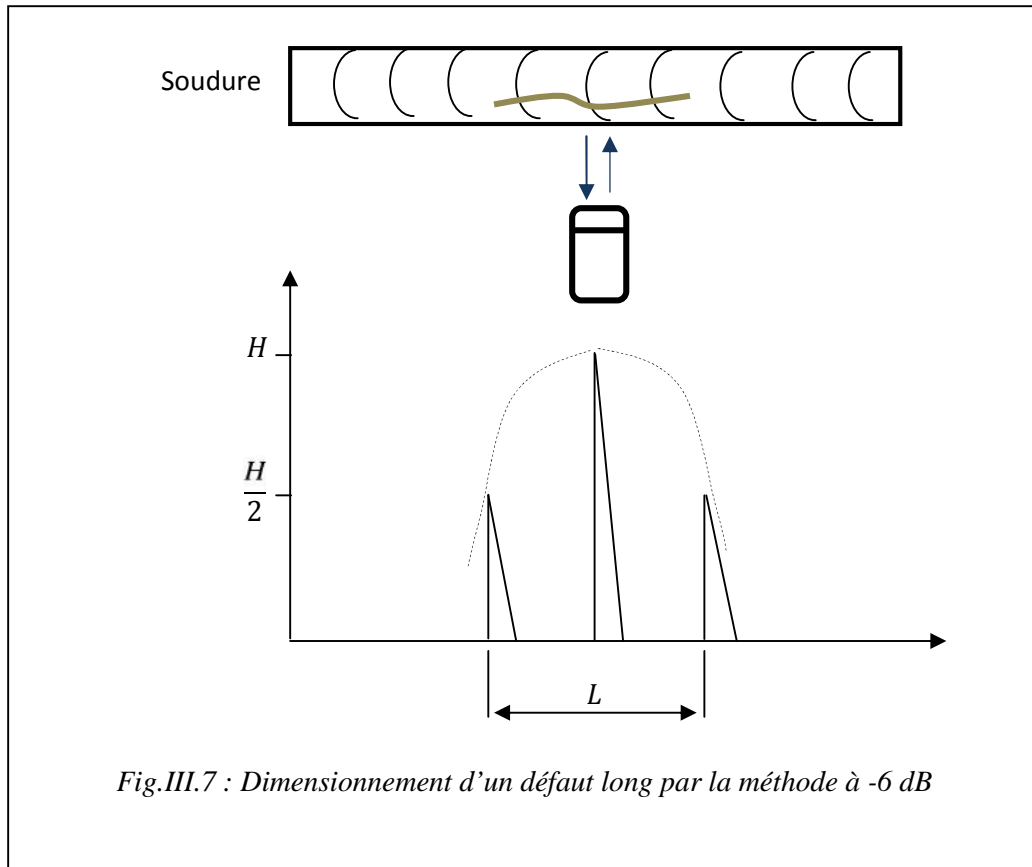
Dans le second cas on aura $X_2 = 20 \log(H_2/H_0) = 20 \log(H_1/2H_0) = 20 \log(H_1/H_0) - 20 \log 2$

$$X_2 = X_1 - 6\text{dB}$$

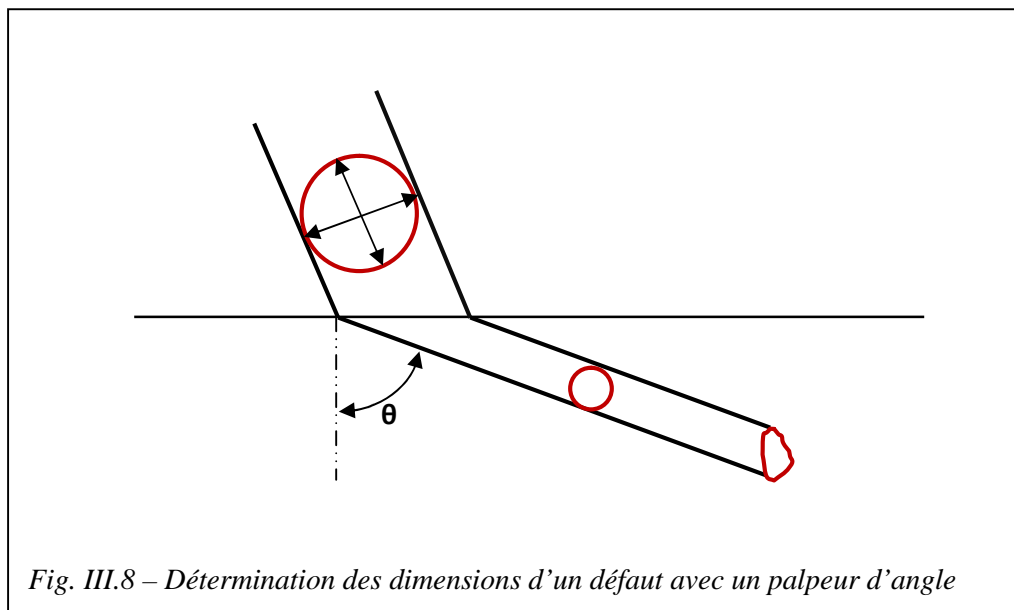
Par suite pour ramener H_2 à la même valeur que H_1 il faut ajouter 6 dB

Pratiquement lorsque x_1 a été déterminé, on règle l'amplification de manière à amener H_1 à 100% de l'échelle verticale, puis on ajoute +6 dB, on recherche ensuite la position x telle que l'amplitude H de l'écho observé soit à nouveau égale à 100%. On porte ensuite sur un dessin toutes les valeurs de x et on obtient une cartographie du défaut.

1. Dimensionnement à -6 dB (palpeur droit)



- 2. Le cas d'utilisation d'un palpeur d'angle**, il faut tenir compte de l'angle d'incidence du faisceau. Dans la pièce le faisceau qui était de forme cylindrique devient elliptique ou inversement. L'évolution de la dimension D est égale alors à $D \cdot \cos$ (voir fig.III.8).



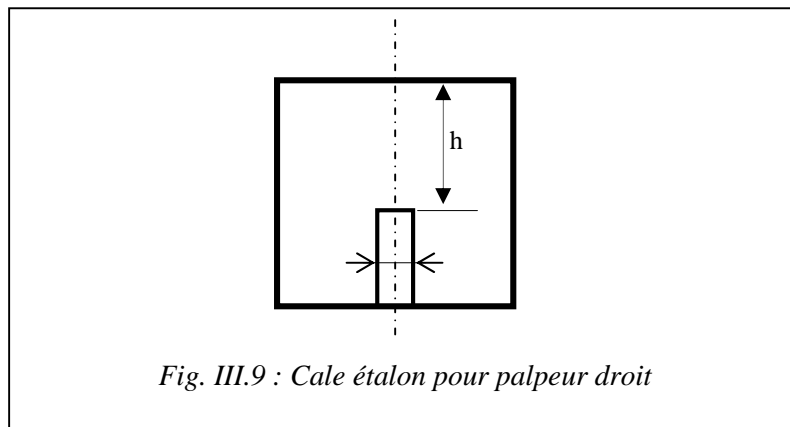
III.2.3.2. Méthode par comparaison à des défauts types

Courbes DAC (Distance Amplitude Correction)

Dans cette méthode on réalise des défauts étalons types puis on mesure les amplitudes des échos obtenus sur ces étalons. On obtient un réseau de courbes caractéristique de l'appareillage et du défaut type. En se replaçant pratiquement dans les mêmes conditions de mesures, on peut déterminer les dimensions apparentes du défaut. Il faut distinguer les cas des palpeurs droits et d'angles.

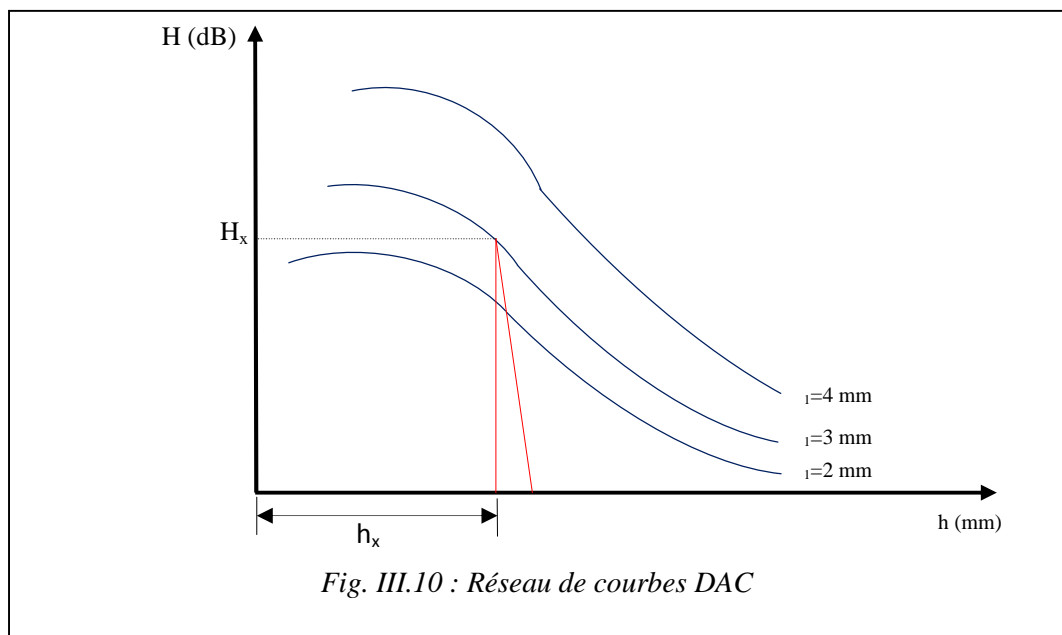
1. Palpeurs droits

On réalise des cales étalons de même matériau que celui à sonder et percées d'un trou de diamètre et de profondeurs calibrées (fig.III.9)



Pour chaque valeur du diamètre du trou, on trace la courbe donnant la hauteur H de l'écho obtenu en fonction de la distance h du fond du trou à la face supérieure de la cale, et pour les mêmes valeurs des autres paramètres de l'énergie et fréquence d'émission, et le même degré de filtrage. On mesure ensuite la hauteur H_x et la position x de l'écho de défaut.

On reporte ces valeurs sur le réseau de courbes, et on lit directement sur le graphique la valeur du diamètre équivalent du défaut (fig.III.10).

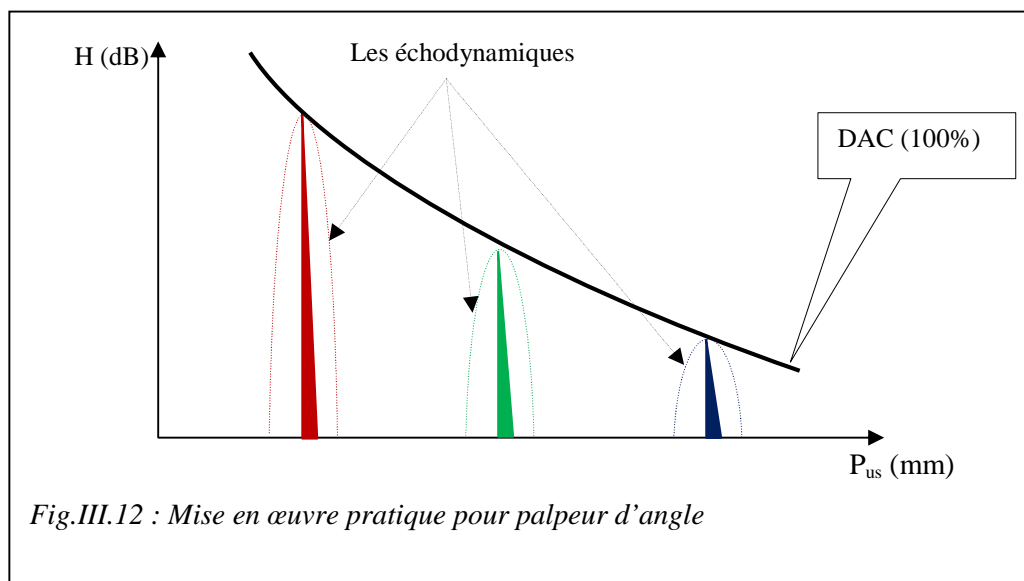
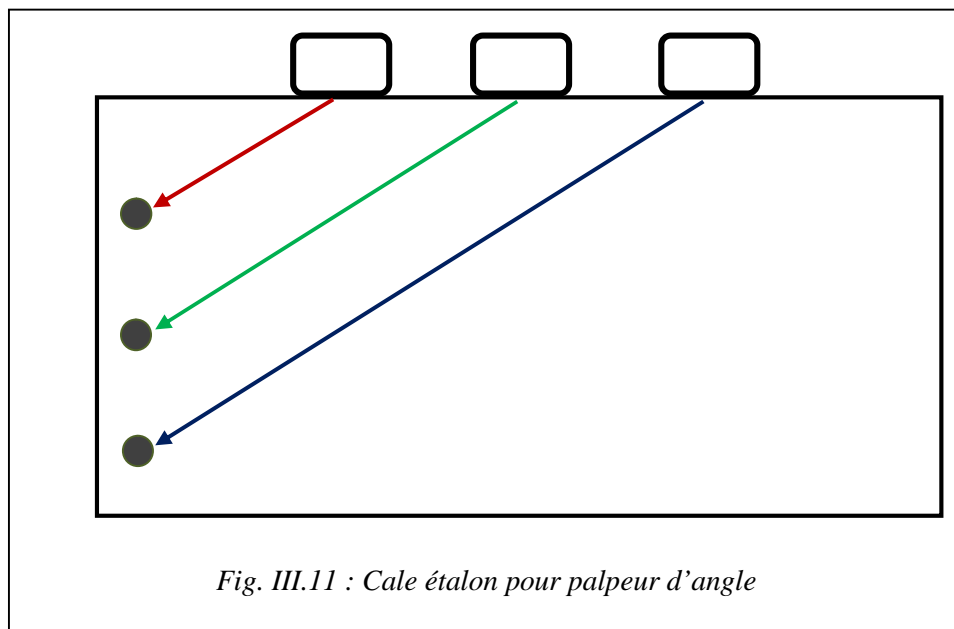


Si le faisceau acoustique touche différentes défautsités de même dimension mais à des profondeurs différentes, l'amplitude d'écho est inversement proportionnelle à la distance entre la défautsité et le palpeur

Il existe des cadrans amovibles transparents sur lesquels de tels réseaux de courbes sont représentés. Ces écrans prévus pour un certain palpeur et un certain matériau sont fixés devant l'écran lumineux, il est alors possible d'évaluer directement les échos des défautsités.

2. Palpeurs d'angles

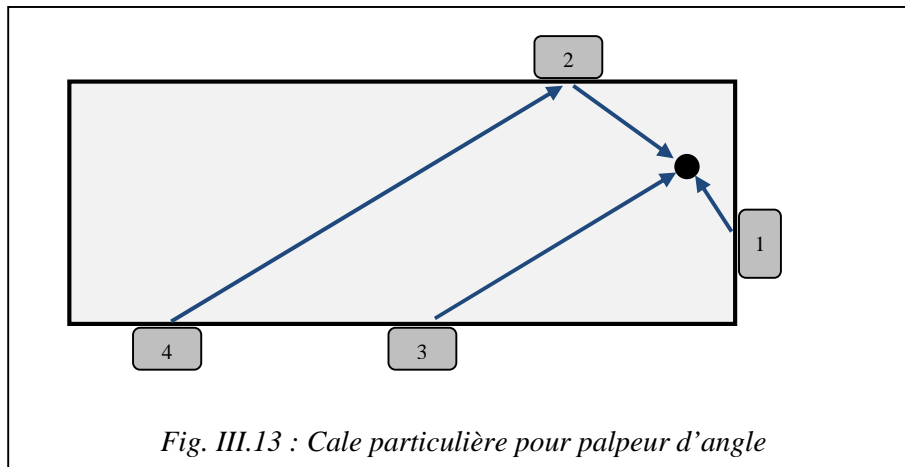
La méthode précédente se prête mal à l'étalonnage des traducteurs d'angles. Il est alors nécessaire de modifier la forme du défaut étalon. On réalise dans ce cas des cales parallélépipédiques présentant des trous cylindriques parallèles à une des faces de la cale et régulièrement espacés (fig.III.11). On mesure, pour chaque position du palpeur, l'amplitude maximale de l'écho obtenu et on trace ensuite un abaque de même type que celui relatif au palpeur droit. En abscisse on porte l'éloignement du trou par rapport au palpeur. On procède ensuite comme pour les palpeurs droits.



Note :

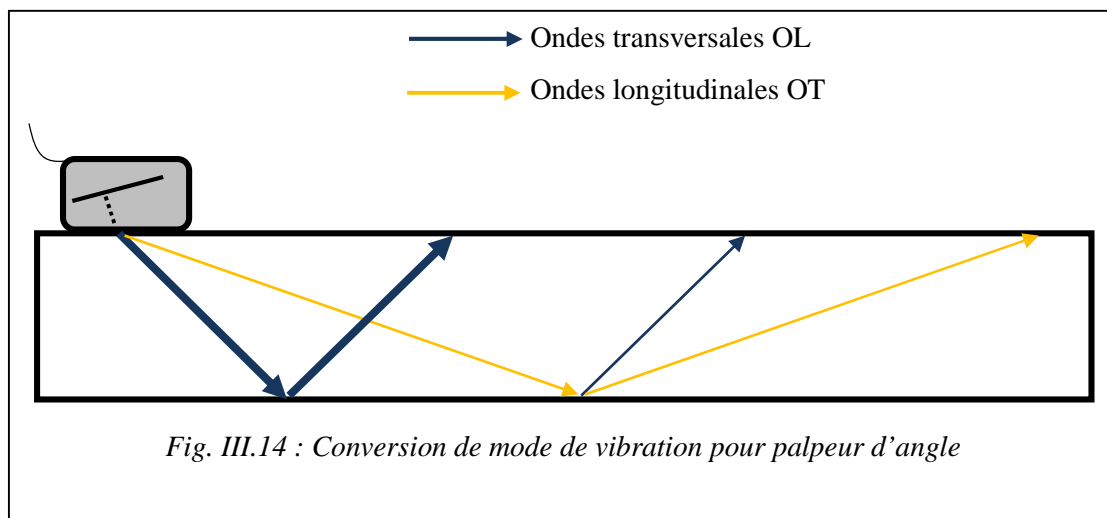
Lorsque le palpeur est loin des trous, le faisceau s'ouvre et intercepte généralement plusieurs trous. Si la résolution axiale du palpeur est mauvaise, il sera impossible de les séparer avec certitude les différents échos

Il existe des cales qui ne présentent qu'un seul trou, ce qui facilite la réalisation de la cale, mais peu conduire à des valeurs erronées de l'étalonnage. En effet, lorsque l'étalonnage s'effectue en direct (position 1, 2, 3 de la fig.III.13) on obtient une courbe régulière. Lorsque l'on désire augmenter la distance sondée, on recherchera un rebond du faisceau (position 4). Mais lorsqu'un faisceau ultrasonore arrive sous incidence oblique sur une surface, on génère deux ondes : une de mode longitudinal **L** et une de mode transversal **T**. Comme seule l'onde transversale contribue à la formation de l'écho, l'onde longitudinale est perdue. Les courbes en étalonnage direct et par rebond ne se raccordent généralement pas.



Explication de la note précédente :

Le palpeur à angle qui émet des ondes transversales, génère aussi un faisceau d'ondes longitudinales (fig.III.14). La présence de faisceau OL peut causer de faux échos, et par conséquent provoquer à fausse interprétation des résultats.



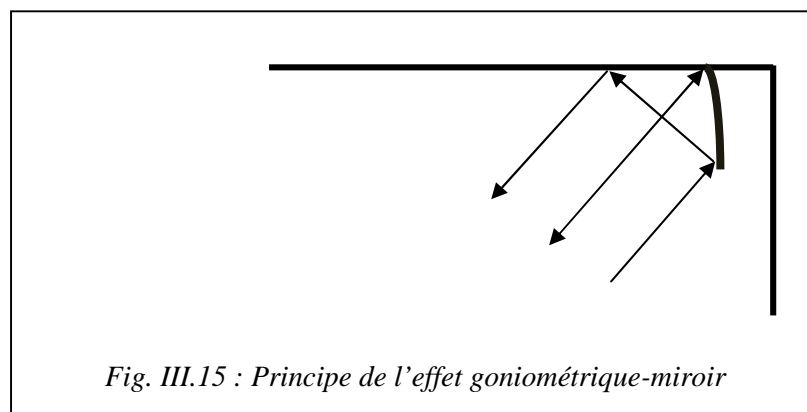
III.2.3.3. Méthode de comparaison avec l'écho de fond

Cette méthode est surtout utilisée pour le contrôle des tôles minces. On ne s'intéresse dans cette méthode qu'au rapport entre l'écho de défaut et l'écho de fond, ce rapport est mesuré soit dans le premier, soit dans le second, soit dans le $n^{\text{ième}}$ parcours. Appelons k le rapport entre la hauteur I_n du $n^{\text{ième}}$ écho de défaut et la hauteur B_n du $n^{\text{ième}}$ écho de fond (I_n et B_n sont mesurés dans le même parcours).

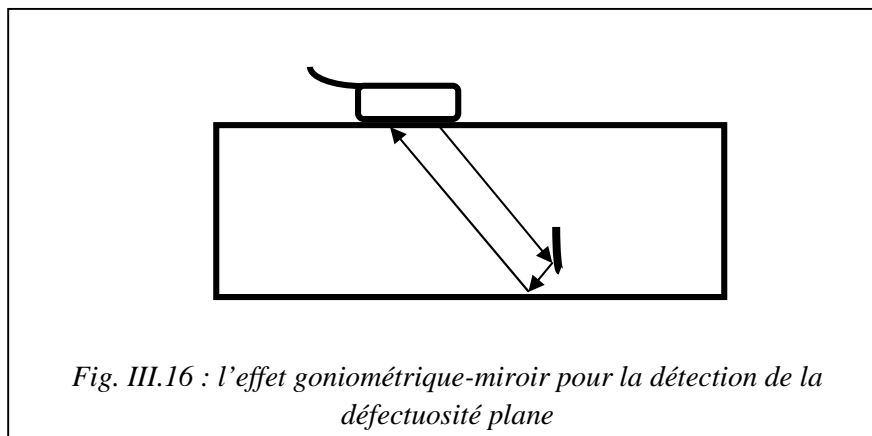
$$k = \frac{I_n}{B_n}$$

III.2.3.4. L'effet goniométrique-miroir

L'onde qui touche un miroir à un angle droit situé entre la fissure et la surface du matériau est réfléchi vers le palpeur, une partie vers son point d'origine si elle touche exactement l'intersection fissure/surface, l'autre partie décalée et parallèle à l'itinéraire aller si cette onde connaît un double renversement de direction entre les deux cotés du « miroir » goniométrique (fig. III.15)



L'utilisation de l'effet goniométrique-miroir est aussi souvent possible là où une défautivité plane perpendiculaire à la surface ne touche pas cette surface (fig.III.16)



III.2.4. Distinction entre défaut volumique et non volumique

Selon leur largeur, on considère deux types de défauts :

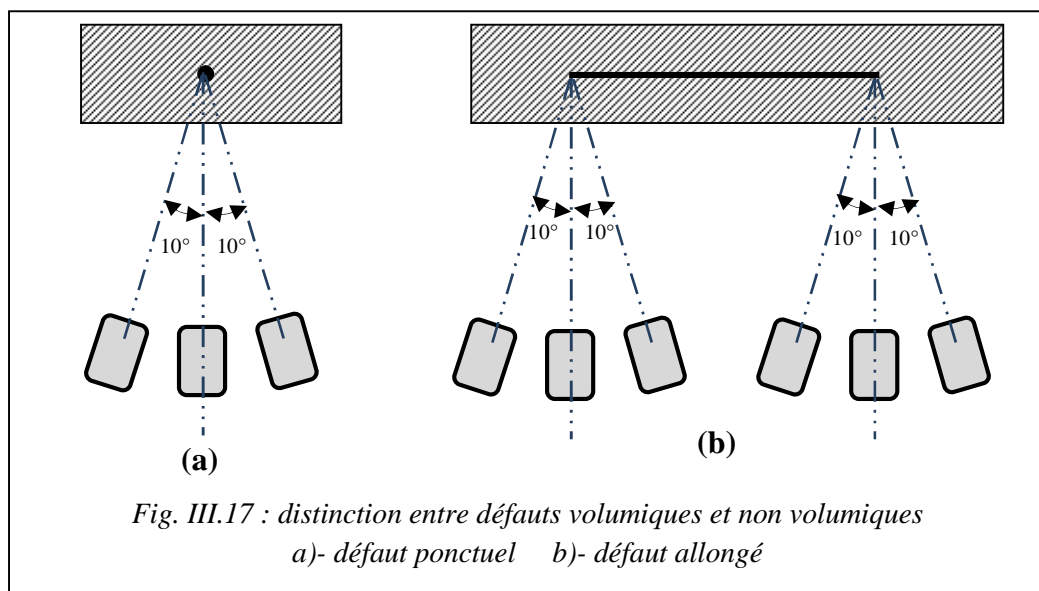
Défauts ponctuels

Après avoir recherché la position donnant un écho de hauteur maximal, on fait tourner le palpeur d'un angle de 10° de part et d'autre du défaut (fig.III.17-a) l'axe de symétrie du faisceau passant par le défaut.

- Le défaut sera considéré comme « volumique » si la décroissance correspondante de l'écho est inférieure à 6 dB environ
- Le défaut est considéré « non volumique » si la décroissance est supérieure à 6 dB

Les dimensions extérieures du défaut étant déterminées, on se place sur le pourtour du défaut (en A et en B, fig.17-b) et on effectue l'opération précédente

- Si la décroissance de l'écho de défaut de hauteur $H_{\max}/2$ est inférieure à la moitié de celle-ci ($H < H_{\max}/4$) en raison de la forme non effilée de ses extrémités, le défaut est considéré comme volumique.
- Si la décroissance est supérieure à la moitié de celle-ci ($H > H_{\max}/4$), le défaut est considéré comme non volumique



Conclusion

L'identification des défauts dans les matériaux est une exigence de la sécurité et de la fiabilité des systèmes mécaniques fonctionnant sous charges dynamiques. Dans ce chapitre, on a traité et détaillé certaines méthodes de localisation et de dimensionnement des défauts dans les pièces soudées. Ces techniques s'avèrent efficaces pour la détection des défauts éventuels à l'intérieur d'une pièce sans l'endommager.

Localisation et Identification des Défauts par le Contrôle Non Destructif

IV. Introduction

Pour montrer la contribution des ultrasons dans le contrôle et l'évaluation non destructive des défauts dans les matériaux métalliques, on propose ci-après une étude expérimentale.

Cette étude comprend :

- Mesures expérimentales sur cales normalisées
- Mesures expérimentales sur éprouvette (pièce soudés) contenant des défauts de soudure (soufflure, et une inclusion non métallique)

IV.1. Dispositif de contrôle ultrasonore

La réalisation de l'ensemble des mesures se fait par un banc de mesure par ultrasons (photo. IV.1) comprenant des palpeurs ultrasonores, un appareil à ultrasons Krautkramer USK8B, gel couplant pour assurer la bonne propagation des ultrasons entre le palpeur et la pièce à sonder, câbles connecteurs LEMO, cales étalons.



Photo .IV.1 : Dispositif de contrôle par ultrasons (labo. LMS)

IV.2. Paramètres de réglage et d'étalonnage d'un appareil à ultrasons

Pour assurer la reproductibilité d'un examen par ultrasons, dans la plupart des cas, des cales étalon sont utilisés : réalisés à partir d'un matériau ayant des propriétés similaires à celles de l'élément à contrôler, ils comportent des réflecteurs artificiels tels que trous forés, trous à fond plat, entailles,... etc.

Les étalons permettent le contrôle et le réglage des appareils à ultrasons et leurs accessoires avant l'exécution d'un travail.

IV.2.1. Types d'étalons

Cale étalon normalisé EN12223 pour les grands palpeurs

Cale étalon normalisé EN27963 pour les palpeurs miniatures

Étalon en escalier 3421

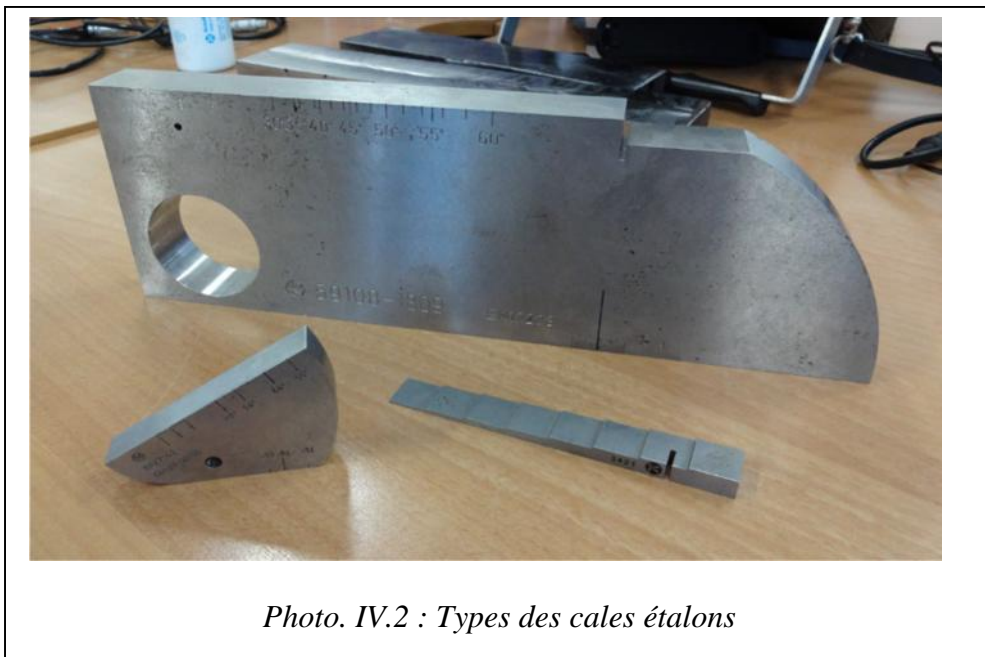


Photo. IV.2 : Types des cales étalons

IV.2.2. Étalonnage

L'étalonnage d'une chaîne de contrôle par ultrasons consiste à afficher sur l'écran de l'appareil la valeur réelle d'une distance préalablement mesurée sur une pièce connue (cale étalon ou pièce mécanique du même matériau à contrôler et possédant des défauts connus, naturels ou artificiellement créés).

Pour le matériau, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau doit être réglée correctement pour pouvoir mesurer la profondeur. Il faut s'assurer de sélectionner le bon mode (longitudinal ou transversale).

L'information sur l'épaisseur de la pièce est entrée. Cette information est particulièrement utile pour les inspections avec palpeur d'angle. Elle permet des mesures de profondeur exactes par rapport au nombre de demi-bonds dans les applications avec palpeur d'angle.

Pour le palpeur, il faut connaître la fréquence pour pouvoir configurer correctement les paramètres de l'émetteur et les paramètres de filtrage du récepteur.

Il faut établir le décalage à zéro pour obtenir des mesures d'épaisseur correctes

Il faut aussi régler l'amplitude de réflecteurs connus et les garder à portée de mains pour référence afin d'utiliser les techniques courantes de dimensionnement par DAC.

Pour le Sabot, il faut connaître la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le sabot. Point d'incidence ou la référence de devant de la sonde.

Pour les blocs d'étalonnage, les blocs d'étalonnage fournissent des cibles connues, qui donnent des indications d'échos utilisées pour le réglage des instruments et l'évaluation des traducteurs, ainsi que des références pour évaluer la taille des défauts.

Dans l'inspection par ultrasons conventionnels, il faut effectuer toutes les étapes ci-dessous pour obtenir des résultats corrects. Puisqu'une sonde mono-élément a une ouverture fixe, la sélection de l'angle d'entrée et du décalage du zéro, ainsi que l'étalonnage de l'amplitude sont propres à une sonde ou à une combinaison sonde-sabot.

À chaque changement de sonde ou de sabot, il faut refaire l'étalonnage

Les étapes qu'il faut suivre

- Configuration de l'appareil, choix de la vitesse, de la plage de mesure...
- Étalonnage de l'instrument avec un bloc normalisé
- Ajustement et vérification des réglages sur la cale
- Pratique du contrôle sur les pièces et structures

IV.2.3. Étalonnage de l'appareil en ondes transversales

En utilisant la cale universelle d'étalonnage EN 12 223.

Calibrage de palpeur d'angle (angle de faisceau, vérification du point émergent).

Cale en Acier 25x100x300mm.

Le palpeur {45°, 2 MHz, 20*22}.

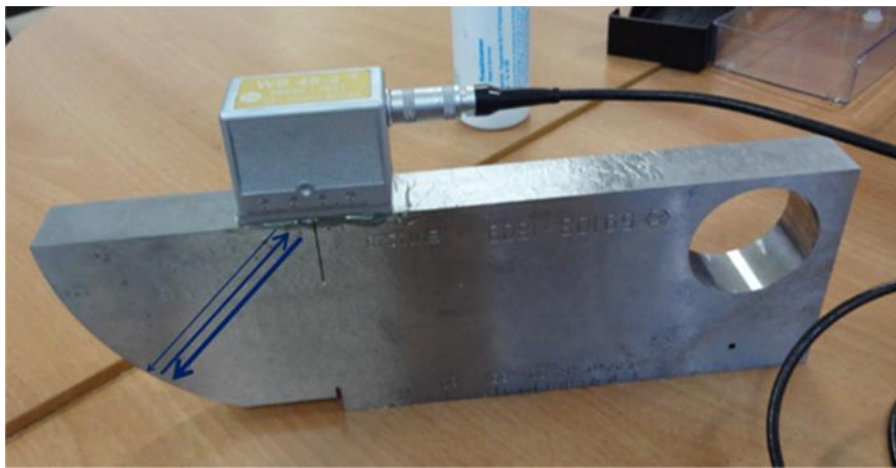
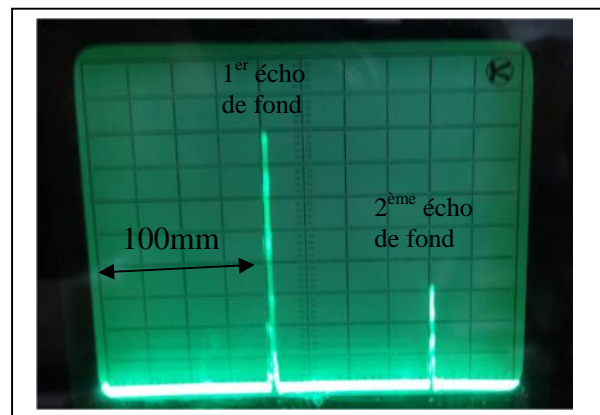


Photo. IV.3 : Étalonnage de l'appareil à ultrasons

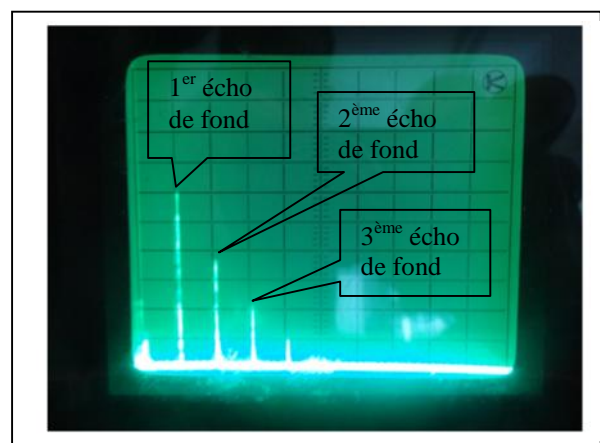
La plage de mesure sur cadran 250mm
(échelle 1 graduation=25mm)
Vitesse des US 3240m/s

Sur écran : La distance entre deux pic successif est égale à 100mm (4 grad*25mm), elle correspondre au rayon de cercle de la cale (voir photo en face)



La plage de mesure sur écran 1000mm
(échelle 1 graduation=100mm)
Vitesse des US 3240m/s

La distance entre deux pic successif =100mm (1 grad*100mm) qui représente le rayon de cercle de la cale
Voir photo en face



IV.2.4. Détection de défauts dans le bloc étalon

Recherche d'un trou de diamètre 50mm sur la cale

Le parcours ultrasonore
 $P = 75\text{mm}$

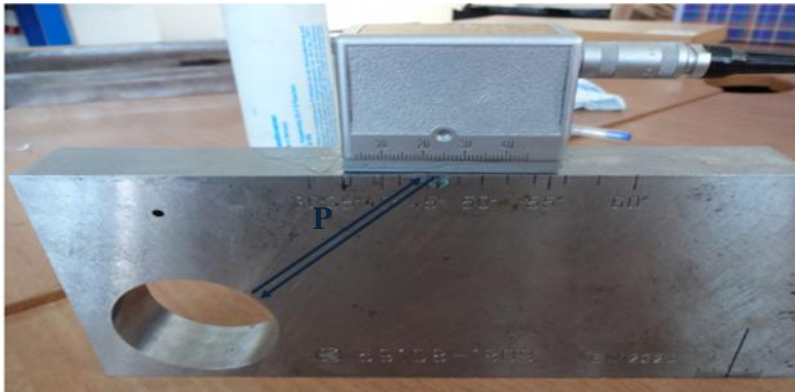
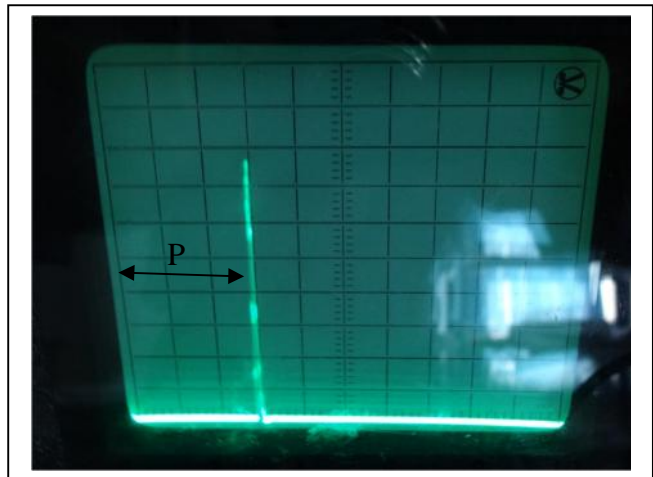


Photo. IV.4 : Recherche d'un trou de diamètre 50mm sur la cale

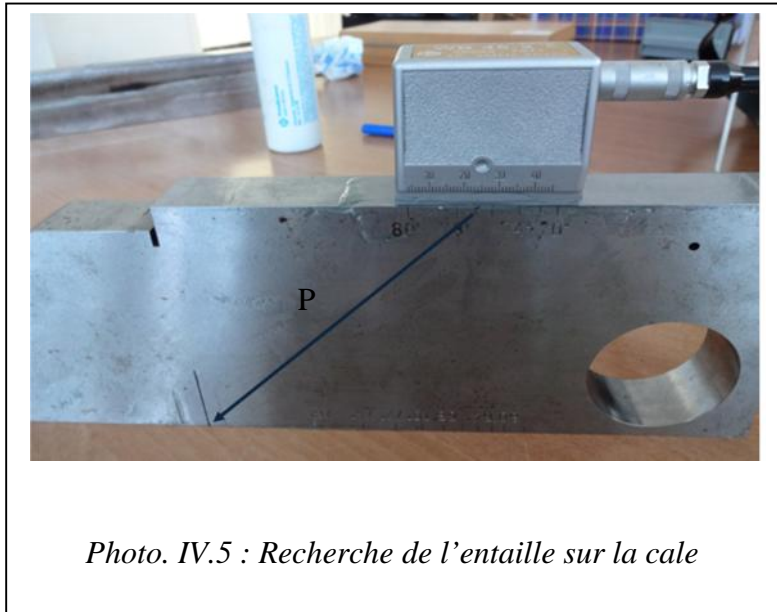
La plage de mesure sur cadran 250mm
(échelle 1 graduation=25mm)

Un pic apparait à distance
 $3 \times 25 = 75\text{mm}$
(Voir photo en face)



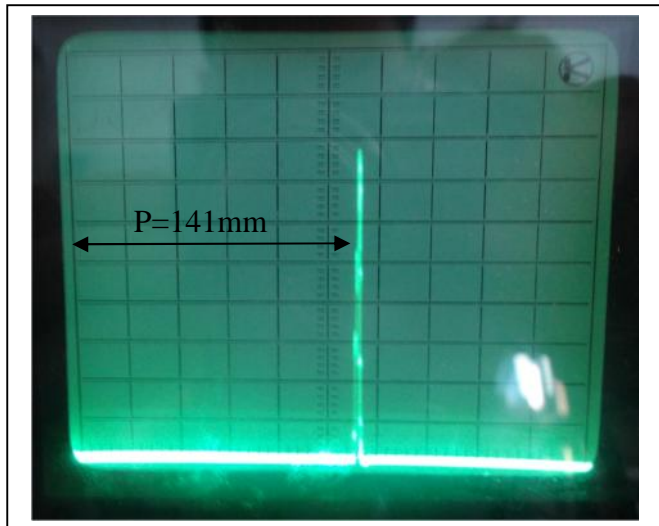
Recherche de l'entaille sur la cale

Parcours ultrasonore
 $P = a/\sin 45^\circ = 100/\sin 45^\circ$
 $P = 141\text{mm}$
(Voir photo en face)



La plage de mesure sur cadran 250mm
(échelle 1 graduation=25mm)

Un pic apparait à distance
 $5.65 * 25 \approx 141\text{mm}$
(Voir photo en face)



Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale

La distance entre le point d'émergence du palpeur et le trou de diamètre 2mm qui correspond au parcours ultrasonore

$$P = h / \cos 45^\circ = 14 / \cos 45^\circ$$

$$P = 20\text{mm}$$

(Voir photo en face)

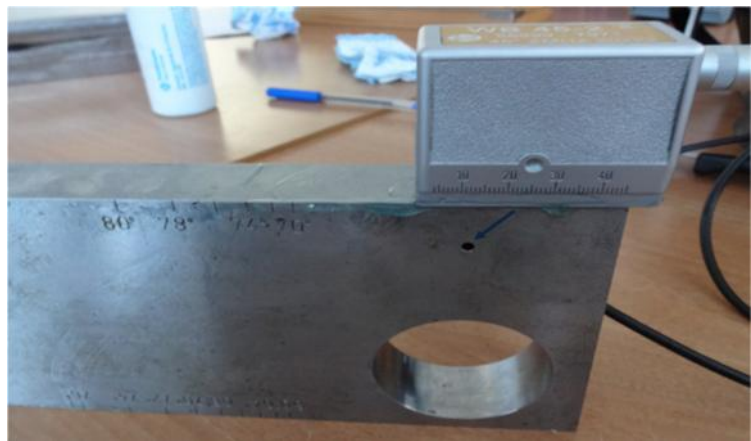


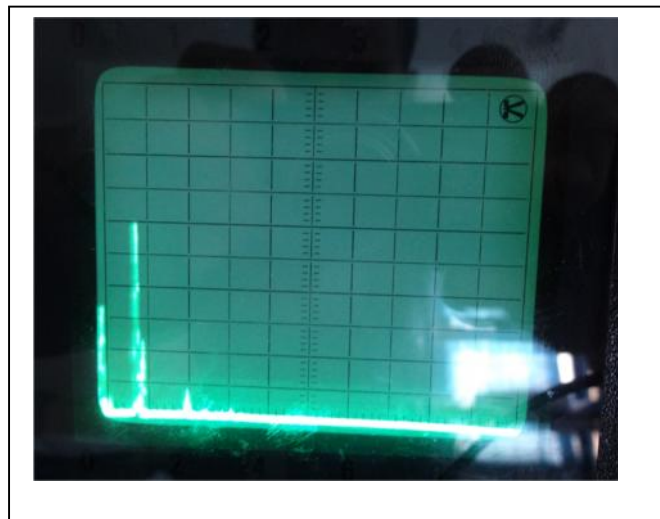
Photo. IV.6 : Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale

La plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

Un pic apparait à distance

$$0.8 * 25 = 20\text{mm}$$

(Voir photo en face)



Recherche de l'entaille sur la cale : mesure 1/2 bond

La distance entre le point d'émergence du palpeur et l'entaille qui correspond au parcours ultrasonore

$$P = e / \cos 45^\circ = 25 / \cos 45^\circ$$

$$P = 35\text{mm}$$

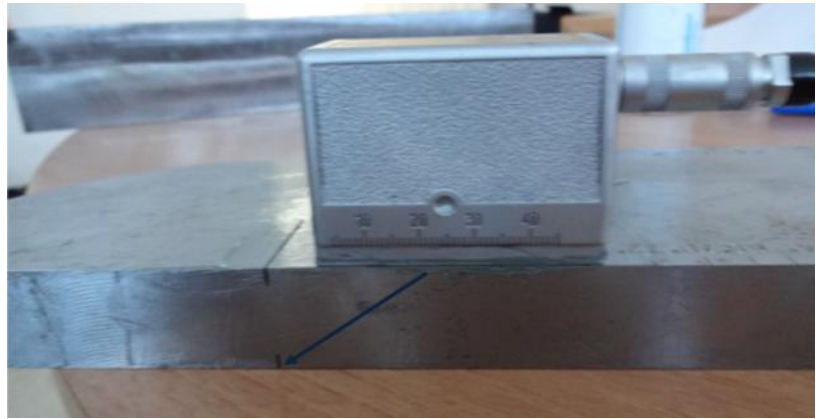
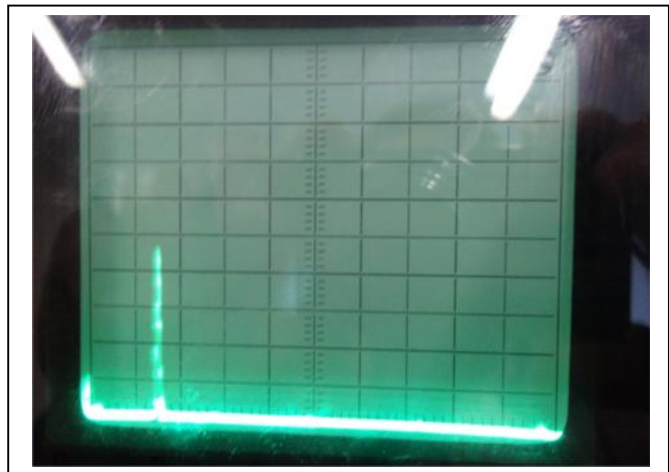


Photo. IV.7 : Recherche de l'entaille sur la cale : mesure 1/2 bond

La plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

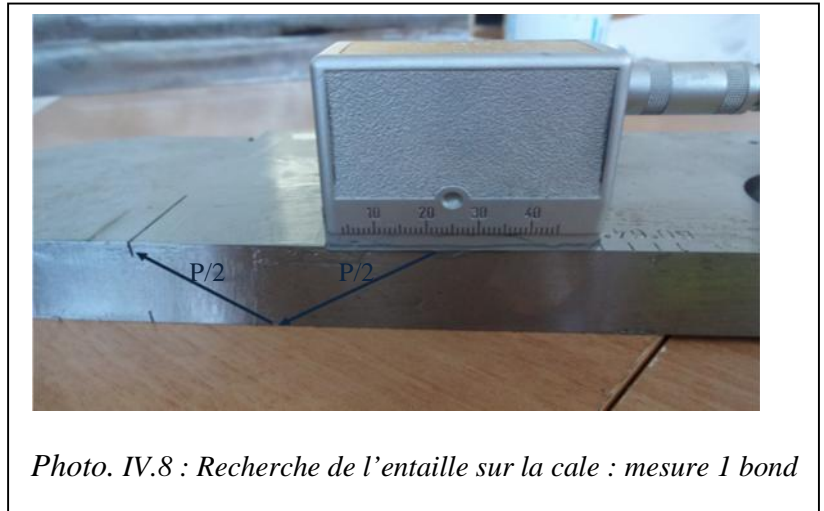
Un pic apparait à distance $1.4 * 25 = 35\text{mm}$
(Voir photo en face)



Recherche de l'entaille sur la cale : mesure 1 bond

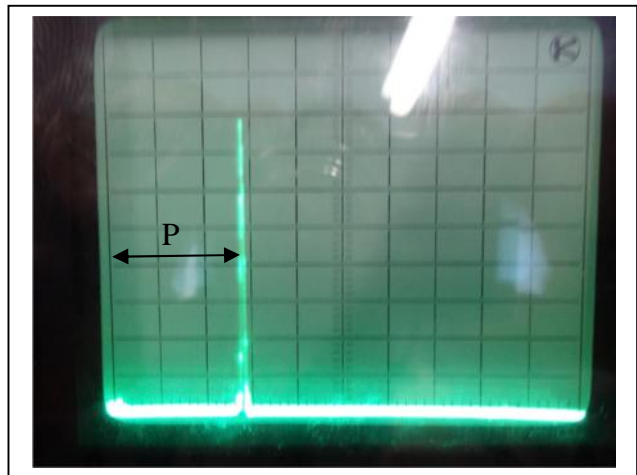
La distance entre le point d'émergence du palpeur et l'entaille qui correspond au parcours ultrasonore

$$P = 2e/\cos 45^\circ = 2 \cdot 25 / \cos 45^\circ$$
$$P = 70\text{mm}$$



La plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

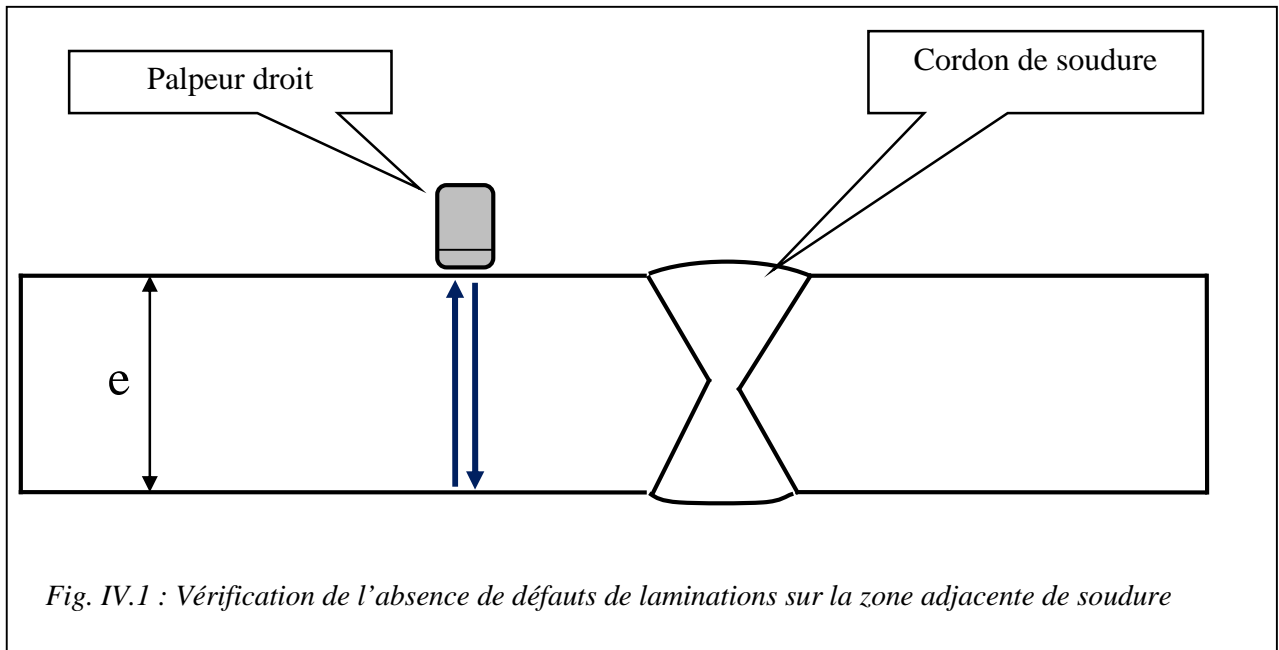
Un pic apparait à distance $2.8 \cdot 25 = 70\text{mm}$
Voir photo en face



IV.3. Contrôle de soudures

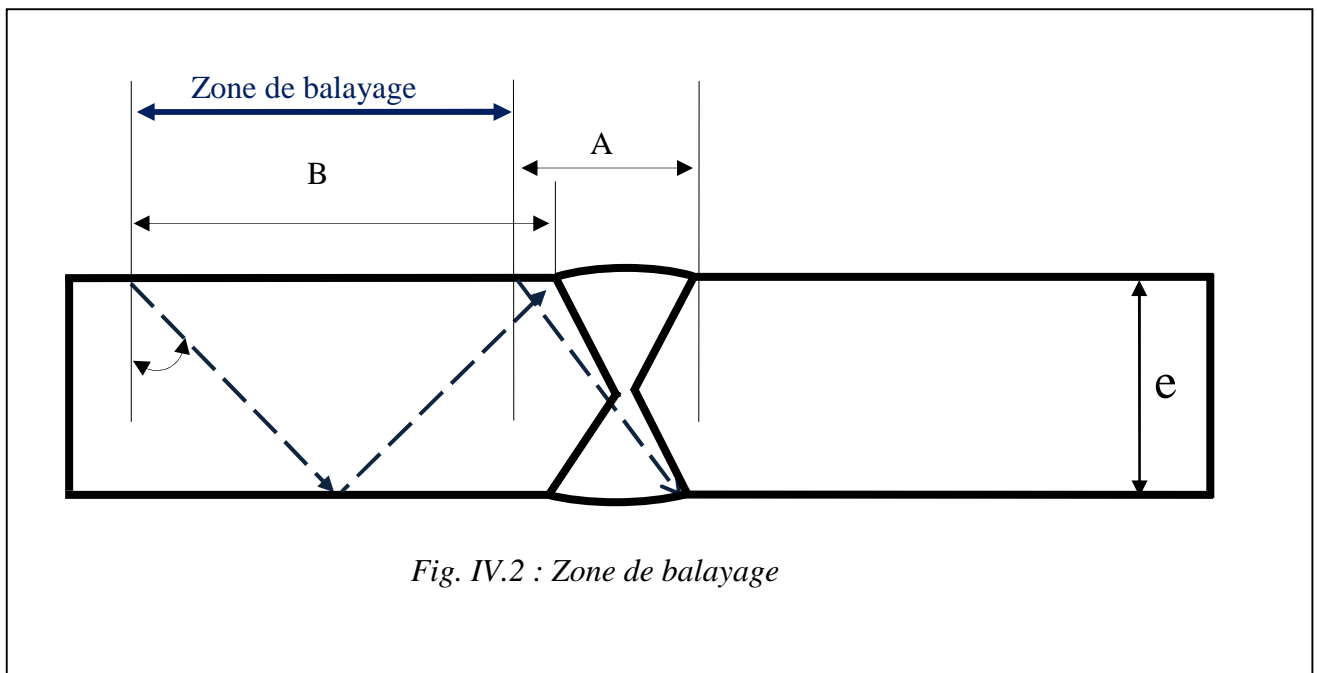
IV.3.1. Contrôle des zones adjacentes par ondes longitudinales

D'abord en faire un balayage avec palpeur droit dans la zone adjacente de cordon de soudure pour vérifier l'existence d'un défaut où pas, avant de contrôler la zone de soudure.



IV.3.2 Lignes de balayage pour le contrôle en ondes transversales

Soudures en X



$$A = e \tan$$

$$B = 2e \tan$$

Note : les lignes de balayage ont les mêmes formules **sauf que les repères sont différents.**

IV.4. Localisation et estimation des défauts de soudure dans une pièce

On a réalisé deux défauts sur deux pièces soudées en X, Les défauts sont situés des distances déterminées et avec des dimensions connues au préalable. Les figures suivantes représentent les pièces avant et après soudage (photo IV.9) et (photo IV.10)

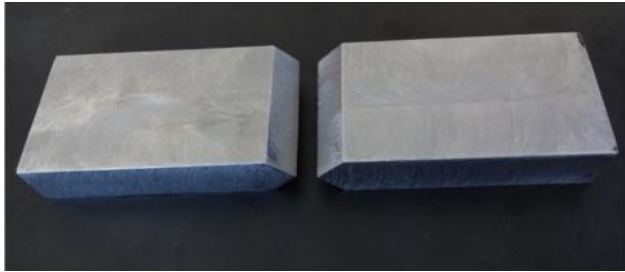


Photo IV.9 : La pièce avant le soudage



Photo IV.10 : La pièce après le soudage

Sur l'écran seuls les pics qui apparaissent entre l'intervalle $[e/\cos, 2e/\cos]$ qui prend en considération (les défauts appartenant à la zone de soudure). En dehors de cet intervalle, les pics qui peuvent apparaître ne font pas partie des défauts présents dans la zone de soudure
La zone de balayage est entre $[36.7\text{mm}, 73.5\text{mm}]$, qui correspond sur écran $[1.46, 2.9]$ pour une plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

La pièce soudée a les dimensions suivantes

Epaisseur 26mm

Longueur 271mm

Largeur 67mm

Contrôle en 1 bond

La pièce soudée contient deux défauts réalisés au préalable :

Le 1^{er} défaut est une soufflure, et le 2^{ème} défaut est une inclusion non métallique (une pierre)



Fig. IV.3 : Repérage de la pièce soudée

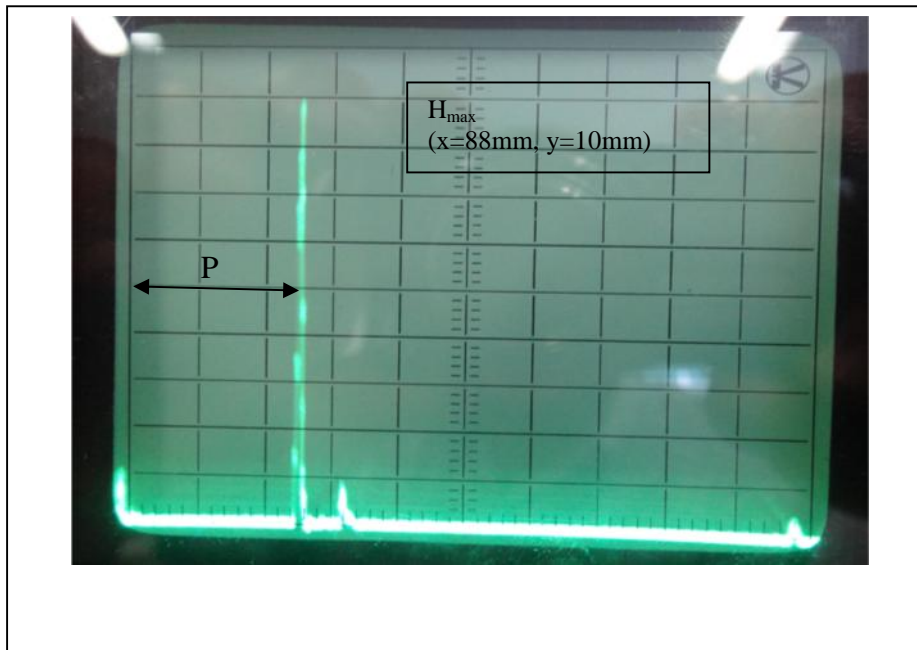
IV.4.1. Localisation et estimation du premier défaut

1. Positionnement du premier défaut

On cherche la position qui donne un écho d'amplitude maximale.



Photo. IV.11 : Recherche du premier défaut



La plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale H_{\max} apparaît à : $P=2.4 \times 25 = 60\text{mm}$, correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à :

$$d = P \cdot \sin 45^\circ = 60 \cdot \sin 45^\circ = \mathbf{42.4\text{mm}}$$

$$\text{La profondeur du défaut } h = 2 \cdot e - P \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 60 \cdot \cos 45^\circ = \mathbf{9.6\text{mm}}$$

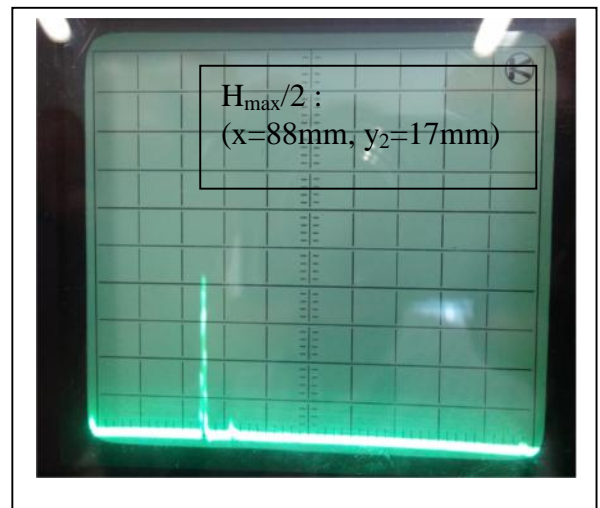
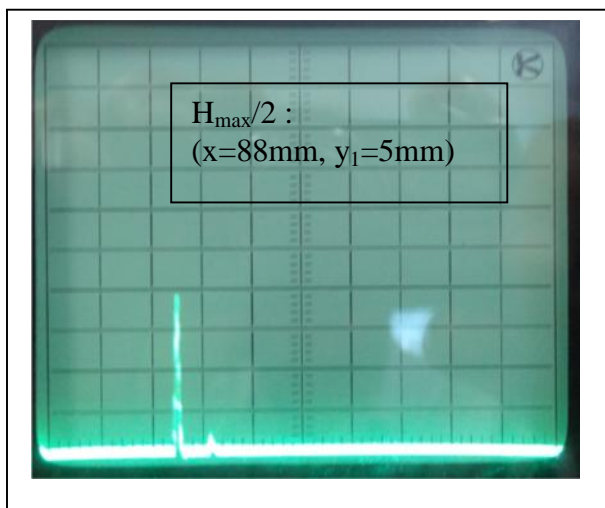
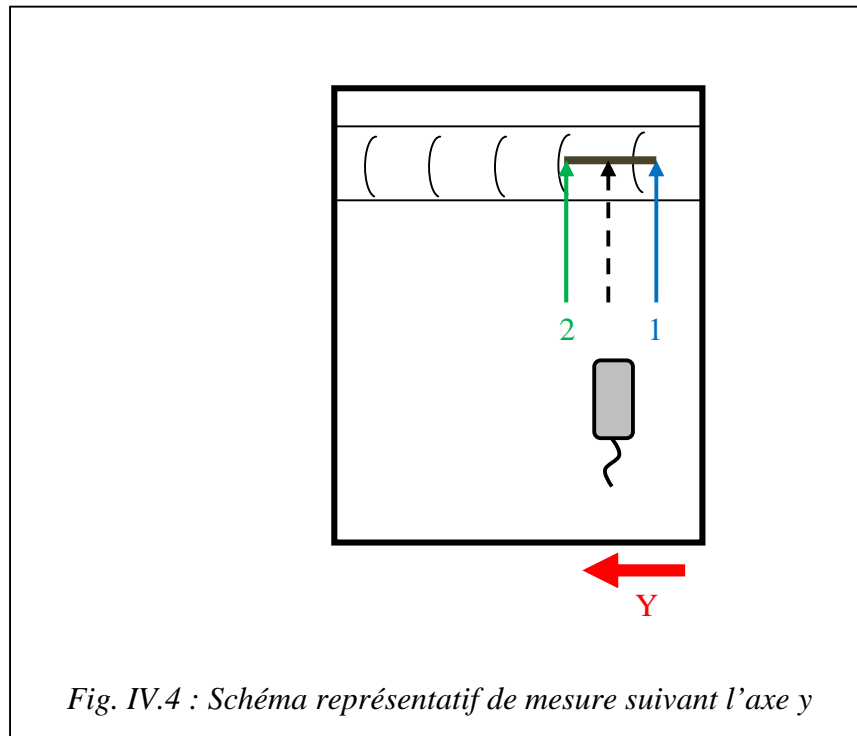
La position du palpeur par rapport à la référence (fig. IV.3) est de coordonnées : $(x=88\text{mm}, y=10\text{mm})$.

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir figure IV.3, aux coordonnées : $x=130.4\text{mm}$ et $y=10\text{mm}$ sur une profondeur $h=9.6\text{mm}$.

2. Dimensionnement du premier défaut par la méthode -6 dB

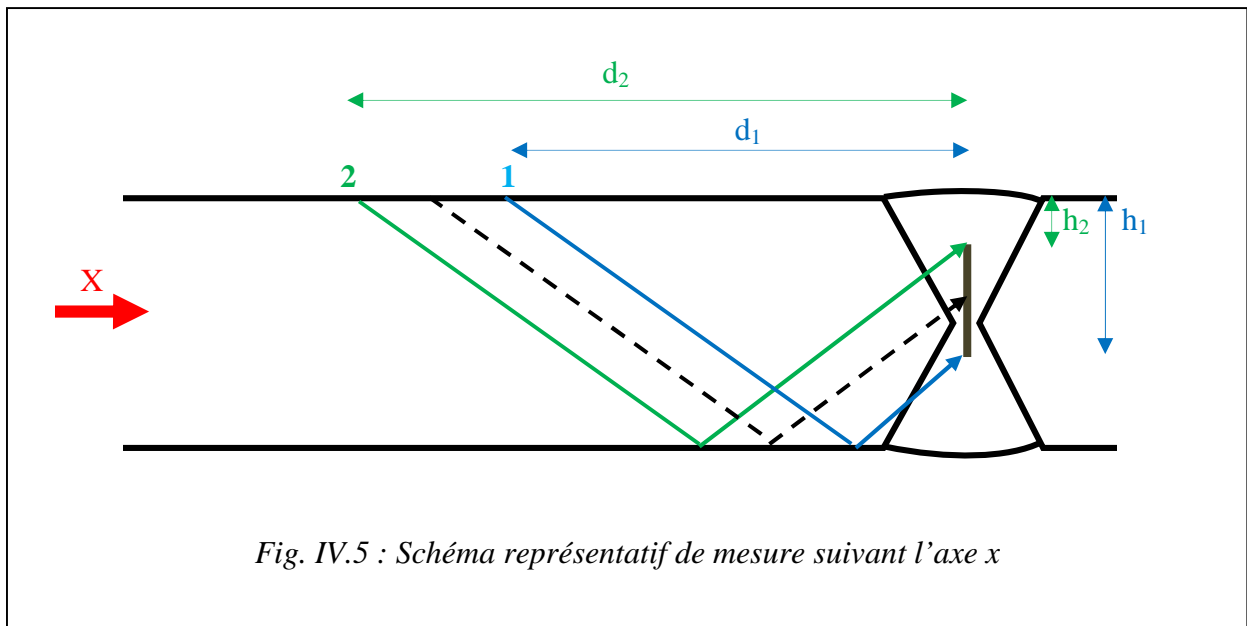
On cherche la position qui donne un écho d'amplitude maximale, puis on cherche les positions qui donnent des échos dont l'amplitude est la moitié de l'amplitude maximale (l'axe du faisceau est tangent au bord du défaut).

2.1. Cherchons la longueur du défaut : déplacement suivant l'axe y (x constante)



La longueur du défaut $L=y_2-y_1=17-5=12\text{mm}$

2.2. Cherchons la hauteur du défaut : déplacement suivant l'axe x (y constante)



Un pic apparaît sur l'écran correspondant à $H_{\max}/2$.

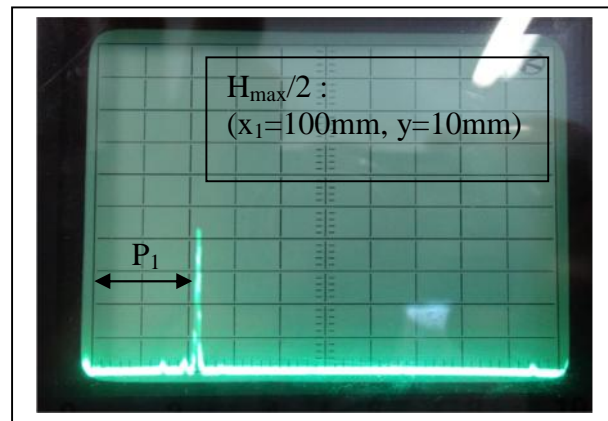
De la même façon que précédemment, on calcule :

$$P_1 = 2.2 \cdot 25 = 55 \text{ mm}$$

$$d_1 = P_1 \cdot \sin 45^\circ = 55 \cdot \sin 45^\circ \approx 38.9 \text{ mm}$$

$$h_1 = 2 \cdot e - P_1 \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 55 \cdot \cos 45^\circ$$

$$h_1 = 13.1 \text{ mm}$$



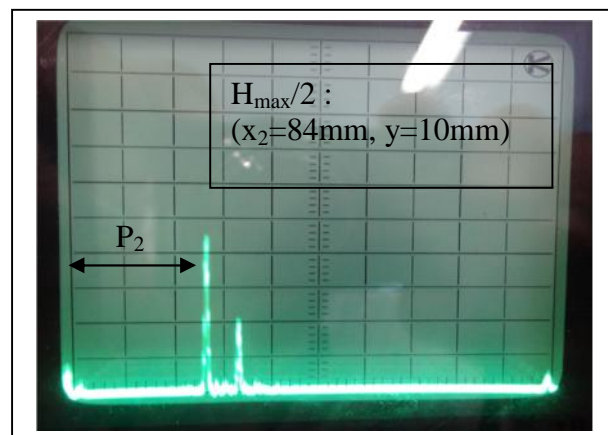
Un pic apparaît sur l'écran correspondant à $H_{\max}/2$.

$$P_2 = 2.6 \cdot 25 = 65 \text{ mm}$$

$$d_2 = P_2 \cdot \sin 45^\circ = 65 \cdot \sin 45^\circ \approx 46 \text{ mm}$$

$$h_2 = 2 \cdot e - P_2 \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 65 \cdot \cos 45^\circ$$

$$h_2 = 6 \text{ mm}$$



La hauteur du défaut $h = h_1 - h_2 = 13.1 - 6 = 7.1 \text{ mm}$

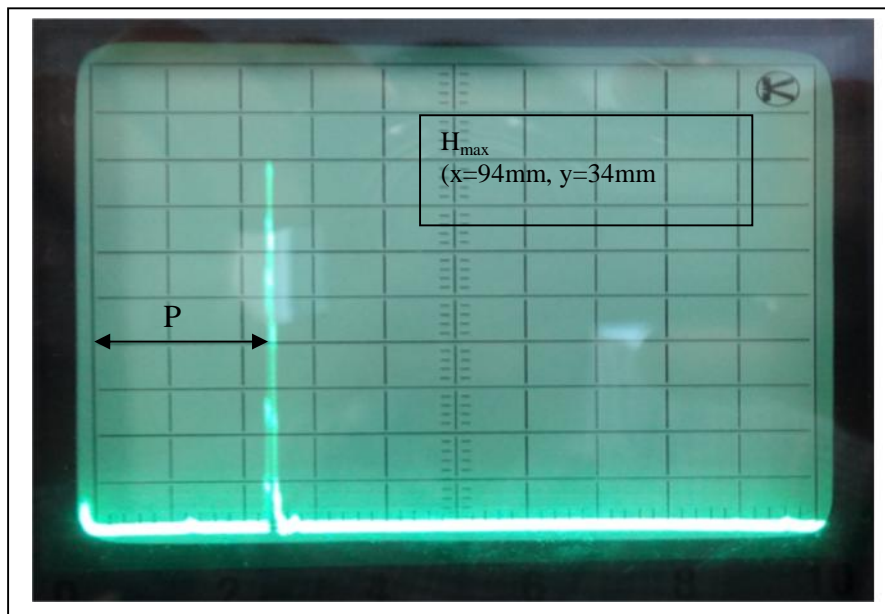
IV.4.2. Localisation et estimation du deuxième défaut

1. Positionnement du deuxième défaut

On cherche la position qui donne un écho d'amplitude maximale



Photo .IV.12 : Recherche du deuxième défaut



La plage de mesure sur cadran 250mm (échelle 1 graduation=25mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale H_{max} apparaît à: $P=2.3 \times 25 = 57.5\text{mm}$, correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à :

$$d=P \cdot \sin 45^\circ = 57.5 \cdot \sin 45^\circ = \mathbf{40.6\text{mm}}$$

$$\text{La profondeur du défaut } h=2 \cdot e - P \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 57.5 \cdot \cos 45^\circ = \mathbf{11.3\text{mm}}$$

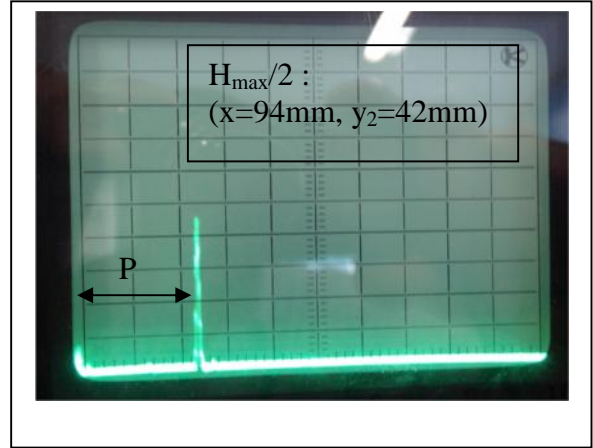
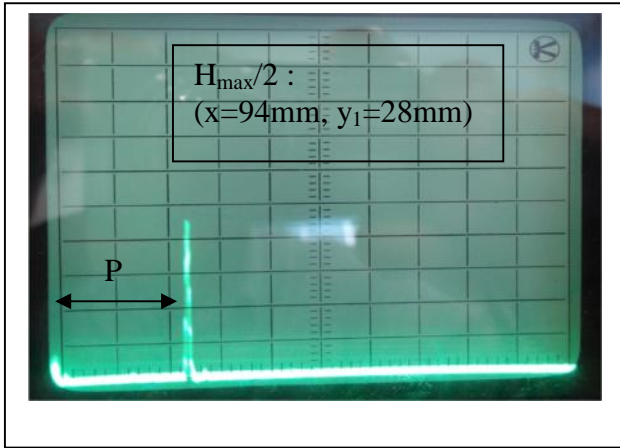
La position du palpeur par rapport à la référence (fig. IV.3) est de coordonnées : (x=94mm, y=34mm).

Le deuxième défaut est localisé par rapport au point de référence, voir figure IV.3, aux coordonnées : **x=134.6mm et y= 34mm sur une profondeur h=11.3mm**

Dimensionnement du deuxième défaut par la méthode à -6 dB

On cherche la position qui donne un écho d'amplitude maximale, puis on cherche les positions qui donnent des échos dont l'amplitude est la moitié de l'amplitude maximale (l'axe du faisceau est tangent au bord du défaut)

2.1. Cherchons la longueur du défaut : déplacement du palpeur suivant l'axe y (x constante)



La longueur du défaut $L=y_2-y_1=42-28=14\text{mm}$

1.1. Cherchons la hauteur du défaut : déplacement du palpeur suivant l'axe x (y constante)

Un pic apparaît sur l'écran correspondant à $H_{\max}/2$.

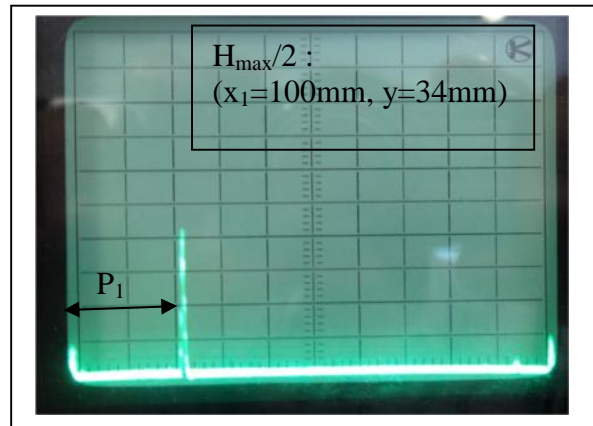
De la même façon que précédemment, on calcul :

$$P_1 = 2.15 \cdot 25 = 53.75 \text{ mm}$$

$$d_1 = P_1 \cdot \sin 45^\circ = 53.75 \cdot \sin 45^\circ \approx 38 \text{ mm}$$

$$h_1 = 2 \cdot e - P_1 \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 53.75 \cdot \cos 45^\circ$$

$$h_1 = 14 \text{ mm}$$



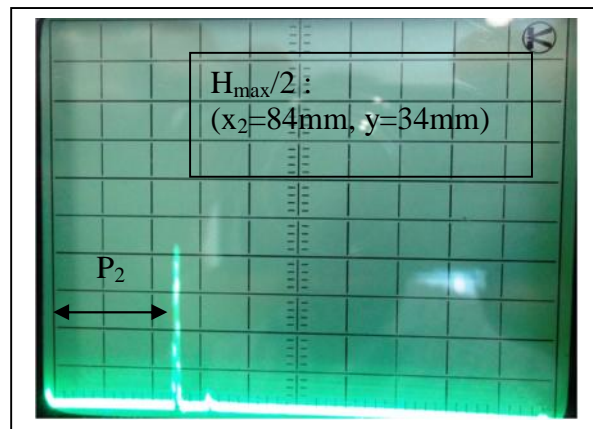
Un pic apparaît sur l'écran correspondant à $H_{\max}/2$.

$$P_2 = 2.45 \cdot 25 = 61.25 \text{ mm}$$

$$d_2 = P_2 \cdot \sin 45^\circ = 61.25 \cdot \sin 45^\circ \approx 43.3 \text{ mm}$$

$$h_2 = 2 \cdot e - P_2 \cdot \cos 45^\circ = 2 \cdot 26 - 61.25 \cdot \cos 45^\circ$$

$$h_2 = 8.7 \text{ mm}$$



La hauteur du défaut $h=h_1-h_2= 14-8.7= 5.3\text{mm}$

IV.4.3. Résultats de mesures

N° du défaut	Position du palpeur		Parcours ultrasonore P (mm)	Profondeur du défaut h (mm)	dimensionnement		Gain (dB)	
	X (mm)	Y (mm)			Longueur L=y ₂ -y ₁	Hauteur h=h ₁ -h ₂		
1	H _{1(max)}	88	10	60	9.6	12	7.1	20+4
	H _{1(max)/2}	88	y ₁ =5	60	9.6			
	H _{1(max)/2}	88	y ₂ =17	60	9.6			
	H _{1(max)/2}	100	10	55	h ₁ =13.1			
	H _{1(max)/2}	84	10	65	h ₂ =6			
2	H _{2(max)}	94	34	57.5	11.3	14	5.3	20+6
	H _{2(max)/2}	94	y ₁ =28	57.5	11.3			
	H _{2(max)/2}	94	y ₂ =42	57.5	11.3			
	H _{2(max)/2}	100	34	53.75	h ₁ =14			
	H _{2(max)/2}	84	34	61.25	h ₂ =8.7			

Parcours ultrasonore P= graduation*échelle de mesure

Profondeur : $h = 2 \cdot e - P \cdot \cos$

Longueur : $L = y_2 - y_1$

Hauteur : $h = h_1 - h_2$

IV.5 Conclusion et Interprétation des résultats

Afin d'identifier les deux défauts présents dans les deux pièces soudées en X. Nous avons dans un premier temps utilisé la méthode directe pour localiser les positions des deux défauts et dans un deuxième temps, nous avons utilisé la méthode de -6dB pour évaluer les dimensions de ces défauts.

Premier défaut :

Sa position par rapport à la référence de la pièce : x=130.4mm et y=10mm.

Les dimensions sont : une longueur de 12mm et une hauteur de 7.1mm.

Deuxième défaut :

Sa position par rapport à la référence de la pièce : x=134.6mm et y=34mm.

Les dimensions sont : une longueur de 14mm et une hauteur de 5.3mm.

Afin de faire la distinction entre un défaut de soufflure et un défaut d'inclusion, on compare le niveau d'énergie émise (gain) : Comme, on a vu précédemment dans le chapitre II, si la valeur de l'impédance acoustique $\cdot V$ du 2^{ème} milieu est plus petite, le coefficient de réflexion sera grand et le coefficient de transmission sera petit et inversement.

Dans notre cas, l'énergie émise pour détecter le défaut 1 est inférieure à celle du défaut 2, car le coefficient de réflexion R1 du défaut 1 est supérieur à celui de R2 du défaut 2. Ce qui implique que $1 \cdot V_1 < 2 \cdot V_2$, le défaut 2 est plus dense que le défaut 1. Donc, on peut déduire que le défaut 1 est une soufflure, et le défaut 2 est une inclusion.

Conclusion

Ce travail m'a permis d'approfondir mes connaissances en matière de CND par ultrasons. Il a relevé plusieurs points, telles que les notions de bases des ultrasons, les techniques de contrôle et les méthodes d'estimation des défauts. Ce mode de contrôle non destructif permet d'estimer la valeur du défaut, et cela sans être obligé de démonter la pièce.

L'acquisition des données est une étape importante. Le choix du palpeur, et les conditions d'acquisition, influent considérablement sur la qualité des données. Plus l'acquisition sera soignée, plus les traitements seront efficaces.

L'amplitude du pic donne une indication sur la taille du défaut.

La combinaison de plusieurs capteurs, ou différentes techniques, donne de meilleurs résultats.

La position de l'écho du défaut entre le pic d'émission et l'écho de fond est proportionnelle à sa profondeur.

Pour pouvoir détecter des défauts plans d'orientations diverses, il faut utiliser plusieurs palpeurs d'angles différents.

Si la technique utilisée est inadaptée, cela influe sur la performance de contrôle.

Si la surface réfléchissante (le défaut ou le fond) est située trop près de la surface de sondage, l'écho peut se superposer avec l'impulsion initiale. Le palpeur est dit "aveugle", c'est la notion de "zone morte".

Lorsque la pièce présente des formes compliquées (pièces usinées ou bourrelet de soudure), il se produit des réflexions aux changements de dimension. Il en résulte des échos supplémentaires qui ne sont pas significatifs de défaut dans la pièce.

Les concepts (petit ou grand défaut) ne sont pas synonymes de nocivité, car le même défaut situé à des endroits différents dans une pièce peut conduire dans un cas à la rupture de la pièce, et être inoffensif dans une autre position, c'est le rôle du concepteur de définir si un tel défaut est dangereux ou n'est pas dangereux selon sa position dans la pièce.

Références bibliographiques

- [1] S. Mabrouk “Contrôle non destructif des pipelines : Contribution à l’amélioration de la fiabilité” Mémoire de Magister en génie mécanique. Université BADJI Mokhtar - Annaba, 2011.
- [2] P. Bolland “Traitement d’images ultrasonores: étude et application de la transformation de Hough aux échos de diffraction”. Thèse de doctorat 1999, université de Bourgogne-France.
- [3] Ph. Brédif, J. Plu, Ph. Pouligny and C. Poidevin, “Développement d’une méthode de contrôle des rechargements de rails” Centre de Saclay, SNCF -Direction de l’Ingénierie, France, 2006.
- [4] N. Feuilly, O. Dupond, B. Chassignole, J. Moysan, G. Corneloup “Lien entre le bruit ultrasonore rétrodiffusé et la microstructure des matériaux polycristallins” Labo. CND-EDF R&D, LCND – Université de la Méditerranée, 2008.
- [5] M-A Ploix “Etude de l’atténuation des ondes ultrasonores - application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique” Thèse de Doctorat de l’école doctorale : MEGA, présentée devant INSA – Lyon, 2006
- [6] R.Drai “Techniques de traitement des signaux ultrasonores appliquées au contrôle non destructif des matériaux”. Thèse Doctorat 2005 USTHB-Alger.
- [7] S. Laddada “Evaluation des discontinuités dans les matériaux à l’aide de l’analyse par ondelettes des signaux ultrasonores”. Thèse de Magister 2012, Université de Boumerdès.
- [8] J. Perdijon “Le contrôle non destructif par ultrasons” Editions HERMES. Paris 1993.
- [9] J. DUMONT-FILLON “Contrôle non destructif”. Techniques de l’Ingénieur, 1996.
- [10] “Ultrasonic testing of materials at level 2 : training manual for non-destructive testing techniques” technical document issued by the international atomic energy agency, vienna, 1988
- [11] A. Vincent “production et détection des ondes ultrasonores” INSA – Lyon. Edition CAST Centre d’actualisation scientifique et technique, 1986.
- [12] Z. Ghalmi “Contribution au développement d’un capteur ultrasonique pour mesurer l’épaisseur de la glace”. Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) -2006.
- [13] J.H.Marchese “Méthode de contrôle par ultrasons” I.U.M-Nimes, editions Cast 1986
- [14] M. Berke “Nondestructive Material Testing with Ultrasonics-Introduction to the Basic Principles”. Krautkrämer Training System -1992.
- [15] B. Bossuat “Ultrasons : techniques particulières de contrôle”. CETIM 1996.

- [16] J.C.Legrand et M.Veaux “Approche pour une caractérisation de la nocivité des défauts”, Revue de SIS SFIA – Marseille Juin, 1977.
- [17] R.J. Hudgell “Handbook on the ultrasonic examination of austenitic clad steel components”. The International Institute of Welding, Published by European Commission, Joint Research Centre - Institute of Advanced Materials 1994 Luxembourg.
- [18] A.Lambert, J.RIvenez et G.Wache “contrôle non destructif ” CETIM, 1991.
- [19] R. A. Youshaw “A guide for ultrasonic testing and evaluation of weld flaws” U.S. Naval Ordnance Laboratory - Washington, D.C. 1970.
- [20] B. Mitsui “ultrasonic testing”. Prepared for the Health and Safety Executive HSE -First published 2005 -ISBN 0 7176 2945 7 - HSE Books – United kingdom.
- [21] J. and H. Krautkrämer “Ultrasonic testing of materials” 4th edition (1990) Springer, Verlag, New York.
- [22] J. D. Lavender “Ultrasonic testing of steel castings” by Steel Founders' Society of America, Cast Metals Federation Building, Ohio – USA, 1976.