

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

THEME

Approche expérimentale pour un contrôle non destructif par ultrasons

Proposé et dirigé par :

Mr. ABDOU ABDELHAK

Présenté par :

DELLOUM RAFIK ABDELHAK
YAHY IZZEDDINE
ZAITER ABDELHAMID

Année Universitaire : 2010 / 2011

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier bien notre Dieu et après notre encadreur

Mr. Abdelhak Abdou

*Pour ses conseils. Aussi nous remercions vivement monsieurs
les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail*

*Nos remerciements vont également à l'ensemble du personnel de la société de
SONALGAZ (MEI) surtout Mr. Guechichi Mohammed et aussi Idoughi
Nourdine. D'avoir nous aider et pour les conseils valeureux.*

L'université de M'SILA, chercheurs, enseignants, et personnels administratifs

*Je tiens à remercier tous mes amis pour leurs aides et à toute personne ayant
contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

Sommaire

Sommaire

Chapitre I: Techniques du Contrôle Non Destructif CND	5
1. Introduction :	5
1.1. Définition:	5
1.2. Le but de Contrôle Non Destructif (CND):.....	5
1.3. Les domaines d'application sont nombreux :	5
2. Les différentes techniques de CND :	6
2.1. Examen visuelle:	6
2.3. Radiographie:	7
2.4. La thermographie stimulée:	9
2.6. Courant de Foucault:	10
2.7. Les méthodes couplées:.....	12
2.8. Les ultrasons:.....	12
2.9. Tableau récapitulatif	13
Chapitre II: théorie et technique des ultrasons	16
Introduction:.....	16
A. théorie et technologie:	16
1. Principe:	16
2. RAPPELS THEORIQUES:	17
3. VITESSE DE PROPAGATION:	19
3.1. Ondes longitudinales ou de compression:	19
3.2. Ondes transversales ou de cisaillement:.....	20
3.3. Ondes de surfaces:.....	21
4. TRANSMISSION ET REFLEXION DES ONDES:	23
4.1. Généralités et cas des incidences normales:	23
5. ABSORPTION:.....	27
6. DIFFUSION:	27
7. PROPAGATION DIRIGEE DES ULTRASONS:.....	28
7.1. Champ proche:.....	28
7.2. Champ éloigné ou ouverture d'angle:	29
8. ZONE MORTE:	30
9. AUTRES CARACTERISTIQUES DES PALPEURS:	30
B. TECHNOLOGIE DES APPAREILS:.....	30
1. LES PALPEURS ET LEUR CONCEPTION:.....	30
1.1. Effet piézo-électrique et magnétostriction:	30

2. TECHNOLOGIE DES APPAREILS A ULTRASONS POUR LA DETECTION DES DEFAUTS:	35
2.1. Introduction:.....	35
2.2. Principe:.....	36
2.3. Générateur et circuit émetteur d'impulsions:.....	37
2.4. Tube à rayons cathodiques:	37
2.5. La base de temps:	38
2.6. Amplificateur à gain variable:	38
2.7. Réglage de seuil:	40
2.8. Réglage de la puissance à l'émission:.....	40
2.9. Equipement supplémentaire:.....	40
C. TECHNIQUES	41
1. TYPES D'EXPLORATION:.....	41
1.1. Type A (A scan):.....	41
1.2. Type B (B scan):.....	41
1.3. Type C (C scan):.....	42
2.1. Techniques avec ondes entretenues:	43
2.2. Techniques avec impulsions:	44
3. ETALONNAGES:.....	45
3.1. Généralités:.....	45
3.2. Blocs d'étalonnages:	46
3.3. Vérification de l'appareillage:	49
4. CONCLUSION:.....	51
Chapitre III: Contrôle par ultrasons.	53
1. INTRODUCTION:	53
2. GENERALITES:	53
2.1. Contrôles au palpeur droit:	53
2.2. Contrôles au palpeur d'angle:	54
3. MESURES D'EPAISSEURS:	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Mesures d'épaisseur à l'aide des palpeurs droits simples:.....	54
3.2. Mesures d'épaisseur par palpeur avec cristaux, émetteurs et récepteur séparés:	55
3.3. Appareils pour mesures d'épaisseur à lecture directe:	56
3.4. Principe des mesures de l'épaisseur en fonction de la vitesse de propagation des ondes US :.....	57
3.5. Principe des mesures d'épaisseur à température élevée:	57
4. RECHERCHE DE CORROSION:	58
4.1. Types de corrosion:	58

4.2. Détection des corrosions:.....	59
5. CONTROLE DE PIECES COULEES ET FORGEES:	60
5.1. Généralités:	60
5.2. Examen de pièces coulées:	61
5.3. Examen de pièces forgées:	63
5.4. Défauts apparaissant en service:.....	66
6. CONTROLES DES SOUDURES:	66
6.1. Contrôle de soudures bout à bout de tôles et, viroles:.....	66
6.2. Contrôle de soudures bout à bout de tubes de faible épaisseur :	71
6.3. Contrôle des soudures d'angle :.....	73
Chapitre IV : Résultats expérimentaux.....	76
1. Introduction:	76
2. Contrôle non destructif par ultrasons:	76
2.1. Matériels:	76
2.2. Étalonnage:.....	78
2.3. Contrôle d'Adhérence.....	79
2.4. Contrôle de Soudure :	87
4. Contrôle non destructif par magnétoscopie:	96
5. Conclusion:.....	99

Table des Symboles

TABLE DES SYMBOLES

e : l'épaisseur de la pièce [m].

v : la vitesse de propagation d'onde [m/s].

f : la fréquence de signal [Hz].

T : une période [s].

λ : longueur d'onde[m].

v_L : vitesse d'onde longitudinale.

V_t : vitesse d'onde transversale.

K : coefficient qui =1,23 pour les métaux usuel.

E :coefficient d'élasticité (module de Young).

G :module de cisaillement ou de glissement.

ρ : la densité des matériaux.

Z : l'impédance acoustique.

Z_L : l'impédance acoustique longitudinale.

Z_t : l'impédance acoustique transversale.

σ_{xx} : contrainte.

V_{part} : vitesse de particule.

I_r : intensité réfléchi.

I_i : intensité incidente.

Introduction Générale

Introduction générale:

L'évolution de l'outil de production et l'augmentation des cadences se traduisent par une nécessité de contrôler la qualité des produits réalisés. De ce fait, de nombreux moyens de contrôle sont apparus, parmi ceux-ci, le contrôle non destructif (CND) qui consiste à évaluer l'état interne et externe d'une structure ou d'un matériau sans porter atteinte à son intégrité. Comme d'autres domaines, le CND est en forte évolution en relation d'une part avec la complexité croissante des pièces à contrôler et d'autre part à l'évolution de l'informatique et des techniques de traitements de données. Les phénomènes physiques sur lesquels repose chacune de ces techniques sont très différents et le choix de l'une d'entre elles dans une application dépend d'un certain nombre de paramètres. Les principaux paramètres sont: la nature des matériaux à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position et forme du défaut), l'environnement du contrôle, le type de contrôle à effectuer (contrôle en ligne, sur pièce mobile, possibilité de contact ou non) et le contexte économique (coût, ..). Pour que l'une de ces techniques soit appliquée, il est bien sûr nécessaire que les propriétés des matériaux à contrôler soient compatibles avec le phénomène physique mis en jeu par la méthode de CND choisie et que les grandeurs mesurées soient significatives afin d'être correctement interprétées. Dans ce travail, nous nous intéressons au CND par ultrasons (US). L'une des préoccupations du CND est d'augmenter la rapidité et la résolution spatiale du contrôle, [1, 3, 4, 5,6].

Dans le domaine de contrôle par ultrasons, les approches analytiques demandent de grandes connaissances des ondes acoustiques, les besoins industriels en matière de contrôle non destructif exigent que les résultats d'investigation soient disponibles rapidement. L'évolution rapide de l'informatique et des techniques de calcul numérique a contribué à résoudre ce problème.

La problématique du CND consiste à détecter des défauts dans une pièce, c'est à dire à mettre en évidence la présence d'une hétérogénéité dans le matériau contrôlé. Au-delà de la seule détection, la caractérisation des défauts reste un objectif majeur de la technique du CND car elle constitue une aide importante à la décision quant à la mise au rebut de la pièce contrôlée. Nous pouvons distinguer deux types de défauts: les défauts de surface qui débouchent sur la paroi externe du matériau, et les défauts internes qui se trouvent dans le volume de la pièce. Les défauts de surface peuvent être des fissures ou des craquelures dues par exemple à la fatigue du matériau, Les défauts internes peuvent être des grands défauts ou des inclusions de corps étrangers. Un modèle inverse est nécessaire dans ce cas pour remonter, à partir des mesures délivrées par le palpeur, aux caractéristiques du défaut, [1, 3, 4, 5,6].

Les objectifs fixés à travers ce travail est de faire, une recherche bibliographique sur les différentes techniques de contrôle non destructif, avoir un aperçu global sur le contrôle par ultrasons et les techniques utilisées. Et fin, faire une approche expérimentale pour un contrôle non destructif par ultrasons au sein de l'Entreprise de Maintenance Industrielle « MEI » de m'sila.

Ce mémoire est partagé en quatre chapitres décrit comme suit :

Dans le premier chapitre : on présentera en premier lieu, la définition et principe général du Contrôle Non Destructif « CND », on passera ensuite aux différentes techniques de CND, principe physique, caractéristiques essentielles de chaque technique ainsi que les domaines d'applications

et les avantages et inconvénients, et on terminera étude comparative des techniques de CND les plus utilisées.

Dans le deuxième chapitre : on exposera un rappel sur la théorie des ondes ultrasonores ainsi que la technologie des appareils utilisés en contrôle par ultrasons.

Dans le troisième chapitre : on proposera en revue les différentes techniques de contrôle par ultrasons en milieu industriel ainsi que les recommandations pratiques pour une meilleure détection des défauts.

Dans le quatrième chapitre : on proposera essentiellement, des résultats expérimentaux pour un contrôle non destructif par ultrasons sur différentes cibles et pour différent type de défauts, et on présentera aussi des résultats de quelques testes pour le contrôle par ressuage et magnétoscopique.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués, les problèmes rencontrés et enfin les perspectives envisagées pour la continuité de ce travail.

chapitre un

**Techniques du
Contrôle Non Destructif
(C N D)**

Chapitre I: Techniques du Contrôle Non Destructif CND

1. Introduction :

L'histoire des essais non destructifs (END) commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, ...etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures...[1,3,4,5,6] .

Nous évoquerons dans ce chapitre, en premier lieu le principe général du contrôle non destructif ; le champ d'application actuel, les différents défauts qui peuvent être détectés, les différentes phases de contrôle. Puis nous aborderons avec plus de détail les différents procédés de contrôle les plus répandus en CND ; principe physique, champs d'application, avantages et inconvénients. Nous terminerons par une analyse comparative des techniques les plus utilisées.

1. 1. Définition:

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défauts), soit au cours de leur utilisation. [1]

1.2. Le but de Contrôle Non Destructif (CND):

Le but principal d'un contrôle non destructif est de déterminer la qualité ou l'état d'une pièce ou d'un assemblage sans nuire à son intégrité, avec l'intention d'accepter ou de rejeter ces élément, Toute méthode de contrôle non destructif, correctement appliquée peut dire si l'état d'une pièce correspond à des tolérances données. En utilisant les méthodes de CND, il est possible de diminuer le facteur d'ignorance sur un matériau, sans diminuer le facteur de la sécurité. En fin, en peut dire que l'utilisation des techniques de CND permettent à l'exploitant de surveiller l'étatde ces équipements et de planifier en conséquence les opérations d'entretien et la maintenance (remplacement des pièces usées, renforcement de structures, reprise des soudures, Ets...). [4]

1.3. Les domaines d'application sont nombreux :

- Détection de défauts et Evaluation,
- Détection de fuite,
- Localisation de défauts,
- Mesures Dimensionnelles,
- Caractérisation des Structures et Microstructures,
- Estimation des Propriétés Physiques et Mécaniques,
- Mesures des contraintes et des réponses dynamiques,
- Choix du matériau et Détermination de la Composition Chimique. [3]

1.4. Quand utiliser le contrôle non destructif?

Il existe des applications des essais non destructifs à tous les stades de la fabrication d'un composant.

- Assistance dans le développement de la production,
- Examen et choix des matériaux,
- Gestion, amélioration ou contrôle du processus de fabrication,
- Vérification des assemblages. [3]

2. Les différentes techniques de CND :

2.1. Examen visuelle:

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien, le plus simple plus générale. L'examen visuel est aussi utilisé dans l'étape finale de plusieurs autres procédés contrôle non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout de l'hétérogénéité locale et superficielle (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhibitoires pour des produits plats du type tôles, tissus, verre, etc. L'examen purement visuel présente toutefois des limites à différents niveaux. Ceci justifie d'ailleurs, l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique, dont les principaux sont décrits plus loin. [1,3,4,5,6] .

Application:

Le champ d'application concerné par cette rapide évolution est celui du contrôle industriel en ligne, qu'il s'agisse du contrôle des produits fabriqués en continu tels que les bandes de tôle, de papier, de verre, de plastique ou du contrôle de pièces fabriquées en grande série, pour lesquelles on s'intéresse non seulement à l'absence de défaut de surface mais aussi à celle de défauts d'aspect ou d'irrégularités dimensionnelles (contrôle de tuiles, de boîtes, de pièces moulées, forgées, Usinées).

Indépendamment du contrôle en fabrication, le contrôle optique visuel, direct, par endoscope ou relayé par un équipement de télévision est de pratique courante dans les opérations de maintenance telles qu'on les effectue dans les domaines de l'aéronautique, du génie nucléaire ou chimique, et dans le génie civil.

Le contrôle optique intervient enfin comme étape ultime des procédés de contrôle décrits par ailleurs tels que le ressuage ou la magnétoscopie dont le rôle n'est d'ailleurs autre que d'améliorer la lisibilité optique des petits défauts. Il est utile aussi de rappeler que les principales techniques de contrôle non destructif délivrent en fait des images qu'il faudra lire et éventuellement traiter: c'est le cas pour la radiographie ou la thermographie, mais la cartographie des défauts devient petit à petit un élément important des contrôles ultrasonores ou par courants de Foucault, [1,3,4,5,6]

2.2. Contrôle par ressuage:

But du ressuage:

Révéler la présence de défauts débouchant à la surface d'une pièce.

Principe du ressuage:

Cette technique consiste à appliquer sur la surface à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre, en particulier par capillarité, dans les ouvertures des défauts. Après un certain temps correspondant à la pénétration du liquide d'imprégnation dans les défauts, l'excès de liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage (Figure (1.1)). La surface est ensuite séchée puis recouverte d'un révélateur du liquide. L'éclairage approprié de la pièce, qui dépend du liquide utilisé, permet l'observation visuelle des défauts à la surface de la pièce. Cependant cette méthode ne permet de mettre en évidence que les défauts débouchant en surface et ne donne pas une caractérisation complète du défaut. [3,4,5,6] [10]

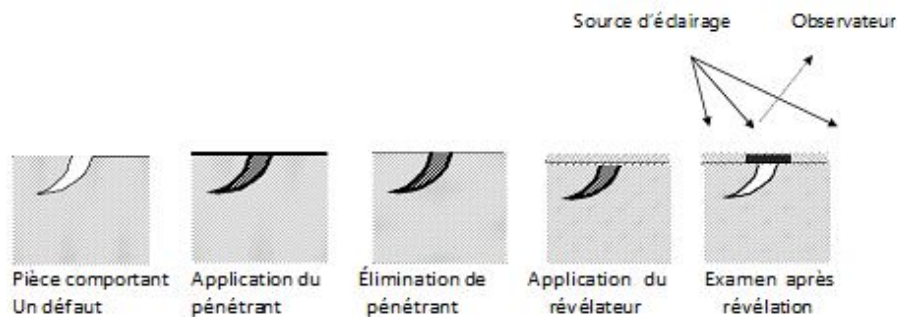


Figure (1. 1): Principe de ressuage.

Avantages du ressuage:

- procédé de contrôle économique,
- procédé de contrôle relativement rapide,
- bonne sensibilité de détection des défauts débouchant avec appréciation de leur longueur,
- détection possible de petit défaut,
- possibilité d'automatisation du procédé, [1,2,4,5,6].

Inconvénients du ressuage:

- détection de défaut obligatoirement débouchant sur une surface,
- impossibilité de contrôler les matériaux poreux (Bruit de fond très important),
- la surface à contrôler ne doit être expérimentée pour certains techniques,
- impossible de révéler les défauts internes,
- gestion des déchets liquides rejetés à l'écart, [1,2,4,5,6].

2.3. Radiographie:

Définition:

La radiographie est la technique de production de radiogramme. Le radiogramme est une image sur une émulsion sensible d'un objet traversé par un rayonnement ionisant.

Le principe de la formation de l'image est en fonction de l'absorption des rayonnements aux différentes épaisseurs et densités du matériau à contrôler. Donc pour un matériau donné (densité donnée) l'absorption sera d'autant plus forte que la matière à traverser sera épaisse. Tout défaut, tout manque, ou surplus de matière aura une action sur cette absorption. [4][10]

Principes et bases physiques:

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'ondes (rayon X) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique du type film photographique argentique ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre. [3][10].

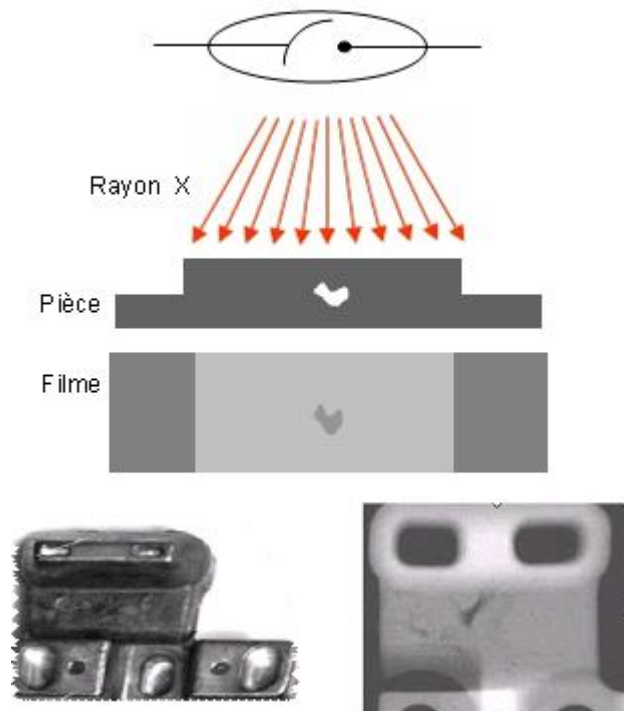


Figure (1. 2): Principe de radiographie.

Avantages des techniques Radiographie:

- facilité de détection des défauts internes des pièces,
- rapidité relative d'obtention du résultat (pour 15 mm),
- traçabilité et archivage des résultats par l'intermédiaire d'une file,
- numérisation possible avec un traitement d'image. [2]

Inconvénients des techniques Radiographie:

- investissement relativement important,
- mise en oeuvre délicate sur chantier avec tube rayon X,
- limitation du contrôle par l'épaisseur et par le matériel utilisé,
- sensibilité de détection liée à l'orientation du défaut par rapport au rayonnement ionisant,
- les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes,
- les opérateurs doivent être très expérimentés. [2]

2.4. La thermographie stimulée:

Le CND par thermographie stimulée consiste à appliquer une source d'énergie (Lampe à incandescence, faisceau laser, flux d'air chaud,...) sur la pièce à contrôler. Le flux résultant de chaleur dans la pièce, et donc la distribution de la température dans celle-ci, est fonction de ses propriétés thermiques et de sa géométrie. La mesure de la distribution de la température à la surface de la pièce est obtenue au moyen d'une caméra infrarouge (mesure de rayonnements thermiques émis par la pièce). Ce qui permet, après résolution du problème inverse et analyse de retrouver certaines propriétés physiques et/ou géométriques de la pièce. [1,2,3,4,5,6][12]

L'excitation énergétique peut être de type impulsif ou bien périodique.

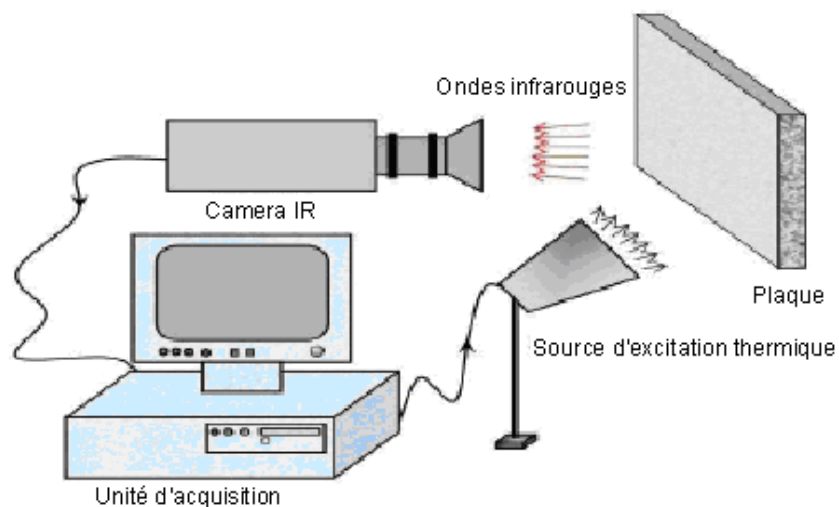


Figure (1. 3): Schéma de principe du contrôle par thermographie stimulée.

2.5. Magnétoscopie:

Le principe de cette méthode repose sur le fait que dans une pièce aimantée, toute anomalie de structure provoque une distorsion des lignes d'induction. Si le défaut est situé au voisinage de la surface, la perturbation engendrée peut être décelée à l'aide de fines particules magnétiques qui s'accumulent à l'aplomb du défaut (Figure (1.5)). Cette méthode à champ magnétique continu ne s'applique qu'à des matériaux ferromagnétiques. Elle est d'autant plus efficace que leur perméabilité relative est élevée. L'interprétation des résultats reste toutefois visuelle. [9, 4, 5,6][10]

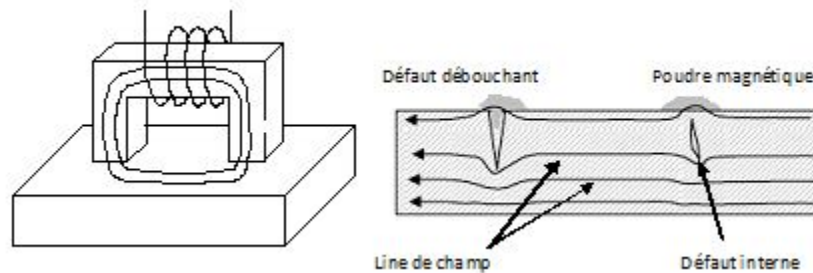


Figure (1. 4): principe de magnétoscopie.

Avantage:

- procédé de contrôle économique,
- méthode de mise en oeuvre plus rapide que le contrôle par ressuage,
- facilité de détection des défauts débouchant et immédiatement sous-jacents (à 2mm maximale),
- les défauts peuvent être obstrués,
- rapidité et relative d'obtention des résultats,
- possibilité d'apprécier la longueur des défauts,
- bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculairement au champ. [2,3,4]

Inconvénients:

- méthode de contrôle exclusivement réservée aux matériaux ferromagnétiques,
- impossible de détecter des défauts en profondeur (> 2mm de profondeur),
- aimantation difficile des pièces à géométrie complexe,
- risque électrique par direct de courant,
- risque de microfissuration sur certains aciers sensibles,
- démagnétisation obligatoire après contrôle. [2,3,4]

2.6. Courant de Foucault:

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819 - 1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifient par la même l'impédance de cette bobine. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle, en effet, le trajet,

a répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

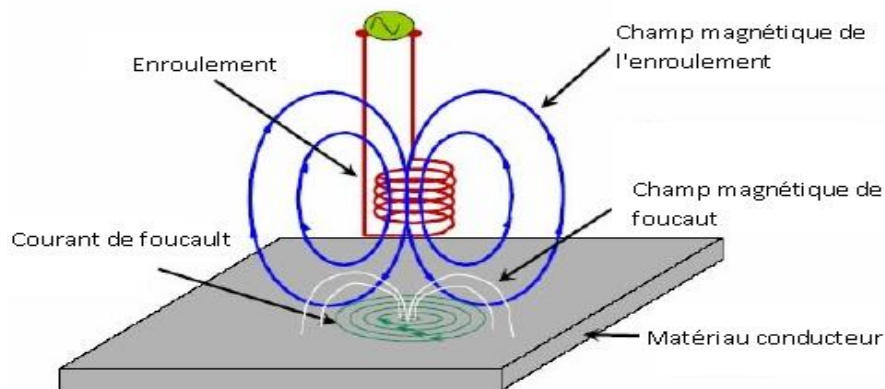


Figure (1. 5): Principe de courant de Foucault.

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation (ou de tout autre bobinage situé dans le champ). Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). [1, 2, 3, 4, 5,6][10]

Avantages et inconvénients:

Les possibilités offertes par la sensibilité de détection et l'automatisation aisée du contrôle par courants de Foucault sont très appréciées sur le plan industriel. L'absence de contact entre la sonde et la pièce à contrôler, la possibilité de défilement à grande vitesse et la facilité d'intégration du procédé dans les chaînes de production donnent à cette technique de contrôle un avantage certain par rapport aux autres procédés.

Les courants de Foucault constituent par ailleurs un moyen de contrôle exceptionnellement fidèle et ce malgré la complexité des phénomènes électromagnétique mis en œuvre et la multitude des paramètres d'action. Ce caractère d'excellente reproductibilité est très important pour les contrôles en maintenance, ainsi que pour la qualité des procédures d'étalonnage du matériel. Il est possible, avec les courants de Foucault, de détecter d'infimes hétérogénéités de surface, toutefois cette grande sensibilité concerne bien entendu tous les paramètres perturbateurs, ce qui fait que, pour certaines applications, on pourra avoir du mal, malgré des réglages optimisés de la fréquence et de la phase, à obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant et donc un contrôle fiable, sans fausses alarmes. Plusieurs remèdes à cette situation pouvaient être utilisés : techniques multifréquences, saturation magnétique des aciers pour minimiser l'effet perturbateur des variations locales de la perméabilité magnétique, traitement du signal par filtrage ou par des procédures plus complexes apparentées au traitement d'image. En ce sens, le contrôle par courants de Foucault bénéficie pleinement des progrès constants de l'électronique et de l'informatique. [1, 2, 3, 4, 5,6]

2.7. Les méthodes couplées:

Récemment, des méthodes couplées ont vu le jour et certaines relèvent encore du domaine de la recherche les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou magnéto-optiques. [1]

2.8. Les ultrasons:

Des ondes sonores de haute fréquence (vibrations mécaniques) sont injectées dans un matériau. Celles-ci sont réfléchies par une surface ou une fissure (Figure (1.6)).

Les ondes ultrasonores (US) se propagent à une vitesse constante dépendant du milieu, mais se réfléchissent sur toutes discontinuités rencontrées. Par analyse des échos reçus (temps de parcours allé et retour de l'onde), l'anomalie est localisée dans l'espace (Figure 1.6). Dans la pratique, l'onde ultrasonore est émise par un élément piézo-électrique, sous forme d'impulsions de quelques microsecondes. Après réflexion sur une surface de séparation (obstacle), cette onde est détectée par l'élément piézo-électrique agissant cette fois-ci comme un récepteur transformant la vibration ultrasonore reçue en tension électrique. [3,4,5,6]

La méthode la plus utilisée pour l'évaluation de l'épaisseur d'une pièce est basée sur la réflexion d'impulsions. Le principe est le même que celui du radar : le transducteur émet une brève impulsion (US) et reçoit en retour une suite d'échos. La mesure du temps (τ) d'aller-retour de l'onde dans la pièce testée permet de déduire son épaisseur (e) connaissant la vitesse de propagation (v) de l'onde selon l'expression :

$$e = \frac{\tau v}{2} \quad (1.1)$$

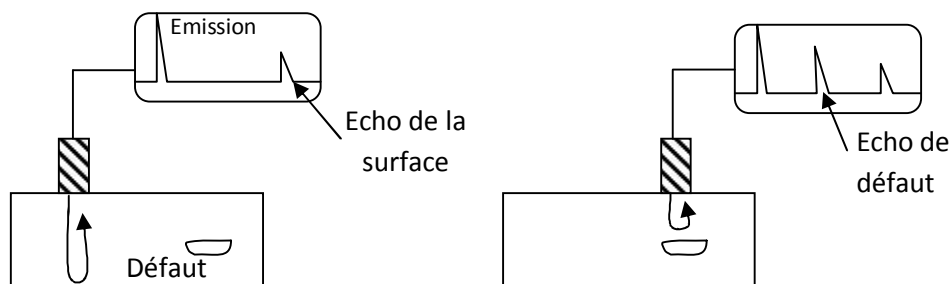


Figure (1. 6): Principe des ultrasons.

Le contact entre le transducteur et la pièce n'est jamais parfait : il existe un film d'air les séparant. Quel que soit le matériau testé, la grande différence d'impédance acoustique entre le transducteur et l'air d'une part et entre l'air et le matériau d'autre part constitue un obstacle majeur à la réalisation de la mesure. En effet, la quasi-totalité de l'énergie émise par le transducteur est réfléchi à l'interface air-matériau. Il est alors nécessaire de déposer un couplant (eau, huile, graisse par exemple) entre le transducteur et le matériau ou encore, d'opérer en immersion totale dans une cuve remplie d'eau. Le milieu de couplage permet de réaliser une meilleure adaptation d'impédance avec le matériau, [1][10][11].

2.9. Tableau récapitulatif

Le tableau ci-dessous, englobe les techniques de CND les plus utilisées, avec les caractéristiques essentielles de chacune d'elles.

<i>Méthodes de contrôle</i>	<i>Principe physiques</i>	<i>Type de défaut détecte</i>	<i>Domaines d'application</i>	<i>Points forts</i>	<i>Points faibles</i>
<i>Examen visuel</i>	Vision perturbation d'une réflexion	Défaut débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tout produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
<i>Ressuage</i>	Effet de capillarité	Défaut fins débouchant	Contrôle manuel de tout produits à surface accessible	Simplicité faible cout	Productivité peu quantitatif
<i>Magnétoscopie</i>	Accumulation de poudre	Défaut fins débouchant et sous-cutanés	Produit ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Reserve pour acier pour quantitatif
<i>Courant de Foucault</i>	Perturbation d'un courant	Défaut fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité automatisation	Matériaux non conducteurs interprétation
<i>Radiographie X</i>	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tout matériaux	Cartographie souplesse de réglage	Protection détection des fissures
<i>Ultrasons</i>	Perturbation d'une onde acoustique	Défaut interne et défaut débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité de mâtereaux	Grande sensibilité nombreuses méthodes d'auscultation	Condition d'essai interprétation des échos couplage

Tableau (1. 1) : Tableau récapitulatif des différentes techniques de CND, [3, 4,5].

3. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les techniques du contrôle non destructif, les plus utilisées actuellement en contrôle.

On constate qu'il n'y a pas de technique valable pour tous les matériaux et pour tous les types de défauts, chacune des techniques a ses particularités et son champ d'application privilégié.

Pour bien choisir une technique de CND, il faut en connaître les avantages et surtout les limites. Le choix d'un procédé est généralement conditionné par plusieurs facteurs, nous citerons principalement :

- ✓ nature et superficie de la cible,*
- ✓ nature des fissures recherchées,*
- ✓ critères technico-économiques,*

Les ultrasons tendent à occuper une place de plus en plus importante. En effet, ils sont applicables pour la détection de défauts internes sur des pièces présentant une épaisseur importante, ils sont aussi robustes, simples d'utilisation, une grande sensibilité de détection, et cela, compte tenu de la bonne pénétration des ondes ultrasonores dans un bon nombre de microstructures métallurgiques.

De plus, elles ont la particularité de pouvoir se prêter facilement au contrôle automatisé, permettant ainsi d'acquérir, de stocker et de traiter une grande quantité d'informations.

Partant de ces caractéristiques, nous avons jugé utile d'étudier avec plus de détails cette technique de CND dans le chapitre suivant.

chapitre deux

Théorie

et

technique des ultrasons

Chapitre II: théorie et technique des ultrasons.

Introduction:

L'une des toutes premières applications des ultrasons fut, en 1912, la détection des icebergs puis, lors de la première guerre mondiale, le développement rapide de la détection des sous-marins et du sondage maritime. Vers les années 1935, la technique fut développée pour le contrôle des aciers.

Au-début, les vibrations ultrasoniques sont utilisées pour compléter les essais aux rayons (X) mais trente ans plus tard, la méthode a supplanté l'examen aux rayons X pour le contrôle d'un grand nombre de pièces de construction mécanique, [3,4,5].

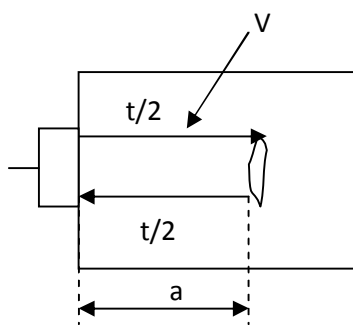
Dans ce chapitre, nous évoquerons en premier lieu, la théorie des ondes ultrasonores avec notamment les différentes ondes et leurs caractéristiques, puis nous aborderons la technologie des appareils à ultrasons avec toutes les composantes nécessaire pour un contrôle non destructif, et nous terminerons par les techniques de mesures et une conclusion.

A. théorie et technologie:

1. Principe:

Des vibrations sont envoyées dans la pièce à contrôler, toute réflexion provenant d'un défaut ou d'une autre face peuvent dans certaines conditions être détectées en utilisant de courtes impulsions d'ondes ultrasonores à intervalles égaux émis par un cristal.

Si l'onde est envoyée perpendiculairement à la surface d'une pièce à faces parallèles. Cette onde va se réfléchir sur la paroi opposée et revenir vers le cristal qui va transmettre le signal à l'appareil à ultrasons. Le temps nécessaire à l'onde pour parcourir le trajet aller-retour dans la pièce est mesuré par l'appareil.



t = temps de parcours de l'impulsion.

a = distance entre défaut et surface.

v = vitesse acoustique dans le matériau.

Figure (2. 1): Principe de détection d'un défaut.

Ce principe est le même pour détecter un défaut. Connaissant le temps du parcours, on sait facilement trouver la position du défaut ou le fond de la pièce si on connaît la vitesse de propagation des ondes dans ce matériau

$$a \text{ (m)} = \frac{T}{2} \text{ (s)} \times \text{Vitesse (m/s)} \quad (2.1)$$

Le temps est représenté par l'appareil sur un tube cathodique, c'est la distance entre l'impulsion de départ et écho où la distance entre 2 échos qui se suivent:

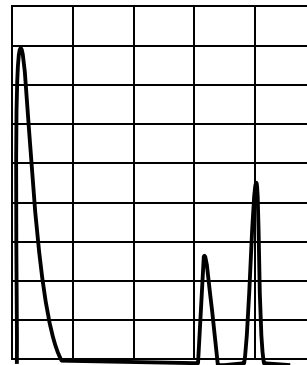
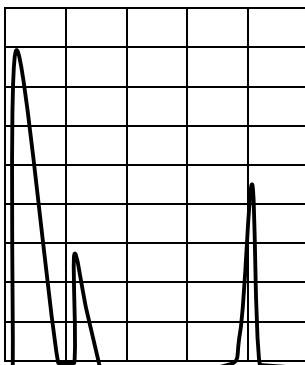
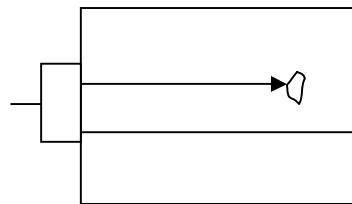
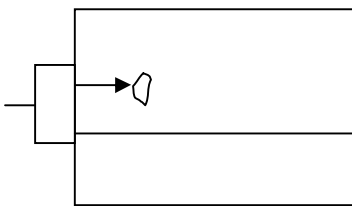
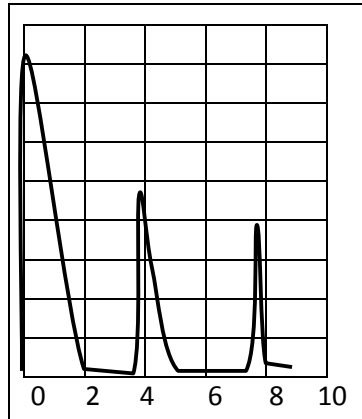


Figure (2. 2): Les graphes ce représente la distance entre l'impulsion de départ et écho de défaut.

Si on règle l'équipement pour que la valeur en mm corresponde avec un certain écartement l en mm sur le tube à rayon cathodique (c'est-à-dire $= t/2$), il ne reste plus qu'à lire directement la valeur de la position du défaut ou du fond de la pièce sur l'appareil.

2. RAPPELS THEORIQUES:

Phénomènes ondulatoires:

Les ultrasons sont des ondes élastiques, tout comme les sons audibles et les infrasons. Ils ne diffèrent entre eux que par leur domaine de fréquences. Mais avant de parler de ces domaines, qu'est-ce qu'une onde, qu'est ce qu'une fréquence, qu'est-ce qu'une onde élastique ?

On parle d'ondes lorsqu'il s'agit d'un phénomène périodique, c'est-à-dire un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période, la fréquence (f) de réapparition du phénomène (on parle de cycles) est donc donné par l'inverse de ce temps (T) :

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Exprimée généralement en cycles/s ou par définition en Hertz

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ cycle/s} \quad (2.3)$$

On peut représenter ce mouvement vibratoire sur un graphique dans le temps où dans l'espace.

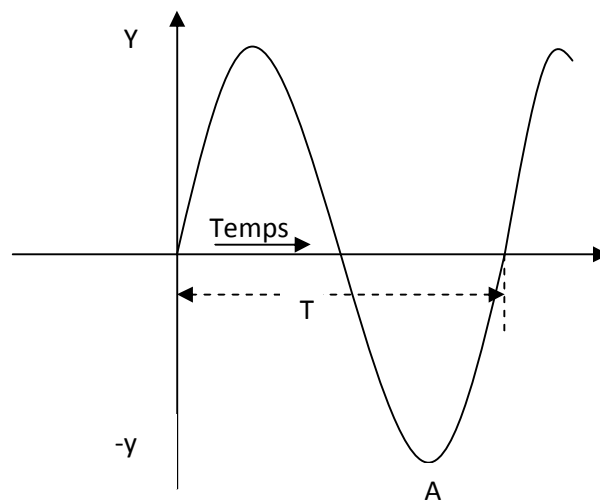


Figure (2. 3): Représentation de mouvement vibratoire.

Le temps nécessaire pour parcourir une oscillation complète est désigné par la période (T) en secondes.

Le nombre d'oscillation par unité de temps est désigné par la fréquence (f) en cycles par secondes où Hertz.

L'espace parcouru par l'onde pendant un cycle où une période est connue sous longueur d'onde(λ).

Les relations qui existent entre ces différents paramètres sont les suivantes :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{c/s}) \quad (\text{Hertz}) \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (\text{m}) \quad (V) \text{ vitesse du son dans le matériau (m/s)} \quad (2.5)$$

Les sons d'une manier générale, sont des ondes élastiques ou dites aussi mécaniques, c'est-à-dire que les ondes sonores sont dues à des déplacements élastiques d'éléments les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire que les forces de rappel vers la position d'équilibre,

qui est l'absence de vibration, sont des forces élastiques, c'est-à-dire à l'image d'un ressort, d'un pendule.

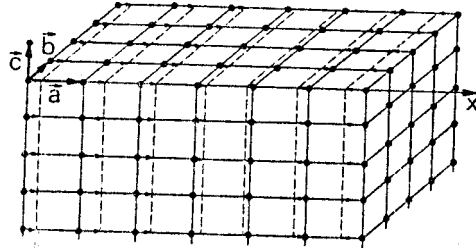


Figure (2. 4): Réseau cristallin déformé par le passage d'une onde plane longitudinale.

Si j'écarte un pendule de la position d'équilibre, c'est-à-dire la position verticale, il va commencer à osciller autour de cette position d'équilibre, si le frottement notamment dû à l'air est négligeable (pendule dans le vide), celui-ci, une fois écarté de sa position d'équilibre va osciller par exemple de gauche à droite et de droite à gauche, la hauteur de remontée à gauche comme à droite étant égale ou si on veut, l'angle d'écart maximum par rapport à la position d'équilibre sera le même et ne variera pas au cours du temps.

On sait aussi que la période T d'un pendule ne dépend que de sa longueur. Pour un pendule donné, cette période reste donc constante.

Si on s'intéresse au déplacement du pendule (déplacement angulaire), on peut tout d'abord remarquer qu'après une période déterminée, le pendule repasse, par exemple, à son extrême gauche, on parlera d'amplitude maximale. De plus, on remarque que le déplacement s'effectue suivant une loi dite sinusoidale, car elle peut s'exprimer en fonction d'un sinus d'un angle, c'est-à-dire la projection sur un diamètre d'un point se déplaçant sur une circonférence à vitesse constante.

3. VITESSE DE PROPAGATION:

Nous allons voir que la vitesse des ondes élastiques ne dépend pas de la fréquence, contrairement aux ondes électromagnétiques mais qu'elle ne dépend que de la nature des matériaux qui les transportent et du type d'onde. En effet, il existe 3 types d'ondes :

- ondes longitudinales où de compression,
- ondes transversales où de cisaillement,
- ondes de surfaces.

Nous allons décrire ces différents types et voir l'influence sur la vitesse de propagation.

3.1. Ondes longitudinales ou de compression:

En fait, grâce à un support, un matériau, que ce soit un gaz, un liquide ou un solide, ces vibrations élastiques peuvent se transmettre de proche en proche.

On peut montrer, que pour les métaux on a:

$$V_L = k \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad K=1.23 \text{ pour les métaux usuels,} \quad (2.6)$$

Où (E) est le coefficient d'élasticité (module de Young),

(ρ) densité du matériau (masse spécifique).

On a, dans ce cas, uniquement des ondes longitudinales, c'est-à-dire vibrations parallèles à l'axe de la tige.

On peut aussi les schématiser par une densité de lignes, qui représente l'état de contrainte, par exemple de pression. On les appelle aussi d'ailleurs ondes de compression.

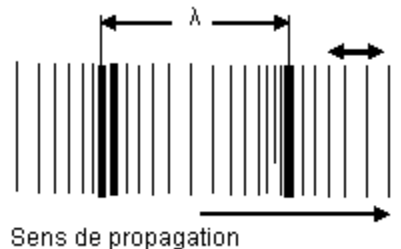


Figure (2. 5): Onde longitudinales (de compression).

Nous verrons ci-après que seules les ondes longitudinales peuvent exister dans les fluides non visqueux d'où les gaz et les liquides en général.

3.2. Ondes transversales ou de cisaillement:

En même temps que des ondes longitudinales, on peut avoir d'autres types de vibration dans les solides; les ondes transversales représentent l'un de ces types.

On peut schématiser ces ondes transversales par le schéma suivant :

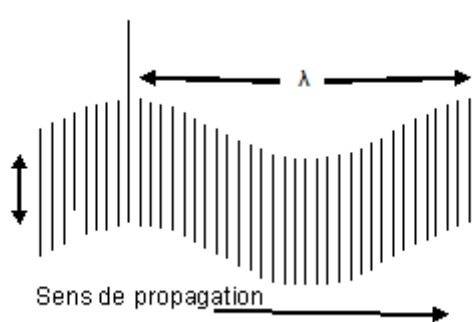


Figure (2. 6): Onde transversales (de cisaillement).

On les appelle également ondes de cisaillement, car elles font intervenir le cisaillement élastique de la matière.

On obtient, pour la vitesse de propagation :

$$V_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7)$$

Ou (G) est le module de cisaillement ou glissement élastique de la matière.

Il est à remarquer que pour un liquide ou un gaz ($G=0$).

Donc ces ondes du cisaillement ou ondes transversales ne peuvent pas exister dans les fluides non visqueux (gaz et liquides).

3.3. Ondes de surfaces:

En plus de ces ondes de "volume", on trouve également des ondes de surface.

Dans certaines circonstances, l'onde de cisaillement dont il a été question ci-dessus se limite à une couche sensiblement égale à une longueur d'onde à la surface d'un solide.

Cette onde de surface porte le nom d'onde de Rayleigh. Ces ondes se propagent à une vitesse approximative de : $V_s = 0,9 V_t$

On peut schématiser ces ondes par la figure:

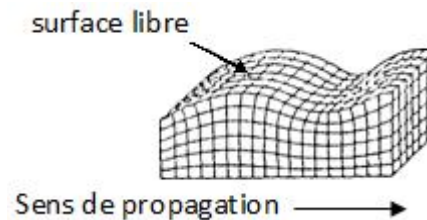
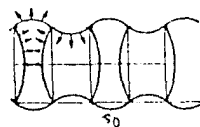


Figure (2. 7): Ondes de surfaces.

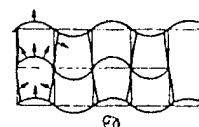
Lorsque le matériau a une épaisseur de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, on a alors non plus des ondes de surface du type décrit par Rayleigh mais des ondes plates qualifiées d'ondes de Lamb. Deux types d'ondes de Lamb existent

les ondes symétrique



Sens de propagation →

les ondes asymétriques



Sens de propagation →

Figure (2. 8): Ondes de Lamb.

Les ondes symétriques peuvent être assimilées à des ondes de compression (v_1), les ondes asymétriques à des ondes de cisaillement (v_t).

TABLEAU DE VITESSE DES ULTRASONS:

Les vitesses des ultrasons pour certain matériau sont données par le tableau suivant:

Matériau	Poids spécifique g/cm ³	Modules kg/cm ² x10 ⁶		Vitesse m/sx10 ⁻¹⁶		
		De Young E	De Rigidité G	V ₁	V _t	V _s
Acier doux	7,85	2,1	0,81	5,96	3,24	2,9
Aluminium (17 ST)	2,699	0,73	0,27,	6,25	3,10	2,80
Laiton	8,44	1,05	0,385	4,70	2,14	1,93
Cuivre	8,89	1,12	0,41	4,63	2,14	1,93
Plomb	11,34	0,17	0,06	1,96	0,63	0,58
Magnésium	1,74	0,46	0,16	5,78	3,06	2,75
Nickel	8,90	2,10	0,80	6,04	3,01	2,80
Platine	21,45	1,83	0,65	3,15	1,73	1,55
Argent	10,49	0,76	0,27	3,64	1,63	1,45
Acier inoxydable (347)	7,91	1,98	0,77	5,75	3,10	2,80
Etain	7,30	0,56	0,21	3,38	1,68	1,50
Air	1,293 x10 ⁻³	-	-	0,33	-	-
Verre	2,32	-	-	5,65	3,28	2,95
Glycérine	1,26	-	-	98	-	-
Plexyglass	1,182	0,033	0,014	2,67	1,09	0,99
Nylon (6-6)	1,11	0,036	0,012	2,62	1,07	0,97
Polyéthylène	0,90	0,08	0,0026	1,96	0,53	0,48
Polystyrène	1,056	0,053	0,012	2,34	1,12	1,02
Quartz	2,65	0,81	-	5,75	-	-
Eau	1	-	-	1,50	-	-

Tableau 1.1: Les vitesses des ultrasons

Les valeurs données dans cette table ont été rassemblées à partir de plusieurs sources et sont en général précises suffisamment pour la majorité des applications pratiques.

LONGUEURS D'ONDES :

De ces valeurs de la vitesse, on peut déterminer en fonction de la fréquence, les longueurs d'ondes correspondantes.

Milieu	0,5 MHz cm	1 MHz cm	2,5 MHz cm	5 MHz cm
Air	0,069	0,034	0,014	0,0069
Aluminium	1,25	0,63	0,25	0,12
Bakélite	0,52	0,26	0,10	0,052
Cuivre	0,94	0,47	0,19	0,094
Nickel	1,12	0,56	0,22	0,11
Huile	0,28	0,14	0,056	0,028
Plexyglass	0,53	0,27	0,11	0,053
Quartz	1,12	0,56	0,22	0,11
Acier	1,18	0,59	0,23	0,12
Eau	0,30	0,15	0,060	0,030

Tableau1. 2:Longueur d'ondes en fonction de la fréquence.

4. TRANSMISSION ET REFLEXION DES ONDES:

4.1. Généralités et cas des incidences normales:

Lorsqu'une onde ultrasonore rencontre l'interface séparant deux matériaux différents, les phénomènes qui se produisent diffèrent selon les cas, en fonction de:

- l'angle d'incidence,
- la nature des deux matériaux, c'est-à-dire leur impédance acoustique

Par définition, nous appellerons impédance acoustique spécifique du milieu, le rapport de la contrainte dans la direction du déplacement des particules sur la vitesse de ces particules.

Pour les ondes planes longitudinales et transversales, nous aurons respectivement :

$$Z_L = \frac{\sigma_{xx}}{V_{partL}} = \frac{\rho V_L V_{partL}}{V_{partL}} = \rho V_L \quad (2.8)$$

$$Z_t = \frac{\sigma_{xx}}{V_{part_t}} = \frac{\rho V_t V_{part_t}}{V_{part_t}} = \rho V_t \quad (2.9)$$

$$\text{En général : } Z = \rho V \quad (2.10)$$

V_{part} = vitesse des particules ; σ_{xx} = contrainte ; ρ = densité

Les angles étant toujours mesurés par rapport à la norme à l'interface, dans le cas de l'incidence normale (angle d'incidence 0°), une partie de l'énergie est réfléchiée et l'autre est transmise tout en restant à incidence normale.

Dans l'étude ci-après, il sera question d'amplitude, d'intensité d'énergie et de puissance. L'intensité d'une onde est égale au carré de son amplitude.

La puissance d'un faisceau d'ondes élastiques est l'intensité de ce faisceau multiplié par l'aire traversée par ce faisceau. L'énergie est cette puissance multipliée par le temps.

L'amplitude des ondes réfléchies et transmises sous une incidence normale à la surface de séparation de deux matériaux d'impédance acoustique $Z_1 = (\rho_1 V_1)$ et $Z_2 (\rho_2 V_2)$ est :

$$\frac{\text{Amplitude.réfléchié}}{\text{Amplitude.incidenté}} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.11)$$

Pour les intensités, on a:

$$\frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (2.12)$$

Si $Z_1 = Z_2$ pratiquement la totalité de l'intensité est transmise.

On peut facilement se rendre compte, d'après la formule que l'intensité transmise est très faible ou que l'intensité réfléchié est très grande pour des matériaux d'impédances (Z) acoustiques très différentes.

Les valeurs des intensités réfléchies par la surface de séparation entre deux milieux donnés, et représenté dans le tableau ci-dessous:

milieu	Impedance $\rho V \times 10^6$ $\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Aluminium	Laiton	Cuivre	Plomb	Nickel	Acier	Bakélite	Verre	Polystyrène	Huile	Eau	Air
Aluminium	1,7	0	14	18	3	24	21	42	2	50	74	72	100
Laiton	3,6	14	0	0,2	5	2	1	68	23	73	87	86	100
Cuivre	4,1	18	0,2	0	7	0,8	0,3	71	19	75	88	87	100
Plomb	2,7	3	5	7	0	12	9	55	9	62	80	79	100
Nickel	5,0	24	2	0,8	12	0	0,2	75	34	79	90	89	100
Acier	4,6	21	1	0,3	9	0,2	0	76	31	77	89	88	100
Bakélite	0,36	42	68	71	55	75	76	0	32	1	23	18	100
Verre	1,8	2	23	19	9	34	31	32	0	40	67	65	100
Polystyrène	0,29	50	73	75	62	79	77	1	40	0	17	12	100
Huile	0,13	74	87	88	80	90	89	23	67	17	0	0	100
Eau	0,14	72	86	87	79	89	88	18	65	12	0	0	100
Air	0,000041	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 1.2: L'intensité réfléchié par la sur face.

Intensité transmise = Intensité incidente - Intensité réfléchié.

(2.11)

4.2. Cas des incidences obliques:

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, sous forme d'une onde longitudinale et d'une onde transversale, ou d'une seule de ces deux ondes selon les cas.

L'autre partie de l'énergie incidente est transmise au travers de l'interface et se propage dans le deuxième matériau sous forme d'ondes longitudinales, transversales de surfaces ou de plusieurs de ces ondes simultanément, selon les cas.

La répartition de l'énergie entre les ondes réfléchies et transmises est fonction du type de l'onde incidente, de la valeur de l'angle d'incidence, et des valeurs respectives des impédances acoustiques des deux matériaux.

3.2.1. Etude de la réflexion:

L'onde incidente longitudinale sous incidence α_L , est réfléchiée sous forme d'une onde longitudinale de même angle α_L , et d'une onde transversale d'angle α_T .

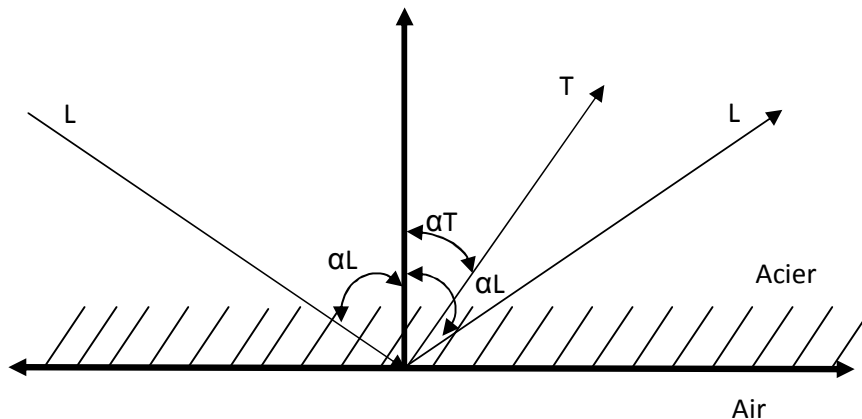


Figure (2. 9): La réflexion des ondes.

V_L et V_T étant les vitesses des ondes longitudinales et transversales dans le matériau considéré,

$$\frac{\sin \alpha_L}{V_L} = \frac{\sin \alpha_T}{V_T} \quad (2.12)$$

Au cas où l'onde incidente est une onde transversale, la relation entre les angles reste la même, en considérant que l'angle d'incidence est égal à α_T .

3.2.2. Etude de la réfraction:

L'énergie transmise, comme l'énergie réfléchiée, se répartit entre des ondes longitudinales et des ondes transversales. Appelons α_L et α_T les angles des ondes L et T (incidentes ou réfléchies) dans le milieu A, α_L' et α_T' les angles des ondes L et T réfractées, dans le milieu B, V_L et V_T les vitesses des ondes L et T dans le milieu A, V_L' et V_T' les vitesses des ondes L et T dans le milieu B.

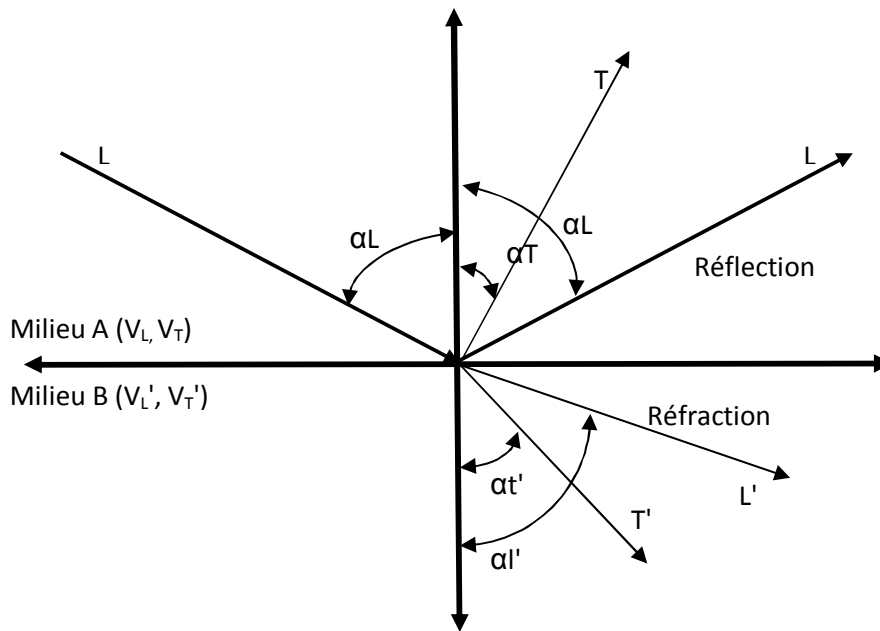


Figure (2. 10): La réfraction des ondes.

Il existe une relation générale entre ces diverses grandeurs :

Cette relation est appelée loi des sinus ou loi de Snell:

$$\frac{\sin \alpha_L}{V_L} = \frac{\sin \alpha_t}{V_t} = \frac{\sin \alpha_L'}{V_L'} = \frac{\sin \alpha_t'}{V_t'} \quad (2.13)$$

Puisque le sinus d'un angle est toujours inférieur ou égal à 1, si le calcul conduit à une valeur supérieure à 1, cela signifie que l'onde correspondante n'existe pas.

La vitesse V_l est inférieure à la vitesse V'_l ; c'est le cas d'un passage du plexiglas vers l'acier qui va servir d'exemple pour l'exposé ci-dessous, dans lequel nous n'envisagerons que le cas d'une onde incidente longitudinale (puisque c'est toujours le cas dans le contrôle courant)

$V_l = 2730$ m/s dans le plexiglas

$V'_l = 5900$ m/s et $V'_t = 3230$ m/s dans l'acier

Ondes de surface:

Nous avons parlé ci-dessus d'ondes rasantes, correspondant à des angles égaux à 90° . Il s'agit en fait d'ondes de surface. La connaissance des lois de réfraction est très importante pour le contrôle par ultrasons, notamment pour le choix des angles de palpeurs à utiliser dans divers cas.

Il est utile de rappeler ici que les dénominations habituelles des palpeurs d'angle sont les angles réfractés obtenus dans l'acier au carbone. Les palpeurs conventionnels sont donc construits de façon que leur angle α_L , corresponde à un angle réfracté α'_t It égal à la valeur indiquée.

Il est également utile de rappeler qu'il ne peut exister d'ondes T dans les liquides et les gaz.

3.2.3. Lois des intensités:

Dans le cas de l'acier, la figure ci-dessous donne les valeurs correspondantes des intensités des ondes réfléchies L et T en fonction de la valeur de l'angle d'incidence, dans le cas d'une onde incidente L.

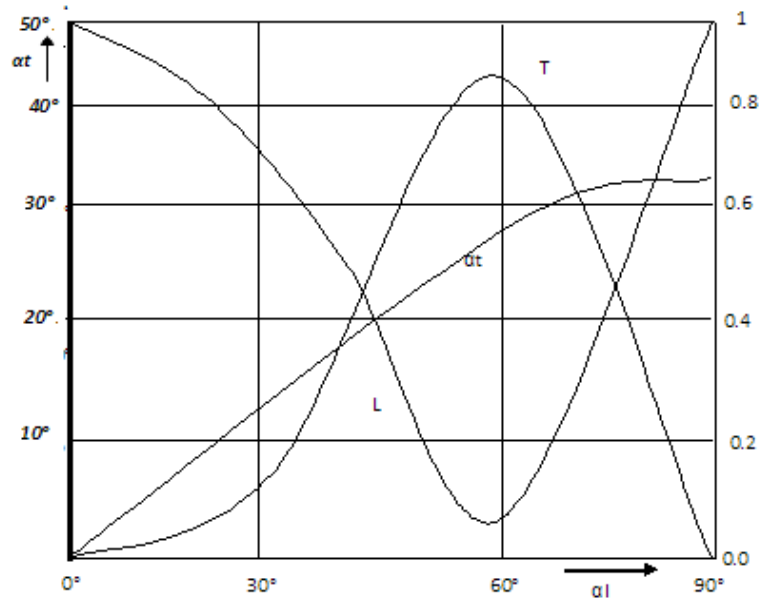


Figure (2. 11): Les intensités des ondes réfléchies.

Les valeurs de L et T sont indiquées en supposant que l'intensité totale réfléchie est égale à 1.

5. ABSORPTION:

Comme l'absorption augmente avec la fréquence, on peut se demander, pourquoi on utilise des ultrasons au lieu de sons audibles.

Il faut en rechercher la raison dans le fait que pratiquement, il n'est pas possible d'avoir une propagation dirigée qu'avec des ultrasons.

En effet, si on peut détecter un défaut au moyen de sons audibles, et, d'après le fait que cela sonnera faux ou pas, de rejeter ou d'accepter un produit, cette méthode, quoique économique et pratique ne permet pas de détecter de petits défauts et surtout de savoir où se trouve ce défaut.

6. DIFFUSION:

Les causes de diffusion des vibrations élastiques mécaniques et en particulier des ultrasons, sont dues au diamètre du grain du matériau ausculté.

D'une part, une croissance de la diffusion d'où de l'absorption par diffusion lorsque le diamètre du grain diminue. Ceci s'explique par le plus grand nombre de surfaces de grains. Cette absorption est peu liée à la fréquence mais montre néanmoins une diminution avec celle-ci.

D'autre part, une croissance, jusqu'à un maximum, de la diffusion lorsque le diamètre du grain augmente. Ce maximum est fonction de la longueur d'onde et se situe aux environs de $\lambda = d$.

d = diamètre du grain.

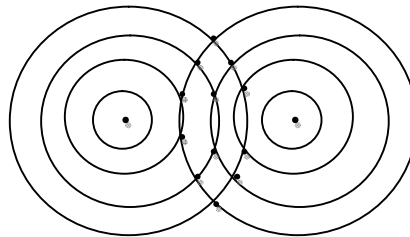
Ce phénomène, que cache généralement le premier, peut s'expliquer par une mise en résonance de ces grains, qui émettent dans toutes les directions des ultrasons, chaque grain devenant émetteur.

Ce phénomène apparaît, pour une fréquence donnée, qu'au delà d'une certaine grosseur de grains c'est ainsi qu'il faut parfois travailler à des fréquences de 0,5 MHz pour certains types d'acier. Bien sûr à ces fréquences, le faisceau devient de moins en moins dirigé.

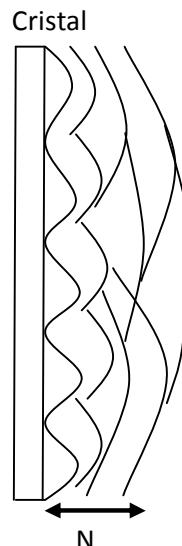
7. PROPAGATION DIRIGÉE DES ULTRASONS:

7.1. Champ proche:

Chaque point du cristal peut être considéré comme un point d'émission. Il y a donc des interférences entre ces différentes sources d'émission



Cette interférence produit une variation irrégulière de la pression acoustique près du cristal.



La longueur de cette zone d'interférence appelée champ proche est donnée par la relation:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.14)$$

Avec (D) diamètre du cristal, (λ) longueur d'onde dans le matériau.

On voit l'intérêt d'employer de basses fréquences, donc des grandes λ ainsi que de petits diamètres, pour diminuer ce champ proche. Souvent, lorsqu'on risque d'être gêné par ce champ rapproché, on travaille de préférence entre deux échos successifs.

7.2. Champ éloigné ou ouverture d'angle:

Après le champ proche, le front des ondes peut être considéré comme une onde plane et le son se propage dans un cône

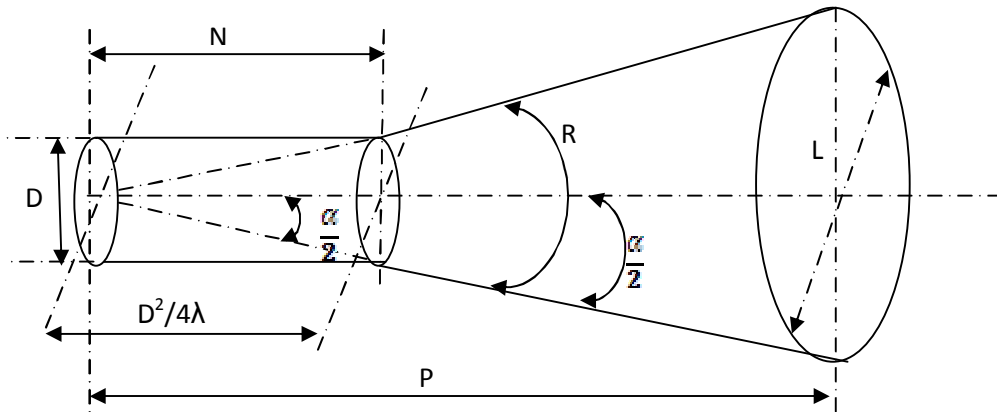


Figure (2. 12): Champ éloigné.

$$L : \text{largeur du faisceau} = 2p \operatorname{tg} (\alpha/2) \quad (2.15)$$

Pour un cristal circulaire, l'angle de dispersion est donné par la formule de Fraunhofer,

$$\operatorname{Sin} \frac{\alpha}{2} = k \frac{\lambda}{D} \quad (2.16)$$

Dans laquelle K est une constante dépendant de la limite de diffusion du faisceau c'est-à-dire le niveau d'énergie qu'on veut considérer:

K = 1,22 100 % du faisceau,

K = 1,08 90 % du faisceau,

K = 0,56 50 % du faisceau.

Pour une source rectangulaire dont les côtés sont a et b, la formule devient:

$$\operatorname{Sin} \frac{\alpha}{2} = \frac{\lambda}{a} \text{ au } \frac{\lambda}{b} \text{ Dans les directions respectives a et b.} \quad (2.17)$$

Il est bon d'insister une fois de plus sur le fait que plus le diamètre de l'émetteur est élevé plus la propagation sera dirigée. Il en est de même dans le cas de la diminution de la longueur d'onde dans le matériau, c'est-à-dire une augmentation de la fréquence du faisceau ultrasonore.

On voit ici apparaître tout l'avantage des ultrasons, car ces ondes permettent d'obtenir, pour des diamètres d'émetteur acceptable, des propagations dirigées.

8. ZONE MORTE:

C'est une partie de l'écran qui est inutilisable à cause de l'écho d'émission produit électroniquement dans l'appareil et mécaniquement dans le palpeur.

En effet, l'amortissement du cristal prend un certain temps et l'impulsion émise se réfléchit en partie dans la semelle du palpeur se qui brouille une petite partie au début du cadran de l'appareil. Dans cette zone, on ne sait pas distinguer un écho de défaut.

9. AUTRES CARACTERISTIQUES DES PALPEURS:

Sensibilité:

C'est le pouvoir de déceler le plus petit défaut.

Nous avons vu que cela va dépendre de la position de ce défaut dans le faisceau (champ proche et ouverture d'angle) et de la fréquence du palpeur.

Résolution:

C'est le pouvoir de distinguer deux défauts qui sont très près l'un de l'autre, ce pouvoir dépend des caractéristiques de l'appareil et du palpeur. Il augmente avec la fréquence car la longueur d'onde diminue.

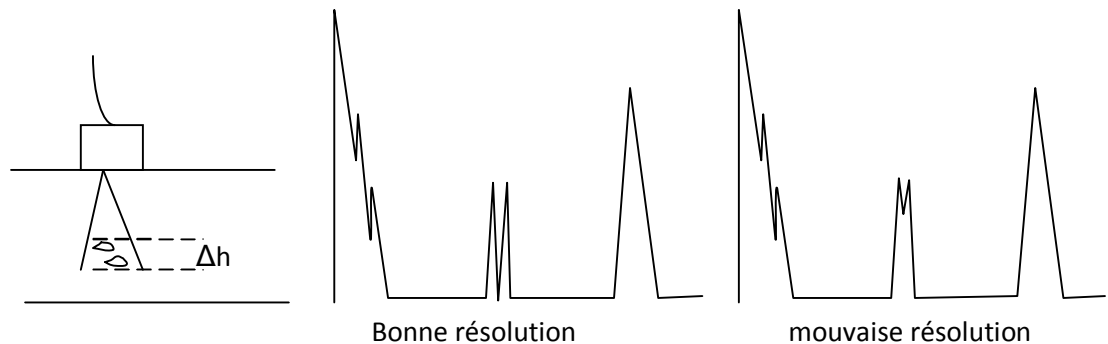


Figure (2. 13): Résolution.

D'autres caractéristiques seront développées plus loin lors des étalonnages.

B.TECHNOLOGIE DES APPAREILS:

1. LES PALPEURS ET LEUR CONCEPTION:

1.1. Effet piézo-électrique et magnétostriction:

S'il existe plusieurs méthodes pour produire des ultrasons, la seule utilisée couramment à l'heure actuelle est basée sur l'effet piézo-électrique.

L'effet piézo-électrique est une propriété qu'ont certains cristaux de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un potentiel électrique.

Comme l'amplitude et le sens de la variation de forme varie comme l'amplitude et le sens de la variation du potentiel, si ces cristaux sont soumis à un potentiel alternatif, ils vibrent, à la même fréquence.

Ce sont donc des transformateurs d'un signal électrique alternatif en une vibration mécanique alternative.

Il est à remarquer que l'effet est réversible, c.à.d. que si on applique des vibrations mécaniques au cristal, ce dernier va créer un champ électrique variable.

Etant donné que le rendement d'un cristal sensible à l'effet piézo-électrique est fonction non seulement de la nature du cristal mais également de la fréquence, mais surtout du rapport épaisseur-longueur d'onde, car le rendement maximum est donné lorsque le cristal vibre à une fréquence de résonance, on s'arrangera donc pour avoir :

$$t = k \frac{\lambda}{2} \quad (2.18)$$

t = épaisseur du cristal.

On prendra souvent $k = 1$ d'où $t = \frac{\lambda}{2}$ (fréquence fondamentale).

On dispose actuellement de nombreux matériaux présentant des propriétés piézo-électriques. Le quartz et la tourmaline sont les cristaux naturels les plus connus, mais il en existe d'autres, dont certains peuvent être fabriqués à partir de solutions de sels simples (ex. sulfate de lithium), tous ces cristaux présentant naturellement la propriété de piézo-électricité.

Dans le cas des céramiques poly cristallines par contre, cette propriété est obtenue artificiellement, et peut disparaître si un cristal est chauffé.

Ces cristaux sont obtenus par polarisation c.à.d. qu'on laisse le matériau se refroidir en le plaçant dans un champ électrique intense pour orienter préférentiellement les effets piézo-électriques de chaque "grain" pour qu'ils s'additionnent.

La température à partir de laquelle un cristal est polarisé, au cours du refroidissement est appelée température de curie. Si on chauffe le cristal au dessus de cette température il se dépoliarise.

Les matériaux qui ont été polarisés de cette façon présentent des propriétés analogues à celles des cristaux naturels cités plus haut.

Caractéristiques des cristaux

Quartz : supporte des températures jusqu'à 550°C.

Titanate de baryum : le plus utilisé, peut être produit sous des formes très diverses, il a un rendement élevé.

Zirconate de plomb : pour applications particulières élevé mais sinon peu intéressant.

Métaniobate de plomb : à peu près identique au titanate de baryum mais pour des températures allant jusqu'à 500°C, bon pour fréquences élevées.

Sulfate lithium : possède la meilleure sensibilité mais il est très sensible à l'humidité et à la température.

1.2. Palpeurs - constitutions et types:

1.2.1. Introduction:

Dans tout système de détection des défauts par ultrasons, le choix du palpeur revêt une très grande importance. Ce choix n'est pas toujours aisé car divers facteurs contradictoires ont besoin d'être coordonnés et pour la plupart des problèmes posés, la solution est généralement un compromis. Il est impossible de résoudre, par un seul type

de palpeur, les multiples problèmes de détection et il est nécessaire d'adapter la conception de chaque palpeur à un objectif déterminé.

1.2.2. Palpeurs droits ou normaux:

Le palpeur normal, appelé aussi palpeur droit, est celui qui émet des ondes de compression (ou longitudinales) et les transmet à la pièce perpendiculairement au plan de la surface sur laquelle il est appliqué.

Ce type de palpeur est utilisé dans les méthodes d'examen par réflexion en jouant successivement le rôle d'émetteur et de récepteur ou dans les techniques de transmission soit comme émetteur, soit comme récepteur.

Il existe des palpeurs à contact direct sur la surface en examen et des palpeurs protégés contre l'usure par une pastille en matière synthétique ou une capsule mince de métal léger.

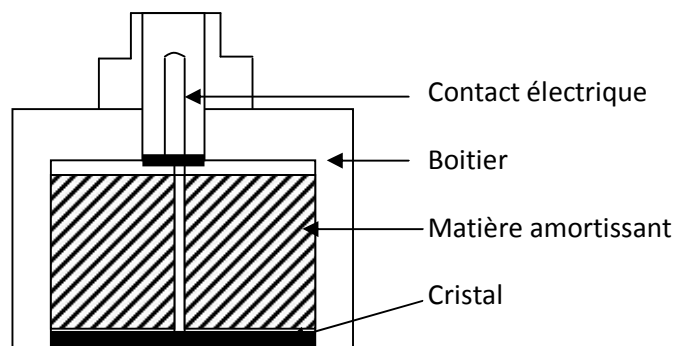


Figure (2. 14): Constitution d'un Palpeurs droits.

Tous les palpeurs doivent être convenablement amortis à l'aide d'un matériau qui possède une impédance acoustique plus grande que celle du cristal. Ce matériau doit être capable d'absorber toutes les vibrations provenant de la face arrière du cristal ainsi que des côtés de celui-ci et freiner les vibrations du cristal pour limiter la durée de l'impulsion émise.

Ce matériau, doit, en outre, être un isolant électrique. On utilise habituellement le caoutchouc synthétique. De la qualité de l'amortissement dépendront les propriétés de sensibilité et de pouvoir de résolution du palpeur.

L'habillage du palpeur, constitué d'un boîtier métallique, doit être conçu pour constituer un support rigide pour le cristal. Les fréquences les plus couramment utilisés sont de 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 - 6 et 10MHz.

1.2.3. Constitution des palpeurs doubles:

Les palpeurs doubles ou "émetteur-récepteur" sont constitués, comme le montre la figure (2.15), de deux cristaux jumelés dans un seul bloc support. Les cristaux sont inclinés afin de permettre par chevauchement des zones déterminées au sein de la pièce en examen.

Il est indispensable d'assurer l'isolement acoustique entre les deux afin d'empêcher la transmission directe de l'émetteur au récepteur.

Les modèles les plus courants sont amortis de la même façon que les mono palpeurs et montés sur bloc de plexiglas.

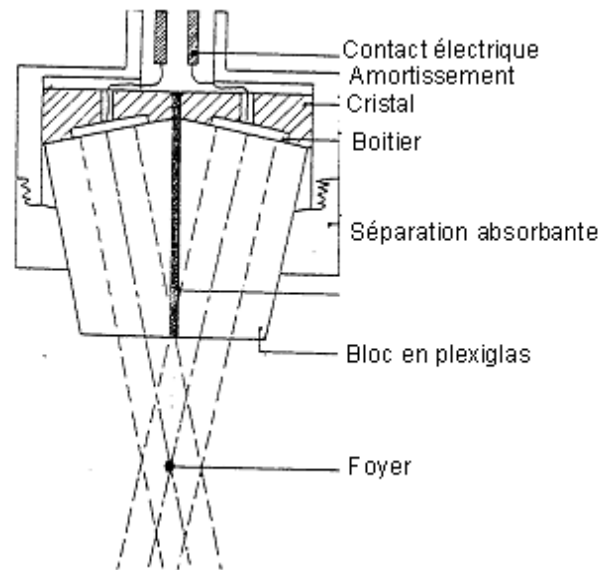


Figure (2. 15): Constitution d'un Palpeurs double (émetteur- récepteur).

Grâce à ces palpeurs doubles, on s'affranchit de la zone morte des mono palpeurs et l'on peut détecter des défauts très près de la surface en examen ou mesurer des épaisseurs de paroi avec une précision de 0,2 mm.

Toutefois, il faut mentionner que la sensibilité de ces palpeurs est maximale au point d'intersection ou foyer des faisceaux et il est impossible de définir les notions de champ proche et de champ éloigné. L'utilité des palpeurs émetteur-récepteur s'étend, pour un palpeur déterminé, sur une profondeur relativement courte. Chacun d'eux est caractérisé, outre le Φ , la fréquence et le type de cristal par le domaine de profondeur utile d'examen et le point de focalisation.

1.2.4. Palpeurs-irrigués:

Pour les essais en "continu" ou pour l'examen de très grandes surfaces, l'eau est utilisée comme agent de couplage.

Elle est introduite sous pression par des orifices situés à l'avant du palpeur, est distribuée au niveau de l'interface palpeur-pièce en irriguant ce milieu de façon continue.

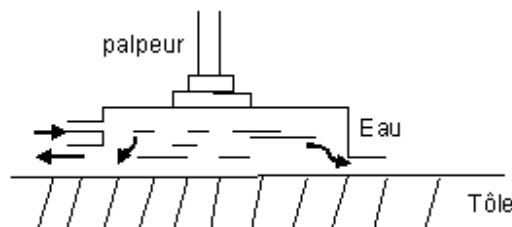


Figure (2. 16): Principe de fonctionnement de palpeur irrigué.

1.2.5. Palpeur d'angle (à ondes de cisaillement):

Principe:

On pourrait obtenir des ondes de cisaillement (ou ondes transversales) à partir d'un quartz taillé en Y mais les ondes transversales ne passent pas dans les liquides. Il faudrait alors coller le quartz sur la pièce.

Il existe un moyen plus commode de produire des ondes transversales à partir des ondes L, par le phénomène de réfraction comme vu précédemment.

Il suffit d'envoyer une onde L incidente entre le 1^e et 2^e angle critique c.à.d. entre $27^{\circ}36'$ et $57^{\circ}42'$ dans le cas de l'acier, ainsi on a les ondes t réfractées et plus d'ondes L. La réfraction. de ces ondes t est comprises entre 33 et 90° .

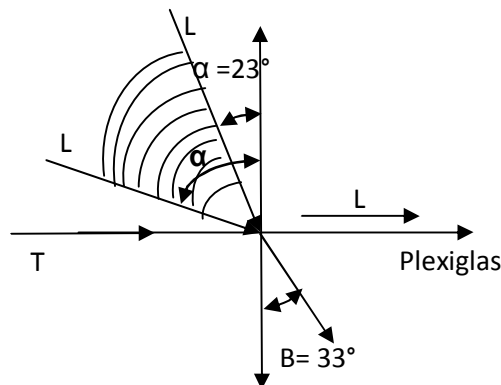


Figure (2. 17): Ondes de cisaillement.

Les palpeurs d'angle produisant uniquement des ondes transversales dans les matériaux sont constitués comme l'indique la figure d'un cristal (généralement du titanate de baryum) métallisé sur ses faces et muni de ses contacts électriques et appliqué sous un angle adéquat sur un bloc de plexiglas. Le dispositif d'amortissement est de même nature que dans les palpeurs droits. Un boîtier métallique protège l'ensemble des éléments et donne la robustesse mécanique nécessaire.

La surface de pose du bloc en plexiglas est généralement plane mais peut être adaptée à toute autre forme en vue d'épouser celle de la pièce en examen. Soumise à usure, cette surface peut être réparée en rapportant par collage une nouvelle semelle de plexiglas.

Il faut noter que l'amortissement des ondes à l'intérieur du bloc de plexiglas est également obtenu par une matière absorbante.

- W=transducteur
- L= onde longitudinale
- P= coin en plexiglas
- S= pièce à contrôler
- T = onde transversale
- D = bloc d'atténuation
- β = angle de réfraction

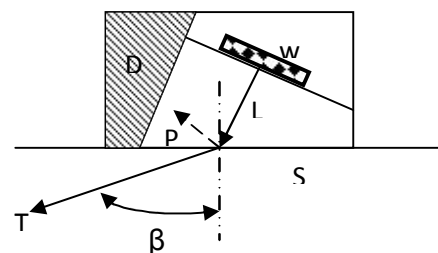


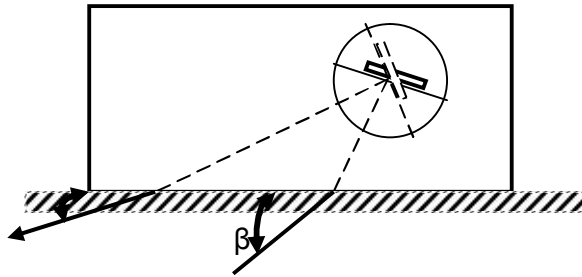
Figure (2. 18): Palpeur d'angle.

En pratique, on construit des palpeurs d'angle avec des valeurs angulaires de réfraction dans l'acier de 35, 45, 60, 70 et 80°.

La fréquence utilisée le plus fréquemment est de 2, 4, 5 et 6 MHz.

Il existe des palpeurs à un seul cristal et des palpeurs doubles. Dans ces derniers, les éléments sensibles peuvent occuper des positions invariables ou être mobiles l'un par rapport à l'autre de façon à s'adapter à des conditions spéciales d'examen (sur des tubes par exemple).

Dans certains palpeurs angulaires ajustables, l'angle du faisceau sonore dans l'échantillon peut être modifié de façon continue.



Mais cela entraîne une perte considérable par l'interface supplémentaire entre cristal et pièces.

2. TECHNOLOGIE DES APPAREILS A ULTRASONS POUR LA DETECTION DES DEFAUTS:

2.1. Introduction:

Ce chapitre a pour mission principale d'exposer les principes généraux de fonctionnement des appareils à ultrasons et de leurs accessoires.

Il ne sera pas question de dresser un bilan comparatif des appareils existants, mais de donner suffisamment d'informations, pour amener les opérateurs à l'utilisation correcte de leur équipement.

La très grande majorité des appareils, en service, utilisant la "méthode des échos d'impulsion". Nous les décrirons donc spécialement.

2.2. Principe:

Il s'agit :

- a) d'envoyer dans le matériau à contrôler, des impulsions d'ondes élastiques de courte durée (quelques microsecondes),
- b) de recevoir les échos renvoyés par la paroi opposée ou les défauts éventuels rencontrés,
- c) de mesurer le temps s'écoulant entre l'envoi de l'impulsion et les différents retours.

L'injection des ondes élastiques dans le matériau utilisera les phénomènes de piézo-électricité dans un palpeur-émetteur (de quartz ou de titanate de baryum par exemple). L'excitation de ce palpeur se fera au moyen d'impulsions électriques.

Au retour, le même palpeur ou un autre élément sensible, recevra les impulsions élastiques réfléchies (échos) et les transformera en impulsions électriques. Celles-ci seront ensuite amplifiées par voie électronique.

La mesure du temps de parcours entre impulsions émises et les diverses impulsions en retour se fera de façon commode sur un tube à rayons cathodiques (T.R.C.) ayant un balayage synchronisé avec l'émetteur d'impulsions.

Nous voyons donc apparaître les principaux éléments de l'appareillage et leur fonction, à savoir :

- des circuits d'émission d'impulsions électriques à H.F. (générateur et circuit émetteur d'impulsion),
- un ou des cristaux piézo-électriques transformant les impulsions électriques en impulsions élastiques et vice versa,
- des circuits d'amplification des signaux électriques reçus,
- un tube à rayons cathodiques mesurant les temps de parcours,
- des circuits dits "de base de temps" destinés à la synchronisation du balayage horizontal du T.R.C. avec l'émetteur d'impulsions.

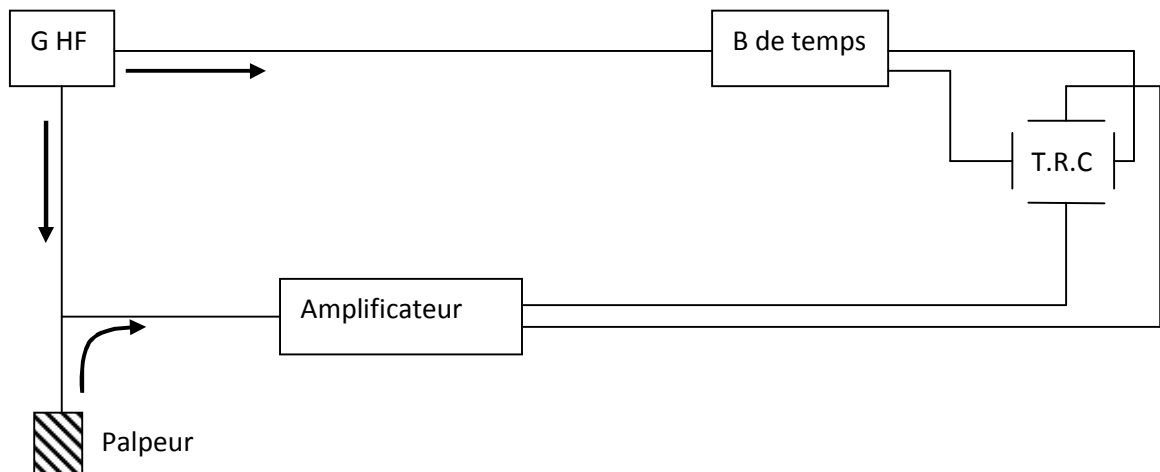


Figure (2. 19): Constitution appareils a ultrasons pour la détection des défauts.

2.3. Générateur et circuit émetteur d'impulsions:

Sa fonction consiste à émettre de courtes impulsions à intervalles réguliers et prédéterminés. Ces impulsions initiales ont un double rôle : elles déclenchent la base de temps qui commande le balayage horizontal de l'écran du T.R.C. et elle envoie une impulsion énergétique au cristal émetteur.

La fréquence à laquelle a lieu cette émission est appelée "fréquence de répétition d'impulsions" ou "fréquence de récurrence" qui est de l'ordre de 50 à 1000 impulsions par seconde.

Il convient de préciser la différence entre cette fréquence de répétition d'émission et la fréquence d'oscillation du cristal. Cette dernière est la fréquence de vibration naturelle propre du palpeur (comprise habituellement entre 0,5 et 12 MHz suivant le type de palpeur).

En pratique, puisque la base de temps du T.R.C. est synchronisée sur l'émetteur, les impulsions successives seront superposées et donneront une image stationnaire sur l'écran.

2.4. Tube à rayons cathodiques:

Le tube à rayons cathodiques (T.R.C.) comprend trois parties:

- un canon à électron projetant un mince faisceau d'électrons,
- un système déflecteur qui peut être électrostatique ou magnétique,
- un écran luminescent recouvert d'une couche fluorescente, qui rend visible le mouvement du faisceau électronique sur l'écran.

Une cathode à revêtement spécial, chauffée par un filament, émet des électrons attirés par une anode positive. Une grille interposée entre l'anode et la cathode, a pour but de limiter le flux d'électrons et par conséquent de régler la brillance de l'image. L'ensemble anodique comprend généralement une série d'anneaux ayant la forme d'ouvertures ou de cylindres, qui accélèrent et concentrent le flux d'électrons en provenance de la cathode. Les électrons groupés en un mince faisceau frappent finalement l'écran : leur énergie est convertie en lumière visible.

A l'aide d'un système déflecteur, qui succède immédiatement au canon à électrons, le faisceau peut être dévié horizontalement et verticalement à la surface de l'écran du T.R.C. Des systèmes électrostatiques sont généralement utilisés et comprennent, en principe, deux paires de plaques parallèles, placées normalement l'une par rapport à l'autre, entre lesquelles passe le faisceau.

L'application d'un potentiel à l'une des paires de plaques (plaques de déviation X) provoque le déplacement du faisceau dans un plan horizontal, de même que les plaques Y provoquent le déplacement dans le sens vertical.

Le faisceau joue ainsi le rôle d'un équipage mobile sans inertie, qui peut être défecté dans un espace à deux dimensions, figure (2.20).

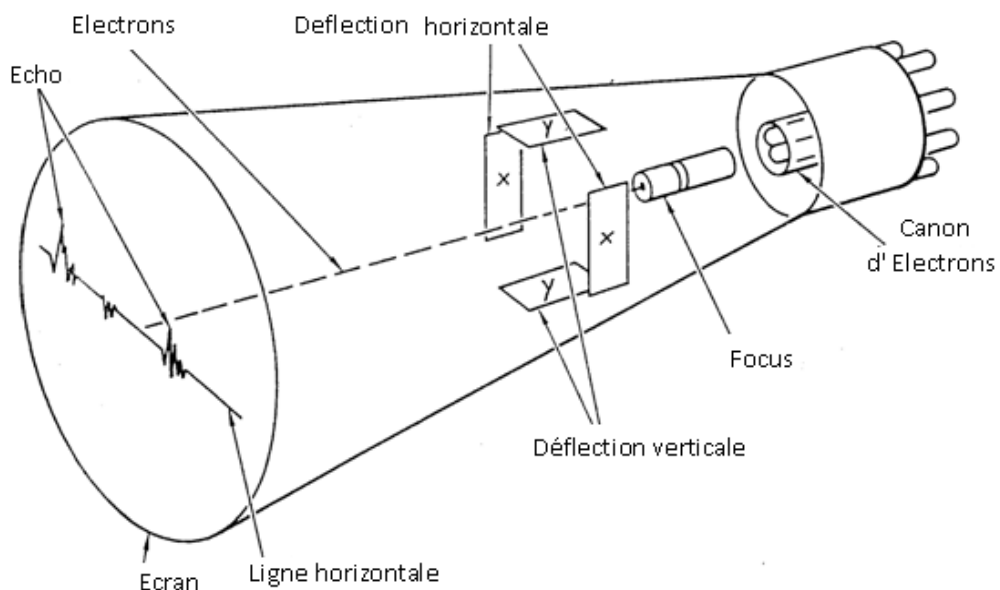


Figure (2. 20): Tube à rayons cathodiques.

Dans les appareils classiques de détection des défauts du type à écho d'impulsion, les signaux appliqués aux plaques X et Y seront respectivement : la base de temps (dans le plan horizontal) et les signaux d'écho de l'amplificateur (dans le plan vertical).

L'ajustement du potentiel de l'une des plaques Y, permet de déplacer l'image vers le haut ou vers le bas (cadrage vertical).

2.5. La base de temps:

La base de temps est nécessaire pour assurer un balayage horizontal linéaire du T.R.C, l'impulsion de l'émetteur et les échos successifs y étant reproduits verticalement.

Le circuit de base de temps doit donc fournir un balayage linéaire de sorte que des distances égales, sur le tracé, représentent des intervalles de temps égaux et par conséquent, pour un matériau déterminé, des distances égales à l'intérieur de l'échantillon (puisque la vitesse de propagation est une constante pour un matériau donné).

2.6. Amplificateur à gain variable:

Au fur et à mesure que l'impulsion ultrasonore parcourt des distances plus grandes dans le matériau, les échos s'affaiblissent par absorption de l'énergie.

On corrige cet affaiblissement en augmentant le gain de l'amplificateur en rapport avec le parcours de l'impulsion ultrasonore dans le matériau.

Le réglage du gain peut être manuel ou automatique.

En plus de la détection purement qualitative des défauts, il est souhaitable de pouvoir exprimer quantitativement leur importance. Les appareils sont alors pourvus d'un quadrillage gravé sur l'écran du T.R.C. de manière à pouvoir mesurer la grandeur des échos et d'un atténuateur calibré pour effectuer des mesures précises de grandeur de défaut.

On aperçoit immédiatement l'intérêt présenté par un atténuateur calibré par rapport à la mesure comparative directe de la grandeur des échos sur l'écran : tous les échos sont ramenés à la même hauteur sur le T.R.C. et les mesures sont lues sur des cadrans, afin que l'exactitude ne soit nullement affectée par la non-linéarité de l'amplificateur.

Habituellement, les mesures sont faites en décibels car il est plus facile d'ajouter ou de soustraire des niveaux d'intensité sur une échelle logarithmique que de multiplier ou de diviser des niveaux d'intensité absolue.

Rappelons qu'un équipement qui amplifie un niveau de puissance de P1 à P2 a un gain de:

$$\text{Log}_{10} \frac{P2}{P1} \text{ bels.} \quad (2.19)$$

En pratique, le Bel est une unité trop grande et on l'a divisé par 10 pour donner une unité appelée décibel (dB) et l'on a :

$$\text{Gain en dB} = 10 \log_{10} \frac{P2}{P1} \text{ décibels.} \quad (2.20)$$

Les amplitudes des signaux sont mesurées plus facilement en fonction de la tension ou du courant qu'en fonction de la puissance. Comme la puissance est, pour une impédance constante (Z), proportionnelle au carré de la tension ou du courant on peut écrire :

$$\text{Gain en décibels} = 10 \log_{10} \frac{Z_1 V_2 + V_2}{Z_2 V_1 + V_1} \quad (2.21)$$

Comme Z1 et Z2 sont égaux, c.à.d. V1 et V2 sont mesurés tous les deux sur la même impédance, on a

$$\text{Atténuation en décibels} = 10 \log_{10} \frac{V_2 + V_2}{V_1} = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1} \quad (2.22)$$

Comme la hauteur d'un écho est proportionnelle à la tension, on a :

$$20 \log_{10} \frac{h_2}{h_1} \quad (2.23)$$

Ainsi, lorsque les grandeurs d'échos de deux défauts, mesurées sur l'écran sont dans le rapport relatif de 2/1 cette réduction sera représentée par :

$$20 \log_{10} 1/2 = 20 \times 0,3010 = 6 \text{ décibels}$$

Si le rapport est de 1/4 (25%) on a 12 dB

1/5 (20%) on a 14 dB

1/10 (10%) on a 20dB

En pratique, l'emploi d'un atténuateur calibré en décibels évite à l'utilisateur d'effectuer des calculs.

On ajuste de préférence le petit écho à une hauteur convenable sur l'écho, en employant le réglage normale de sensibilité, avec l'atténuateur calibré à un certain niveau.

La valeur est + s'il s'agit d'une amplification et elle est - s'il s'agit d'une atténuation.

2.7. Réglage de seuil:

Un dispositif supplémentaire de suppression du bruit ou réglage de seuil figure sur la plus part des appareils.

Le but de ce réglage est d'éliminer de l'image tout les signales sans intérêt sans pour cela modifier les échos normaux.

Le réglage de suppression de bruit peut donc être considéré comme un réglage de gain, non linéaire.

Il doit être utilisé a bon escient, surtout si l'on emploie l'appareil et le palpeur a la limite de leur possibilité dans la détection de très et petit défaut.

Ce réglage peut être utilisé si on se limite a des lecteurs de la position d'échos (c.-à-d. La position de défaut en de la paroi apposée-mesures d'épaisseur et recherche de corrosion), car avec ce réglage la proportionnalité entre les échos n'existe plus.

2.8. Réglage de la puissance à l'émission:

L'amortissement de la vibration du cristal sera d'autant plus long que la puissance émise est grande d'où il y a une plus grande longueur de l'écho de réception et une moins bonne résolution. On utilise donc toujours la puissance minimum à l'émission, sauf si le matériau ou l'épaisseur à traverser l'exige.

2.9. Equipement supplémentaire:

Dans les paragraphes précédents, on a décrit les éléments de base qui sont essentiels et que l'on retrouve dans l'appareil de détection le plus modeste.

Il existe cependant des dispositifs additionnels créés pour augmenter la souplesse et la précision de la technique et pour libérer l'utilisateur d'un certain nombre de sujétions rencontrées lors des programmes d'inspection importants.

Ces équipements supplémentaires peuvent être acquis séparément tels les avertisseurs de défaut (moniteur) et peuvent être connectés à la demande sur l'appareil de base, ou bien incorporés dans certains appareils plus perfectionnés.

Le circuit de contrôle couplé à un système d'alarme visuel audible et particulièrement intéressant pour l'inspection en continu de série au de masses relativement importantes: tôles laminées, disques, rotor, lingots, billettes, rails, etc....

Ce système fait apparaître sur l'écran T.R.C. une zone de sensibilité telle que tout écho, pénétrant dans cette zone commande un circuit de déclenchement et par l'intermédiaire d'un petit relais allume une lampe de signalisation ou actionne un avertissement sonore pour attirer l'attention de l'opérateur.

Le réglage de la sensibilité détermine le niveau de fonctionnement de circuit de contrôle pour que, seuls les échos d'amplitude supérieurs à l'étalonnage soient détectés.

Seuils de réglage obtenus sur un défaut réel d'importance connue ou sur un bloc d'étalonnage contenant un défaut artificiel de grandeur convenable

C. TECHNIQUES

1. TYPES D'EXPLORATION:

1.1. Type A (A scan):

Toutes les descriptions précédentes se sont rapportées à un seul type de tube à rayon cathodique, les déplacements horizontaux de l'image y sont proportionnels au temps donc à la distance et les déplacements verticaux représentent l'amplitude de l'écho.

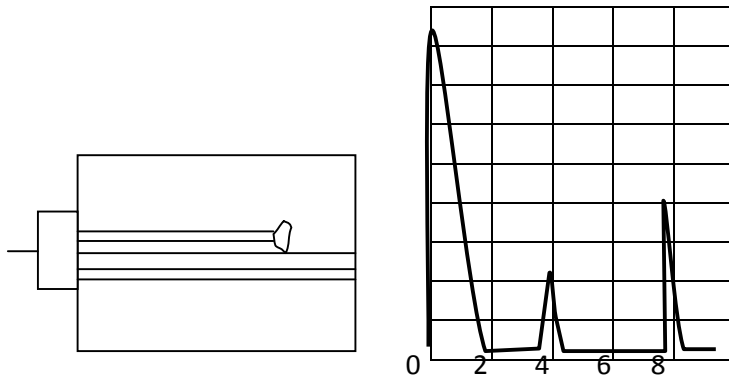


Figure (2. 21): *Type A (A scan)*.

C'est ce type de représentation qui est normalement livré avec les appareils de détection des défauts : on l'appelle "analyseur type A". Il existe cependant d'autres genres de présentation qui, s'ils nécessitent des accessoires supplémentaires, sont parfois utilisés.

1.2. Type B (B scan):

Dans ce type de présentation, la base de temps normale fournit un balayage horizontal de gauche à droite. Les échos de défauts et des faces avant et arrière (paroi d'entrée et paroi de fond) parviennent après réception et amplification non pas aux plaques déflectrices (Y) comme dans le type A mais à la grille du TRC pour augmenter l'éclat de l'image. Si on applique aux plaques déflectrices (Y) un signal proportionnel au déplacement du palpeur le long de l'échantillon, l'écran tout entier peut alors servir à représenter une section de l'échantillon sur une longueur donnée de celui-ci.

La méthode peut être appliquée à l'exploration par contact mais on utilise surtout la technique par immersion car les déplacements longitudinaux du palpeur doivent être réglés par des moyens mécaniques d'une façon précise et régulière.

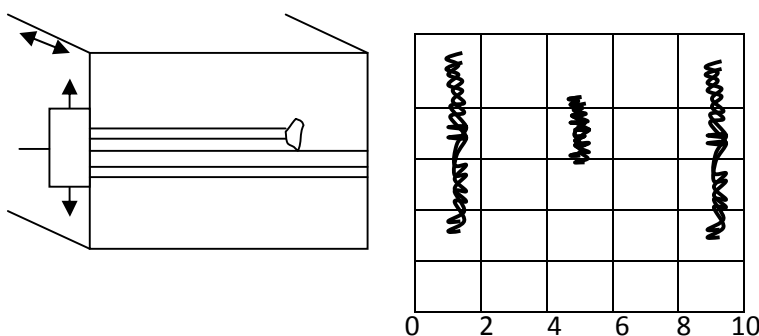


Figure (2. 22): *Type B (B scan)*.

Ce type de représentation demande donc un balayage du palpeur suivant une droite sur la pièce.

1.3. Type C (C scan):

Dans ce type de présentation, le principe ci-dessus est développé suivant les axes X et Y; en effet, leurs déflexions correspondent aux coordonnées du palpeur. Les échos de défauts, formés à l'intérieur de l'échantillon, sont localisés sur les plages; ils modulent la grille du TRC et forment des taches brillantes dans les régions où se trouvent ces défauts. L'image ressemble à une radiographie mais on peut détecter des défauts très petits dans des matériaux très épais. La méthode a été utilisée avec succès dans les inspections de tôles laminées et dans le contrôle d'adhérence de métal blanc sur coussinets en utilisant la technique par immersion.

Les résultats peuvent être enregistrés sur un écran à tube cathodique à mémoire ou sur un enregistreur à stylet.

Le déplacement du palpeur se fait ici suivant 2 axes sur toute la surface de contrôle.

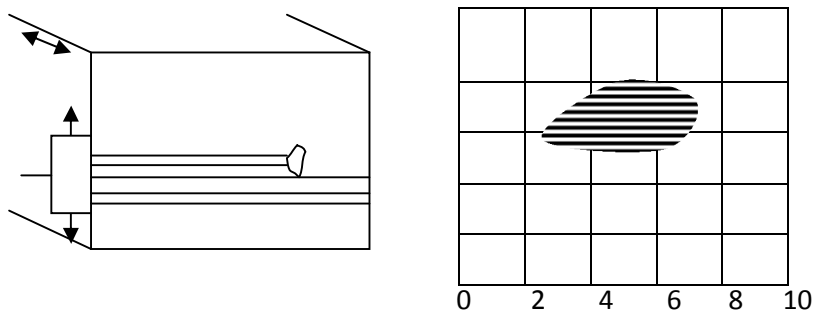


Figure (2. 23): Type C (C scan).

2. PRINCIPES D'INSPECTION:

Sans entrer dans les détails des techniques utilisées ou préconisées, pour détecter tel ou tel défaut, techniques qui seront décrites plus loin, il est toutefois utile de donner maintenant un aperçu des méthodes fondamentales d'inspection.

Il faut tout d'abord distinguer 2 grandes techniques :

- a. Techniques utilisant des ondes entretenues,
- b. Techniques utilisant des impulsions.

2.1. Techniques avec ondes entretenues:

Cette technique est surtout utilisée avec la méthode par transmission avec 2 palpeurs, un émetteur et un récepteur.

2.1.1. Méthode Par transmission :

L'émetteur se trouve donc d'un côté de la pièce et le récepteur de l'autre. Si l'apport de la pièce entre les palpeurs fixes est possible, on préférera cette méthode; dans le cas où l'on doit déplacer les palpeurs, il est nécessaire de rechercher attentivement la position du récepteur par rapport à l'émetteur.

Dans cette méthode, le défaut va agir comme barrière acoustique et non comme réflecteur.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle donne uniquement la présence ou l'absence d'un défaut sans le situer dans la pièce. Toutefois, c'est une méthode conseillée pour des plaques minces d'épaisseur inférieure à 5 mm où l'on recherche surtout des doublures de laminage.

On évite ainsi de travailler dans la zone morte du palpeur en technique impulsion-écho car la durée de l'onde amortie serait sensiblement plus grande que le temps de parcours à travers le matériau.

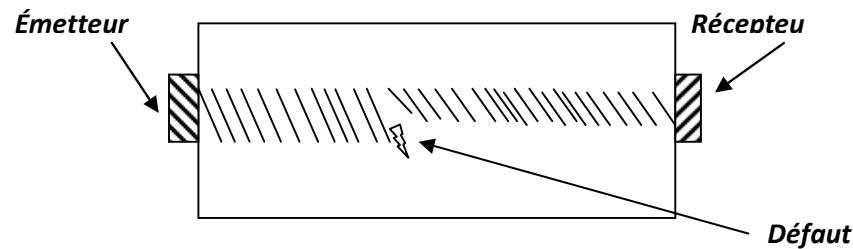


Figure (2. 24): Transmission des ondes avec palpeur émetteur et palpeur récepteur.

2.1.2. Méthode Par réflexion:

Il n'est pas exclu d'utiliser des ondes entretenues avec une méthode par réflexion. Dans ce cas, les deux palpeurs se trouvent généralement du même côté de la pièce à examiner.

Au moyen des palpeurs d'angle, il est parfois possible de situer la position d'un défaut, mais ceci reste difficile; on préfère surtout utiliser une technique avec impulsions à celle utilisant des ondes entretenues. Toutefois, pour des tubes soudés et le contrôle en continu, cette méthode peut être retenue.

2.1.3. Méthode Par résonance:

Cette méthode, qui sert principalement à mesurer des épaisseurs est basée sur le fait que l'intensité reçue passe par un maximum si en faisant varier la fréquence, on arrive à des fréquences de résonance de matériau c'est-à-dire qu'il faudra moins d'énergie pour faire vibrer un matériau à cette fréquence plutôt qu'à toute autre

$$D' où t = k \frac{\lambda}{2} \quad t = \text{épaisseur}$$

$$\lambda = \text{longueur d'onde} \quad k = \text{nombre entier}$$

Cette méthode est très sensible (on peut trouver k en recherchant des maxima successifs en faisant varier la fréquence). Toutefois, elle est relativement peu utilisée.

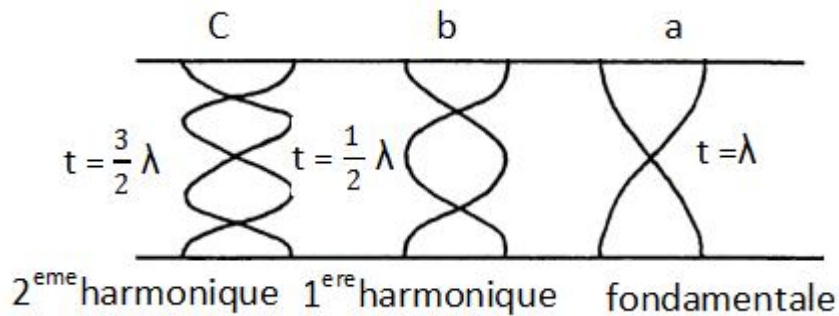


Figure (2. 25): *Méthode Par résonance.*

2.2. Techniques avec impulsions:

2.2.1. Méthode Par réflexion:

C'est la méthode la plus utilisée, connaissant l'angle de propagation des ondes dans le milieu ausculté, on peut rechercher par cette méthode la position du réflecteur.

Il faudra bien établir la géométrie de la détection pour évaluer avec exactitude la position des défauts.

2.2.2. Méthode Par transmission:

Cette méthode peut être utilisée au moyen de deux palpeurs. Mais l'avantage d'impulsions en lieu et place d'ondes entretenues est très faible, la technique est pratiquement la même dans les 2 cas.

Conclusion:

La méthode la plus utilisée est la méthode par impulsion-écho par réflexion.

Car cette méthode donne la position du défaut et ne nécessite l'accès que d'un seul côté de la pièce.

3. ETALONNAGES:

3.1. Généralités:

Pour utiliser convenablement les appareils à ultrasons et leurs accessoires, il est indispensable de disposer d'un milieu de référence qui permette :

- a. d'étudier les caractéristiques propres de l'appareillage et des palpeurs utilisés,
- b. d'étalonner l'appareil en fonction de la nature du matériau à examiner et des dimensions de la pièce,
- c. de choisir une sensibilité en vue d'un examen et de vérifier que cette sensibilité reste constante pendant toute la durée de l'examen,

d. d'être en mesure de recommencer l'examen à n'importe quel moment dans les mêmes conditions et d'obtenir des résultats identiques,

e. d'effectuer un examen dans des conditions identiques avec des appareils différents.

Certains facteurs vont encore influencer les conditions du contrôle. La zone morte ou pouvoir de résolution au départ est une caractéristique à vérifier principalement pour le contrôle avec mono palpeur. Elle fixe la distance minimum sous le palpeur à partir de laquelle un défaut fournit un écho distinct de l'impulsion de départ. Sa longueur dépend de l'amortissement du cristal de la fréquence mais également des anomalies de couplage, de certains facteurs géométriques et principalement du temps de blocage de l'émetteur.

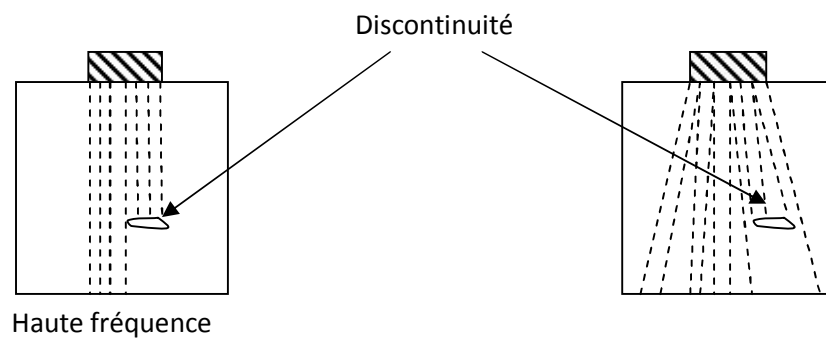


Figure (2. 26): Influence de la fréquence.

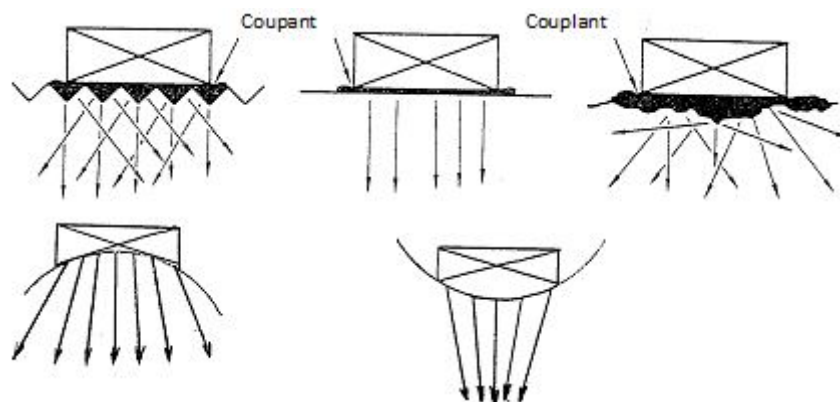


Figure (2. 27): Influence de la surface.

3.2. Blocs d'étalonnages:

Un bloc d'étalonnages, c'est un milieu de références capable de répondre aux exigences posées. Il est de même nature que le matériau à sonder et il a une forme et des dimensions bien définies.

Pour les aciers non alliés, cas très fréquent dans l'industrie, on utilise couramment le bloc recommandé par l'Institut International de la Soudure (I.I.S.). Ce bloc porte aussi la dénomination V.1. D'autres blocs d'étalonnages sont également très répandus tels que le Sulzer et le VII. Tous ces blocs ont le même but, c'est de servir de référence au contrôle.

Examinons les différents blocs et les étalonnages que l'on peut réaliser sur ces blocs

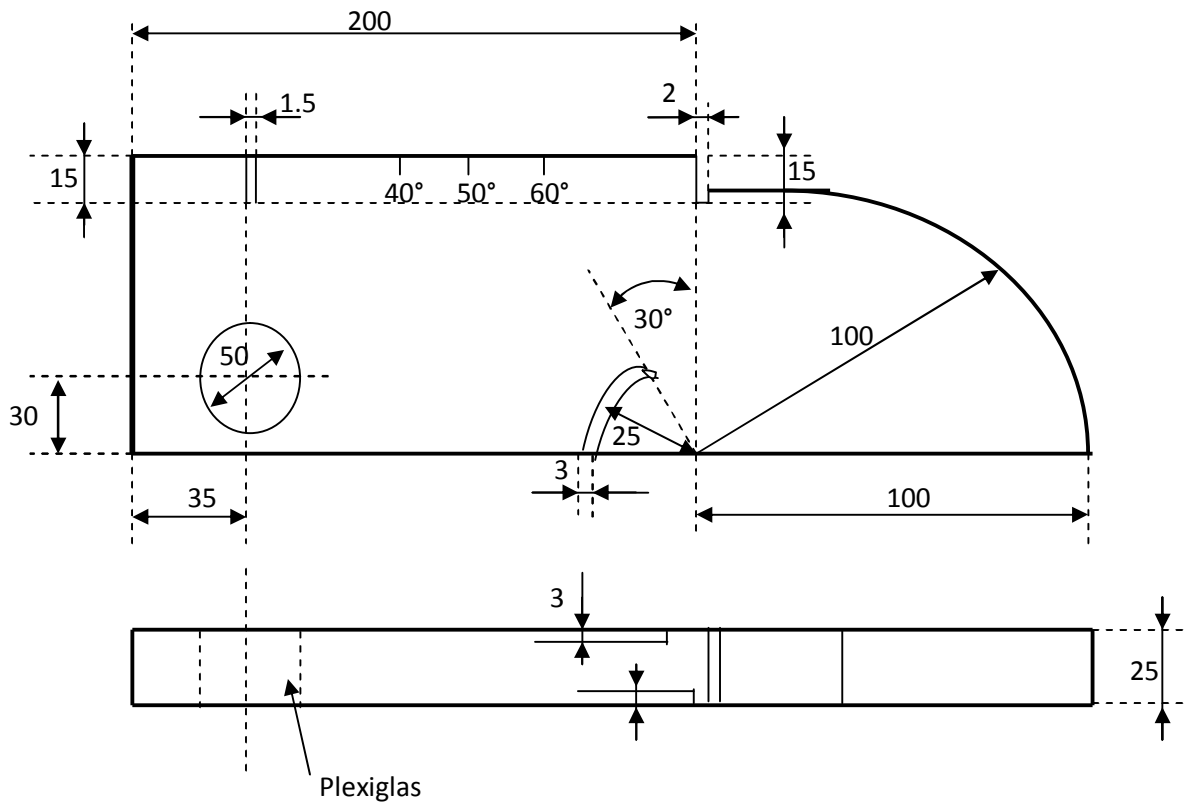


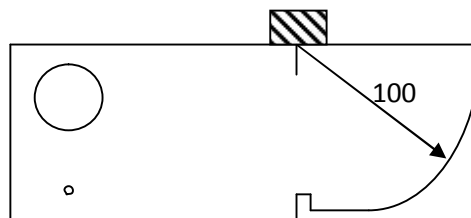
Figure (2. 28): Etalonnage sur Bloc v1.

En plaçant le palpeur sur l'épaisseur de 25, on obtient une série d'échos.

Pour connaître l'emplacement des échos, il suffit de diviser l'échelle que l'on veut obtenir par 50 (les 50 graduations de l'écran) pour connaître la valeur en mm d'une graduation et de diviser l'épaisseur d'étalon par la valeur en mm d'une graduation.

Remarque:

Pour les distances supérieures à 1m nous conseillons d'utiliser un bloc de même nature le principe est le même pour un palpeur d'angle, mais on place le palpeur avec son centre d'émission sur le centre de courbure du bloc étalon, on a ainsi 2 écho à des parcours de 100 et de 200mm.



Pour régler la sensibilité du contrôle, le bloc possède un trou calibré qui peut servir de comparaison.

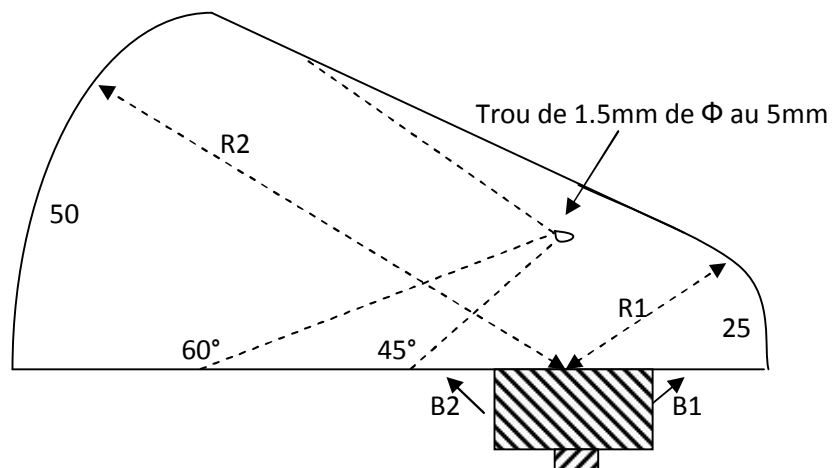
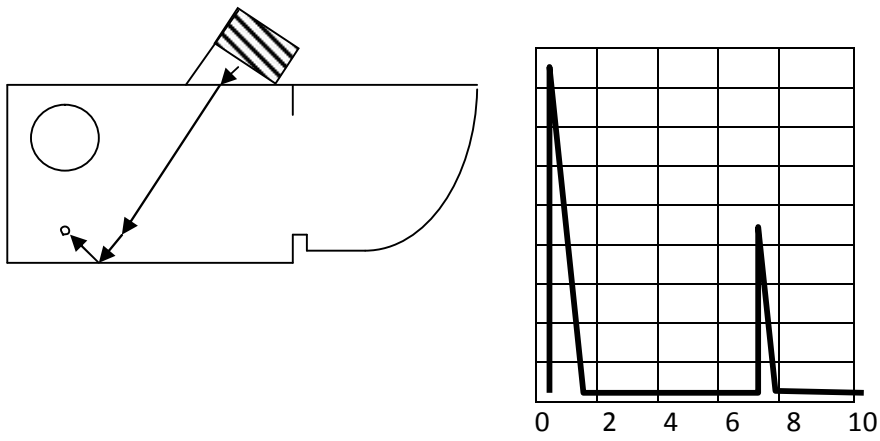
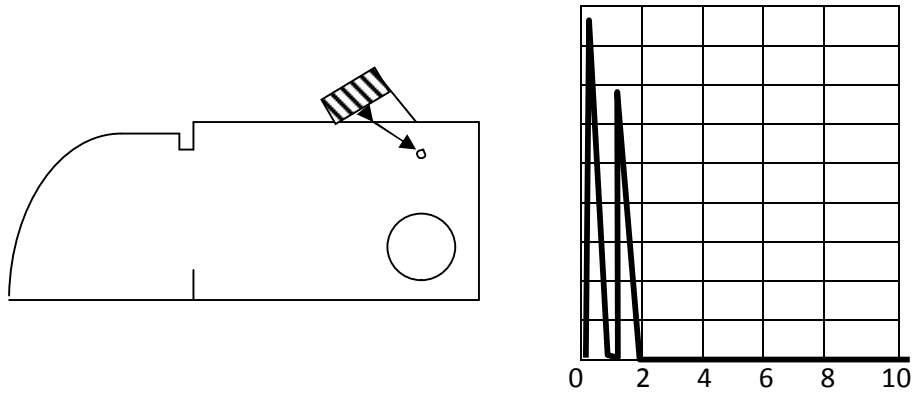


Figure (2. 29): Bloc V II:

3.3. Vérification de l'appareillage:

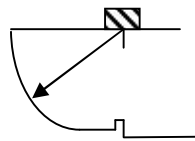
D'autres vérifications peuvent encore être effectuées sur ces blocs.

3.3.1. Le contrôle du point d'émergence du palpeur d'anale:

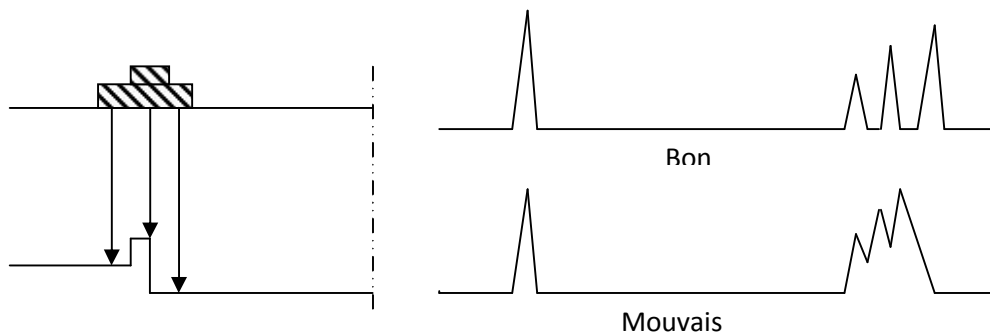
Le point d'incidence ou centre d'émergence du faisceau ultrasonore sert de point de référence pour la mesure des distances de sondage et de la pose exacte des défauts.

En général, il est repéré, sur le palpeur, par un trait mais il est nécessaire d'en vérifier la position car l'usure du sabot entraîne un déplacement du point réel d'incidence.

Ce point se détermine pendant qu'on règle l'échelle; en effet : il suffit de chercher le maximum des échos obtenus sur la courbure de l'étalon et lire le repère du palpeur qui se trouve en face du trait de la cale étalon.



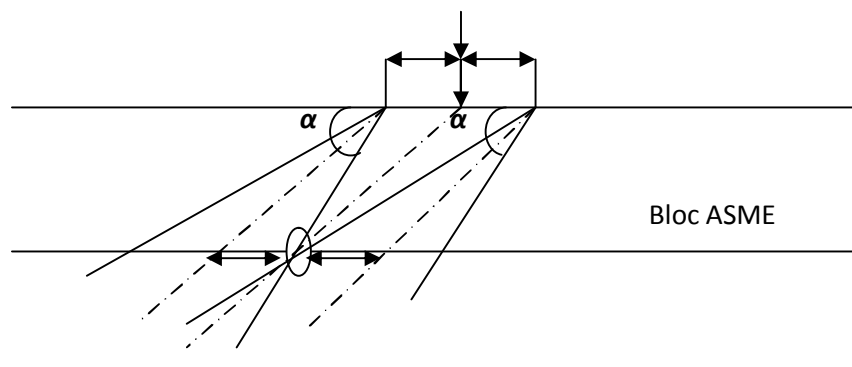
3.3.2. Le contrôle de la résolution du palpeur:



3.3.3. Contrôle de l'anale du palpeur:

Ce contrôle peut se faire soit sur le trou étalon soit sur la courbure de l'étalon en plaçant le palpeur de l'autre côté du centre de courbure (donc après bond).

3.3.4. Contrôle de l'ouverture d'angle



On avance ou on recule le palpeur par rapport à un maximum qu'on obtient sur un trou étalon. La valeur de déplacement vers l'avant correspond à l'ouverture arrière du faisceau et la valeur de déplacement vers l'arrière correspond à l'ouverture avant ou supérieure de faisceau.

On peut réaliser ceci avec des trous à différentes profondeurs, pour obtenir la forme réelle du faisceau.

3.3.5. Vérification de la linéarité de l'amplificateur – de l'amplification et de la base de temps de l'appareil à ultrasons:

Linéarité de la base de temps:

Principe:

Ce contrôle a pour but de vérifier; pour un group d'échos multiples, que le distance de l'échelle séparent chaque écho de l'écho voisin soient constante.

Méthode:

Placer le palpeur sur le bloc étalon de façon a obtenir une séquence d'écho multiple (au minimum 5 échos). Régler la base de temps pour que le 1^{er} et le 5^e écho correspondent de façon précise à des graduations de l'échelle. Noter les graduations au droit desquelles sont situé les 2^e, 3^e et 4^e écho. Diviser les valeurs obtenues par la valeur correspondant au 5^e écho. Les résultats de ces divisions doivent être égaux à 0.4, 0.6, 0.8 et ce avec une tolérance maximale admise de +0.05.

Linéarité de l'amplificateur étalonné

Principe:

Ce contrôle a pour but de déterminer qu'une variation de X dB de l'amplificateur étalonné produit une variation d'Y % des échos pouvant apparaître le long de l'échelle de la base de temps choisie pour le contrôle.

Méthode:

Placer le palpeur sur le bloc étalon pour obtenir une réponse maximale sur un trou étalon. En ajoutant ou retranchant le nombre de dB donné ci-dessous, on doit obtenir les lectures suivantes :

<u>Indication sur le trou à d'amplification</u>	<u>Modification amplification</u>	<u>Indication après modification</u>
80 %	- 6 dB	32 à 48 %
80 %	- 12 dB	16 à 24 %
40 %	+ 6 dB	64 à 96 %
20 %	+ 12 dB	64 à 96 %

Linéarité de l'amplification:

Principe:

Ce contrôle a pour but de déterminer si le rapport entre les hauteurs d'échos obtenues sur des réflecteurs différents et situés à des distances différentes, reste constant quelle que soit la valeur donnée aux réglages d'amplification.

4. CONCLUSION:

Ce chapitre a été consacré, à la théorie générale des ondes ultrasonores, aux matériels utilisés pour un contrôle non destructif.

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Ce contrôle utilise les propriétés vibratoires de la matière. Quand on soumet un matériau à des ondes élastiques. Ces ondes subissent des modifications quand elles rencontrent une discontinuité dans la structure de la matière. Ce contrôle est donc basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons

Ces données théoriques constituent une plate forme de base pour l'application du contrôle non destructif à ultrason, toute fois il est nécessaire d'avoir des connaissances sur les techniques pratiques de mesures en milieu industriel, ce qui fera l'objet de nôtre troisième chapitre.

chapitre trois

Contrôle par ultrasons

Chapitre III: Contrôle par ultrasons.

1. INTRODUCTION:

Les ultrasons sont des ondes émises par un transducteur émetteur qui se propagent dans la matière. Lorsqu'elles rencontrent un obstacle elles se réfléchissent et sont transformées en signal électrique par un transducteur récepteur. Un calibrage et un étalonnage rigoureux permet d'analyser et de déterminer la position et la nocivité de ce réflecteur, qui sera évalué suivant les critères d'acceptations applicables.

Donc en plus de la connaissance, du principe de détection de défauts par ultrason et la disponibilité des équipements de contrôle, on doit maîtriser les techniques de contrôle en milieu industriel.

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les différentes techniques de contrôle selon le type de défaut recherché et pour différentes formes de pièce.

2. GENERALITES:

2.1. Contrôles au palpeur droit:

Dans la plupart des contrôles au palpeur droit, on peut situer directement la position d'un défaut si on a préalablement réglé une échelle fonctionnelle, puisque le parcours lu sur l'écran est égal à la profondeur du défaut mesurée à partir de la surface de palpation, sauf dans les cas où se sert d'une face de réflexion de la pièce pour examiner d'autres zones tel que le montrent les figures ci-dessous.

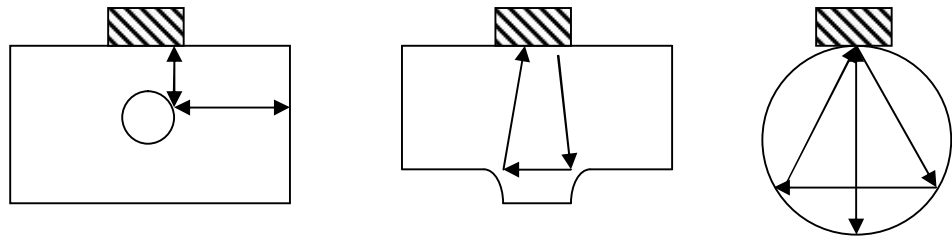


Figure (3. 1): Réflexion de la pièce.

D'autres petits phénomènes peuvent perturber la lecture de l'écran de l'appareil tel que transformateur de mode de propagation ou réflexions inclinées dues à l'ouverture d'angle du faisceau comme le montre la figure suivante.

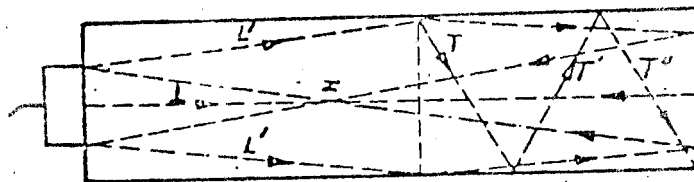
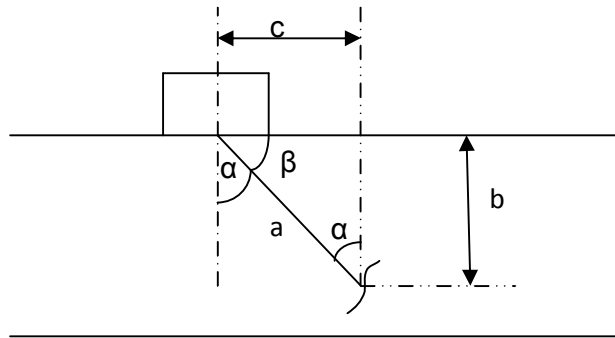


Figure (3. 2): réflexion de la pièce.

2.2. Contrôles au palpeur d'angle:

Pour localiser les défauts au palpeur d'angle, il faut passer par un calcul pour définir la profondeur et la position par rapport au palpeur.



a : parcours palpeur-défaut (lu sur l'écran),

b : profondeur du défaut,

c : position du défaut par rapport au centre d'émission du palpeur,

α : angle des ondes t du palpeur (angle inscrit sur le palpeur) par le triangle droit, on peut écrire,

$$c = a \cos \alpha/3 \quad \text{ou} \quad c = a \sin \alpha,$$

$$b = a \cos \alpha.$$

On sait ainsi donner la position de n'importe quel réflecteur détecté au palpeur d'angle, mais cette méthode n'est pas très pratique sur chantier. C'est pour cette raison que les constructeurs ont construit des lattes de localisation basées sur ce calcul. Voici deux types:

Dans le premier type, il suffit de coulisser la réglette dans sa glissière en plaçant la ligne rouge en face du chiffre indiquant le parcours : on lit la position sur la ligne horizontale supérieure et la profondeur sur la ligne rouge verticale.

3. MESURES D'ÉPAISSEURS:

3.1. Mesures d'épaisseur à l'aide des palpeurs droits simples:

On choisit une échelle telle que l'on obtienne plusieurs échos de fond sur l'écran et l'on règle la base de temps ("échelle") de façon que les fronts d'échos obtenus sur des épaisseurs connues, encadrant celle à mesurer, soient en regard des graduations correspondantes. La valeur de l'épaisseur recherchée est égale à l'abscisse du nième écho de fond sur l'écran (valeur lue) divisée par n, nombre d'échos de fond successifs.

L'erreur de mesure est d'autant plus faible que le nombre n d'échos est grand mais ne dépassant pas 9, sinon on a intérêt de prendre une échelle 10 x plus petite.

Dans le cas d'épaisseurs faibles, les premiers échos de fond peuvent se confondre avec l'écho de départ; dans ce cas, en jouant sur le bouton cadrage, on place un écho bien distinct au 0 et l'on procède comme ci-dessus, mais le nombre d'échos n étant compté sans tenir compte de celui placé au zéro.

3.2. Mesures d'épaisseur par palpeur avec cristaux, émetteurs et récepteur séparés:

Connaissant l'épaisseur approximative de la pièce à contrôler, on se munit d'étalons d'épaisseurs dont les valeurs encadrent, d'aussi près que possible, l'épaisseur à mesurer.

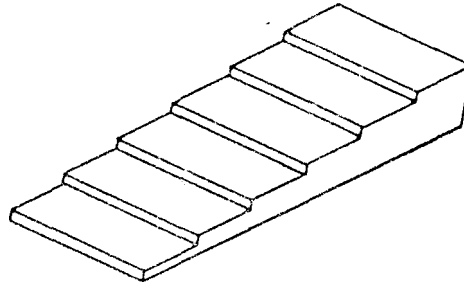
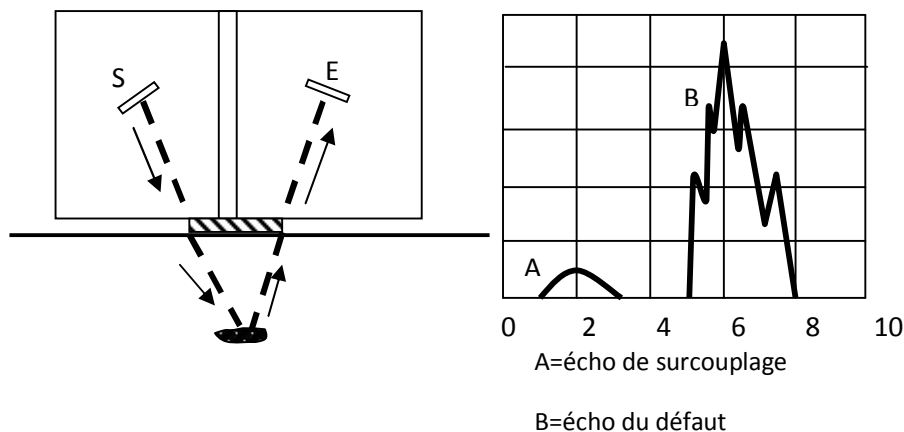


Figure (3.3): bloc d'étalon d'épaisseur.

En jouant sur le cadrage et l'échelle, on étalonne l'appareil de façon précise sur ces deux valeurs, et l'on obtient l'épaisseur par lecture directe.



Pour éviter des erreurs de mesure grossières, il faut régler l'écho obtenu à la même hauteur que l'écho d'étalonnage.

Cette méthode est surtout utilisée pour les faibles épaisseurs (2 à 10).

Remarques importantes:

1. De façon à corriger, au maximum des possibilités, toute imperfection du réglage de l'appareil, connaissant une valeur approximative de l'épaisseur à mesurer, il est important de contrôler l'étalonnage à proximité de cette valeur cherchée; par exemple à 5 et 6 mm si l'épaisseur cherchée vaut environ 5,5 mm; ou à 35 et 40 mm pour une épaisseur cherchée d'environ 37 mm. Ce réglage fin peut être effectué à l'aide des étalons "en escalier" ou de toute épaisseur mesurable au pied à coulisse ou, si réalisable, au palmer.

2. Dans le cas de mesures d'épaisseur de tubes, il faut veiller à ce que la barrière acoustique qui sépare les cristaux E et R soit placée perpendiculaire aux génératrices des tubes, sinon la mesure est faussée.

De même, dans le cas de pièces à parois non parallèles dont on veut mesurer l'épaisseur en un point, cette barrière doit être placée perpendiculaire aux lignes d'épaisseur constante.

3. Il convient de veiller à ce que le contact du palpeur en son axe soit bon, sinon l'épaisseur d'une couche plus ou moins importante de liquide de contact est comprise dans la mesure, d'où résulteraient des erreurs importantes de lecture puisque la vitesse des US dans le liquide est nettement différente de celle dans le métal (une épaisseur de 1 mm d'eau correspond à une épaisseur d'environ 4 mm d'acier). Il n'est donc pas possible de faire une mesure d'épaisseur précise en un point où le palpeur repose sur une surface concave.

3.3. Appareils pour mesures d'épaisseur à lecture directe:

3.3.1. Kmètre : appareil à aiguille

Avant toute mesure, il convient de contrôler la batterie. En position "Batt test", l'aiguille doit venir dans le secteur blanc de la zone "Batt test" du cadran.

Etalonnage : grossier sur l'étalon incorporé à l'appareil fin sur étalon "escalier",

Mesures : l'aiguille doit être bien stabilisée.

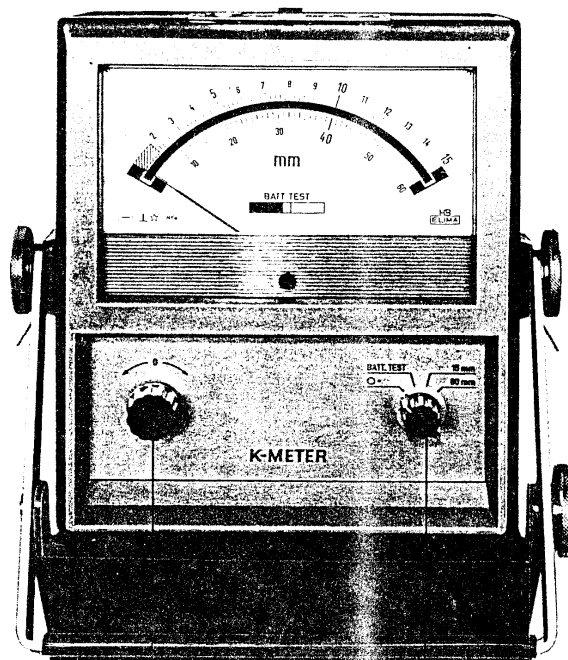


Figure (3. 4): K mètre.

Dans le cas de pièces à surface courbe (tubes, etc...) la barrière entre émetteur et récepteur du palpeur doit être placée perpendiculaire à la génératrice rectiligne de la surface.

3.3.2. Appareils digitaux du type DM2, M215, Caliper, ES M 300:

Mêmes réglages que pour le K mètre et mêmes remarques. Ces appareils donnent généralement une précision de l'ordre de 1/100 mm; il convient de veiller au contact parfait.

Dans le cas de relevé d'épaisseur sur tubes, un jeu d'étalons de même diamètre et matière est souhaitable.

Certains appareils emploient un palpeur simple à ondes de choc (un cristal émetteur, placé de façon telle que son faisceau traverse le cristal récepteur; le passage du train d'onde donne une première impulsion au récepteur, impulsion qui sert d'origine à la base de temps).

3.4. Principe des mesures de l'épaisseur en fonction de la vitesse de propagation des ondes US :

Dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles :

Utiliser pour l'étalonnage, 2 épaisseurs de même matière, pour l'étalonnage soit deux blocs séparés, soit des endroits de la pièce où une mesure au pied à coulisse ou au palmer est possible.

Soit étalonner l'appareil pour l'acier et employer la formule :

$$e = K \cdot em \quad k = \frac{Vm}{Vac} \quad e = \frac{em \times Vm}{Vac}$$

(2.24)

D'où :

em = épaisseur mesurée sur l'appareil quand il est calibré pour l'acier,

Vac = vitesse dans l'acier, (+OU -5 960 m/s)

Vm = vitesse de propagation dans la matière examinée,

Remarque :

- La première méthode est de loin préférable.
- Sur certains appareils, il est possible de régler la vitesse de propagation.
- La vitesse des ondes US dans les aciers fortement alliés peut différer très notablement (jusqu'à 25 % selon les cas) de la vitesse dans les aciers au carbone courants !
- Il est également possible de mesurer la vitesse de propagation d'un matériau en connaissant une épaisseur de celui-ci.

3.5. Principe des mesures d'épaisseur à température élevée:

Ce procédé utilise des palpeurs spéciaux dont la sensibilité et la résistance sont peu variables avec la température (en fait, les cristaux piézo-électriques sont protégés de la chaleur par interposition d'une pièce en matière spéciale, contenue dans la tête du palpeur).

Le contact est assuré par une vaseline spéciale.

La vitesse de propagation des ultrasons dans l'acier variant en fonction de la température. La vitesse diminue puisque le coefficient d'élasticité diminue quand la température d'un matériau augmente.

$$V = K \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.25)$$

Comme la vitesse diminue, cela veut dire qu'on va mesurer plus que la réalité, il y'a lieu d'apporter aux mesures obtenues, les corrections suivantes par rapport à l'étalonnage sur "étalon escalier" effectué à température ambiante, tableau 1.3

Température c°	5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
0	+ 0,035	+ 0,07	+ 0,15	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,35
15	0	0	0	0	0	0
50	- 0,08	- 0,15	- 0,35	- 0,5	- 0,7	- 0,85
100	- 0,2	- 0,4	- 0,8	- 1,2	- 1,6	- 2
150	- 0,3	- 0,65	- 1,3	- 1,95	- 2,6	- 3,25
200	- 0,45	- 0,9	- 1,8	- 2,65	- 3,5	- 4,4

Tableau 1.3: l'influence de la température sur la mesure obtenue.

Exemple : valeur lue : 15,7 mm =4 valeur réelle 14, mm à 200°

Remarque : Si l'on possède un étalon à la même température que la pièce, il n'y a pas lieu d'apporter de correction.

4. RECHERCHE DE CORROSION:

4.1. Types de corrosion:

Corrosion ou érosion uniformes:

La perte de métal est uniforme sur de grandes surfaces.

Corrosion et érosion par plaques ou par zones:

Même phénomène que ci-dessus, mais localisé à certains endroits.

Corrosion sous "accrochages" ou dépôts:

Ce type de corrosion peut être très localisé; la corrosion se présente sous forme de piqûres ou pustules.

Corrosion fissurant dite "stress corrosion":

Cette corrosion peut avoir un caractère excessivement local; elle se manifeste par l'apparition de fissures ou amorces en diverses zones.

Corrosion fragilisant:

Cette corrosion se produit habituellement sous un dépôt ou une couche d'oxyde. Grosso modo, on peut considérer qu'elle se manifeste sur une partie du métal par une désagrégation des joints de grains, le métal perdant sa cohésion et devenant fragile et sans résistance.

4.2. Détection des corrosions:

Corrosion (ou érosion) uniformes:

Cette corrosion n'atténue que très peu les réflexions successives sur la paroi corrodée; aussi, pour la détecter aura-t-on recours à la mesure d'épaisseur, soit par échos multiples, soit à l'aide du palpeur S.E.

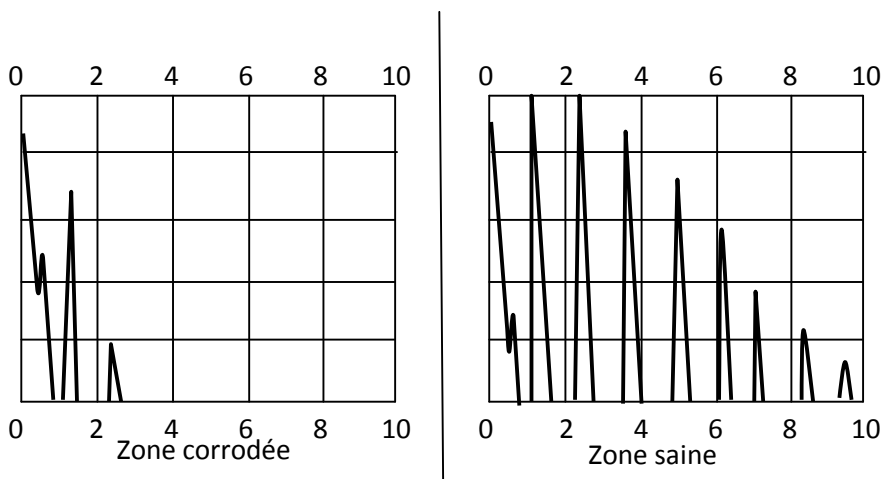
Corrosion par plaques:

Cette corrosion étant du même type, se détectera par mesure d'épaisseur en un nombre suffisant de points.

Corrosion sous accrochages ou dépôts:

Ce type de corrosion se détecte par amortissement et disposition des échos successifs de réflexion.

- Zone saine: Pas d'amortissement sensible de la courbe d'atténuation des échos successifs,
- Zone avec amorce de corrosion: Un amortissement sensible de la courbe d'atténuation (disparition des trois derniers échos de fond, par exemple) correspond habituellement à un début de corrosion ou à la présence d'accrochages,
- Zone corrodée de façon déjà importante: Disparition totale des échos suivant le premier écho de fond,



- Préparation des surfaces de palpation: Une variation de l'état de la surface de contact influence également le nombre et l'intensité des échos réfléchis; pour éviter toute confusion entre la mauvaise réflexion due à une corrosion et celle due à un mauvais état de surface, il est important que les surfaces à contrôler soient nettoyées avant d'effectuer

le contrôle, Un sablage des surfaces de contact doit être recommandé lorsque ces surfaces présentent des adhérences ou irrégularités.

- Exécution du contrôle:

Sur tôle: La surface sera quadrillée de façon à ce qu'aucune partie n'échappe à l'examen; dans chaque carré, plusieurs lignes horizontale et verticale seront parcourues avec le palpeur (suivant le pourcentage de contrôle demandé).

Corrosion fissurant:

La détection de corrosion de ce type est en fait une recherche de fissuration. Il y'a donc lieu de se reporter aux chapitres correspondant à ce sujet.

Corrosion fragilisant:

Plusieurs méthodes de détection de ce type de corrosion ont déjà été utilisées, mais aucune n'a donné satisfaction complète jusqu'à présent.

Il semble que la méthode (contrôle sur tubes remplis d'eau et examen des échos de réflexion après parcours dans l'eau) donne certains résultats, mais, au stade actuel, sans certitude de détecter toutes les zones atteintes et uniquement celles-ci.

Tout cas de ce type qui devrait être traité devra faire l'objet d'une étude particulière.

5. CONTROLE DE PIECES COULEES ET FORGEES:

5.1. Généralités:

5.1.1. Connaissance de la pièce:

Avant de procéder à l'examen d'une pièce, il faut en connaître les dimensions d'une manière aussi exacte que possible; il faut avoir en main le plan de la pièce avec tous les détails, car un changement de section, un arrondi, par exemple, peut renvoyer au palpeur émetteur un écho de retour qui pourrait être confondu avec un défaut éventuel; bien entendu, lorsque la pièce est complètement libre, cette anomalie est facilement décelable, ce qui n'est pas le cas pour l'examen de pièces dont certaines parties sont encore cachées.

5.1.2. Connaissance du mode de fabrication de la pièce:

La connaissance du mode de fabrication d'une pièce donne des indications sur le type et la localisation des défauts dont la présence est la plus probablement à craindre.

Exemples:

- pièces forgées en général : défauts autour de l'axe,
- pièces provenant d'un lingot coulé sous vide; défauts du côté du pied du lingot,
- pièces provenant d'un lingot coulé normalement; défauts du côté de la tête du lingot,
- pièces laminées : défauts parallèles aux génératrices ou aux faces,
- pièces coulées : défauts dans les zones de changements de forme, dans les parties minces.

5.1.3. Connaissance des conditions de sollicitation de la pièce en service:

La connaissance du mode de sollicitation d'une pièce en service donne des indications sur le risque de rupture ou d'accident qui correspond aux défauts dont on a détecté la présence; il est utile d'obtenir des renseignements sur le sens ou la direction des efforts principaux.

Exemples :

- pièce en rotation,
- pièce en traction,
- pièce en mouvement alterné,
- pièce en compression.

5.1.4. Remarque:

Lorsqu'on effectue un contrôle par ultrasons, il ne faut pas se fier à une première impression, mais prendre soin de confirmer le premier diagnostic par des recoupements, en sondant le défaut suivant d'autres directions (prendre d'autres palpeurs d'angle, choisir une autre surface de sondage, etc...).

5.2. Examen de pièces coulées:

5.2.1. Préparation des surfaces:

Les pièces coulées sont examinées, dans un premier stade, après un traitement de normalisation. Les surfaces sont en général brutes de coulée, à l'exception de quelques parties qui sont dégrossies. Cet état de surface permet bien entendu un contrôle par ultrasons, mais certaines anomalies peuvent échapper. Pour que le contrôle soit réellement valable, il faut que la surface de contact avec le palpeur soit usinée ou meulée avec le plus grand soin.

5.2.2. Méthode de détection des défauts:

5.2.2.1. Retassures:

Le principal défaut des pièces en acier moulé est la retassure, Elle se détecte relativement bien au moyen des ondes ultrasonores.

- Au palpeur normal :
 - On obtient, sur l'écran cathodique, l'une des possibilités suivantes :
 - un groupe d'échos multiples avec atténuation de l'écho de fond
 - un groupe d'échos multiples sans écho de fond
 - un groupe de départ sans aucune autre indication et sans écho de fond

- Au palpeur d'angle :

On obtient un groupe d'échos multiples sur l'écran cathodique; ce groupe d'échos multiples existe quelle que soit la direction suivant laquelle on examine le défaut. La largeur du groupe d'échos multiples donne une idée des dimensions de la retassure, en fonction du, palpeur utilisé.

5.2.2.2. Traînées de gaz ou soufflure:

Se présentent sous forme d'un défaut vermiculaire suivant un tracé irrégulier dans la pièce.

- Au palpeur normal :

Le défaut est assez difficilement détecté; l'écho obtenu est très petit comparativement à l'écho de fond; si l'appareil est réglé de façon à obtenir un écho de fond égal à la hauteur du cadran, le défaut risque même de passer inaperçu.

- Au palpeur incliné :

Le défaut se marque par un écho unique pour autant que la largeur du faisceau des ondes ultrasonores soit parallèle à la traînée de gaz; de plus, comme le chemin de cette traînée de gaz est irrégulier, il est très difficile de la suivre sur toute sa longueur, en déplaçant le palpeur sur la pièce.

Le danger de ce type de défaut est qu'il peut correspondre à un manque d'étanchéité, par exemple si la traînée de gaz traverse l'épaisseur de la pièce, se terminant à chacune des surfaces par un petit cratère.

5.2.2.3. Reprise de coulée:

C'est une discontinuité linéaire de la matière qui se situe à la rencontre de deux courants métalliques dans le moule et qui n'étaient plus assez chauds et/ou oxydés pour se confondre et se souder. Cette surface, non fusionnée, réalise ainsi un "manque de fusion" analogue à celui que l'on connaît en soudure. Ce défaut se détecte la plupart du temps avec un palpeur droit et donne un écho assez fin comme la doublure dans une tôle.

5.2.2.4. Goutte froide:

C'est une goutte de métal tombée prématurément dans le moule et solidifiée avant d'être submergée par la masse principale du métal. Ce type de défaut est détecté comme l'inclusion gazeuse.

5.2.2.5. Taches de sable:

Ce type de défaut n'est pas toujours décelable par ultra-sons du fait que la surface entre sable et acier a une forme très irrégulière, ce qui provoque une diffusion du faisceau US dans toutes les directions, sans donner d'écho notable, ceci aussi bien en ondes longitudinales que transversales.

5.2.2.6. Inclusions d'oxyde:

Il s'agit d'oxyde formé pendant la coulée; cet oxyde, plus léger que le métal, remonte normalement vers la masselotte, mais il peut rester emprisonné dans le métal, par exemple près d'une discontinuité de la forme du moule. Ce défaut n'est pas visible au palpeur normal, par suite de son inclinaison et de l'absence d'écho de fond qui est due à la forme de la pièce à cet endroit. Au palpeur incliné, le défaut est plus facilement décelable; on obtient un écho important, unique et large à sa base.

5.2.2.7. Fissures à chaud:

Ce défaut est également typique des aciers moulés; il est facilement détecté par ultrasons au moyen du palpeur d'angle.

5.2.2.8. Manque d'épaisseur:

Il arrive parfois que les pièces moulées, se présentant sous forme d'enveloppe, aient une épaisseur insuffisante, soit localement, soit sur tout un côté; il est important, lors du contrôle de ces pièces, d'en vérifier l'épaisseur.

Il ne s'agit évidemment pas de rechercher un manque d'épaisseur de quelques millimètres, mais bien de déceler sur l'écran de déplacement de l'écho de fond correspondant à une diminution notable d'épaisseur.

5.2.3. Acceptabilité des défauts détectés:

- Les fissures ne sont en général admissibles dans aucun cas,
- Les manques d'épaisseur seront ou non tolérés en fonction du calcul de résistance de la pièce; d'ailleurs ces anomalies sont en général réparables par une recharge par soudure,
- Les traînées de gaz, pour autant qu'elles soient détectées, ne sont pas dangereuses, il suffit de s'assurer par un léger meulage en surface qu'il n'existe pas de cratère débouchant en peau, risquant de donner un manque d'étanchéité,
- Les taches de sable également ne sont en général pas dangereuses,
- Les retassures sont en général facilement détectables par ultrasons; on peut en déterminer les dimensions globales; par contre, il est très difficile d'en juger l'importance réelle.

On procédera alors au contrôle radiographique des zones avec retassures, et l'acceptabilité des défauts sera étudiée à partir des critères radiographiques (par exemple, les films de comparaison des normes ASTM). Il faut préciser que si un défaut est décelé par ultrasons, et que la radiographie de contrôle de la zone correspondante ne montre aucun défaut, cela signifie que l'on se trouve en présence d'un défaut du type difficilement décelable par radiographie, c'est-à-dire du type à deux dimensions; il s'agit donc d'un défaut grave dont la présence rend la pièce douteuse.

5.3. Examen de pièces forgées:

5.3.1. Préparation des surfaces:

Les pièces de forge sont en général examinées à plusieurs stades différents, en cours de fabrication, de façon à éviter des frais d'usinage qui seraient perdus au cas où le contrôle à un stade ultérieur provoquerait le rebut de la pièce par cause de défauts existant déjà à la coulée ou dès le début du forgeage.

Examen du lingot après écroutage:

Afin de s'assurer de l'absence de retassure importante.

Cet examen est effectué à basse fréquence (1 ou 0,5 MHz), parce que les ondes ultrasonores de fréquence supérieure sont trop fortement absorbées, étant donné la structure du métal.

Examen du bloc après forgeage:

Pour être valable, le contrôle par ultrasons est effectué après traitement de normalisation pour que le grain du métal soit fin.

La surface du bloc forgé est meulée sur quatre génératrices afin d'éliminer les croûtes d'oxyde.

Examen de la pièce à l'état de livraison:

La surface doit être usinée à trait d'outil fin, 125 in min.

5.3.2. Méthodes de détection des défauts:

5.3.2.1. Défauts filiformes:

Ce type de défaut est décelable au moyen du palpeur normal. En principe, il est surtout visible dans les environs immédiats de l'axe de la pièce. Il n'est pas décelable par translation d'un palpeur d'angle suivant les génératrices de la pièce forgée.

Cette anomalie donne lieu, sur l'écran cathodique, à un écho unique situé à mi-distance entre l'écho de départ et l'écho de fond.

5.3.2.2. Défauts de la structure du métal:

Certaines pièces forgées présentent dans leur partie centrale une agglomération de grains comparativement plus grossiers que les grains plus affinés situés vers les parois extérieures. Cette anomalie se constate sur l'écran cathodique par une agglomération de petits échos irréguliers, de différentes hauteurs, appelés généralement herbes; l'écho de fond subsiste sur l'écran. La largeur du groupe d'herbes, relevée sur le cadran et reportée à l'échelle de la pièce, correspond au diamètre réel de la zone à structure grossière.

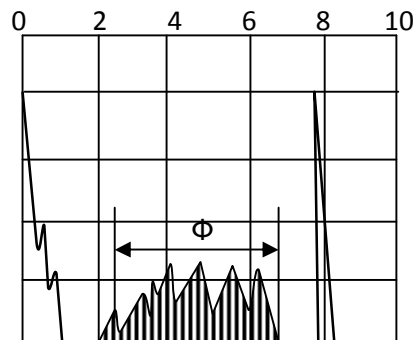


Figure (3. 5): Structure grossière.

5.3.2.3. Inclusions:

L'ensemble de ces inclusions est situé dans un cylindre ou dans un cône. Ces anomalies correspondent, sur le cadran de l'appareil, à **des échos multiples et séparés les uns des autres**. Ces échos sont situés entre l'écho de départ et l'écho de fond. Ces défauts proviennent d'inclusions à trois dimensions situées dans la partie centrale du lingot avant forgeage.

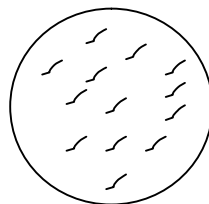
D'autres inclusions peuvent être trouvées groupées d'un côté de la pièce forgée, correspondantes soit au pied, soit à la tête du lingot. Ces inclusions ont pour origine un chutage insuffisant du lingot, c'est-à-dire à une mauvaise élimination des défauts situés dans le prolongement de la zone de retassure. Par ultrasons, ces inclusions se marquent

par un groupe d'échos très rapprochés les uns des autres avec une atténuation de l'écho de fond; la longueur du défaut se détermine par translation du palpeur suivant l'axe de la pièce; la largeur par translation du palpeur dans une direction perpendiculaire à l'axe; la hauteur du groupe d'inclusions correspond à la largeur de l'écho sur l'écran de l'appareil aux ultrasons.

L'oscillogramme ainsi obtenu peut être confondu avec le cas de structure grossière. Le meilleur moyen de les distinguer est de diminuer la fréquence du palpeur utilisé. Si les petits échos disparaissent, c'est qu'ils étaient donnés par la structure grossière.

Inclusions radiales:

Certaines pièces forgées cylindriques présentent des inclusions très fines dont les deux dimensions principales sont orientées, suivant l'axe et le rayon de la pièce.



Lors de l'examen au palpeur d'angle, on remarque la présence de plusieurs échos dont l'origine est localisée dans une couronne voisine de la surface extérieure. L'épaisseur trouvée pour cette couronne varie en fonction de l'angle d'incidence du palpeur utilisé. Ceci signifie que l'on ne décèle pas, avec un seul palpeur, la présence de tous les défauts simultanément, mais seulement de ceux qui présentent une certaine orientation par rapport au faisceau d'ultrasons. Même s'il subsiste une zone dans laquelle on ne décèle pas de défauts, il est donc logique de conclure que ces défauts forment un ensemble, qui s'étend dans toute la section de la pièce.

5.3.2.4. Flocons, fissures et replis de forge:

Flocons:

Les flocons se présentent dans une pièce de forge sous forme de petites fissures orientées dans toutes les directions. Ce sont des bulles d'hydrogène qui ont éclaté lors du forgeage, ce qui donne naissance à des étoiles de fissures. On les détecte très bien au moyen du **palpeur droit**; sur le cadran de l'appareil à ultrasons, on observe une multitude d'échos très fins et répartis entre l'écho de départ et l'écho de fond fortement atténué. Au moyen du palpeur d'angle, on observe la même image sur l'écran que lors de l'examen au palpeur droit.

Fissure:

Ce type de fissure se présente, lors de l'examen micrographique, sous une forme irrégulière aussi bien en longueur qu'en profondeur. Sa détection par ultrasons est aisée : sur l'écran de l'appareil, elle correspond à un écho simple. La longueur de la fissure se détermine par translation du palpeur parallèlement au défaut. En général, les fissures ne sont pas détectées à l'examen au palpeur normal, même à très forte amplitude.

Replis de forge:

Les replis de forge donnent, lors de l'examen par ultrasons, le même genre d'écho que les fissures de forme irrégulière. Il s'agit de défauts débouchant en surface.

5.3.3. Interprétation des résultats obtenus:

Comme dans le cas des défauts de pièces coulées, à défaut d'une spécification qui précise les limites d'acceptabilité, il faut s'attacher à localiser avec précision les défauts décelés et à déterminer leur nature. Leur acceptabilité sera alors décidée suivant les indications du responsable du calcul de la pièce examinée.

5.4. Défauts apparaissant en service:

Fissures de fatigue:

Les défauts apparaissant en service trouvent leur origine à des points faibles, c'est-à-dire dans des zones qui sont **proportionnellement plus fortement sollicitées que le reste de la pièce.**

Ces points faibles correspondent soit à des défauts résultant de l'élaboration de la pièce, (défaut d'homogénéité du métal), soit à des faiblesses de **conception**, discontinuités de forme (congés mal dessinés, par exemple) etc...

Nous envisageons ici le cas des pièces soumises à fatigue proprement dite, c'est-à-dire que la sollicitation varie rapidement, décrivant un grand nombre de cycles successifs. Dans pareil cas, peut apparaître un type particulier de fissure rectiligne dont les **surfaces sont lisses, et même polies par le matage des deux lèvres** l'une sur l'autre à chaque cycle de la sollicitation.

6. CONTROLES DES SOUDURES:

6.1. Contrôle de soudures bout à bout de tôles et, viroles:

6.1.1. Informations nécessaires pour le contrôle:

Le choix de la meilleure méthode de contrôle d'une soudure donnée, de même que l'interprétation des échos obtenus, ne peuvent être faits valablement qu'à partir de la connaissance d'un certain nombre d'informations.

Métal de base:

La nature du métal de base (acier, aluminium, etc...) a de l'importance parce qu'elle détermine l'angle réel d'incidence des faisceaux ultrasons dans la pièce examinée.

Cette nature a également une influence sur le type de défauts que l'on peut rencontrer. Il faut également s'assurer que le métal de base, aux environs du chanfrein, est exempt de défauts tels que doublures ou ségrégations. La présence de pareils défauts modifiera le parcours des ondes ultrasonores, pouvant donner des échos parasites sans lien avec aucun, défaut de soudure, ou au contraire, ces défauts peuvent masquer la présence de défauts de soudure réels.

Préparation de la soudure:

La connaissance de la préparation de la soudure (chanfrein) est nécessaire pour déterminer le type de palpeur à utiliser (le faisceau doit autant que possible être perpendiculaire au flanc de chanfrein). D'autre part, cette connaissance est une aide pour.

Déterminer la nature d'un défaut détecté. Par exemple, un défaut n'atteignant pas la racine d'une soudure en V ne pourra être un manque de pénétration. La forme et les dimensions du chanfrein doivent donc être connues.

Procédé de soudage:

Il faut ajouter ici que certaines structures du métal déposé par soudure peuvent ne pas être perméables aux ultrasons (par exemple : soudures au chalumeau, soudures d'aciers austénitiques). Dans ce cas, l'absence d'écho ne correspond pas nécessairement à l'absence de défauts, puisqu'il est possible que le faisceau US soit "absorber" avant même d'avoir atteint un éventuel défaut.

Spécification de contrôle:

Le contrôleur ultrasoniste a pour mission principale de déceler, identifier et localiser les défauts éventuellement existants dans la soudure. Ensuite, il appliquera les critères d'acceptabilité qui lui ont été définis, pour décider si ces défauts sont acceptables ou s'ils doivent être réparés.

Ces critères sont normalement définis pour chaque pièce en fonction des conditions de sollicitation de l'assemblage, des conséquences que pourrait avoir une rupture (risque d'accident de personne, possibilité de réparation, risque économique lié à l'arrêt d'une unité de production par exemple, etc...).

Les spécifications de contrôle et critères d'acceptabilité peuvent soit être définis pour chaque pièce ou assemblage examiné (spécification particulière à une commande), soit se référer à certains codes ou normes d'utilisation générale, tels le code ASME (American Society of Mechanical Engineers), le code API (American Petroleum Institute - tanks de stockage, pipe-lines, etc...), les British Standards, les normes DIN, etc...

Certaines de ces spécifications du reste indiquent non seulement les critères d'acceptabilité, mais aussi les méthodes d'étalonnage et de contrôle, palpeurs à utiliser, etc...

Dans plusieurs cas, les critères sont définis en se basant sur la hauteur de l'écho obtenu sur une anomalie, par rapport à la hauteur d'écho donné par un défaut artificiel (trou foré par exemple) dans un bloc d'étalonnage; il ne faut pas perdre de vue que cette méthode de définition d'un critère n'est pas utilisable dans tous les cas, puisqu'il peut arriver qu'un défaut tolérable donne un écho plus important qu'un autre défaut qui n'est pas acceptable.

6.1.2. Préparation 'du matériel:

Choix des palpeurs:

Un premier choix du palpeur à utiliser pour réaliser un contrôle déterminé est fait en fonction des épaisseurs du métal de base, suivant le tableau ci-dessous :

<u>Epaisseur de tôle</u>	<u>Angle du palpeur dans le métal examiné</u>
4 à 30 mm	70 °
25 à ∞.	60 °
Supérieure à 30 mm	45 °

Echelle:

L'échelle doit être supérieure au parcours du bond complet.

6.1.3. Exploration de la soudure:

Quoique le faisceau émis par un palpeur ait une certaine ouverture, ce faisceau ne traverse qu'une partie de la soudure pour une position donnée du palpeur. Pour balayer l'entièreté de la soudure, il faut donc déplacer le palpeur, perpendiculairement au cordon de soudure.

Après une translation perpendiculaire de la soudure, on déplace' le palpeur parallèlement à la soudure, d'une distance équivalente à la largeur du palpeur et on recommence le mouvement perpendiculaire.

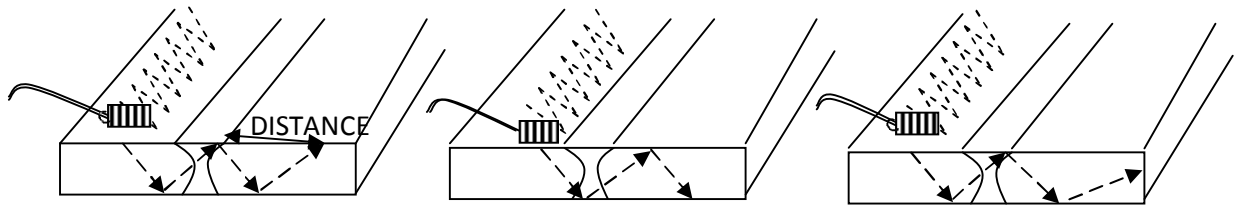


Figure (3.6): Exploration de la soudure.

Ce mouvement donne un sondage complet de la soudure, mais ne révélera pas nécessairement tous les défauts éventuellement présents :

- Pour détecter des défauts dans les diverses orientations possibles, le contrôle doit être effectué par sondage des deux côtés de la soudure; (mais ce n'est pas toujours possible),
- Dans le cas de soudures de forte épaisseur, il faut se souvenir que l'intensité du faisceau d'ultrasons diminue quand augmente la distance par rapport au palpeur; pour éviter cet inconvénient, on examine également la soudure à partir des deux faces de la tôle, si possible.

L'exploration de la soudure est destinée à détecter toute anomalie que l'on rencontrerait. Cette exploration peut éventuellement se faire avec un réglage d'amplification supérieur à celui précisé par l'étalonnage (ajouter 4 à 8 dB par exemple). De cet* te façon, on peut augmenter la vitesse de sondage sans craindre de ne pas détecter certains défauts qui devraient l'être. Mais il est évident que l'acceptabilité des défauts et le jugement de leur importance ne peuvent se faire qu'en revenant aux réglages d'étalonnage.

6.1.4. Identification des anomalies détectées:

Il n'est pas possible de définir des critères objectifs permettant de déterminer avec certitude la nature du défaut examiné. Cependant, par l'analyse de l'écho obtenu et de la façon dont cet écho évolue lorsque l'on déplace le palpeur en face du défaut, un opérateur expérimenté peut déterminer la nature du défaut.

Les défauts rencontrés dans les soudures à l'arc sont illustrés par le schéma ci-dessous. On distingue en effet :

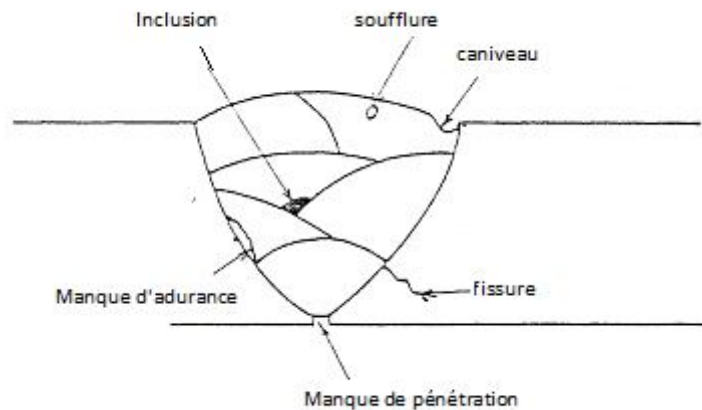


Figure (3. 7): Les défauts rencontrés dans les soudures.

6.1.4.1. Porosités:

L'écho obtenu sur une porosité isolée est un écho à front raide.

- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à l'axe de la soudure, l'écho disparaît rapidement,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à l'axe de la soudure, l'écho disparaît rapidement,
- Si l'on fait tourner le palpeur autour du défaut pris comme centre, l'écho reste pratiquement constant.

6.1.4.2. Groupe de porosités:

- L'écho obtenu est composé des différents échos provenant de chacune des porosités composant le groupe. On aura donc un ensemble de petits échos à front raide, dont certains se recouvrent l'un l'autre éventuellement,
- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à l'axe de la soudure, l'écho global subsiste, mais la position relative des petits échos l'un par rapport à l'autre, peut changer,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à la soudure : idem,
- Si l'on fait tourner le palpeur autour du défaut pris comme centre: idem.

Remarque : Dans certains cas, les groupes de porosités sont difficilement décelables par ultrasons, et on aura tendance à en sous-estimer l'importance. En effet, il se produit un phénomène "d'absorption" des ultrasons.

6.1.4.3.. Inclusion de laitier:

- L'écho obtenu est un écho à front déchiqueté,
- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à la soudure, l'écho subsiste, mais en changeant de forme,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à la soudure: L'écho disparaît rapidement,

- Lorsque l'on fait tourner le palpeur autour du défaut, à amplitude normale, l'écho disparaît progressivement, tandis qu'à forte amplitude, on obtient un écho décheté à large base ou une série de puits échos.

6.1.4.4. Manque de pénétration:

L'écho obtenu est haut, à front raide,

- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à la soudure, l'écho subsiste,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à la soudure, l'écho subsiste,
- Lorsque l'on fait tourner le palpeur autour du défaut pris comme centre de rotation, l'écho disparaît.

6.1.4.5. Manque de fusion dans le flanc de la soudure:

L'écho obtenu est identique à celui d'un manque pénétration : écho haut, à front raide et qui réagit, de façon similaire aux déplacements du palpeur.

Le seul moyen de différenciation consiste à déterminer la position du défaut.

6.1.4.6. Fissure:

De tous les défauts étudiés c'est le plus dangereux pour la résistance des assemblages soudés. D'autre part, ce type de défaut souvent difficile à déceler par radiographie est en général aisément détecté par les ultrasons ce qui est une des qualités principales de cette méthode de contrôle.

- L'écho obtenu est important, à front raide (superposition d'une multitude d'échos),
- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à l'axe de la soudure, l'écho subsiste,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à l'axe de la soudure, l'écho subsiste,
- Lorsque l'on fait tourner le palpeur autour du point d'incidence des ondes US, l'écho varie de hauteur, diminuant puis augmentant etc... Sans disparaître. Cette particularité est la caractéristique principale qui permette de différencier une fissure d'un autre type de défaut.

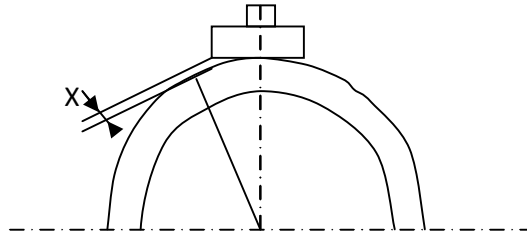
6.2. Contrôle de soudures bout à bout de tubes de faible épaisseur :

6.2.1. Etalonnage:

Le fait que le palpeur doive être posé sur des surfaces courbes et non plus sur des surfaces planes, modifie les circonstances de contrôle, du fait de la variation de la géométrie des faisceaux en fonction des rayons de courbure.

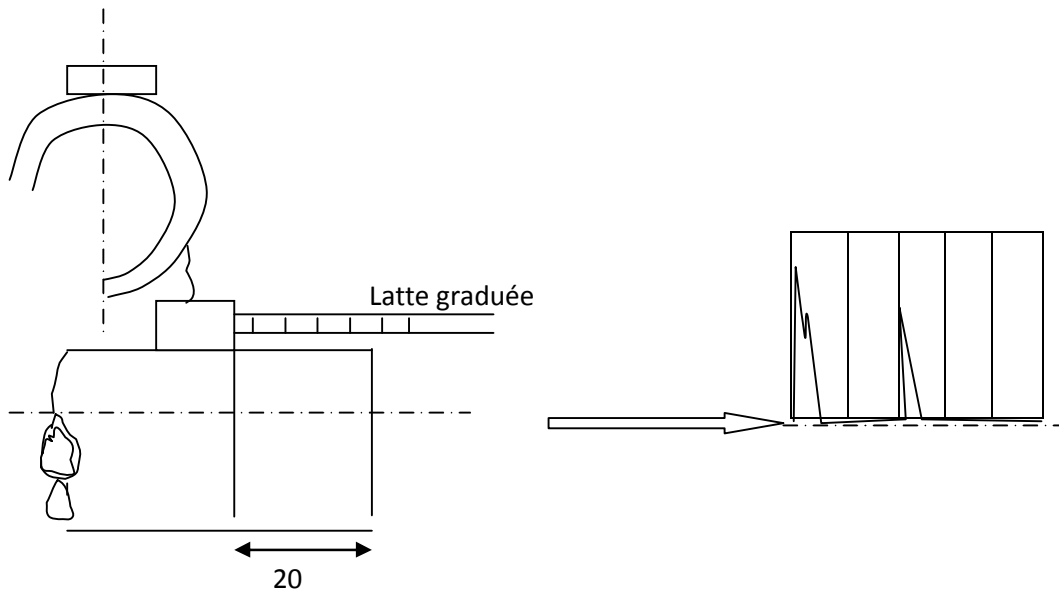
D'autre part, si l'on applique un palpeur dont la semelle est plane sur la surface courbe d'un tube, la modification des conditions de contact entre palpeur et métal peut correspondre à une modification des angles d'ouverture de faisceau.

L'ajustage du profil de la semelle du palpeur doit être fait de telle manière que toute la surface de la semelle porte sur le tube à examiner et que le jeu en bordure de cette semelle en plexiglas ne dépasse pas 0,1 mm.



Ajustage de l'échelle:

En pratique, pour régler l'échelle, l'opérateur prend un bout de tube de diamètre et épaisseur égaux au tube à contrôler. Il place successivement le palpeur à 10 - 20 - 30 - 40 mm du bout du tube et place les échos ainsi obtenus sur 1 - 2 - 3 - 4ème graduation de l'écran. Il a ainsi une échelle en projection de son parcours.

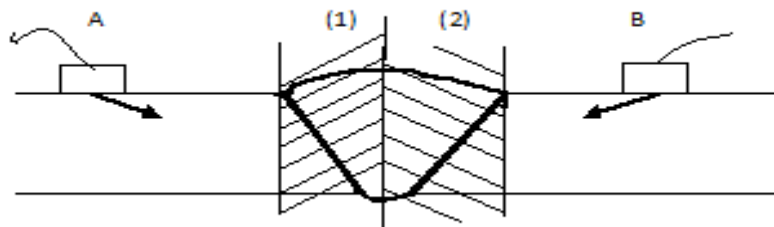


6.2.2. Contrôle de soudures:

Défaut de soudure et défaut de surface ou de forme

Il faut distinguer les échos correspondant à des anomalies dans la soudure de ceux qui correspondent à la géométrie particulière de l'assemblage soudé.

Pour faciliter la compréhension, nous diviserons la soudure en 2 parties égales.



En règle générale, dans le cas du sondage par le côté A par exemple, des échos localisés dans la zone 1, même s'ils ne sont pas confirmés par le côté B, correspondent à des défauts de soudure.

Par contre, lorsque le palpeur situé du côté A décèle des échos dont l'origine est localisée dans la zone 2 ou même quelquefois au-delà, il s'agit d'échos parasites dus à la géométrie de l'assemblage.

On peut évidemment tenir le même raisonnement lorsque le palpeur se trouve du côté B :

- localisation dans zone 2: défauts
- localisation dans zone 1 : échos parasites.

Remarque:

Echos dus à la géométrie de l'assemblage:

Lorsque des échos de ce genre existent, il est souvent difficile de déterminer leur cause de façon objective. Cette cause peut être un excès de pénétration interne, ou un bourrelet extérieur, ou parfois les deux en même temps. On sait, en effet, que le faisceau d'ondes ultrasonores a une certaine ouverture, et que les épaisseurs de tubes chaudières sont faibles. De ce fait, le faisceau du palpeur balaye pratiquement toute l'épaisseur de la soudure, quelle que soit la position du palpeur par rapport à la soudure.

En règle générale, on peut estimer que les défauts tels que manque de pénétration, fissure, etc... Sont la cause d'échos localisés au même endroit dans la soudure, quel que soit le côté par lequel le sondage US est effectué; tandis que les défauts de forme du cordon (surépaisseur, concavité, etc...) sont cause d'échos localisés en des positions différentes suivant le côté du sondage.

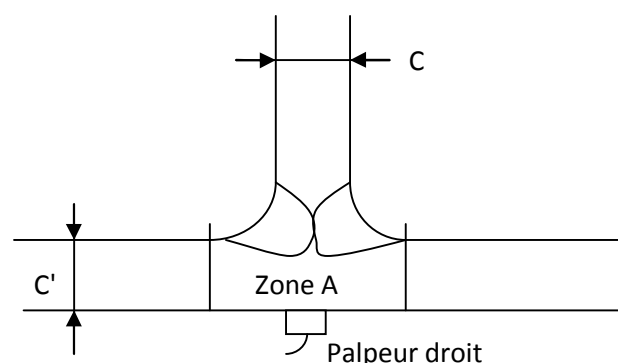
L'opérateur US s'attachera donc à déterminer la position de l'anomalie qu'il rencontre, (ce qui donne en même temps des informations sur la nature de cette anomalie), l'allure de la courbe enveloppe (information sur la hauteur du défaut dans la soudure), la longueur du défaut et l'importance de l'écho maximum (hauteur d'écho); d'où il pourra juger de la nature et de l'importance du défaut de soudure, et décider de son acceptabilité en fonction des critères qui lui ont été fixés.

6.3. Contrôle des soudures d'angle :

6.3.1. Méthodes de contrôle:

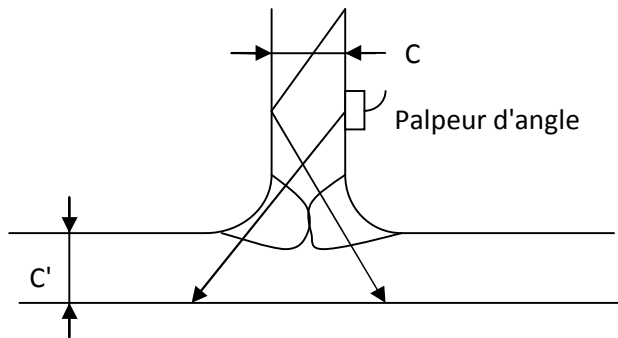
Différentes méthodes d'examen

- Examen par ondes longitudinales à Partir de la tôle C':



Cette méthode a pour but d'explorer la zone A en vue de détecter des fissures ou décollements de matière, situés dans la liaison soudure- tôle C' (éventuellement décollement lamellaire ou fissuration sous cordon).

- Examen par ondes transversales sur une ou sur les deux faces de C:



Cette méthode a pour but d'examiner la soudure et ses zones de liaison en vue de détecter :

- Défaut de soudure,
- Fissure,
- Décollements.

6.3.2. Procédure d'examen:

Palpeur droit, lorsque l'épaisseur de l'âme et de la semelle le permet.

Palpeur d'angle, à partir d'un côté de la tôle d'âme lorsque l'accès est possible seulement à partir d'un côté ou, lorsque les ondes ultrasonores sont suffisamment peu atténuées, pour permettre un contrôle au bond complet.

Palpeur d'angle, des deux côtés de la tôle d'âme lorsque les ondes ultrasonores sont atténuées au point que seul le contrôle au demi bond est possible.

6.3.3. Identification des anomalies:

La méthode de travail est la même que celle expliquée dans le cas des soudures bout à bout sur tôles et viroles.

Conclusion

La technique de contrôle non destructif par ultrasons est couramment utilisée pour l'inspection des pièces composites ou métalliques, dont la géométrie est de plus en plus complexe.

Pour inspecter ce type de pièces ou de structures, la méthode "classique" consiste à utiliser des transducteurs piézoélectriques couplés aux pièces à contrôler par un milieu couplant (car les ultrasons se propagent mal dans l'air). Néanmoins pour maîtriser cette méthode il faut connaître au préalable les différentes techniques de contrôle pour la recherche de défauts ou pour la mesure d'épaisseur.

Une fois les techniques et les précautions à prendre en considération, lors d'un contrôle non destructif en milieu industriel, connues on peut passer aux manipulations pratique de détection de défaut. Ce qui fera le but du dernier chapitre.

chapitre quatre

Résultats Expérimentaux

Chapitre IV : Résultats expérimentaux

1. Introduction:

La meilleure façon d'approfondir ces connaissances théoriques c'est de pouvoir exécuter expérimentalement tous les pré-requis analytiques (les hypothèses, lois et règles théoriques).

Nous avons eût le privilège et l'honneur de faire un stage de courte durée, au sein de l'Entreprise de Maintenance des Equipements Industriels « **MEI** » de M'sila, afin d'border un secteur capital dans le domaine du contrôle : en service, de qualité ou maintenance, connu sous le nom de Contrôle Non Destructif « **CND** ».

Parmi ces contrôles, on distingue le contrôle par ultrasons qui présente des caractéristiques très importantes, faisant de ce dernier l'un des principaux contrôles au sein de cette même entreprise, ce qui nous amener à réaliser différents essais pratiques.

Dans ce chapitre, nous décrivons les équipements utilisés lors des essais expérimentaux d'une façon globale, puis nous présenterons les résultats obtenus et leurs interprétations, pour différentes pièces. Nous consacrerons la dernière partie aux différents résultats expérimentaux pour un contrôle par ressuage et magnétoscopie.

2. Contrôle non destructif par ultrasons:

2.1. Matériels:

Appareil ultrason:

Sonatest UFD7A



krauthkramer USK7D.



Figure (4. 1): Des appareils ultrasons.

Réglage de l'appareil:

- Echelle sur la carte de l'afficheur :
 - X : base de temps: (50 graduation).
 - Y: énergie de signal.
- La gamme: réglage la base de temps ce réglage dépend de l'épaisseur de la pièce, (exp: une pièce de épaisseur 20mm la gamme sera 50mm).
- Le gain: pour régler l'intensité de signal.

- Vitesse de propagation: change d'un matériau à un autre (Sonatest UFD7A).
- Les fiches de (émetteur/récepteur): dépend du palpeur utilisé (palpeur double émetteur/récepteur),
- Palpeur émetteur et palpeur récepteur).

Les palpeurs : tous les palpeurs utilisés dans ce travail sont des palpeurs double.

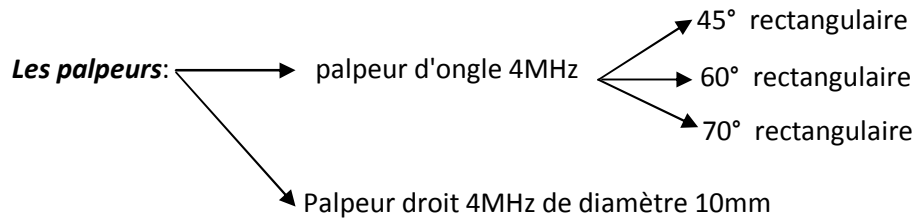


Figure (4. 2): Palpeurs.

Choix de palpeur: le choix se fait à partir de leur application.

- Inversement proportionnelle de faisceau par rapport à la fréquence, pour une grande fréquence il y a une petite largeur de faisceau et par contre pour une petite fréquence on a une grande largeur de faisceau.

- Quand Le diamètre de l'émetteur est grand → la largeur de faisceau est grande.

REMARQUE:

- Le contrôle non destructif par ultrason ce fait toujours par comparaison, par rapport a une référence a prés la phase d'étalonnage en utilisant des blocs (cales) étalons normalisés,
- On a utilise l'appareil SONATEST qui a une vitesse de propagation fixe (vitesse d'acier 5960m/s).

2.2. Étalonnage:

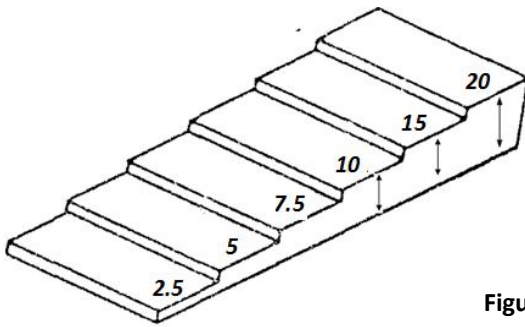


Figure (4. 3): Etalonnage d'épaisseur.

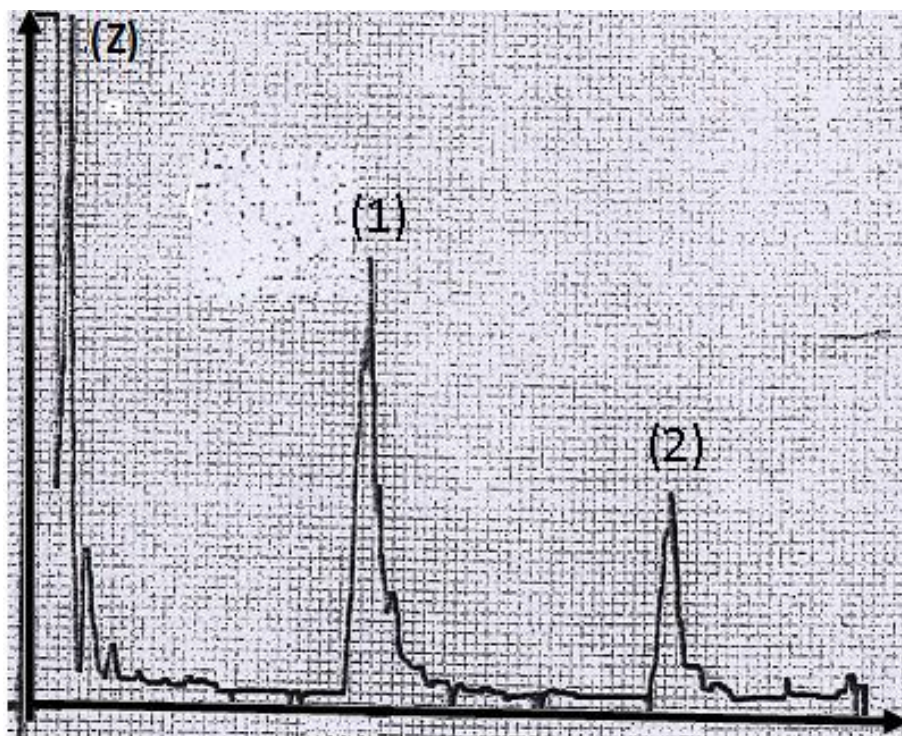
Pour étalonnée l'appareille on a choisi le palpeur droit double de 4MHz avec un diamètre 10mm, et une pièce étalon d'épaisseur dans la figure (4.3).

On a règle les paramètres de l'appareille:

Le gain =10 dB

La gamme =50mm

Voir le graphe suivant:



Nous constatons que:

L'amplitude de l'écho(1) est supérieure à l'écho (2).

- Le premier écho sur 20 graduations.

- le deuxième écho sur 40 graduations.

-(Z) : écho de référence (énergie totale sur la pièce).

-Le premier écho(1) est sur le point de 20mm car le parcours du signal est dans l'épaisseur de la pièce étalonner de 20mm.

-Le deuxième écho(2) est reproduction du l'écho(1) mais avec une faible énergie (perte d'énergie de signal dans le matériau).

- **Donc l'appareil est bien étalonné.**

2.3. Contrôle d'Adhérence

Pour contrôler l'adhérence il faut seulement contrôler l'épaisseur.

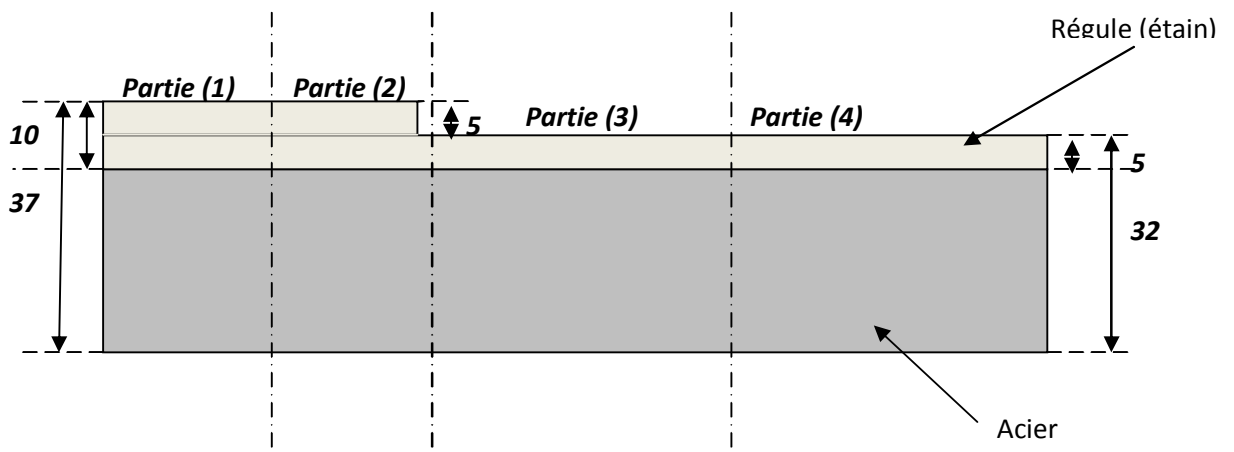
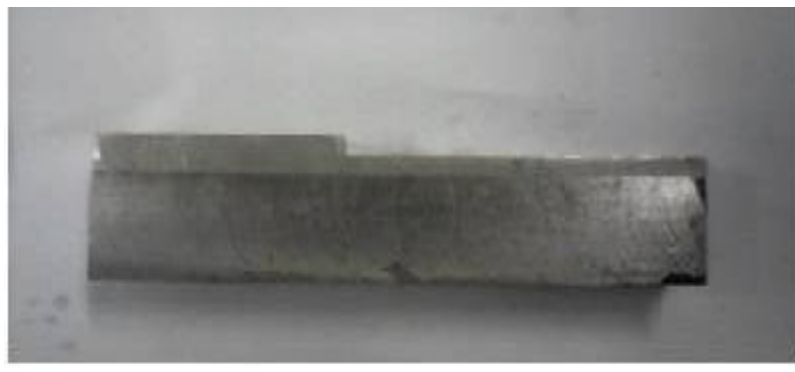


Figure (4. 4): Pièce à contrôler.

Pour une vérification totale de la pièce nous avons contrôlé cette pièce de deux côtes:

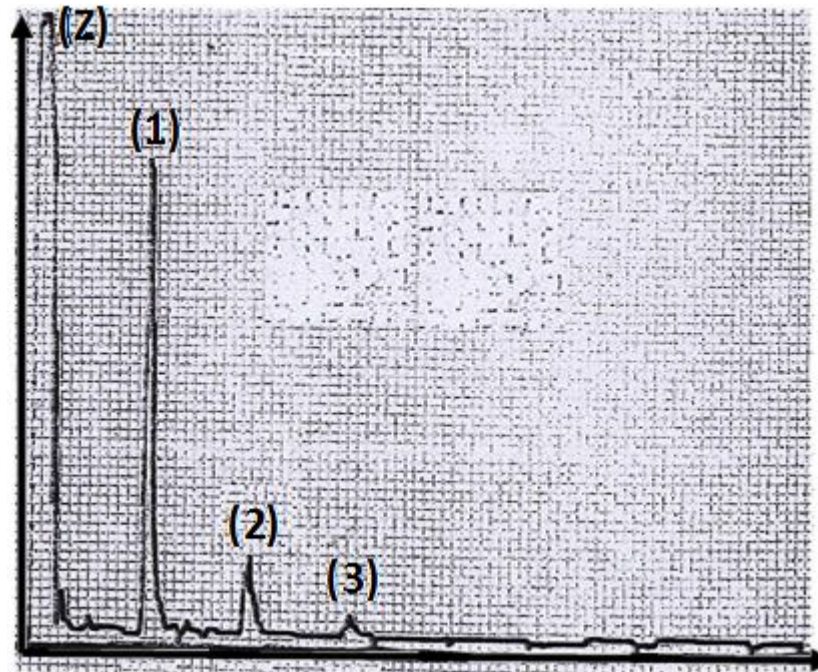
-côte 1: côte régule (base d'étain).

-côte 2: côte acier.

Côte règle:

Partie (1):

On a mis le palpeur sur la zone (1) et balayé toute la surface, le résultat trouvé sur le graphe ce dessue:



Paramètres de réglage:

- le gain: 16 dB
- la gamme : 100 mm
- 100mm/50graduations= 2 mm par graduation

Interprétation:

L'axe de x :

L'écho (z) c'est l'énergie de référence envoyé sur la pièce.

$$\left\{ \begin{array}{l} 18\text{mm} \longrightarrow 5960\text{m/s (vitesse d'acier)} \implies X=10\text{mm} \\ X \longrightarrow 3380\text{m/s (vitesse d'étain)} \end{array} \right.$$

L'écho (1) sur 9 graduations \longrightarrow 18mm (vitesse d'acier) \longrightarrow 10mm (vitesse de règle (étain)).

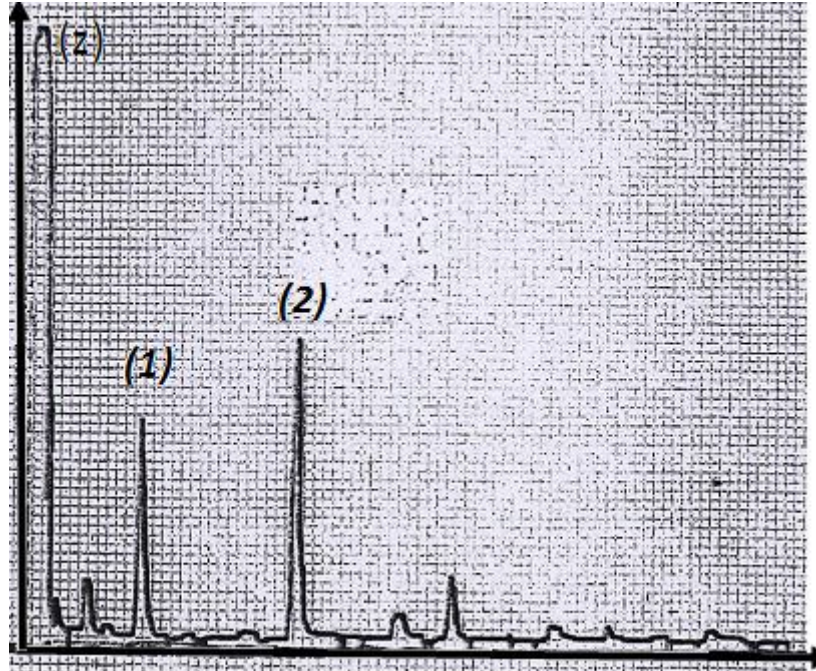
L'écho (2) sur 18 graduations \longrightarrow 36mm (vitesse d'acier) \longrightarrow 20mm (vitesse de règle (étain)).

L'écho (3) sur 27 graduations \longrightarrow 54mm (vitesse d'acier) \longrightarrow 30mm (vitesse de règle (étain)).

Nous constatons une réflexion totale du signal à l'épaisseur 10mm, pas de passage du signal dans le deuxième partie d'épaisseur, par conséquent nous concluons que l'interface a réfléchi totalement le signal.

Résultat : Mauvaise adhérence.

Partie (2):



Paramètres de réglage:

- le gain: 16 dB.
- la gamme: 100mm (2 mm par graduation).

Interprétation:

L'axe de x :

L'écho (1) sur 9 graduations \longrightarrow 18mm (vitesse d'acier) \longrightarrow 10mm (vitesse de régule (étain)).

L'écho (2) sur 22,5 graduations \longrightarrow 45mm > 37mm pour les calculs on utilise la même vitesse.

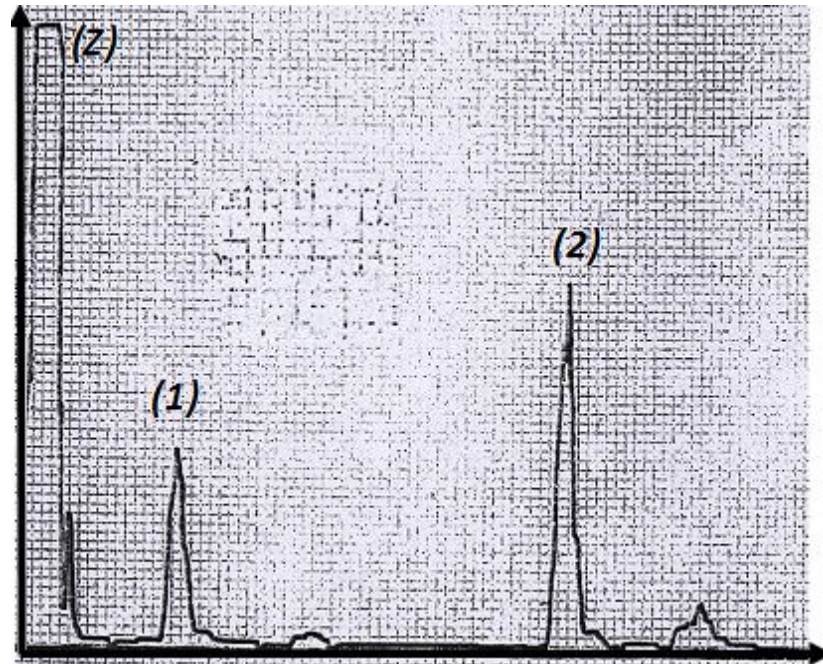
Epaisseur de l'acier \longrightarrow 45-18=27mm.

L'énergie envoyée (z) une partie a été réfléchi à l'épaisseur de régule [écho(1)] et l'énergie restant réfléchi au fond de la pièce [écho(2)].

Il y'a passage d'une partie de l'onde du premier milieu vers le deuxième.

Résultat : Bonne adhérences.

Partie (3):



Paramètres de réglage:

- le gain : 10dB
- la gamme: 50mm (1mm par graduation).

Interprétation:

L'axe de x :

L'écho (1) sur 10 graduations \longrightarrow 10mm (vitesse d'acier) \longrightarrow 5mm (vitesse de régule (étain)).

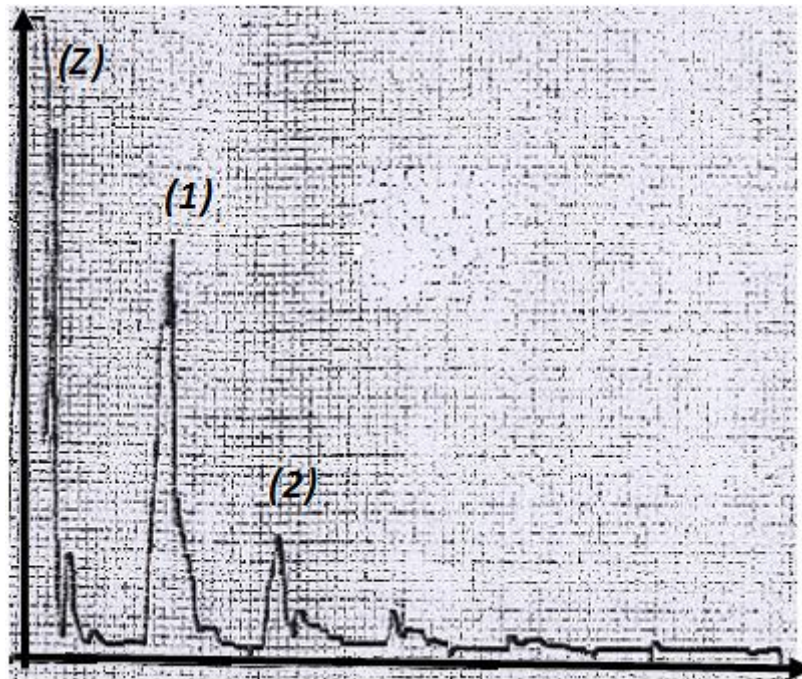
L'écho (2) sur 37 graduations \longrightarrow 37mm car les deux milieux ce calcul par une même vitesse.

Épaisseur de l'acier \longrightarrow $37-10=27$ mm.

L'énergie envoyée (z) une partie a été réfléchié à l'épaisseur de régule [écho(1)] et l'énergie restante est réfléchié au fond de la pièce [écho(2)].

Résultat : Bonne adhérence

Partie (4):



Paramètres de réglage:

- le gain: 10dB
- la gamme : 50mm (1mm par graduation).

Interprétation:

L'axe de x :

L'écho (1) sur 10 graduations → 10mm (vitesse d'acier) → 5mm (vitesse de régule (étain)).

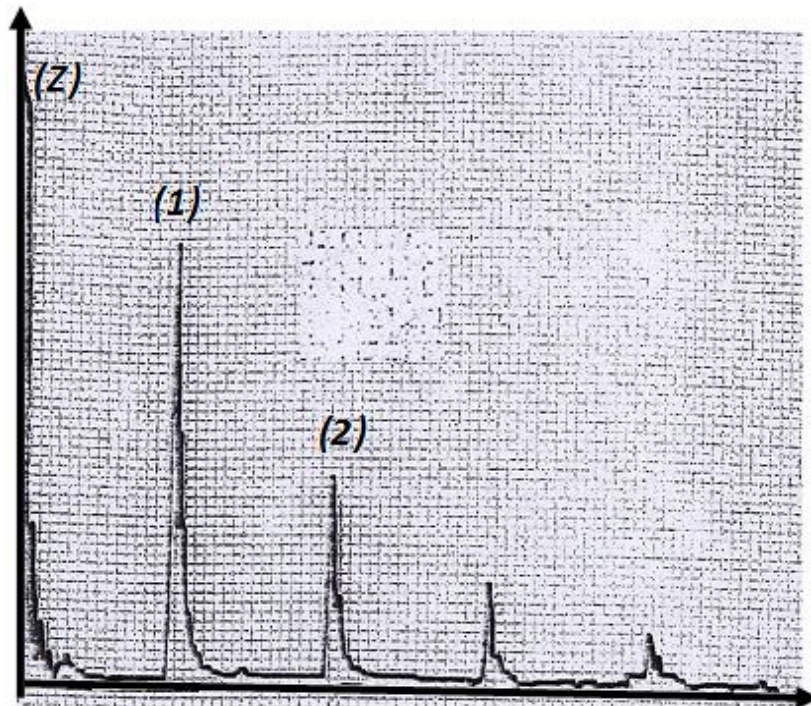
L'écho (2) sur 20 graduations → 20mm (vitesse d'acier) → 10mm (vitesse de régule (étain)).

Nous constatons une réflexion totale du signal à l'épaisseur 5mm, par conséquent nous concluons que l'interface a réfléchi totalement le signal.

Résultat: Mauvaise adhérence

Côte acier

Partie 1A:



Paramètres de réglage:

- le gain : 20 dB
- la gamme : 100mm
- $100\text{mm}/50\text{graduations} = 2\text{ mm par graduation}$

Interprétation:

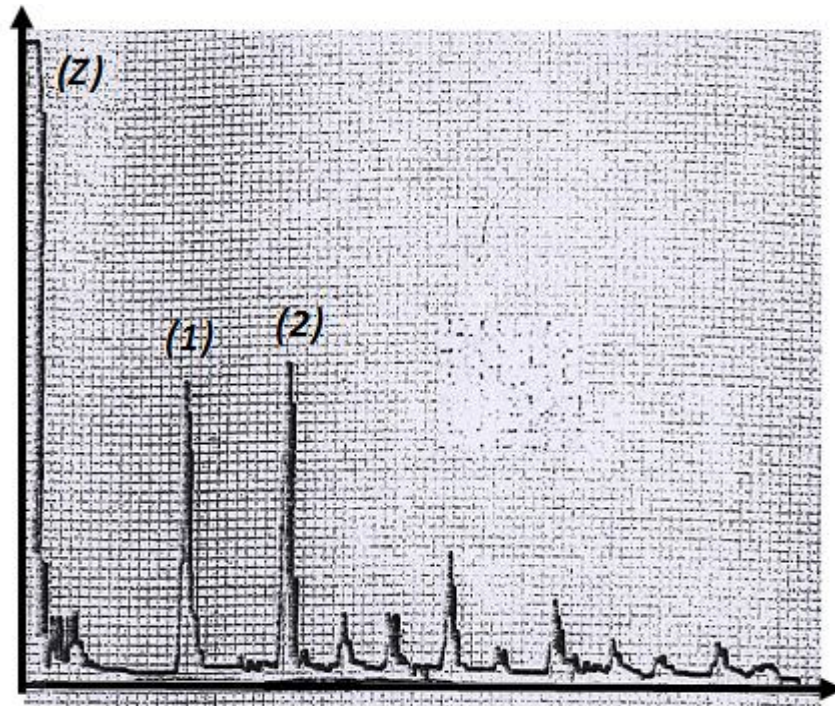
L'écho (1) sur 13.5 graduations \longrightarrow 27mm (vitesse d'acier)

L'écho (2) sur 27 graduations \longrightarrow 54mm (vitesse d'acier)

Nous constatons une réflexion totale du signal à l'épaisseur 27mm, par conséquent nous concluons que l'interface a réfléchi totalement le signal.

Résultat: Mauvaise adhérence.

Partie 2A:



Paramètres de réglage:

- Le gain : 28 dB
- la gamme : 100mm (2 mm par graduation).

Interprétation:

L'axe de x :

L'écho (1) sur 13.5 graduations \longrightarrow 27mm (vitesse d'acier).

L'écho (2) sur 22.5 graduations \longrightarrow 45mm > 37mm car les deux milieux se calculent à la même vitesse.

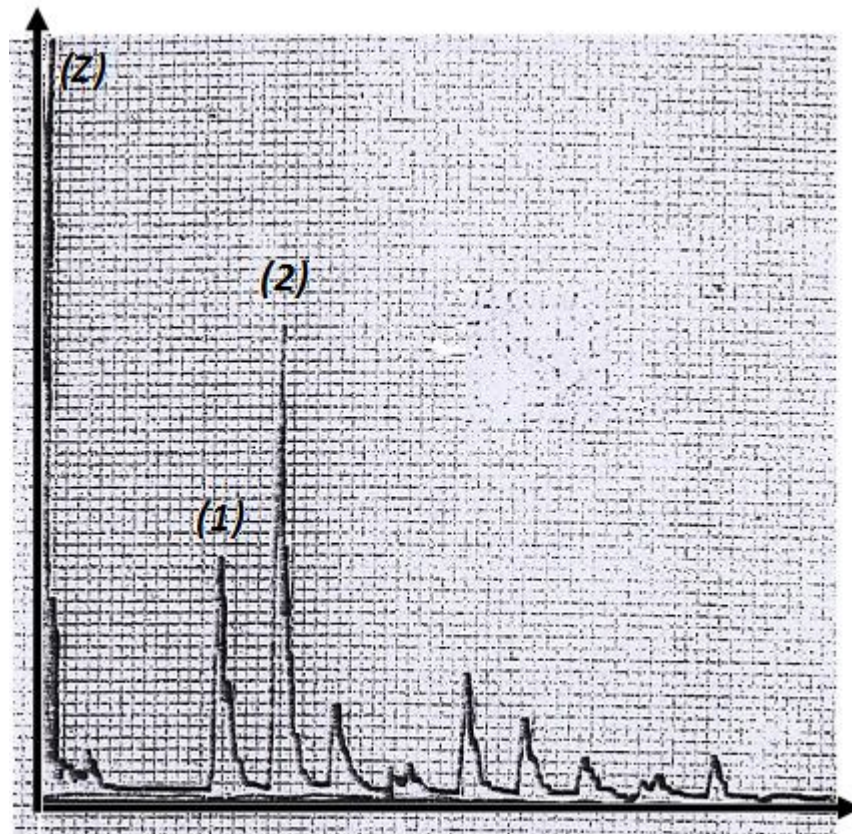
Epaisseur de l'étain \longrightarrow 45-27=18mm (avec vitesse d'acier).

$$\left\{ \begin{array}{l} 18\text{mm} \longrightarrow 5960\text{m/s (vitesse d'acier)} \\ X \longrightarrow 3380\text{m/s (vitesse d'étain)} \end{array} \right. \quad \square \longrightarrow X=10\text{mm}$$

L'énergie envoyée (z) une partie a été réfléchi à l'épaisseur de régule [écho(1)] et l'énergie restante est réfléchi au fond de la pièce [écho(2)].

Résultat: Bonne adhérence

Partie 3A :



Paramètres de réglage:

- le gain : 23dB
- la gamme : 100mm

interprétation:

L'axe de x :

L'écho (1) sur 13.5 graduations \longrightarrow 27mm (vitesse d'acier).

L'écho (2) sur 18 graduations \longrightarrow 36mm > 32mm car les deux milieux se calculent à la même vitesse.

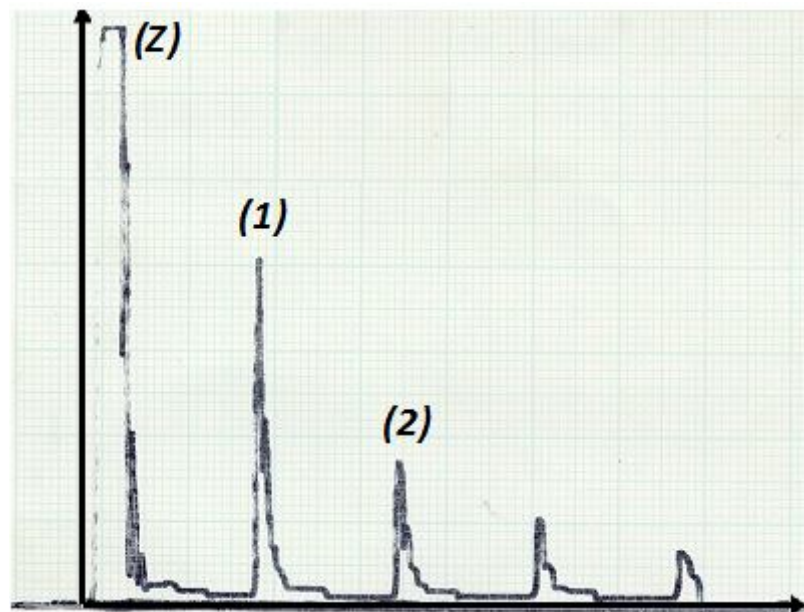
Epaisseur de l'acier \longrightarrow 36-27=9mm (vitesse d'acier).

$$\left. \begin{array}{l} 9\text{mm} \longrightarrow 5960\text{m/s (vitesse d'acier)} \\ X \longrightarrow 3380\text{m/s (vitesse d'étain)} \end{array} \right\} \longrightarrow X=5\text{mm}$$

L'énergie envoyée (z) une partie a été réfléchi à l'épaisseur de régule [écho(1)] et l'énergie restante est réfléchi au fond de la pièce [écho(2)].

Résultat: Bonne adhérence

Partie 4A :



Paramètres de réglage:

- le gain : 23 dB
- la gamme: 100mm

interprétation:

- L'écho (1) sur 13.5 graduations —> 27mm (vitesse d'acier).
- L'écho (2) sur 27 graduations —> 54mm (vitesse d'acier).

Nous constatons une réflexion totale du signal à l'épaisseur 27mm, par conséquent nous concluons que l'interface a réfléchi totalement le signal.

Résultat: Mauvaise adhérence

2.4. Contrôle de Soudure :

Principaux défauts de soudure sont:

DEFAUT VOLIMIQUE:

- Inclusion
- soufflure
- caniveau
- doublages

DEFAUT SURFACIQUE:

- Manque de liaison
- Fissure

Choix de palpeur:

Si la configuration de la pièce et de la soudure est particulière, un choix plus judicieux des palpeurs peut améliorer l'efficacité du contrôle de la soudure.

L'échelle sera plus grande que le parcours au bond complet:

Angle du palpeur	Echelle minimum
70°	6* L'épaisseur
60°	4* L'épaisseur
45°	3* L'épaisseur

Si le contrôle s'effectue de 4cotes de la soudure l'échelle doit être supérieure au demi-bond.

- localisation du défaut (flanc- racine):

- Confirmation de la visibilité par d'autre cotés.
- Nature de l'écho.
- Forme de l'écho.
- Effet sur l'écho si rotation du palpeur autour de l'écho.
- Effet sur l'écho si rotation du palpeur sur lui-même.
- Effet sur l'écho si déplacement transversale du palpeur.

2.4.1. Etalonnage: palpeur d'angle:

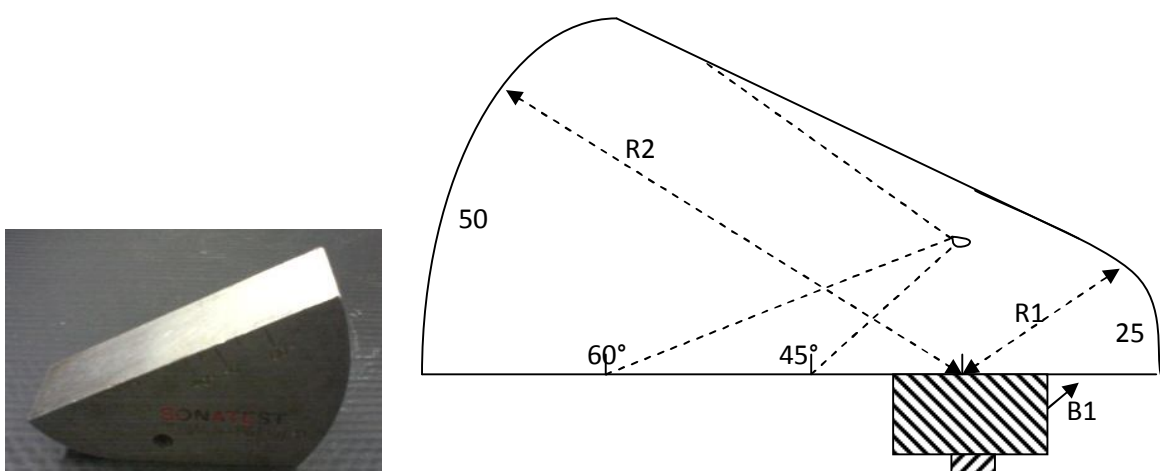


Figure (4. 5): Bloc V II.

Pour étalonner l'appareil on a choisi le palpeur d'angle double de 4MHz rectangulaire d'angle 45°, Et étalon BLOC V2 voir la figure (4.5).

Paramètres de réglage:

Le gain =36D

La gamme =100mm

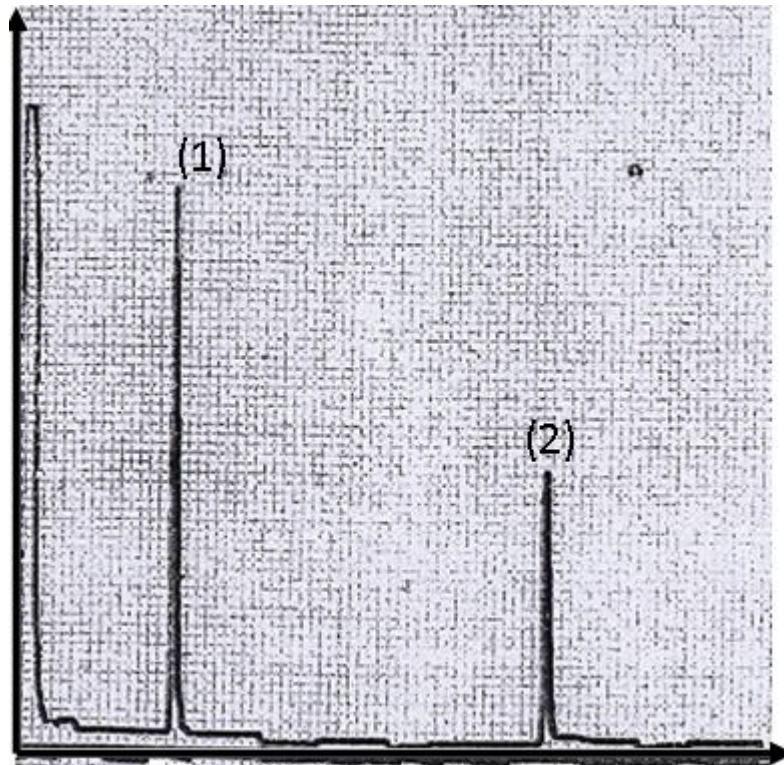
La vitesse de propagation dans l'acier=5960 M/S

interprétation:

- Le premier écho(1) sur 12,5 graduations R1.

- le deuxième écho(2) sur 37,5 graduations R1+R2.

L'amplitude de l'écho(1) est supérieure à l'écho (2) .voir le graphe suivant



Le premier écho(1) est sur le point de 25mm car le parcours du signal (le rayon R1).

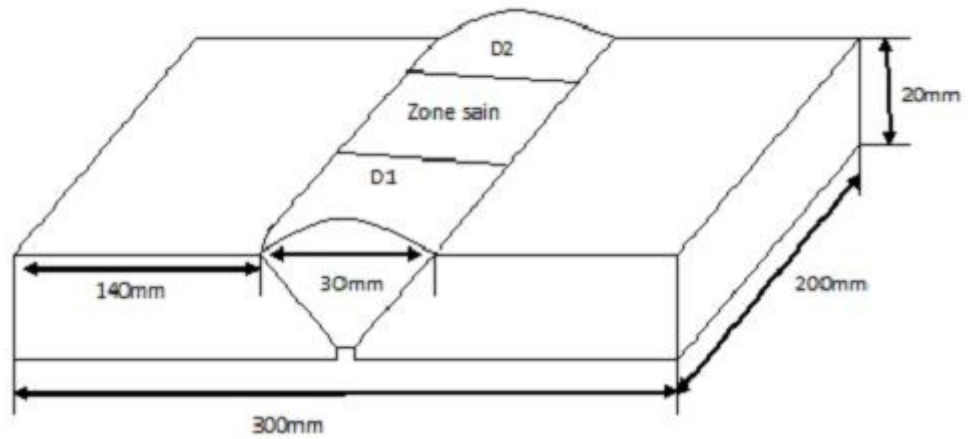
Le deuxième écho(2) est la somme de R1+R2 car physiquement le palpeur d'angle reçoit la réflexion des ondes des rayons de la pièce au même temps.

Résultat: Donc l'appareil est étalonné

2.4.2. controle de la pièce soudé:

Une pièce modèle formé deux tôles soudées en (V), qui contient des défauts connus et non localisés, le but de notre travail et de détecter ces défauts et déterminé leur emplacement.

Pièce schématisé:

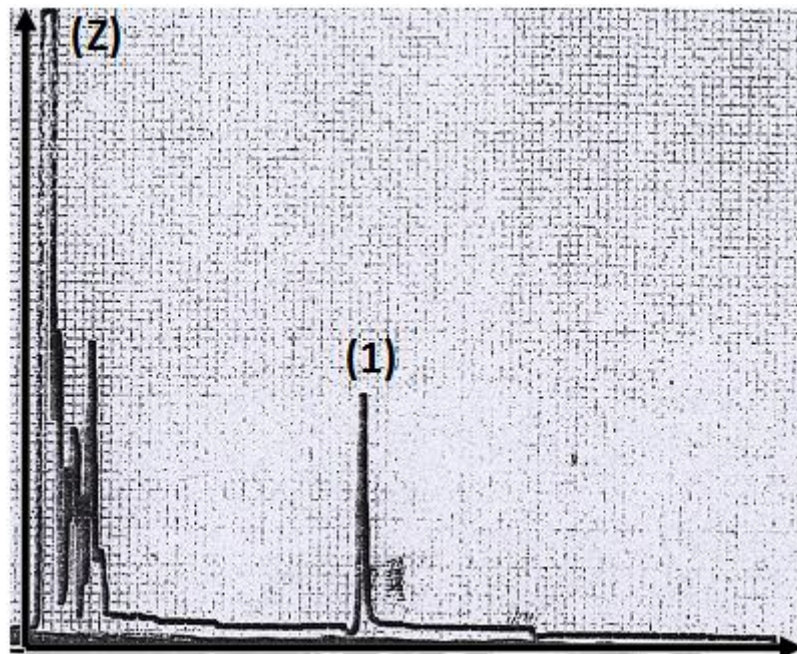


Pièce réel :



Figure (4. 6): La pièce soudée en V.

Partie D1:



Paramètres de réglage:

- le gain : 41dB
- la gamme : 100mm

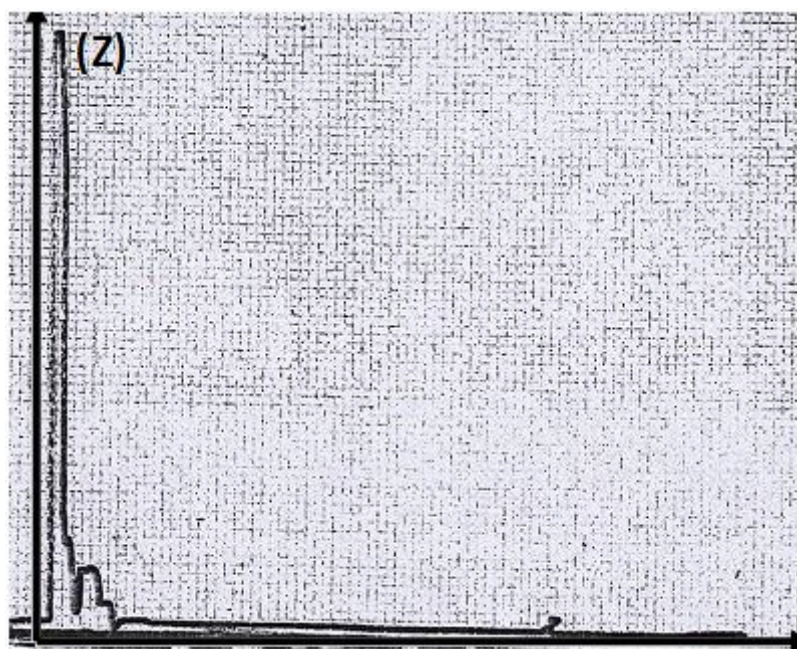
interprétation:

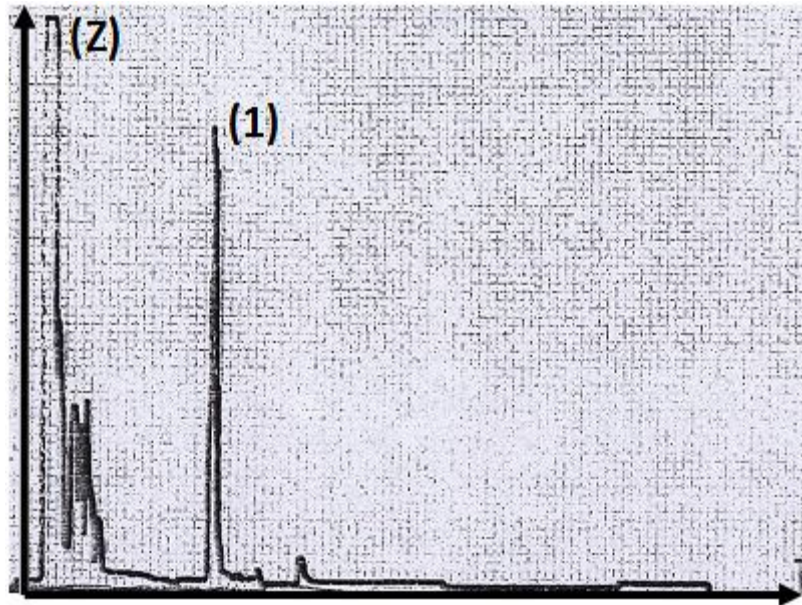
-l'écho obtenu est similaire aux point 1 le seul moyen de différentiation consiste à déterminer la position du défaut.

Résultat: Manque de fusion

Partie zone saine:

Partie D2:





Paramètres de réglage:

- le gain : 41dB
- la gamme : 100mm

interprétation:

- L'écho obtenu est haut à front raide,
- Lors du déplacement du palpeur parallèlement à la soudure, l'écho subsiste,
- Lors du déplacement du palpeur perpendiculairement à la soudure, l'écho subsiste,
- Lorsque l'on fait tourner le palpeur autour du défaut pris comme centre de rotation, l'écho disparaît.

Résultat: Manque de pénétration

3. Contrôle non destructif par ressuage:

Les étapes de ce contrôle sont:

- Nettoyée et séchée la pièce,
- Appliquer le pénétrons sur la pièce (couleur rouge) après certains temps (5-10min) pendant la pénétration,
- Elimination de pénétrons,
- Application de révélateur,
- Examiner visuellement (localisation de défaut).











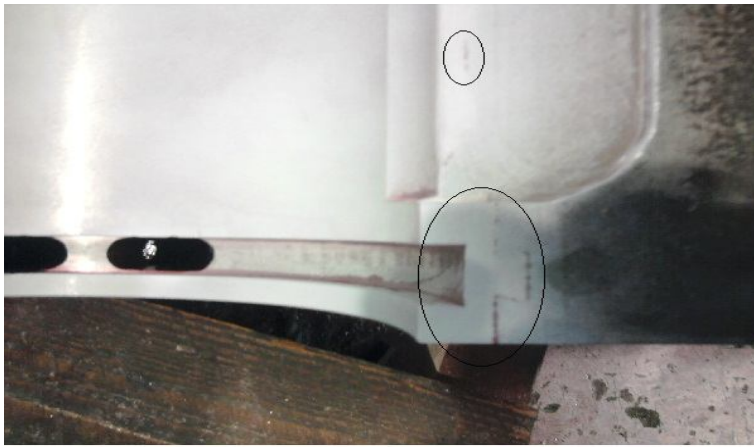
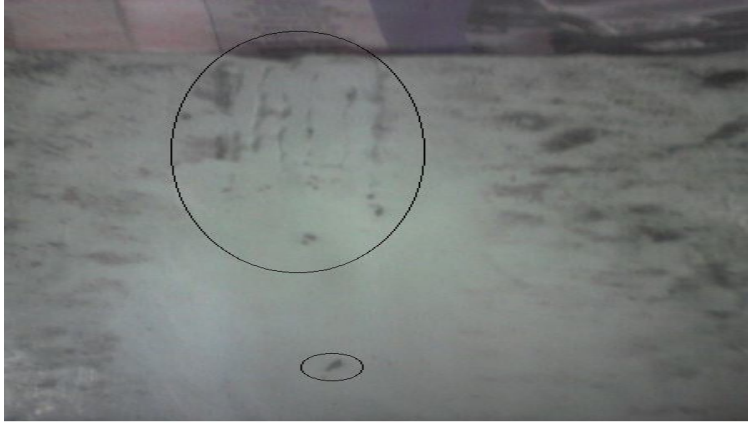
Figure (4. 7):Pénétrant et révélateur.

Les pièces utilisent:

Pièce(1): une pièce modèle formé deux tôles soudées en (V), qui contiens des défauts apprise.

Pièce(2): un demi-coussin (est une pièce maitresse dans les machines tournantes, il sert à soulève et guides l'arbre tournant en assurant un jeu de graissage entre le dernier et l'arbre) rechargé avec régule a base étain.

PIECE(1)	PIECE(2)	ETAPES
		<p>Etape 1: Nettoyage de la surface à tester avec le nettoyant.</p>
		<p>Etape2: Application du pénétrant</p>
		<p>Etape 3: Après un temps de pause, élimination des excès de pénétrant</p>
		<p>Etape 4: Application du révélateur.</p>



Etape 5: Après un temps de pause, l'image des défauts apparaît en Surface.

4. Contrôle non destructif par magnétoscopie:

Les étapes à suivre, pour le contrôle par magnétoscopie sont:

- Nettoyée et séchée bien la pièce,
- Appliquer le fond blanc,
- Application de révélateur (de fer)
- Examiner visuellement (localisation de défaut)



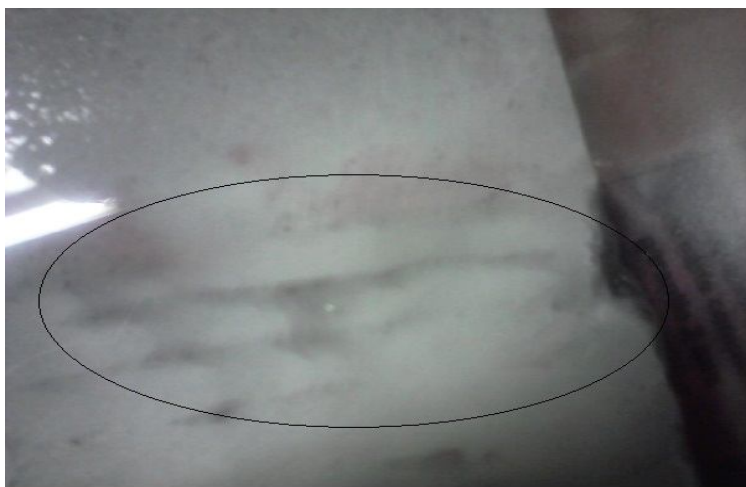
Figure (4. 8): Révélateur pour magnétoscopie et le fond blanc.

Les pièces utilisent:

Pièce(1): une pièce modèle formé deux tôles soudées en (V), qui contiens des défauts apprise.

Pièce(2): vilebrequin est un arbre qui sert à recevoir un mouvement de rotation à base de bielles.

Piece(1)	Piece(2)	Etapes
		<p>Etape 1: Nettoyage de la surface à tester avec le nettoyant.</p>
		<p>Etape 2: Application du fond blanc.</p>
		<p>Etape 3: Application du révélateur.</p>
		<p>Etape 4: Après un temps de pause, Examiner visuellement.</p>



Etape 5: Après un temps de pause, l'image des défauts apparaît en surface.

5. Conclusion:

Plusieurs méthodes caractérisent le contrôle non destructif. Le choix de la méthode dépend de la structure, de la forme de la pièce et de la nature du défaut, car chaque méthode a ses caractéristiques propres.

L'examen magnétoscopique se révèle d'une sensibilité sans égale pour la détection des défauts de surface les plus ténus sur les pièces en acier et autres alliages ferromagnétiques. Le contrôle d'une pièce se déroule pratiquement en un seul temps, correspondant simultanément à la magnétisation, à l'apport du révélateur et à la lecture visuelle.

Le champ d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux.

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion des ondes ultrasonores, cette technique est plus utilisée et efficace et sensible à la détection des défauts, mais par contre comme toutes les méthodes de CND elle consiste des inconvénients les quelles:

- *Utilisation obligatoire d'un couplant (eau, gel) entre le palpeur et la pièce,*
- *Difficulté de mise en œuvre sur faibles épaisseurs,*
- *Mise en œuvre délicate sur matériau à structure métallurgique hétérogène (gros grains, fonte, moulé, centrifugé),*
- *Zone morte ou aveugle en surface de contact du palpeur,*
- *Sensibilité de détection liée à l'orientation du défaut vis à vis de la propagation des ondes acoustiques,*
- *Les opérateurs doivent être qualifiés et très expérimentés.*

Conclusion Générale

Conclusion générale:

En plus de la réalisation de l'objectif principal de ce travail modeste, à savoir la réalisation d'essais expérimentaux pour un contrôle non destructif par ultrasons, et qui constitue en même temps une période très riche sur le plan, de la formation, l'apport personnel, pédagogique et humain de cette expérience qui est sincèrement positif, il nous a permis de découvrir un secteur qui, jusqu'à un passé proche nous est inconnu, ce secteur est celui du contrôle non destructif.

Etant donné les objectifs définis au début de ce mémoire :

La première partie de notre travail a été consacrée à la recherche bibliographique sur les principaux procédés du contrôle non destructif les plus utilisés.

La deuxième partie a été utilisée consacrée à l'étude détaillée du contrôle non destructif par ultrasons.

Dans la troisième partie, une description globale des techniques de contrôle non destructif ultrasonores en milieu industriel.

Quant à la quatrième partie, elle a été résultats consacrée, à la présentation et interprétations des résultats des essais expérimentaux élaborés sur différents pièces cibles au sein de l'entreprise de Maintenance des Equipements Industriels « MEI ».

Analyse des résultats et discussions

*Le **Contrôle Non Destructif (C.N.D)** est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. Ces méthodes sont très utilisées dans : l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs), l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs), l'industrie navale (contrôle des coques), l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.), l'aérospatiale et l'armée*

Dans un contrôle par ultrasons les ondes ultrasonores sont émises au moyen de traducteurs (ou palpeurs) contenant un élément piézoélectrique (quartz par exemple) qui a pour particularité de transformer un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques.

En présence de modifications des caractéristiques du milieu dans lequel elles se propagent, les ondes voient leur propagation perturbée selon les lois de la réflexion - réfraction - absorption : l'onde incidente, lorsqu'elle arrive à une interface entre 2 milieux, transmet une partie de son énergie au second milieu et en réfléchit une partie dans le premier.

Dans le cas particulier de l'air, les lois de la réflexion montrent qu'aucune énergie n'est transmise au second milieu (l'air) ; cette particularité importante est exploitée lorsque l'onde rencontre une fissure ou une inclusion gazeuse.

*C'est également pourquoi on utilise un **produit couplant** (eau, colle de tapissier) sous le palpeur, à son interface avec la pièce à contrôler.*

La méthode la plus usuellement employée est la méthode « par réflexion » qui n'utilise qu'un seul traducteur jouant simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur.

En raison de la forme des assemblages soudés et de l'orientation la plus fréquente des défauts plans (fissures, manques de liaison) qui sont susceptibles d'être rencontrés, le contrôle par ultrasons des soudures est généralement effectué au moyen d'un faisceau d'ondes transversales obliques (palpeurs d'angle).

Le bilan de ce travail est sans équivoque positif, car on pu :

- ✓ Contrôler par ultrasons de l'adhérence entre deux matériaux différents ;*
- ✓ Contrôler par ultrasons des pièces soudées qui présentent des défauts connus mais non localisés (détection de défauts par zones);*
- ✓ Procéder à un contrôle par ressuage sur des pièces soudées et sur une pièce qui sert de guidage pour arbre tournant ;*
- ✓ Procéder à un contrôle par magnétoscopie sur différentes pièces.*

Bibliographie

Bibliographie:

- [1] : Abdelhalim Zaoui , Contribution à la modélisation du CND par matrice de capteurs a courant de Foucault, thèse de doctorat en cotutelle Ecole Militaire Polytechnique et Université de Nantes, année:2008
- [2] : Frija Mounir, module de Contrôle Non Destructif, Institut supérieur des systèmes industriels de gabes.
- [3] : J. DUMONT-FILLON, "Contrôle non destructif (CND) ", techniques de l'ingénieur R1400, 1996, pp.(1-42).
- [4] : M. WANIN , " Evaluation non destructive de la qualité des matériaux partie 1", et partie 2 , techniques de l'ingénieur R4130 et R4132 , 1996, pp.(1-26 et 1-16) .
- [5] : M OST, contrôle par US cours théorique ,VINÇOTTE international Algérie S.P.A member of the AIB-VINÇOTTE Group. Head office : Diamend Building boulevard A Reyers 90 B 1030 Brussels
- [6] : M. LACROIX, " Essais non destructifs ", techniques de l'ingénieur M110 et M111, juillet 1996, pp.(1-21 et 1-17).
- [7] : Document Internet, www.mesures.com/archives/642FICHE%2043.pdf.
- [8] : M. VIENS, " Essais mécanique et contrôle non destructif ", Université du Québec, Ecole de technologie supérieur, 2006
- [9] : Document Internet, <http://www.soudeur.com>
- [10]: Document Internet,<http://www.ndt-ed.org/>
- [11]: Document Internet,<http://www.survitec.fr>
- [12]: Document Internet,<http://www.flir.fr/>