

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N°: ELM 06



DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

BOUDJERADA Moufida

TOUNSI Bilal

Intitulé

Contrôle Non Destructif (CND), «
Approche Expérimentale pour un Contrôle
par Ondes ultrasonores et Radiographique »

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. GHEMARI Zine	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Président
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Examineur
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Rapporteur
Dr. Omar Adib Safer	Université Mohamed Boudiaf-M'sila	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2019/2020

Dédicaces & Remerciements

Dédicaces & Remerciements

Dédicace

Au modèle de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à mes parents.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leur conseils aides et encouragements.

MOUFIDA

تشكرات

أشكر أولاً وأخيراً الله تعالى الذي أسبغ علينا نعمه ظاهرة وباطنة، وأمدني بالصبر لتذلل الصعوبات أمامي وأعانني كل العون على إنجاز هذه المذكرة، ثم أشكر أستاذي الكريمين الدكتور **عبدو عبد الحق** والدكتور **صفار عمر أديب** الذين أشرفا على هذه المذكرة وساعدني خطوة بخطوة لبلوغ نهايتها. أحب أن أشكر أمي العزيزة وزوجتي وجميع أفراد العائلة على مساندي طوال الوقت. كما لا يفوتني أن أشكر كل من ساهم وبذل جهداً ولو بالقليل في إنجاز هذه المذكرة وأخص بالذكر دوغة أسامة، زموري فريد، عبد الحكيم سنوسي، ميزي عبد الرزاق كما أشكر الأساتذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول المناقشة. وفي الأخير أود أن أهدي هذا العمل المتواضع لجميع أفراد العائلة وجميع الأصدقاء وبالخصوص أولادي الأعزاء **مارية، براء، ومحمد**

بلال تونسي

Remerciements

Avant tous, Nous remercions ALLAH LE TOUT PUISSANT de nous avoir aidé et éclairé notre chemin. Nous tenons à remercier infiniment nos parents et nos frères et sœurs ainsi que toute ma famille qui nous ont encouragés et aidés pour terminer ce projet de notre formation.

On profite aussi de cette occasion pour adresser nos sincères remerciements aux **Dr. ABDOU Abdelhak** et **Dr SAFER Omar Adib** qui nous ont fait bénéficier de leurs expériences, compétences et conseils, soulignant ainsi l'intérêt constant qu'ils ont portés à nos travaux. On les remercie pour leurs confiances qu'ils nous ont témoignées, et leurs patiences, disponibilités et dévouement durant l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons également à adresser nos remerciements au **Dr. GHEMARI Zine**, Professeur à l'Université de M'sila pour avoir accepté de siéger et présidé le jury de notre mémoire. Nous remercions très vivement le **Dr. BELKHIRI Salah**, Maître de conférences à l'Université de M'sila . pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Notre pensée va aussi à toutes les personnes que nous avons rencontrées durant ces derniers mois, pour leur sympathie et leur aide. On tient à remercier tous les enseignants qui ont accepté de juger ce travail. On tient à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ainsi que toute la promotion **ÉLECTROMECHANIQUE 2019/2020**.

Nous tenons à remercier vivement l'ensemble du personnel administratif et technique des entreprises MEI (M'sila) et ALPHAPIPE (GHARDAIA) pour l'aide, l'assistance et l'environnement favorable de travail qu'ils ont créés pour nous faire bénéficier de leurs expériences et de nous avoir permis de réaliser les essais expérimentaux pour le contrôle non destructif par ultrasons et radiographique.

Table des Matières, Figures et Tableaux

Table des Matières

Dédicaces & Remerciements.....	i
Table des Matières.....	iv
Table des Figures.....	vii
Table des Tableaux.....	ix
Listes des Symboles.....	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre I. Généralité sur les Techniques de CND.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition et l'intérêt du contrôle non destructif (CND).....	3
I.3 Principe du contrôle.....	4
I.4 But de Contrôle Non Destructif.....	4
I.4.1 Rapidité d'exécution.....	5
I.4.2 Coût.....	5
I.4.3 Reproductibilité.....	5
I.4.4 Fiabilité.....	5
I.4.5 Sensibilité.....	5
I.4.6 Résolution.....	5
I.5 Principes de détection des défauts.....	5
I.5.1 Défauts internes.....	5
I.5.2 Défauts de surface.....	6
I.5.3 Caractéristiques des défauts.....	6
I.6 Procédure du CND.....	6
I.7 Champ d'application actuel.....	7
I.8 Différentes techniques de CND.....	7
I.8.1 Examen visuel.....	8
I.8.2 Ressuage.....	8
I.8.3 Radiographie.....	9
I.8.4 Ultrasons (US).....	9
I.8.5 Magnétoscopie.....	10
I.8.6 Thermographie.....	10
I.8.7 Contrôle par courants de Foucault.....	11
I.9 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND.....	11
I.10 Conclusion.....	13
Chapitre II. Apport Sur les Méthodes Ultrasonores	
Pour l'Inspection des Matériaux.....	14
II.1 Introduction.....	14
II.2 Contrôle par Ultrason (US).....	14
II.2.1 Nature des ultrasons.....	15
II.2.2 Principe de l'ultrason.....	15
II.3 Production des ultrasons de fréquence élevées.....	16
II.3.1 Principe de la piézoélectricité.....	16
II.3.2 Substances piézoélectriques.....	16

II.4	Propriétés des ultrasons.....	17
II.4.1	Onde ultrasonore.....	17
II.4.2	Pression et l'impédance acoustique.....	18
II.4.3	Propagation de l'onde ultrasonore.....	18
II.5	Transmission entre milieux.....	21
II.5.1	Incidence normale.....	21
II.5.2	Incidence oblique.....	22
II.6	Faisceau ultrasonore (acoustique).....	23
II.6.1	Champ proche (ou zone de Fresnel).....	24
II.6.2	Champ éloigné.....	24
II.7	Atténuation des ultrasons.....	24
II.7.1	La divergence.....	25
II.7.2	L'absorption.....	25
II.8	Contrôle par ultrasons.....	25
II.8.1	Émission et réception des ultrasons.....	25
II.8.2	Technologie des palpeurs.....	27
II.8.3	Types de palpeur.....	27
II.8.4	Choix du palpeur.....	29
II.9	Méthodes de contrôle.....	29
II.9.1	Méthodes par réflexion ou par écho.....	29
II.9.2	Méthode par transmission.....	30
II.9.3	Méthode par émergence.....	30
II.10	Conditions du contrôle.....	31
II.10.1	Informations requises avant l'examen.....	31
II.10.2	Le niveau d'examen.....	31
II.10.3	Conditions à remplir par le personnel, l'appareillage et les.....	32
	Traducteurs.....	32
II.11	Vérification des appareillages.....	32
II.11.1	Choix du milieu de couplage.....	32
II.11.2	Étalonnage et bloc d'étalonnage.....	33
II.11.3	Bloc de référence.....	34
II.11.4	Principe de trace d'une Courbe Amplitude-Distance (CAD).....	34
II.11.5	Paramètres à régler avant l'examen.....	35
II.11.6	Évaluation des indications.....	35
II.11.7	Détection des défauts internes.....	35
II.11.8	Localisation des défauts en profondeur.....	36
II.11.9	Dimensionnement des défauts.....	36
II.12	Avantages et Inconvénients de l'ultrason.....	37
II.13	Conclusion.....	37
Chapitre III. Approche expérimentale de Contrôle par		
ondes ultrasonores.....		38
III.1	Introduction.....	38
III.2	Cadre de contrôle.....	39
III.2.1	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	39
III.2.2	Création du défaut.....	40
III.3	Préparation du contrôle.....	43
III.3.1	Choix de la méthode d'évaluation.....	43
III.3.2	Méthode de cascade.....	45
III.4	Étalonnage de l'appareillage.....	47
III.4.1	Matériel utilisé.....	47

III.4.2	L'étalonnage de la base du temps :	48
III.4.3	Vérification du pouvoir de résolution :	49
III.4.4	Vérification de la linéarité horizontale et verticale.....	50
III.4.5	Paramètres de réglage et d'étalonnage d'un appareil à ultrasons	51
III.4.6	Traçage de la courbe amplitude distance (CAD).....	55
III.4.7	Correction du transfert	56
III.5	Détection de défauts dans le bloc étalon	57
III.6	Exécution du contrôle.....	57
III.7	Première expérience	58
III.7.1	Description de l'expérience	58
III.7.2	Localisation du défaut.....	64
III.8	Deuxième expérience	65
III.8.1	Dimension de pièce soudée.....	65
III.8.2	Création des défauts.....	66
III.8.3	Matériel utilisé	67
III.8.4	Exécution du contrôle	68
III.9	Conclusion.....	73
Chapitre IV. Approche expérimentale pour un		
Contrôle Radiographique		73
IV.1	Introduction	73
IV.2	Approche théorique du contrôle radiographique.....	73
IV.2.1	Définition	73
IV.2.2	But du contrôle radiographique	73
IV.2.3	Principe de la radiographie	73
IV.2.4	Sources de rayonnements.....	74
IV.2.5	Films radiographiques.....	75
IV.2.6	Equipements du contrôle radiographique	76
IV.2.7	Domaine d'application.....	76
IV.2.8	Avantages et Inconvénients de Radiographie.....	77
IV.3	Analyse expérimentale pour un du contrôle radiographique de joint soudé sur deux plaques en acier	77
IV.3.1	Cadre du contrôle radiographique appliqué sur plaques en Acier	77
IV.3.2	Description de la cabine de rayonnement	80
IV.3.3	Description de la Méthode de contrôle par radiographie (RX).....	81
IV.3.4	Dimensionnement d'un défaut par radiographie	83
IV.3.5	Description du Logiciel de traitement d'image (X YXLON image 500)	83
IV.3.6	Types d'images lors du travail avec le système Image.....	83
IV.3.7	Visualisation et enregistrement de l'image radiographique	84
IV.4	Conclusion.....	86
Conclusion générale		88
Annexes		90
Annexe 1 : propriétés des ultrasons.....		90
Annexe 2 : blocs d'étalonnage et de références.....		92
Annexe 3 : Composition chimiques des deux plaques.....		94
Annexe 4 : Spécifications techniques du tube en spirale :.....		96
Références Bibliographiques		98

Table des Figures

Figure I. 1 Principe du contrôle non destructif.....	4
Figure I. 2 Principe de contrôle visuel.....	8
Figure I. 3 Les quatre étapes de principe de la méthode de ressuage.....	9
Figure I. 4 Principe de la Radiographie.....	9
Figure I. 5 Principe du contrôle par ultrasons.....	9
Figure I. 6 Principe de contrôle par magnétoscopie.....	10
Figure I. 7 Inspection par thermographie.....	10
Figure I. 8 Principe du CND par courants de Foucault.....	11
<hr/>	
Figure II. 1 Nature des ultrasons.....	15
Figure II. 2 Transducteur au-dessous d'une zone saine.....	16
Figure II. 3 Principe de CND par Ultrason.....	16
Figure II. 4 Onde ultrasonore.....	17
Figure II. 5 Propagation d'une onde longitudinale.....	19
Figure II. 6 Propagation d'une onde transversale.....	19
Figure II. 7 Propagation d'une onde de surface.....	20
Figure II. 8 Propagation d'une onde de plaque symétrique.....	21
Figure II. 9 Propagation d'une onde de plaque antisymétrique.....	21
Figure II. 10 Incidence normal.....	22
Figure II. 11 Incidence oblique.....	23
Figure II. 12 Zones du faisceau acoustique.....	24
Figure II. 13 Chaines de mesure de contrôle par ultrason.....	26
Figure II. 14 Elément des palpeurs.....	27
Figure II. 15 Palpeur droit.....	28
Figure II. 16 Palpeur par angle.....	29
Figure II. 17 Méthode de contrôle par réflexion.....	30
Figure II. 18 Méthode de contrôle par émerision.....	31
Figure II. 19 Volume à contrôler.....	35
<hr/>	
Figure III. 1 Pièce en aluminium.....	38
Figure III. 2 Pièce en acier.....	39
Figure III. 3 Création des défauts sur la plaque d'aluminium.....	40
Figure III. 4 Mise en plan échantillon aluminium.....	41
Figure III. 5 Création des défauts sur la plaque acier.....	41
Figure III. 6 Mise en plan échantillon acier.....	42
Figure III. 7 Matériel utilisé.....	48
Figure III. 8 Echo de fond et répétitif.....	49
Figure III. 9 Vérification du pouvoir de résolution.....	49
Figure III. 10 Résolution obtenue par un palpeur droit.....	50
Figure III. 11 Vérification de la linéarité horizontale.....	50
Figure III. 12 Vérification de la linéarité verticale.....	51
Figure III. 13 Types des cales étalons.....	51
Figure III. 14 Détermination de la zone morte.....	52
Figure III. 15 Détermination de la zone morte de notre palpeur.....	53
Figure III. 16 Détermination du point d'émergence.....	53

Figure III. 17	Position de point d'émergence.....	53
Figure III. 18	Echo détermination de point d'émergence	54
Figure III. 19	Détermination de l'angle de réfraction.	54
Figure III. 20	Traçages de la CAD.	55
Figure III. 21	Zoom de la courbe de traçage de la CAD.	55
Figure III. 22	Contrôle de fissuration en peau, technique en opposition.....	56
Figure III. 23	Recherche d'un trou de diamètre 50mm sur la cale.....	57
Figure III. 24	Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale.	57
Figure III. 25	Pièce aluminium saine.....	58
Figure III. 26	Recherche du premier défaut.	59
Figure III. 27	Recherche du deuxième défaut.	59
Figure III. 28	Recherche de premier défaut.....	60
Figure III. 29	Recherche du deuxième défaut.	60
Figure III. 30	Pièce acier saine.	61
Figure III. 31	Recherche de premier défaut.....	61
Figure III. 32	Recherche du deuxième défaut.	62
Figure III. 33	Recherche du troisième défaut.	62
Figure III. 34	Recherche de premier défaut.....	63
Figure III. 35	Recherche de deuxième défaut.....	63
Figure III. 36	Recherche du troisième défaut.	64
Figure III. 37	Plaque en acier assemble par soudage.	66
Figure III. 38	Création des défauts sur la plaque acier.....	66
Figure III. 39	Appareil d'US d'USM 35.	67
Figure III. 40	Différents palpeurs d'utilisés.	67
Figure III. 41	Bloc étalonnage.....	68
Figure III. 42	Étalonnage de l'appareil à ultrasons par palpeur droit.....	68
Figure III. 43	Echos reçus de l'échantillon d'acier.	69
Figure III. 44	Étalonnage de l'appareil à ultrasons par palpeur angle.....	69
Figure III. 45	Zone de balayage.....	70
Figure III. 46	Balayage par palpeur droit.	70
Figure III. 47	Image d'un test sans défaut.	71
Figure III. 48	Recherche du premier défaut.	71
Figure III. 49	Recherche du deuxième défaut.	72

Figure IV. 1	Schéma de principe.....	74
Figure IV. 2	Tube à rayons X.....	75
Figure IV. 3	Structure d'un film.....	76
Figure IV. 4	Plaque acier assemblage bout à bout sans défaut.....	78
Figure IV. 5	Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier.	78
Figure IV. 6	Tube à rayons X (radio gène).....	79
Figure IV. 7	Station d'acquisition d'image.	80
Figure IV. 8	Cabine de rayonnement.....	80
Figure IV. 9	Générateur de la radiographique.....	81
Figure IV. 10	Technique à simple parois.	82

Figure annexe. 1	Bloc étalonnage V1.....	92
Figure annexe. 2	Bloc étalonnage V2.....	93
Figure annexe. 3	Composition chimique de la pièce acier.....	94
Figure annexe. 4	Composition chimique de la pièce aluminium.	95

Table des Tableaux

Tableau I. 1 Caractéristiques des différentes techniques de CND.	12
Tableau II. 1 Coefficient d'atténuation à 2MHz (ondes longitudinales) de quelques milieux.	25
Tableau III. 1 Valeur de : vitesse de propagation, épaisseur d'échantillon, position du défaut et de Transducteurs trouvés.	65
Tableau III. 2 Dimensions des pièces soudées.	65
Tableau annexe. 1 Propriétés acoustiques et constantes physiques des éléments	91

Organigramme

Organigramme III. 1 Choix de la méthode d'évaluation.....	44
Organigramme III. 2 Synoptique de la procédure cascade.....	46

Listes des Symboles

U	Elongation instantané (dB).
A	Elongation maximal (dB).
t	Temps[s].
λ	Longueur de l'onde [mm].
ω	Pulsation de mouvement [rad/s].
C	Vitesse de propagation de l'onde [m/s].
T	Période de l'onde [s].
f	Fréquence d'oscillation [Hz].
Z	Impédance acoustique [kg/m ² .s].
ρ	Masse volumique [kg/m ³].
C	Célérité du son [m/s].
ξ	Déplacement des particules[m].
ω	Pulsation cyclique [rad/s].
P	Pression [Pa].
E	Module d'Young [Pa]
ν	Coefficient de poisson [sans unité].
μ	Module de cisaillement [Pa].
V	La vitesse de propagation des ultrasons dans le milieu considéré[m/s].
VL	La vitesse des ondes longitudinales [m/s].
V_T	La vitesse des ondes transversales [m/s].
V_R	La vitesse des ondes de Rayleigh[m/s].
VS	La vitesse de l'onde de surface [m/s].
V_p	La vitesse de propagation de l'onde de plaque [m/s].
E	L'épaisseur de la plaque[mm].
C	La vitesse de son dans ce milieu [m/s].
α_i	Angle d'incidence dans le milieu 1 (en degré °).
α_{2L}	Angle de réfraction de l'onde longitudinale dans le milieu 2 (en degré °).
α_{2T}	Angle de réfraction de l'onde transversale dans le milieu 2 (en degré °).
V_{2L}	Vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans le milieu 2 [m/s].

V_{2T}	Vitesse de propagation de l'onde transversale dans le milieu 2 [m/s].
D	Diamètre du cristal piézoélectrique [mm].
K	Constante dépend de la géométrie de la source.
α	Demi-angle du cône (en degré °).
PE	Le point d'émergence.
Γ	L'angle d'étalement ou de divergence du faisceau(en degré °).
T	Le coefficient de transmission.
α	Le coefficient d'atténuation des ondes ultrasonore.
P	Le parcours ultrasonore mesurée sur l'écran[mm].
U	Energie à la distance (en joule).
U0	Energie initiale émise X (en joule).
d	La distance entre le défaut et le palpeur [mm].
h	La profondeur à laquelle se trouve le défaut [mm].
θ	L'angle de réfraction du faisceau ultrasonore (en degré °).
H	L'amplitude de l'écho[mm].
Hmax	L'amplitude maximale de l'écho affiché sur écran[mm].

Acronymes

CND	Contrôle non destructif
CND-US	Contrôle non destructif par ultrasons
CND-CF	Contrôle non destructif par courants de Foucault
RX	Rayon X.
ZM	Zone morte.
CAD	Courbe amplitude distance.
US	Ultrason.
DAC	Correction amplitude distance.
OT	Onde transversale
OL	Onde longitudinale

Introduction Générale

Introduction Générale

Le contrôle non destructif (CND) 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. On peut les classer selon les phénomènes physiques mis en jeu: acoustiques (ultrasons, émission acoustique), rayonnements (visuel, radiographie X, γ , tomographie, neutronographie, thermographie infrarouge), flux de matière (ressuage, étanchéité), champs électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault).

Le champ d'application des techniques de Contrôle Non Destructif (CND) continue de s'élargir vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue en rapprochant ce domaine de celui de l'instrumentation ; il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le caractériser et le dimensionner. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou des irrégularités de propriétés telles que des variations de microstructure dans un métal, [1]

Le contrôle par ultrasons permet d'une part d'avoir une grande sensibilité de contrôle principalement pour les défauts internes, d'où un pouvoir de pénétration important, et d'autre part le résultat de contrôle en temps réel. Lors du contrôle ultrasonore, on doit résoudre différents problèmes tels que : La détection des défauts, la localisation des défauts, l'identification du type du défaut, le dimensionnement des défauts, la décision d'acceptation ou de refus du défaut.[2]

La technique du contrôle par ultrasons est utilisée l'une pour détecter et localiser les défauts internes éventuels de plus petites dimensions, son principe repose sur la propagation des ondes ultrasonores dans le matériau

Le contrôle par Ultrasons consiste à émettre, au travers de la pièce à contrôler et à partir de sa surface, un faisceau ultrasonore qui sera partiellement ou totalement réfléchi par toute discontinuité à cœur ou en surface opposée à la surface balayée.

L'analyse du faisceau réfléchi ou transmis permet de localiser et d'estimer la forme et la dimension des défauts. Les défauts dont la surface est sensiblement perpendiculaire à l'axe du faisceau seront plus facilement détectés. Le faisceau est émis par un palpeur. Le signal réfléchi est recueilli par le même palpeur (émetteur-récepteur) ou par un autre palpeur.

Cette méthode est utilisée dans l'ensemble des secteurs industriels, surtout pour contrôler des pièces à coût de production élevé, ou des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (pétrochimie, nucléaire, canalisation de gaz, l'aéronautique, ... etc.)[3]

L'objectif principal visé par ce mémoire en plus de la recherche bibliographique sur les techniques de CND en générale et plus particulièrement sur celles basées les ondes ultra

sonores et par radiographie, c'est de procéder expérimentalement au contrôle non destructif par ultrasons et radiographie. Le CND ultrasonores se fera sur des pièces en aluminium et acier pour différents défauts internes et pour un assemblage de pièces en acier soudées, d'une part, et d'autre part une autre expérimentale au contrôle non destructif par la radiographie (RX) sur une plaque en acier assemblée par soudage

La partie expérimentale des pièces en aluminium et acier est réalisée au niveau des ateliers MEI – M'sila, contenant des défauts de trou et l'autre partie pour la pièce assemblée par soudage est réalisée au niveau de la société ALPHAPIPE (GHARDAIA) est fait sur un cordon de soudure bout à bout pour l'assemblage des tôles en acier A33, réalisé à l'arc électrique avec baguette métallique de même composition. Est contrôlée par ultrason et radiographie contenant des défauts de soudage.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- ✓ Une introduction générale qui précisera le cadre et le but de travail.*
- ✓ Au premier chapitre on présentera des généralités sur les techniques de contrôle non destructif (CND) leurs principes, les types de défauts recherchés, la nature du matériau à contrôler ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque technique.*
- ✓ Le deuxième chapitre traitera de la théorie des ultrasons et les bases physiques de contrôle par ultrasons et le comportement des ondes ultrasonores aux interfaces, ainsi de la génération des ultrasons et les différents types de palpeurs usuels. Ce chapitre mettra en considération les méthodes de contrôle par ultrasons, et les différentes techniques de mise en œuvre dans le contrôle ainsi que les différents modes de propagation.*
- ✓ Le troisième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale, il traitera de la recherche et dimensionnement des défauts dans les pièces métalliques. Les mesures seront réalisées sur une cale étalon et deux plaques métalliques éprouvettes en acier et en aluminium contenant des défauts de trou.*
- ✓ Quant au quatrième chapitre il aura pour objectif essentiel de faire une étude expérimentale pour un contrôle non destructif par radiographie (RX) d'une plaque en acier pour rechercher les défauts internes qui peuvent exister dans le cordon de soudure.*
- ✓ Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués.*

Chapitre I :

Généralité sur les Techniques de CND

Chapitre I. Généralité sur les Techniques de CND

I.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industriel pétrolière, nucléaire et automobile, car on vu la gravité des conséquences d'une rupture d'une tige en cours de forage ou d'un tube de cuvelage ou de production. Comme son nom indique CND pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'intégrité des produits contrôlés. Cette définition est assez large. Pour être plus précis que le CND concerne exclusivement la santé de la matière, en effet les techniques du CND sont utilisées en contrôle de qualité pour assurer de la qualité d'une production, puis de garantir la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués. Elles sont également très appréciées en maintenance.

Elles permettent de vérifier la continuité de la matière donc de déceler le manque de matière, les fissures, etc, [4].

L'évaluation non destructive permet de déterminer les propriétés physiques et géométriques d'une pièce. Parmi les méthodes utilisées dans le CND on distingue l'examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons, la radiographie et les courants de Foucault, [5].

Dans ce premier chapitre, on présentera des généralités concernant le CND, la définition, le but et le principe du contrôle non destructif ; Les domaines d'application actuelle, ensuite nous aborderons en revue avec plus de détail les différentes techniques de CND, principe physique, champs d'application, avantages et inconvénients du CND.

I.2 Définition et l'intérêt du contrôle non destructif (CND)

CND est un ensemble des méthodes qui permet 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 défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer qu'elle taille de défaut est acceptable de façon empirique à la casse (destruction) ensuite pouvoir les détecter sans détruire la pièce.

Nous parlons aussi d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs (END), ce qu'évoquent plutôt les examens en laboratoire que la qualité industrielle.

En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé de produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et plus généralement la conformité d'un produit à l'usage qu'il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce, [6].

I.3 Principe du contrôle

Le but principal du CND est de déterminer la qualité ou l'état de la soudure avec l'intention de l'accepter ou de la rejeter en fonction de normes ou cahiers des charges. Les principaux défauts que les CND doivent détecter appartiennent à l'une des classes suivantes :

- ✓ Défauts d'étanchéité.
- ✓ Défauts de continuité.
- ✓ Défauts de résistance mécanique.

Dans tout CND nous pouvons détecter les cinq étapes suivantes :

- La mise en œuvre d'un processus physique.
- L'altération de ce processus par le défaut.
- La révélation de cette variation par un détecteur approprié.
- Un émetteur de flux.
- Un récepteur ou détecteur,[7].

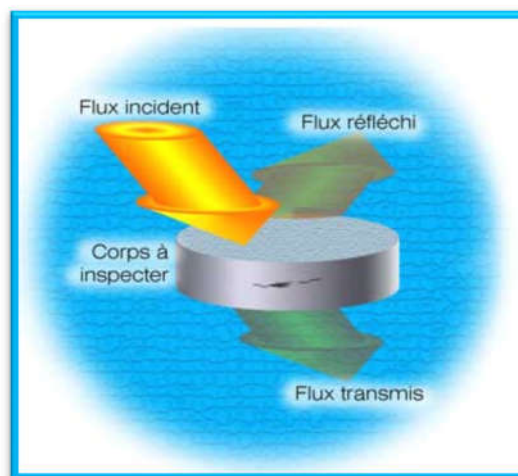


Figure I. 1 Principe du contrôle non destructif.

I.4 But de Contrôle Non Destructif

Le CND a pour objectif comme son nom l'indique de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce et le deuxième cas, il s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

I.4.1 Rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

I.4.2 Coût

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

I.4.3 Reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

I.4.4 Fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tout

Les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

I.4.5 Sensibilité

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurant. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurant sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

I.4.6 Résolution

La résolution : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution. Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis, [8].

I.5 Principes de détection des défauts

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative. Évoque bien le rôle qui joue le CND dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, nous avons l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et, les défauts internes,[9].

I.5.1 Défauts internes

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de

pièce moulée, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions.

Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office nous utiliserons l'un ou l'autre des grands procédés du CND.

I.5.2 Défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes Défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis- qu'il s'agit des criques, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).

Défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètre géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses).

Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques, [9].

I.5.3 Caractéristiques des défauts

Un nombre quelconque de défauts peut être positionné dans tout le volume d'une pièce quelconque (géométrie complexe ou canonique, homogène ou hétérogène). Ces défauts sont de différents types Réflecteurs étalons : trou génératrice, trou à fond plat et trou à fond hémisphérique, sphère ;

- Défauts plans, de taille et d'orientation quelconque ;
- Défauts multi-facettes et défauts à contour ;
- Inclusions (de forme cylindrique ou elliptique) : défauts constitués d'un matériau solide, [6].
-

I.6 Procédure du CND

L'opération du CND d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé de la méthode est du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen, [10]

I.7 Champ d'application actuel

Le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures. A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique. Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup, nous recherchons les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des métaux (fissure de fatigue), aussi des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire). Nous pouvons par ailleurs considérer que le CND d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'applications conduisant à trois types d'application se différenciant à la fois par le contexte industriel et par la nature du contrôle lui-même :

➤ **Le contrôle en cours de fabrication** : Les essais non destructifs au cours de la fabrication apparaissent de plus en plus comme un moyen d'économiser de l'argent, dans la mesure où ils permettent de rejeter les pièces défectueuses avant leur achèvement, plutôt que de contrôler les pièces une fois fabriquées. C'est un procédé souvent automatisé, impliquant alors un appareillage installé en ligne de fabrication, aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

➤ **Le contrôle en recette** : Procède de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant, d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison. A ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi bien souvent d'en définir la nature et les dimensions.

➤ **Le contrôle en service** : En maintenance prédictive, le CND permet également de réaliser des économies considérables en évitant le remplacement de pièces non défectueuses (ce qui est parfois le cas quand la durée de vie est estimée) et les interruptions imprévues d'activités pour réparation, toujours très coûteuses, lorsqu'une pièce critique casse avant la date estimée. C'est pourquoi les ventes de systèmes de contrôle non destructif augmentent rapidement dans ce domaine, [11].

I.8 Différentes techniques de CND

Les méthodes CND utilisées couramment sont : les procédés optiques, le ressuage, la radiologie, les ultrasons, l'émission acoustique, le procédé par courants de Foucault).

La diversité des pièces à inspecter, leurs géométries, leurs matériaux et les conditions d'inspection interdit à une méthode de CND d'être universelle, [12].

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler.

Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les Phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur.

Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière. Nous allons décrire le principe de chacun de ces moyens et faire une analyse succincte donnant une idée sur les possibilités d'emploi de chacune de ces techniques. Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettent de réaliser le contrôle non destructif dans toutes les conditions au meilleur rendement, [7].

I.8.1 Examen visuel

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle le plus simple et le plus général puisque c'est le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles graduées, [12].

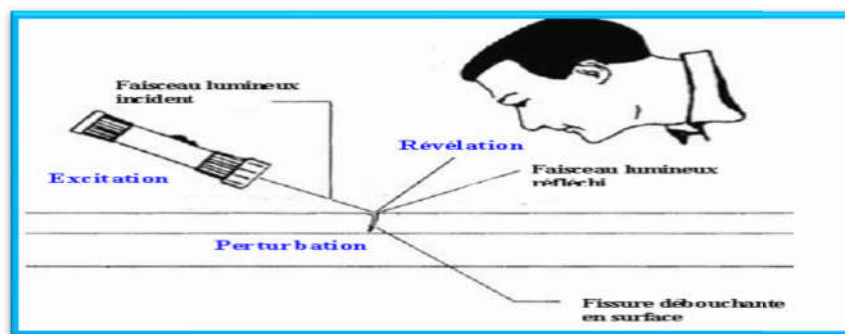


Figure I. 2 Principe de contrôle visuel.

I.8.2 Ressuage

Le contrôle par Ressuage destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de la matière métallique. Il consiste à faire pénétrer dans les fissures débouchant un liquide mouillant et du liquide par une méthode appropriée (poudre, rayonnement UV...), [13].

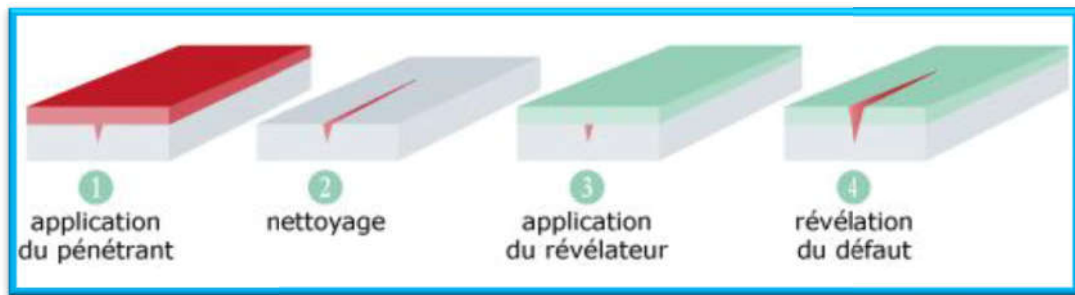


Figure I. 3 Les quatre étapes de principe de la méthode de ressuage.

I.8.3 Radiographie

Cette méthode couramment utilisée comme la plupart des autres techniques de CND la radiographie par rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) qu'il s'agit de traverser à l'intérieur d'une pièce et à recueillir le signal atténué sur un film photographique qui convertit ce rayonnement sous forme d'une image par un récepteur.

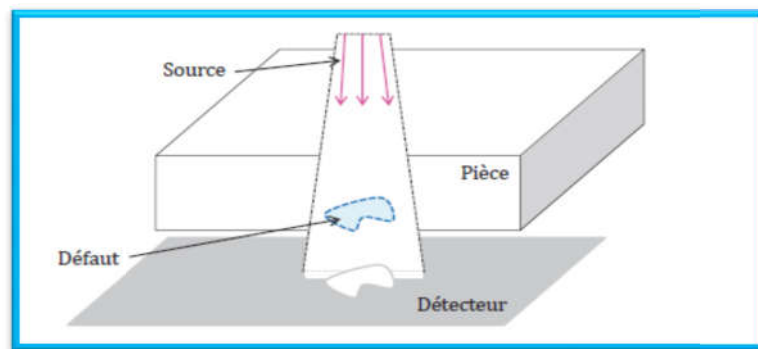


Figure I. 4 Principe de la Radiographie.

I.8.4 Ultrasons (US)

Le contrôle par ultrasons consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans un matériau. La présence d'un défaut interne sur le trajet des US provoque la réflexion des impulsions à la manière d'un écho sur les obstacles. Le signal réfléchi est recueilli par un capteur appelé « **transducteur ultrasonore** ».

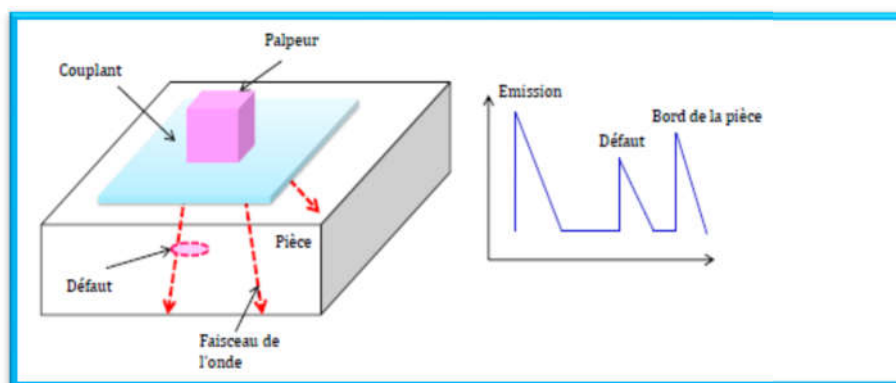


Figure I. 5 Principe du contrôle par ultrasons.

I.8.5 Magnétoscopie

Cette méthode permet en plus par rapport au ressuage, de mettre en évidence des défauts non débouchant mais proche de la surface. Pour cela, on applique un fort champ magnétique ou un fort courant sur la pièce et on visualise à l'aide d'une poudre métallique les lignes de champ au droit des défauts. L'examen des pièces se fait le plus souvent sous éclairage ultraviolet(UV). Le principe de cette méthode présente dans la Figure (I.6), [13].

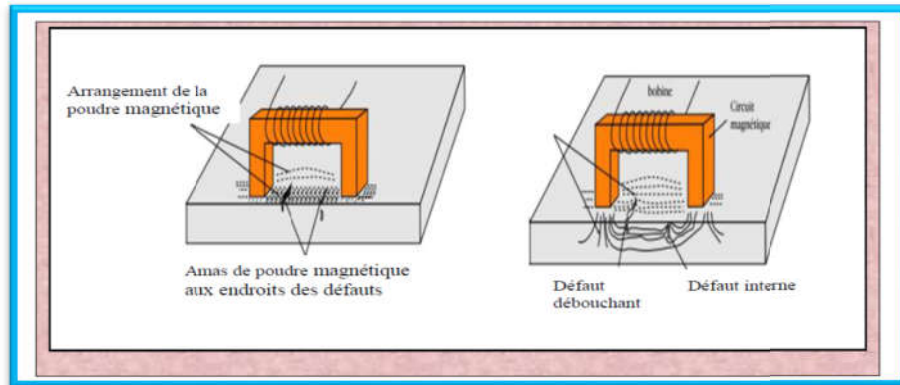


Figure I. 6 Principe de contrôle par magnétoscopie.

I.8.6 Thermographie

La thermographie consiste à chauffer rapidement la surface du matériau inspecté au moyen de lampes flash par exemple l'enregistrement l'évolution de la température à la surface de la pièce testée à l'aide d'une caméra infrarouge. La chaleur émise par les lampes se diffuse dans le volume de la pièce et la présence d'un défaut se manifeste localement sur les images par un retour normalement lent à la température ambiante. Les images thermographiques sont enregistrées après le flash généralement sont normalisées en fonction du signal recueilli sur une région saine. cette technique est bien adaptée pour la détection des défauts sous-jacents dans les matériaux métalliques et composites. Toutefois, elle ne permet pas de déceler les défauts profonds puisque sa sensibilité diminue avec les fortes épaisseurs et la géométrie de la pièce contrôlée doit être relativement simple, [9].

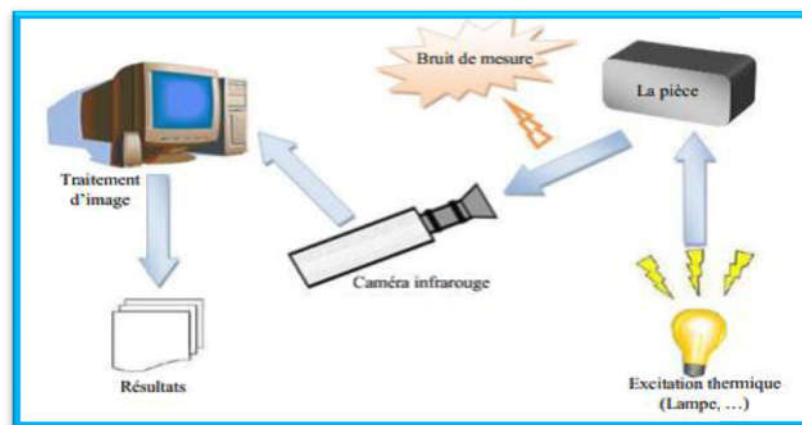


Figure I. 7 Inspection par thermographie.

I.8.7 Contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode du CND qui utilise les phénomènes de propagation d'onde électromagnétiques.

Le passage d'un courant variable à travers une bobine génère un champ magnétique, la propagation de ce dernier dans une pièce conductrice électromagnétique induit des courants de Foucault, qui à leurs tours créent un champ magnétique opposé au champ d'excitation entraînant une variation d'impédance de la bobine, la mesure de celle-ci est à la base du contrôle par courant de Foucault. Ils dépendent des caractéristiques électriques magnétiques et structurales du matériau (dimension, conductivité électrique et perméabilité magnétique), [10].

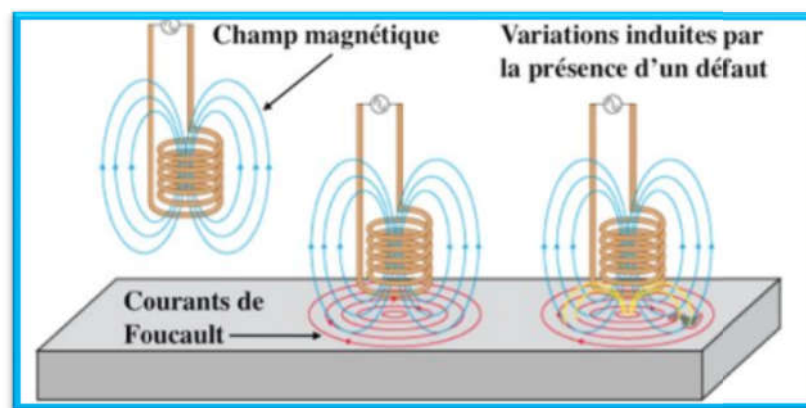


Figure I. 8 Principe du CND par courants de Foucault.

I.9 Synthèse comparative des techniques utilisées en CND

Le **tableau I.1** donne un aperçu global des différents procédés les plus utilisés en CND, il englobe le principe physique, les défauts détectés, les domaines d'applications et les principaux avantages et inconvénients, [14].

Tableau I. 1 Caractéristiques des différentes techniques de CND.

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'application	Points forts	Points faibles
Optiques	Examen visuel direct ou assisté	Vision Perturbation d'une réflexion	Défauts débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
	Contrôle laser			Contrôles automatiques de bandes et tôles	Productivité	Taux élevé de fausses alarmes
	Contrôle TV	Formation d'une image	Défauts d'aspect, taches	Contrôle automatique en fabrication des produits divers	Productivité	Défauts fins
	Interférométrie holographique	Détection de microdéformations provoquées	Délaminations, décollements	Contrôle en atelier de parois non métalliques	Contrôle des composites	Interprétation, productivité
	Thermographie infrarouge	Cartographie de perturbations thermiques	Délaminations hétérogénéités diverses	Contrôle sur site	Cartographie	Caractérisation des défauts
Ressuage	Ressuage	Effet de capillarité	Défauts fins débouchant	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité Faible coût	Productivité, peu quantitatif
Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatifs
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Vibrations mécaniques	Ultrasons	Émission d'une onde, Échographie	Défauts internes Défauts débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Grande sensibilité Nombreuses méthodes d'auscultation	Conditions de essai Interprétation des échos. Couplage
	Émission acoustique	Émission provoquée par sollicitation mécanique	Criques Fissures	Parois de gros récipients Structures diverses	Contrôle global avec localisation des défauts	Interprétation Bruits parasites
	Essais dynamiques	Perturbations d'un amortissement Mesure de vitesse	Criques Fissures	Contrôle de pièces moulées	Productivité	Qualitatif
Tests d'étanchéité	Essais hydrostatiques	Détection de bulles	Défauts débouchant dans joints ou parois, zone perméable	Tubes et enceintes en tout matériau	Grande étendue de flux de fuite selon la méthode	Contingences diverses selon la méthode
	Tests avec gaz traceurs (halogènes, hélium)	Détection chimique				
	Détection sonore	Bruit acoustique				

Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatifs
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Electro-magnétiques	Courants de Foucault	Perturbations d'un courant	Défauts fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité Automatisation	Matériaux non conducteurs Interprétation
	Potentiel électrique	Perturbations d'un courant	Mesure de profondeur de défauts	Tout produit conducteur	Simplicité Faible coût	Contrôle manuel Lent
	Hyperfréquences	Transmission ou réflexion radar	Hétérogénéités diverses	Matériaux peu conducteurs	Contrôle sans contact	Interprétation du signal
Rayonnements ionisants	Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tout matériau	Cartographie Souplesse de réglage	Protection Détection des fissures
	Radiographie γ			Contrôle en ligne	Fortes épaisseurs	Profondeur des défauts
	Radioscopie en temps réel				Productivité	Résolution limitée
	Tomographie X			Contrôle de structures non métalliques	Imagerie en coupe	Coût Productivité
	Neutronographie			Corps hydrogénés	Complète la radiographie	Équipement Condition d'emploi
	Diffusion Compton	Rétrodiffusion	Délamination			

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les méthodes de contrôle non destructif les plus utilisées avec leur principe de détection d'un éventuel défaut, le chapitre suivant sera consacré plus détailler pour le contrôle par ultrasons.

Chapitre II :

**Apport sur les
Méthodes
Ultrasonores Pour
l'Inspection des
Matériaux**

Chapitre II. Apport Sur les Méthodes Ultrasonores Pour l'Inspection des Matériaux

II.1 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 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.

L'onde est une perturbation ou une variation qui transfère l'énergie progressivement d'un point à un autre dans un milieu et qui peut prendre la forme d'une déformation élastique Ou d'une variation de la pression, de l'intensité électrique ou magnétique, du potentiel Electrique, ou de la température.

L'ultrason est une onde mécanique et élastique, qui se propage au travers de supports fluides, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 20 000 et 10 000 000 Hertz, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine. Le contrôle par ultrason est appliqué aux fabrications, aux demi-produits et éventuellement aux produits finis, en petite ou grande série, il est capable de mettre en évidence les défauts en préservant l'intégrité des produits contrôlés, [2].

II.2 Contrôle par Ultrason (US)

Contrairement aux techniques précédentes, le contrôle par ultrasons est bien adapté contrôle Des pièces très épaisses.

La technique de contrôle non destructif par Ultrason utilise la transmission de l'onde sonore de haute fréquence pour détecter des défauts ou localiser des changements dans les propriétés de ces matériaux. Des US sont envoyés dans la pièce à contrôler leurs réflexions sur les différents obstacles dans la pièce permettent d'obtenir une image de l'intérieur de celle-ci. Connaissant la vitesse de propagation des US dans le matériau et le temps aller-retour d'une impulsion ultrasonore envoyée par le transducteur, on déduit la distance parcourue par cette impulsion et la profondeur du défaut, [2].

II.2.1 Nature des ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations élastiques d'origine mécanique qui se propagent dans un milieu matériel. Les ultrasons sont de même nature que le son mais de fréquence plus élevée.

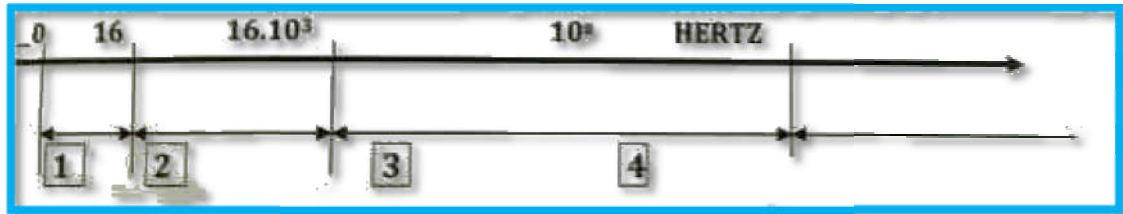


Figure II. 1 Nature des ultrasons.

1. Domaine des infrasons, (inaudible) de 0 à 16Hz
2. Domaine des sons, (audible) de 16 à $16 \cdot 10^3$
3. Domaine des ultrasons, (inaudible)
4. Domaine des hypers son, (inaudible)

En CND on utilise la bande de 0.5 à 5MHz

II.2.2 Principe de l'ultrason

Les US sont des ondes mécaniques dont la fréquence est supérieure à 20 KHz, ces sont inaudibles pour l'oreille humaine. Le son se propage dans les solides sous forme de vibrations des atomes appelés photons, seule la vibration se propage, et non les atomes qui ne font que vibrer très faiblement autour de leur position d'équilibre.

En contrôle non destructif la longueur d'onde doit être du même ordre de grandeur que les défauts rencontrés, c'est pourquoi on utilise des fréquences élevées comprises en général entre 1 et 15 MHz. Les US trouvent de nombreuses applications dans différents domaines :

- militaire (sonar).
- médical (échographie).
- industriel – télémétrie.
- Loisir pour créer des brouillards d'eau (fontaines...).

Pour le contrôle non destructif, les US sont générés à partir d'un élément Piézo-électrique Excité une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 MHz. Cet élément est souvent fixé d'un côté sur une semelle en matière plastique et de l'autre, un Amortisseur, l'ensemble constituant le transducteur.

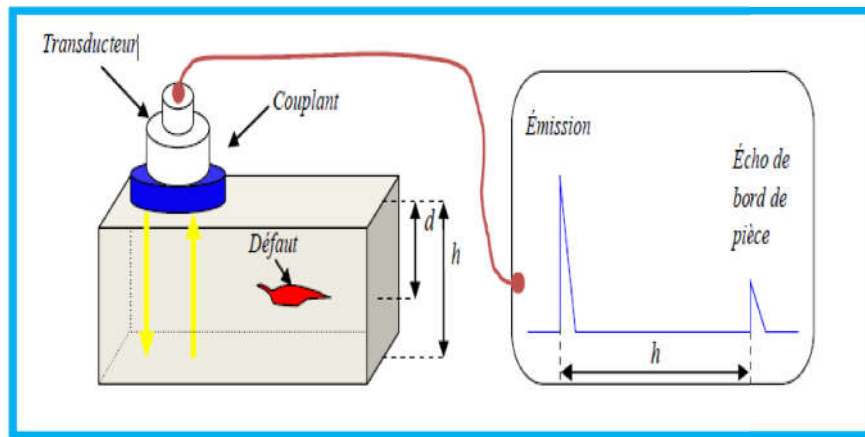


Figure II. 2 Transducteur au-dessous d'une zone saine.

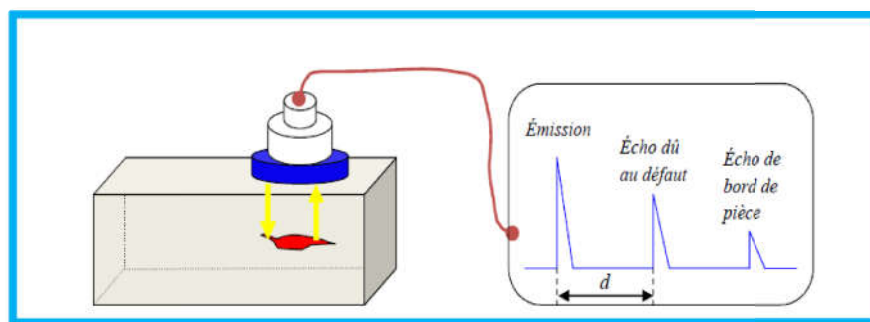


Figure II. 3 Principe de CND par Ultrason.

II.3 Production des ultrasons de fréquence élevées

On part par des oscillations électriques pour les traduire ensuite en vibrations mécanique, la piézoélectricité est pratiquement la seule méthode utilisée dans l'industrie. [2]

II.3.1 Principe de la piézoélectricité

II.3.1.a Effet direct

Une action mécanique provoque l'apparition d'un dipôle électrique dans chaque maille cristalline d'un matériau, par déplacement des centres des charges positives et négatives.

II.3.1.b Effet inverse

L'application d'une certaine tension entre les faces métallisées du Cristal le dilate ou le contracte suivant le sens de la tension appliquée.

Une tension de 500 volts par exemple provoque une contraction d'une lame de quartz.

II.3.2 Substances piézoélectriques

II.3.2.a Naturels

Ces substances ne peuvent fournir que de faibles puissances à l'émission, mais présentent par

contre une bonne sensibilité électrique et mécanique dans le temps, on trouve des éléments naturels tel que : Quartz, sel de rochelle,

II.3.2.b *Artificielles*

Les chercheurs ont obtenus des propriétés piézoélectriques analogues à celles des monocristaux, en utilisant des (céramiques artificielles) élaborés à partir d'agrégats de microcristaux ferroélectriques poly domaines.

Les éléments chimiques qu'on trouve : sulfate de lithium, titane de baryum, phosphate d'ammonium des hydrogéné.

II.4 Propriétés des ultrasons

II.4.1 **Onde ultrasonore**

- Une onde est le lieu géométrique des particules dans le même état vibratoire.
- Tout mouvement ondulatoire répond à l'équation périodique suivante.[2]

$$U = A\sin(\omega t) \tag{II.1}$$

Avec :

U : élongation instantanée,

A : élongation maximale,

ω : Pulsation de mouvement.

t : temps.

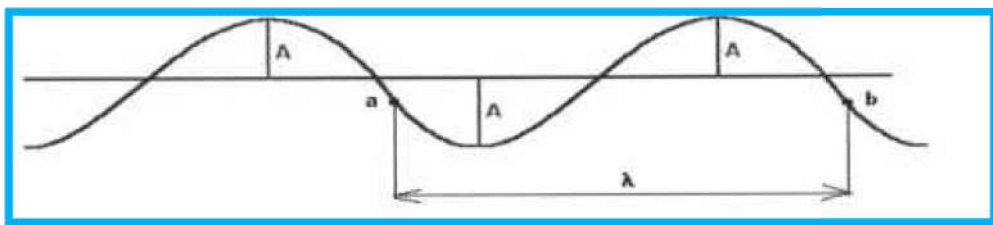


Figure II. 4 Onde ultrasonore.

- Le temps nécessaire à une oscillation est la période T[s].
- Le nombre d'oscillations par seconde est la fréquence f [Hz].
- La distance parcourue par l'onde pendant une période s'appelle la longueur d'onde

$$\lambda \text{ [m] tel que : } \lambda = c.T = \frac{c}{f} \tag{II.2}$$

Avec : λ : Longueur e l'onde.

C : Vitesse de propagation de l'onde [m/s].

T : Période de l'onde, en seconde (s) et $T = 1 / f$. C : célérité de l'onde, en m/s

f : Fréquence d'oscillation [Hz].

II.4.2 Pression et l'impédance acoustique

➤ Le déplacement des particules entraîne dans le milieu de propagation des augmentations et diminutions successives de pression P.

La pression dépend des caractéristiques de l'onde ainsi que celles du milieu de propagation. [2]

➤ L'impédance acoustique Z est une grandeur caractérisant le milieu et reliant la pression acoustique a la vitesse de vibration des particules.

Soit :

$$P = \rho C \omega \xi \quad \text{Ou} \quad P = Z \omega \xi \quad \text{Tel que : } Z = \rho C \quad (\text{II.3})$$

Avec :

Z : Impédance acoustique [kg/m². s].

ρ : Masse volumique [kg/m³].

C : Célérité du son [m/s].

ξ : Déplacement des particules[m].

$$\omega : \text{Pulsation cyclique [rad/s] Ou } \omega = 2\pi f \quad (\text{II.4})$$

f: Fréquence de l'onde [Hz].

Ainsi la densité de puissance acoustique ' J ' soit

$$J = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

P : Pression [Pa].

Z : impédance acoustique [kg/m². s].

II.4.3 Propagation de l'onde ultrasonore

Le mode de propagation des ondes acoustiques se détermine par les propriétés élastiques du milieu et par le type d'impulsion, on peut motioneer quatre types de propagation des ondes ultrasonores, [3].

II.4.3.a Onde longitudinale (ou de compression)

Une onde est dite longitudinale lorsque la direction de propagation est parallèle à la direction de vibration des particules.

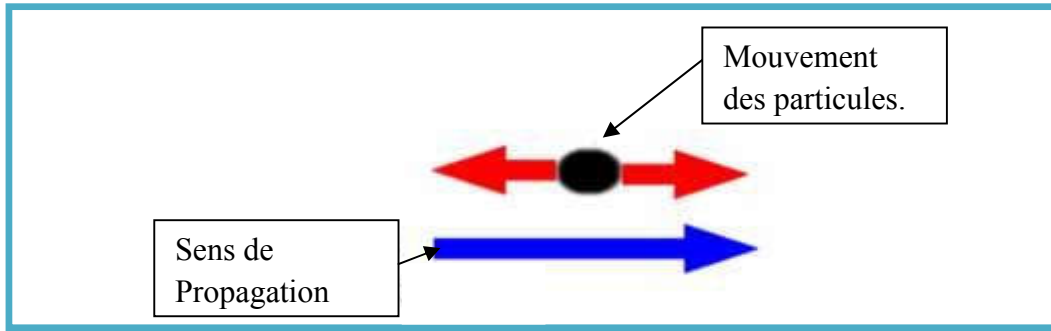


Figure II. 5 Propagation d'une onde longitudinale.

La vitesse de propagation de l'onde longitudinale « VL » :

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{II.6})$$

Ou
$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

ρ : Masse volumique [kg/m^3]

E : Module d'Young [Pa]

ν : Coefficient de poisson [sans unité]

λ, μ : Constantes de LAME [Pa]

II.4.3.b Onde transversale (ou de cisaillement)

Une onde est dite transversale lorsque la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire au sens de vibration des particules.

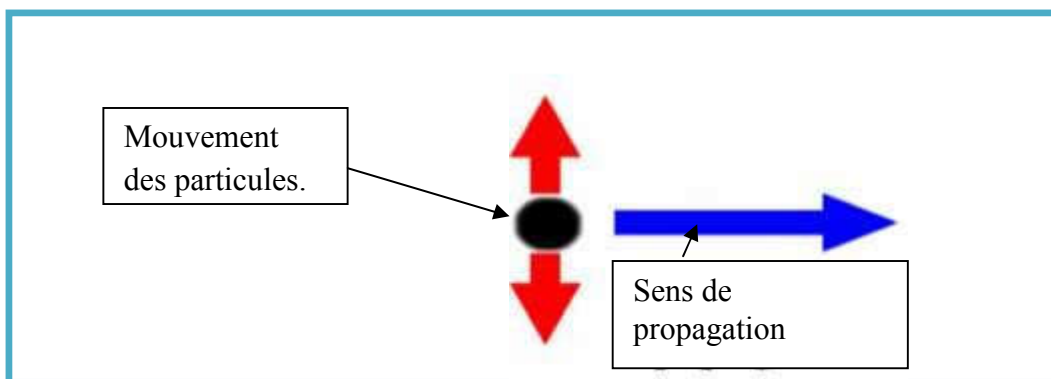


Figure II. 6 Propagation d'une onde transversale.

La vitesse de l'onde transversale « VT » :

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Où } V_T = \sqrt{\frac{u}{\rho}} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

ρ : Masse volumique [kg/m³]

E:Module de Young [Pa]

ν : Coefficient de poisson [sans unité].

μ : Module de cisaillement [Pa].

II.4.3.c Onde de surface (ou de Rayleigh):

On obtient une onde de surface lorsqu'on superpose une onde de mode longitudinale et une onde de mode transversale de même direction parallèle à la surface d'un solide.

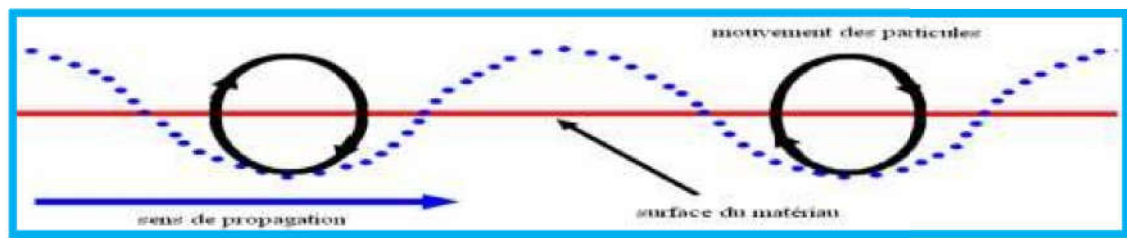


Figure II. 7 Propagation d'une onde de surface.

La vitesse de l'onde de surface est « VS » :

$$V_S = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (\text{II.10})$$

Pour les métaux : $V_S=0.9V_T$

II.4.3.d Onde de plaque (ou de Lamb)

Lorsqu'une plaque d'épaisseur voisine de la longueur d'onde est soumise à une onde de surface, cette dernière disparaît en faisant apparaître deux types d'ondes plates appelées onde de Lamb symétrique et antisymétrique.

Dans le mode symétrique, les particules sur les deux faces de la pièce vibrent en opposition de phase en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque le mouvement vibratoire des particules est longitudinal.

Dans le mode antisymétrique, les particules sur les deux faces de la pièce vibrent en phase, en décrivant des ellipses. Sur l'axe neutre de la plaque, le mouvement vibratoire des particules est transversal.

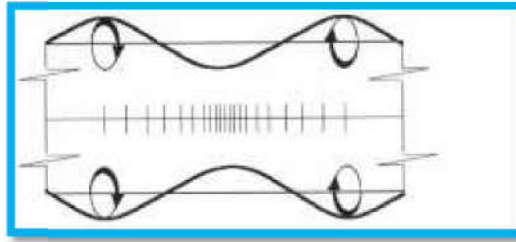


Figure II. 8 Propagation d'une onde de plaque symétrique.

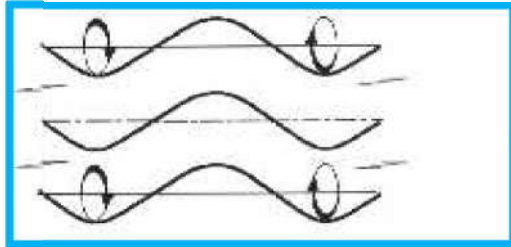


Figure II. 9 Propagation d'une onde de plaque antisymétrique.

- ✓ La vitesse de propagation de l'onde de plaque « V_p » est déterminée par :

$$V_P = ef \quad (\text{II.11})$$

Avec :

e : l'épaisseur de la plaque.

f : la fréquence de l'onde.

II.5 Transmission entre milieux

Quand une onde ultrasonore traversant un matériau rencontre la limite d'un matériau différent perpendiculaire aux ondes, une partie de l'énergie des ondes est réfléchi vers la source et l'autre partie poursuit son parcours. Le pourcentage de réflexion par rapport à la transmission est lié à l'impédance acoustique relative des deux matériaux [2],[11].

$$\text{Tel que : } Z = \rho C \quad (\text{II.12})$$

Avec :

ρ : La masse volumique du milieu [kg/m^3].

C : La vitesse de son dans ce milieu [m/s]

L'incidence de l'onde peut se faire de deux manières :

II.5.1 Incidence normale

Lorsqu'une onde longitudinale U_i arrive perpendiculairement à l'interface de deux milieux (1) et (2) d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 , avec une vitesse V_1 , une partie U_r de l'onde incidente est réfléchi vers le milieu (1) avec une vitesse V_1 l'autre partie U_t est transmise dans le milieu (2) avec une vitesse V_2 .

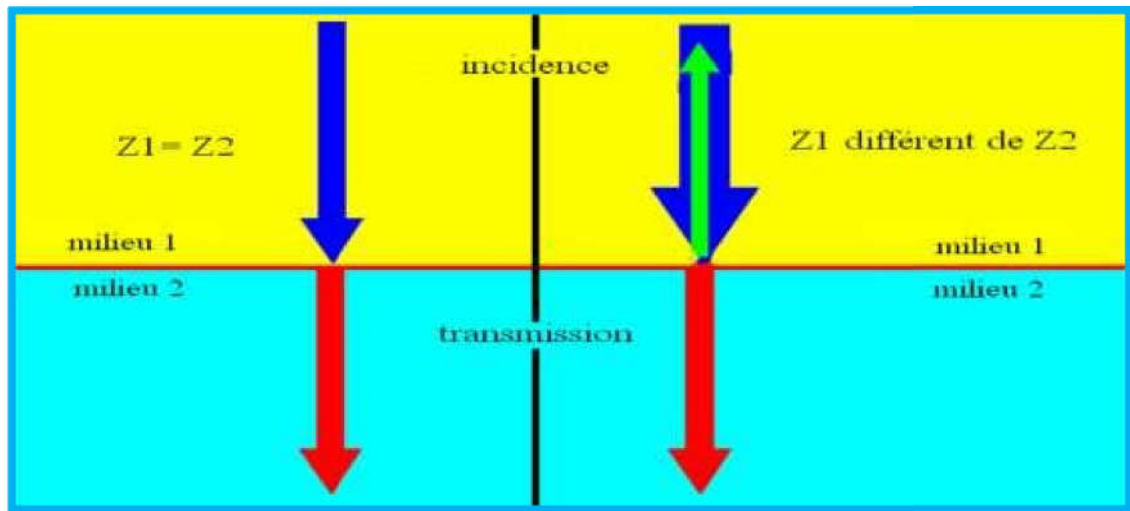


Figure II. 10 Incidence normal.

✓ Le rapport entre la pression acoustique de l'onde réfléchi P_r et la pression acoustique de l'onde incidente P_i est appelé le coefficient de réflexion R .

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{II.13})$$

Avec:

Z_1 : impédance acoustique du milieu 1

Z_2 : impédance acoustique du milieu 2

✓ Le rapport entre la pression acoustique de l'onde transmise P_t et celle de l'onde incidente P_i

Est appelé coefficient de transmission T .

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{II.14})$$

Z_1 : impédance acoustique du milieu 1

Z_2 : impédance acoustique du milieu 2

II.5.2 Incidence oblique

Lorsqu'une onde ultrasonore incidente arrive obliquement sur l'interface de deux milieux, trois phénomènes apparaissent : réflexion, réfraction et transformation de mode.

La réflexion est la partie d'énergie réfléchi par le milieu 2 dans le milieu 1, ainsi l'onde

transmise subit des changements brusques de direction si les vitesses de propagation sont différentes dans les deux milieux, c'est la réfraction.

Selon la nature des deux milieux et de l'angle d'incidence, l'onde incidente peut subir d'une transformation de mode en onde longitudinale, transversale ou de surface. [15]

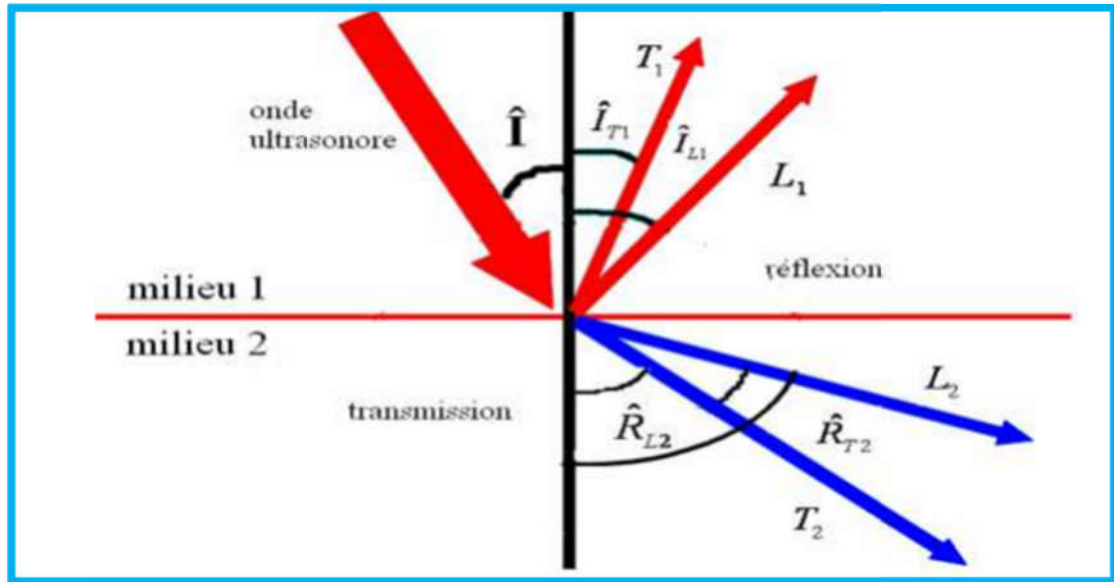


Figure II. 11 Incidence oblique.

Les angles de réflexion et de réfraction de chaque mode d'onde peuvent se déterminer par la loi de Snell –Descartes :

$$\frac{\sin \hat{i}}{V_{L1}} = \frac{\sin \hat{i}_{L1}}{V_{L1}} = \frac{\sin \hat{i}_{T1}}{V_{T1}} = \frac{\sin R_{L2}}{V_{L2}} = \frac{\sin R_{T2}}{V_{T2}} \quad (\text{II. 15})$$

$\sin \hat{i}_{L1}$: Angle d'incidence dans le milieu 1

$\sin R_{T2}$: Angle de réfraction de l'onde transversale dans le milieu 2.

$\sin R_{L2}$: Angle de réfraction de l'onde longitudinale dans le milieu 2.

$V_{L1,2}$: Vitesse de propagation de l'onde longitudinale dans le milieu 2.

$V_{T1,2}$: Vitesse de propagation de l'onde transversale dans le milieu 2.

Dans ce mode d'incidence il est important de citer les deux angles d'incidence limites existant qui sont : un angle limite d'onde longitudinale et un angle limite d'onde transversale.

II.6 Faisceau ultrasonore (acoustique)

Les sources ultrasonores présentent une caractéristique directionnelle fortement marquée, les valeurs nominales des amplitudes de pression ne peuvent être détectées que dans un faible secteur de l'espace.[2].

La partie la plus importante du champ acoustique, présentant une signification pour le contrôle, se limite à un faible secteur du champ que l'on décrit par le faisceau acoustique.

On peut décomposer ce faisceau en deux zones :

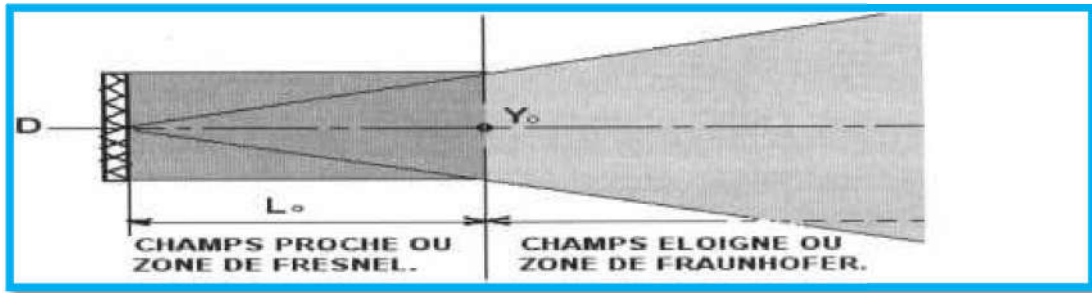


Figure II. 12 Zones du faisceau acoustique.

II.6.1 Champ proche (ou zone de Fresnel)

Le champ proche est la zone près de la sonde où la pression acoustique passe par une série de Maximums et de minimums. Il se termine au dernier maximum sur l'axe à une distance N de la face de la sonde. La distance N du champ proche représente le centre naturel de la Sonde.[2].

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{II.16})$$

D : diamètre du cristal piézoélectrique.

λ : Longueur d'onde dans le matériau.

II.6.2 Champ éloigné

Le champ éloigné est la zone au-delà de la valeur N où la pression sonore diminue progressivement jusqu'à zéro à mesure que le diamètre du faisceau se dilate et que son énergie se dissipe.

$$\sin \alpha = \frac{K\lambda}{D} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

D : diamètre du cristal.

λ : Longueur d'onde.

K : constante dépend de la géométrie de la source.

α : demi-angle du cône.

II.7 Atténuation des ultrasons

Est une perte supplémentaire d'énergie en fonction des milieux dans lesquelles se propage l'onde, la décroissance d'énergie émise suit une loi exponentielle de la forme :

$$U = U_0 e^{-\alpha X} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

U : énergie à la distance X.

U_0 : énergie initiale émise.

α : Coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation α est la somme de deux termes, le premier terme représente la perte par l'absorption et l'autre représente la perte par diffusion.

α est extrêmement important dans certain plastique, mais faible dans les métaux.

Tableau II. 1 Coefficient d'atténuation à 2MHz (ondes longitudinales) de quelques milieux.

Milieu de transmission	A(dB/m)	Milieu de transmission	A(dB/m)
Acier	5 -50	Laiton	50 -200
Alumin ium	1 - 5	Plexigl as Os	500
Eau	1		5000 – 20000
Fonte	20 -500		
Graisse	100 – 500		

L'atténuation est due à trois phénomènes :

II.7.1 La divergence

Le faisceau diverge à partir de son émission et la pression acoustique, par unité de surface diminue.

II.7.2 L'absorption

Toute onde se propageant dans un matériau cède de son énergie à celui-ci cette énergie est transformée en chaleur par le milieu.

✧ **La diffusion**

L'atténuation due à la diffusion des ondes provient d'une dissipation de l'énergie dans toutes les directions par suite de l'anisotropie et de la non homogénéité du matériau.

II.8 Contrôle par ultrasons

II.8.1 Émission et réception des ultrasons

L'émission doit se faire par impulsions pour que la réception puisse être effectuée entre deux impulsions. Pour cela un appareil à ultrason est utilisé, qui permet de visualiser sur un écran, le parcours des ultrasons entre deux impulsions successives. Les appareils à ultrason sont deux types principaux, [3] :

❖ **Appareils de chantier** : qui possèdent un faible encombrement, un faible poids et des possibilités réduites.

❖ **Appareils de laboratoire** : lourds, encombrement, complexes. et qui permettent grâce à leur multiples de possibilités la mise au point de méthodes de recherches.

La chaîne de mesure qui englobe les différentes parties d'un appareil doit comporter :

II.8.1.a *Élément d'excitation ou de commande*

Pour fixer le déroulement du cycle de contrôle, à quel moment émettre et à quel moment écouter (recevoir et évaluer).

II.8.1.b *Générateur d'impulsions*

Il délivre l'impulsion grâce à laquelle le palpeur sera excité pour engendrer les oscillations mécaniques.

II.8.1.c *Palpeur (ou des palpeurs)*

Il transforme les impulsions électriques d'excitation en oscillations mécaniques (ultrasons) et, à l'inverse, les oscillations ultrasonores en impulsions électriques.

Les palpeurs peuvent être au même temps émetteur-récepteur ou séparés.

II.8.1.d *Amplificateur*

A la réception, le signal provoqué par l'écho est très faible (0.01V) pour être visualisé sur l'écran, il faut l'amplifier et filtrer, alors l'amplificateur lui associe avec un gain suffisant pour la visualisation.

II.8.1.e *Tube cathodique (ou écran de visualisation)*

Après le traitement du signal, les résultats sont affichés sur un écran d'un tube cathodique, les distances et les amplitudes des échos sont obtenues grâce à un balayage horizontal et vertical.

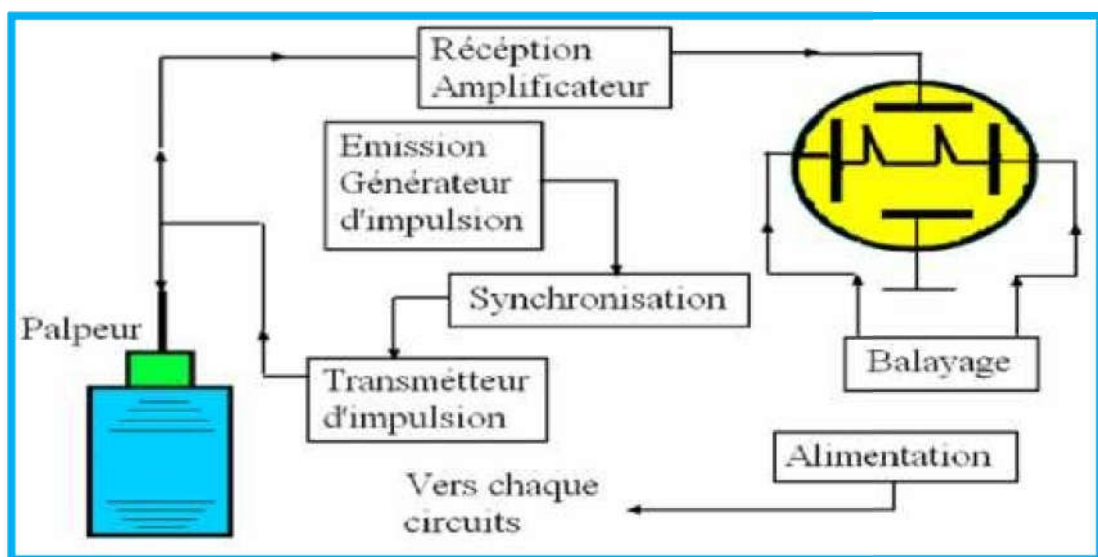


Figure II. 13 Chaines de mesure de contrôle par ultrason.

II.8.2 Technologie des palpeurs

Un palpeur est un dispositif permettant d'émettre et/ou de recevoir des ultrasons. Il est principalement constitué par le transducteur et qui est l'élément piézoélectrique.

Un palpeur est constitué principalement de quatre éléments [13] :

II.8.2.a Pastille piézoélectrique

Le choix de la nature des pastilles piézoélectriques est déterminé par des critères des prix, de fragilité de sensibilité, de tension d'excitation, de coefficient de couplage piézoélectrique et de résistance à la température.

Actuellement les matériaux les plus utilisés pour réaliser industriellement les éléments sensibles sont à la base de zirconate-titanate de plomb et de titanate de baryum. On joint à ces deux matériaux de base des produits qui améliorent leur sensibilité.

II.8.2.b Amortisseur

L'amortisseur a pour but de supprimer la transmission, il permet d'obtenir un signal bref, son impédance acoustique étant égale à celle de la pastille, la vibration est très rapidement amortie (pas de réflexion sur la face arrière).

II.8.2.c Connexions électriques

Les faces de l'élément sensible sont métallisées pour permettre un bon couplage électrique avec les fils de connexion à l'aide de soudure, colles conductrices, ressorts...

II.8.2.d Boîtier :

Le boîtier permet une manipulation simple et des montages spécifiques, il protège la pastille, assure l'étanchéité et la résistance à l'usure

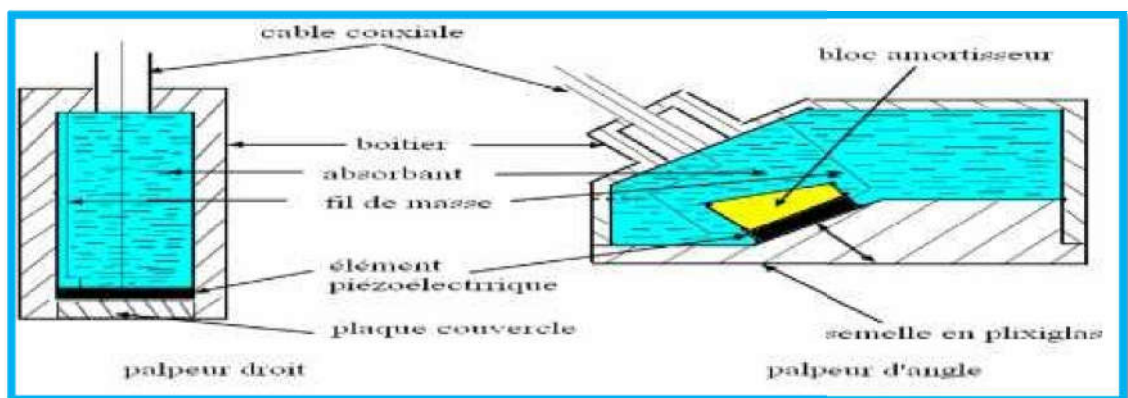


Figure II. 14 Eléments des palpeurs.

II.8.3 Types de palpeur

L'utilisation des ultrasons pour le contrôle des pièces de formes complexes nécessite la conception de palpeurs parfaitement adaptés.[13].

II.8.3.a Palpeurs droits ou normaux:

Les palpeurs droits sont ceux qui émettent des ondes de compression (longitudinale) dont l'axe du faisceau est perpendiculaire à la surface d'émission. Ce sont les palpeurs les plus couramment utilisés, ils offrent une gamme étendue de fréquence, de diamètre et d'amortissement ; le prix est relativement peu élevé.

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

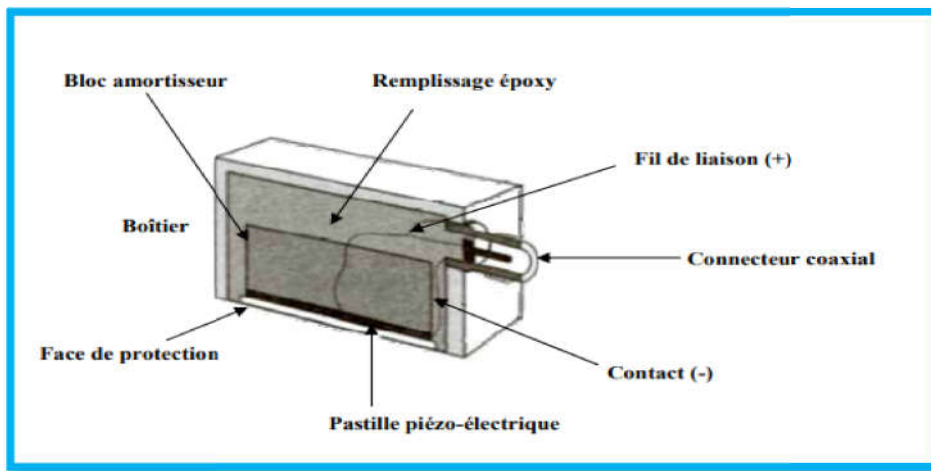


Figure II. 15 Palpeur droit.

II.8.3.b Palpeurs doubles monoblocs

Les palpeurs doubles ou « émetteur-récepteur » sont constitués de deux palpeurs 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.

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 du champ proche et du champ éloigné. L'utilité de ces palpeurs s'étend, pour un palpeur déterminé, sur une profondeur relativement courte.

II.8.3.c Palpeurs d'angle

Les palpeurs d'angle produisent des ondes transversales dans les matériaux en envoyant une onde longitudinale incidente entre le 1^{er} et le 2^{ème} angle critique. En pratique, on construit des palpeurs d'angle avec des valeurs angulaires de réfraction dans l'acier de 35°, 45°, 60°, 70° et 80°.

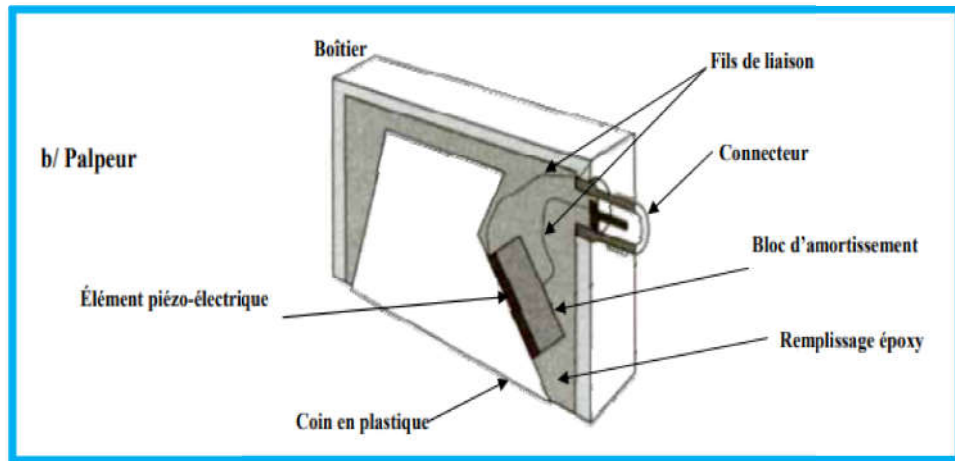


Figure II. 16 Palpeur par angle.

II.8.4 Choix du palpeur

Il est guidé par son utilisation ultérieure, et les considérations essentielles sont :

II.8.4.a Type de palpeur et son élément actif

Selon les modalités du contrôle et le type et l'orientation des défauts recherchés, nous prenons un des palpeurs décrits déjà (palpeur droit, palpeur d'angle) en considérant son fonctionnement en émission et/ou en réception.

II.8.4.b Choix de la fréquence

La fréquence du palpeur est subordonnée au contrôle à effectuer :

- ✓ Pour les épaisseurs faibles ou les défauts très fins on utilise les fréquences élevées.
- ✓ Pour les matériaux à gros grains, on choisit les fréquences faibles pour éviter le phénomène de diffusion.

II.9 Méthodes de contrôle

II.9.1 Méthodes par réflexion ou par écho

En utilisant un appareil ultrasonore contenant un palpeur (E/R) relié avec un tube cathodique muni d'une base de temps, on peut chercher un défaut dans une pièce à contrôler avec un balayage d'une surface par contact.

Le positionnement de l'écho réfléchi par rapport à l'écho émis sur la base de temps peut indiquer sa position par rapport à la surface balayée, et son amplitude comparée avec l'écho émis indique son importance. [1], [2].

Le contrôle par réflexion peut s'effectuer par un simple palpeur ou par un palpeur double.

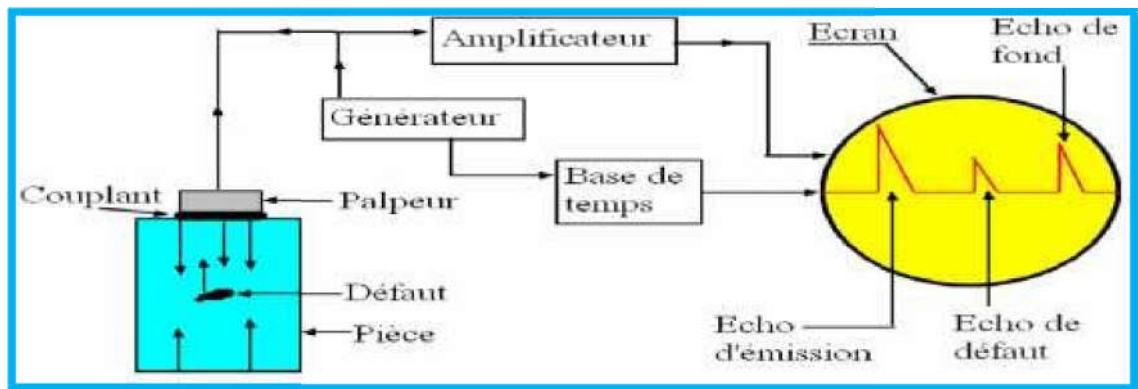


Figure II. 17 Méthode de contrôle par réflexion.

✧ La visualisation de type A (AScan) : où le défaut est représenté par un écho sur l'écran, c'est une méthode fréquemment utilisée.

✧ La visualisation de type B (B Scan) : où une coupe de défaut est visualisée sur un plan (x, y).

✧ La visualisation de type C (C Scan) : où on obtient une image projetée des défauts sur un plan à la surface de sondage, l'image est similaire au cliché en radiographie.

II.9.2 Méthode par transmission

Cette méthode est appliquée sur les plaques de faible épaisseur, elle nécessite deux capteurs ultrasonores (un émetteur et un récepteur).

La diminution du signal transmis par rapport au signal émis indique la présence d'un défaut, or sa position est impossible à détecter.

II.9.3 Méthode par éersion

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

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

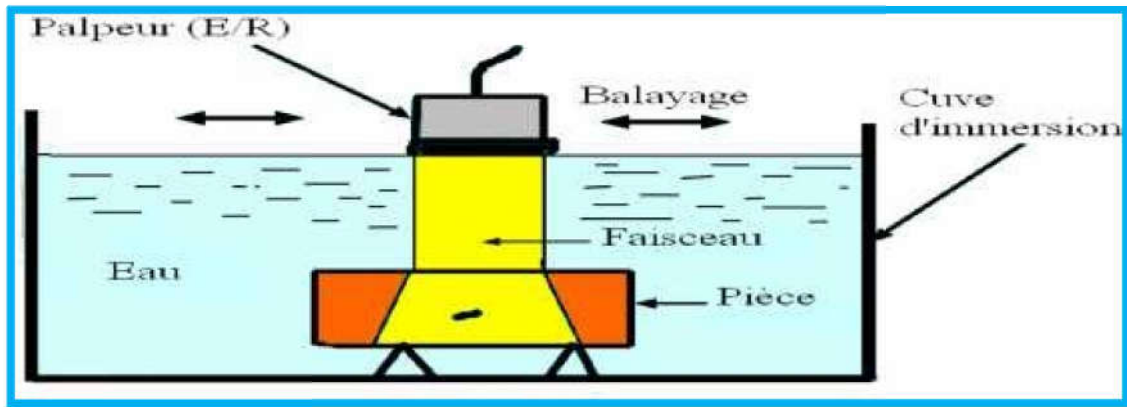


Figure II. 18 Méthode de contrôle par émerison.

II.10 Conditions du contrôle

Avant chaque examen de contrôle, il faut respecter quelques conditions, parmi eux on peut citer [1], [2] :

II.10.1 Informations requises avant l'examen

II.10.1.a Points convenus pendant la négociation du contrat

- Méthode de définition du niveau de référence.
- Méthode d'évaluation des indications.
- Critères d'acceptation.
- Niveau d'examen.
- Stade d'examen.
- Qualification du personnel.

II.10.1.b Renseignements requis avant l'examen

- Procédure écrite, si requise.
- Métal de base (moulé, forgé, laminé...).
- Etat de surface, dimensions...
- Procédé de soudage.

II.10.2 Le niveau d'examen

Les contrôles par ultrasons peuvent s'effectuer sur quatre niveaux d'examen selon la précision voulue pour le contrôle des assemblages :

Niveau 1 : Niveau économique conférant une probabilité modérée de détection.

Niveau 2 : Niveau moyen mais de détection élevée.

Niveau 3 : Niveau élevé d'examen assurant le taux de détection le plus élevé.

Niveau 4 : Non défini et doit faire l'objet d'un mode opératoire écrit.

II.10.3 Conditions à remplir par le personnel, l'appareillage et les Traducteurs

II.10.3.a Le personnel

Il doit être certifié niveau 1,2 ou 3 CONFREND ou équivalent (NF EN 473), pour l'interprétation au minimum niveau 2.

II.10.3.b L'appareil à ultrason

L'appareillage doit contenir :

- Un écran à graduations horizontales et verticales permanentes.
- Fonctionne en mono ou double traducteur.
- Permet l'utilisation de traducteurs de fréquence de 2 à 5MHz.
- Base de temps à gamme étendue de parcours.
- Commandes retard ou calage horizontal signal départ.
- Puissance réglable.
- Amplification suffisante.
- Commande de seuil.

II.10.3.c Traducteurs

- Ils sont de fréquence de 2 à 5MHz.
- En onde transversale, l'angle d'incidence sur la face opposée est compris entre 35^0 et 70^0 (en dehors, il y a changement de mode).

II.11 Vérification des appareillages

Un appareil de contrôle par ultrason doit être vérifié et réglé avant chaque examen à cause de ses caractéristiques qui peuvent être changées et selon les conditions exigées par l'examen.

II.11.1 Choix du milieu de couplage

Une matière de couplage doit être existée entre le palpeur et la pièce à contrôler et :

- Elle doit avoir de bonnes propriétés de mouillage.
- Ses caractéristiques doivent rester constantes de l'étalonnage à la fin de l'examen.
- Elle doit être compatible avec la position de travail et la température de la pièce.
- Après l'examen, elle doit être éliminée.

❖ Les couplant les plus utilisés

- Huiles.
- Graisses.
- Pâtes de contact.

- Colles additionnées d'eau.
- Gel thixotropique.
- Eau additionnée ou non d'agent mouillant.

II.11.2 Etalonnage et bloc d'étalonnage

Pour utiliser rationnellement un matériel de contrôle par ultrasons, il est nécessaire à la fois de connaître de manière aussi précise que possible les caractéristiques de ce matériel et de vérifier les réglages mis en jeu au cours des divers examens.

Ceci rend indispensable l'usage des dispositifs d'étalonnage constitués par des blocs de forme normalisée permettant de :

- Contrôler l'appareillage et les palpeurs, afin de définir leurs caractéristiques propres.
- Reproduire les conditions de réglages antérieurement utilisés.
- Comparer éventuellement les possibilités de différents matériels en vue d'une opération donnée. [4],[5].

II.11.2.a Caractéristiques du bloc d'étalonnage

a) Nature du matériau

Le matériau utilisé pour la fabrication des blocs d'étalonnage doit répondre aux conditions suivantes :

- Acier non allié ($C\% \leq 0.15\%$).
- Indice conventionnel de grosseur de grains ≥ 8 .
- Vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement (5920 et 3255m/s).
 - D'autres matériaux peuvent utiliser en fonctions des applications (tenir compte des vitesses de propagation des ondes ultrasonores).

b) Contrôle du matériau

Avant usinage du bloc, il convient de s'assurer de leur bonne homogénéité et de l'absence des défauts.

c) Tolérances

Les tolérances admises sur les différentes dimensions sont les suivants :

- Angle de découlement circulaire $\pm 1^{\circ}$.
- Emmanchement du cylindre en polyacrylate de méthyle H8-n7.
- Toutes les autres dimensions : $\pm 0.1\text{mm}$.

d) Mode opératoire

Pour l'étalonnage, on doit effectuer :

❖ **A l'appareil**

- Correction du point zéro.
- Etalonnage de l'échelle de mesure par réglage de la base de temps.
- Contrôle de la linéarité horizontale et la linéarité verticale.
- Réglage de la sensibilité relative.

❖ **Aux palpeurs droits**

- ◆ Contrôle de la zone de silence.
- ◆ Contrôle du pouvoir de résolution.

❖ **Aux palpeurs d'angles**

- ◆ Contrôle du pouvoir de résolution.
- ◆ Détermination de point d'incidence (ou d'émergence).
- ◆ Vérification de l'angle de réfraction.

II.11.3 Bloc de référence

Le bloc de référence est constitué d'une pièce métallique de forme et de dimensions normalisées. Ce bloc contient des trous de diamètres et de positions bien définis.

Le bloc de référence est utilisé pour tracer les courbes Amplitude-Distance(CAD) avant l'examen.

II.11.4 Principe de trace d'une Courbe Amplitude-Distance (CAD)

La CAD est une courbe qui donne les amplitudes des échos [dB] en fonction de la distance [mm].

Après le choix du bloc de référence, on trace un CAD de chaque palpeur utilisable pendant le contrôle.

Sur le bloc de référence, on peut utiliser plusieurs trous par un palpeur donné qui nous donnent des échos à des amplitudes et des distances différentes, [1], [2].

La courbe est tracée en jointant les différents sommets des échos, ceci est fait en ajustant le premier écho maximal observé à 80% de la hauteur de l'écran.

Le nombre des points reliés dépend de l'épaisseur de la pièce à contrôler, si la courbe est descendue sous la ligne de 25%, on doit refaire l'ajustement une autre fois ; ainsi l'évaluation des défauts sera basée sur cette courbe tracée.

Si le matériau à contrôler est différent de celui du bloc de référence, on doit effectuer une correction de transfert.

II.11.5 Paramètres à régler avant l'examen

II.11.5.a Détermination de l'axe de soudure

Pour repérer les distances utilisées pendant l'examen, il faut déterminer un repère, souvent l'axe des soudures.

II.11.5.b Volume à contrôler

C'est la zone incluant le métal fondu et le métal de base thermiquement affecté (ou la ZAT à 10 mm de part et d'autre du joint de soudure).

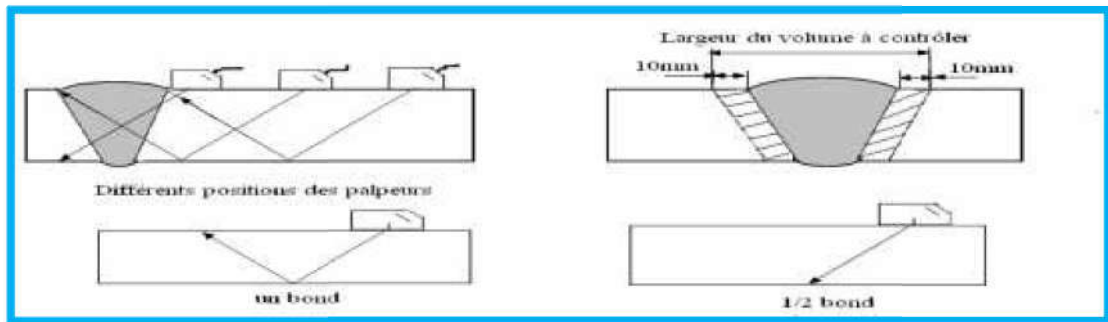


Figure II. 19 Volume à contrôler.

II.11.5.c Préparation des surfaces d'examen

Elles doivent être assez larges pour couvrir le volume à contrôler, lisses, exemptes d'impuretés susceptibles de perturber le couplage du traducteur ou de gêner le déplacement du palpeur.

II.11.6 Evaluation des indications

Lors de l'examen, pour chaque indication égale ou dépassant le seuil de notation, on doit effectuer :

- La détermination du pouvoir réfléchissant maximum.
- La localisation.
- L'évaluation de la longueur.
- La classification en indication volumique ou non volumique.
- L'appréciation de la hauteur (si requise).

II.2.7 Champ d'application et évolution du contrôle

II.11.7 Détection des défauts internes

La détection de défauts internes par US est très pratiquée en contrôle de fabrication et de recette, surveillance de structure en service et maintenance. La remarquable sensibilité de l'échographie ultrasonore à la moindre discontinuité ou hétérogénéité interne dans les

matériaux, en fait une méthode concurrente ou parfois complémentaire de la radiographie. Toutefois, en échographie ultrasonore, le choix des paramètres de sondage et l'interprétation des signaux recueillis ne sont pas toujours aisés et requièrent l'intervention d'un personnel qualifié.

II.11.8 Localisation des défauts en profondeur

Elle est aisée lorsqu'on travaille en échographie. Il existe toutefois une zone sous la surface de couplage pour laquelle l'écho de défaut peut être noyé dans l'écho d'émission ou d'interface, ce qui peut rendre à la fois la détection et la localisation aléatoires. La localisation en plan se fera en relation avec le relevé manuel de la position du palpeur.

II.11.9 Dimensionnement des défauts

C'est une préoccupation légitime du contrôleur en vue de les relier à des critères de nocivité technologique faisant en général l'objet d'une procédure normalisée ou spécifique. C'est un problème délicat auquel on peut toutefois donner des solutions pratiques simples. Deux cas se présentent en théorie, selon que le champ du palpeur est censé être supérieur ou inférieur à la dimension moyenne du défaut.

Le premier cas, tout le défaut est éclairé par le faisceau et l'on peut relier l'amplitude de l'écho de retour à la dimension du défaut à l'aide de diagrammes qui prennent en compte l'ensemble des paramètres ultrasonores du sondage. Cette méthode, souvent appelée méthode AVG est intéressante, mais délicate d'emploi surtout lorsque le défaut à dimensionner présente une orientation et une morphologie très éloignées des cas théoriques (généralement matérialisés par des réflecteurs constitués par des trous à fond plats forés dans les blocs d'étalonnage).

Lorsque le défaut est plus grand que le faisceau, ce que l'on peut parfois volontairement obtenir en utilisant l'étroit champ d'un palpeur focalisé, on trace son contour apparent, soit en repérant et en quantifiant le basculement entre écho de fond et écho de défaut (normes de contrôle de tôles fort espar exemple), soit en utilisant la règle «des – 6 dB» qui prend en compte un rapport 1/2 entre l'amplitude maximale de l'écho de défaut et celle obtenue lorsque les bords du défaut occultent environ à moitié la section du faisceau ultrasonore.

Le champ d'application du contrôle ultrasonore concerne principalement, outre bien entendu le domaine médical, l'examen des pièces métalliques et de leurs assemblages en fabrication et en service, donc l'ensemble des industries métallurgiques, mécaniques, nucléaires et aéronautiques.

Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux, assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, béton ; cela s'effectue lentement, par

difficultés pratiques rencontrées et dues à la nature de ces produits à structure peu homogène et anisotrope, [13].

II.12 Avantages et inconvénients de l'ultrason

➤ **Les avantages**

- Détection précise des défauts dans le volume de la pièce.
- Grande sensibilité surtout pour les défauts plans correctement orientés.
- Souplesse d'utilisation (utilisation sur chantier aussi bien qu'en contrôle automatisé).

➤ **Les inconvénients**

- -Interprétation délicate des défauts et de leurs dimensions, nécessitant un personnel qualifié.
- -Un milieu de couplage est nécessaire entre le palpeur et la pièce, afin d'assurer une bonne propagation des ondes.
- -Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau incident.
- -Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (fonte par exemple), [5].

II.13 Conclusion

Le contrôle par ultrasons est une méthode technologique efficace, parmi ses propriétés, la détection d'un nombre important des irrégularités internes dans le matériau ou dans un assemblage, ceci dépend de la performance des équipements de contrôle. Le prochain chapitre sera réservé aux résultats expérimentaux obtenus pour un contrôle non destructif par ultrasons.

Chapitre III :

Approche Expérimentale de Contrôle par Ondes Ultrasonores

Chapitre III. **Approche expérimentale de Contrôle par ondes ultrasonores**

III.1 Introduction

Le contrôle par ultrasons est un procédé de contrôle non destructif consistant à engendrer une impulsion ultrasonore dans le matériau et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées.

La connaissance de ce procédé implique les analyses suivantes :

- ✓ *Etude de la propagation des ondes ultrasonores,*
 - ✓ *Etudes de l'appareillage permettant l'émission d'impulsions ultrasonores, la réception et l'observation des échos,*
 - ✓ *Etudes des principes généraux du contrôle par ultrasons,*
 - ✓ *Etudes des principes particuliers propres aux différents types de produits industriels.*
- ✓ *Ce travail pratique consiste à détecter, mesurer et identifier un défaut à l'intérieur d'une plaque en acier et une plaque en aluminium au carbone en utilisant le contrôle par ultrasons.*



Figure III. 1 Pièce en aluminium.



Figure III. 2 Pièce en acier.

III.2 Cadre de contrôle

III.2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.1.a Plaque en acier

➤ **Désignation** : une plaque métallique en acier au carbone X60, d'épaisseur : 20 mm, en coupant un taçant de longueur : 123 mm, et de largeur 24 mm.

- **Nuance**: API5LX30
- **Composition chimique** %(1).
 - Fer(Fe) :96.42
 - Manganèse (Mn) :0.998
 - Crome (Cr) :0.030
 - Soufre (S) :0.074
 - Silicon (Si) : 0.827
 - Nickel (Ni) : 0.225
 - Cuivre (Cu) : 0.301
 - Molybdène (Mo) : 0.006

III.2.1.b Plaque en aluminium

➤ **Désignation** : une plaque métallique en aluminium, d'épaisseur :18.2 mm, en coupant un Taçant de longueur : 92,5 mm, et de largeur 29mm.

- **Nuance** : Aluminium 7075
- **Composition chimique** %(1).

- Aluminium (Al) :96.42
- Zinc (Zn) : 4.617
- Magnésium (Mg) :3.553
- Crome (Cr) :0.219
- Manganèse (Mn) :0.230
- Silicon (Si) : 0.392
- Titane (Ti) : 0.057
- Cuivre (Cu) : 0.839
- Fer (Fe) : 0.208
- Zirconium (Zr) : 0.057

III.2.2 Création du défaut

Pour la création d'une hétérogénéité (défaut) à l'intérieur des plaques, nous avons Percé un trou sur les deux plaques comme il est montré dans les figures (III.3, III.4).

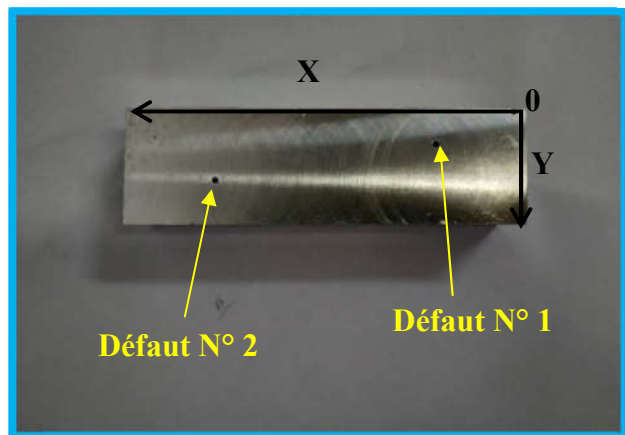


Figure III.3 Création des défauts sur la plaque d'aluminium.

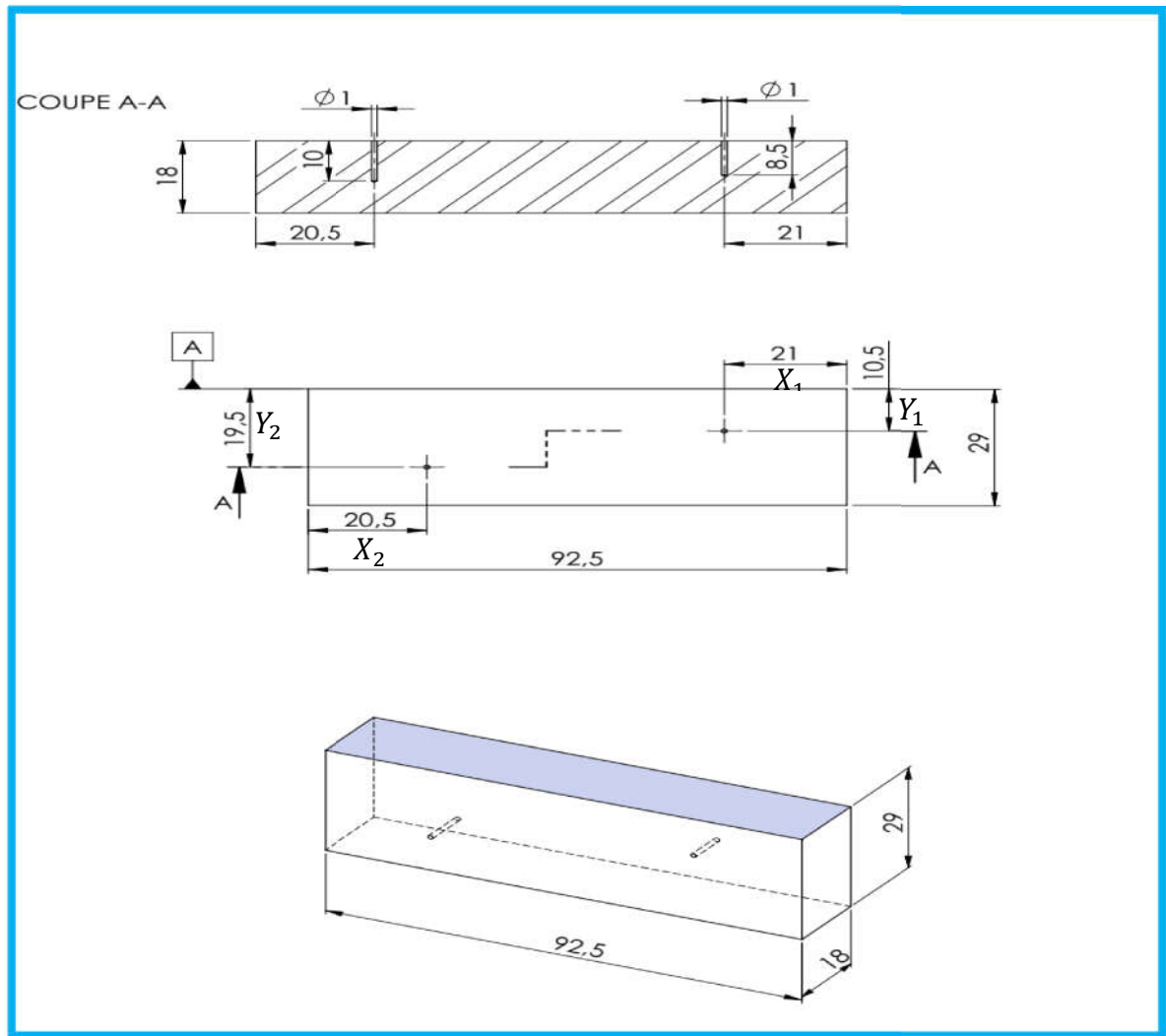


Figure III. 4 Mise en plan échantillon aluminium.

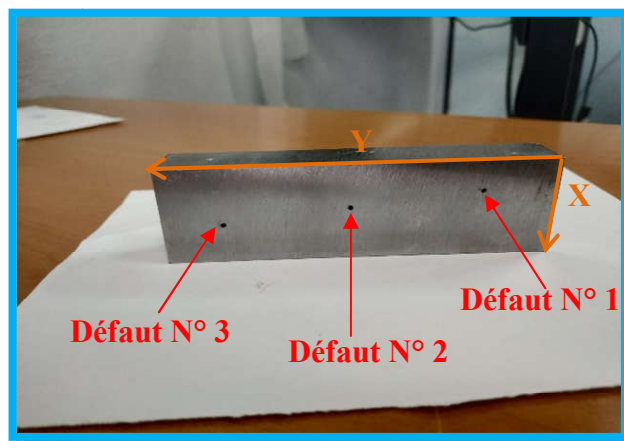


Figure III. 5 Création des défauts sur la plaque acier.

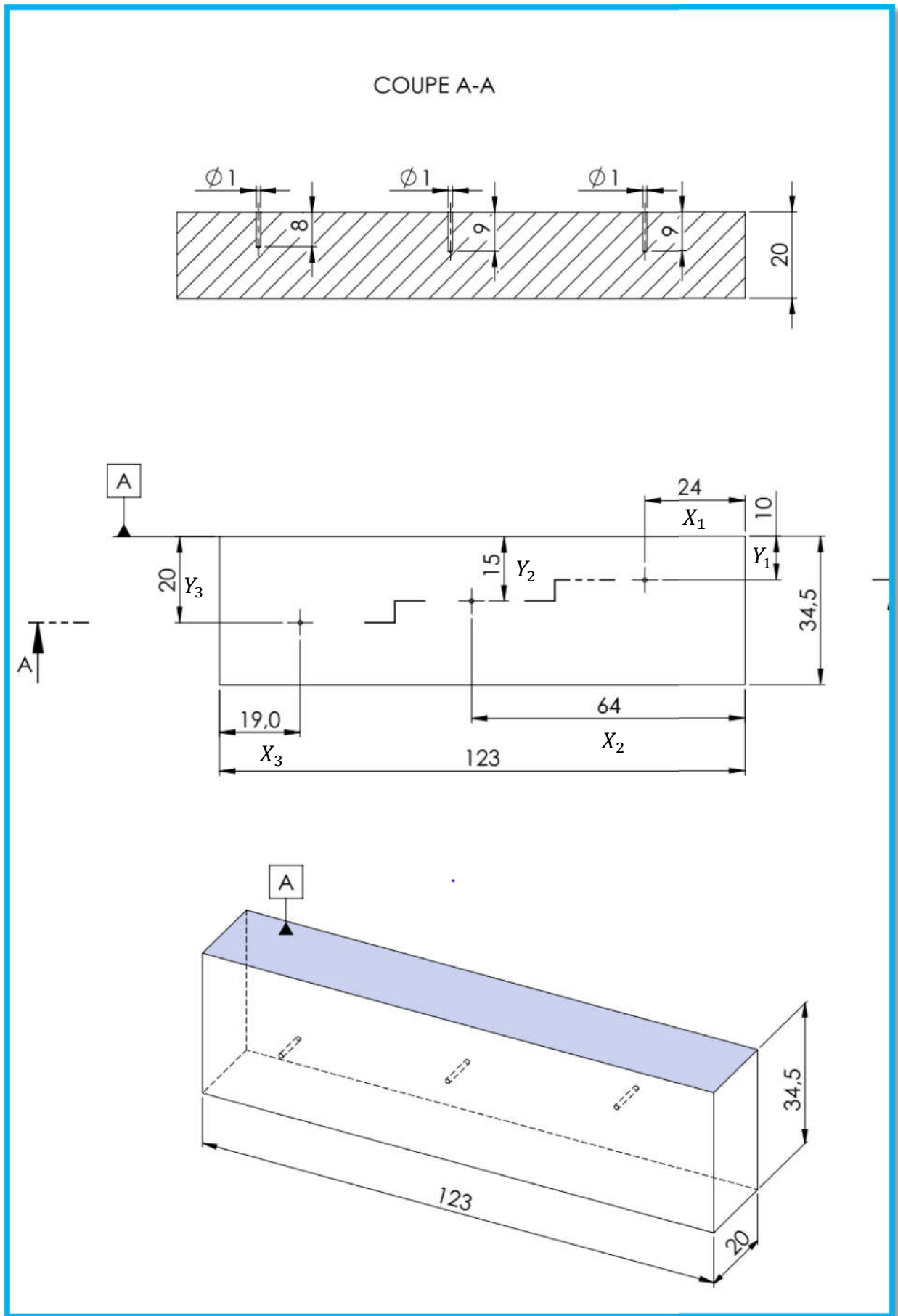


Figure III. 6 Mise en plan échantillon acier.

III.3 Préparation du contrôle

Avant d'entamer le contrôle il faut bien choisir la procédure de contrôle, elles existent plusieurs procédures selon le type de contrôle et le niveau d'inspection et le critère d'acceptation.

- Notre procédure dans ce travail pratique consiste à décrire les étapes suivantes :
 - Le choix de la méthode d'évaluation.
 - L'adoption de la méthode cascade pour le déroulement de contrôle.
 - L'étalonnage de l'appareillage.
 - Les critères du pouvoir réfléchissant.
 - Méthode de dimensionnement.

III.3.1 Choix de la méthode d'évaluation

- Pour le présent travail nous allons exposer trois méthodes d'évaluation, chacune donne une probabilité différente de détection des défauts. [11].

- Ces méthodes permettent l'évaluation des défauts vis-à-vis des critères d'acceptation par l'une des techniques suivantes :

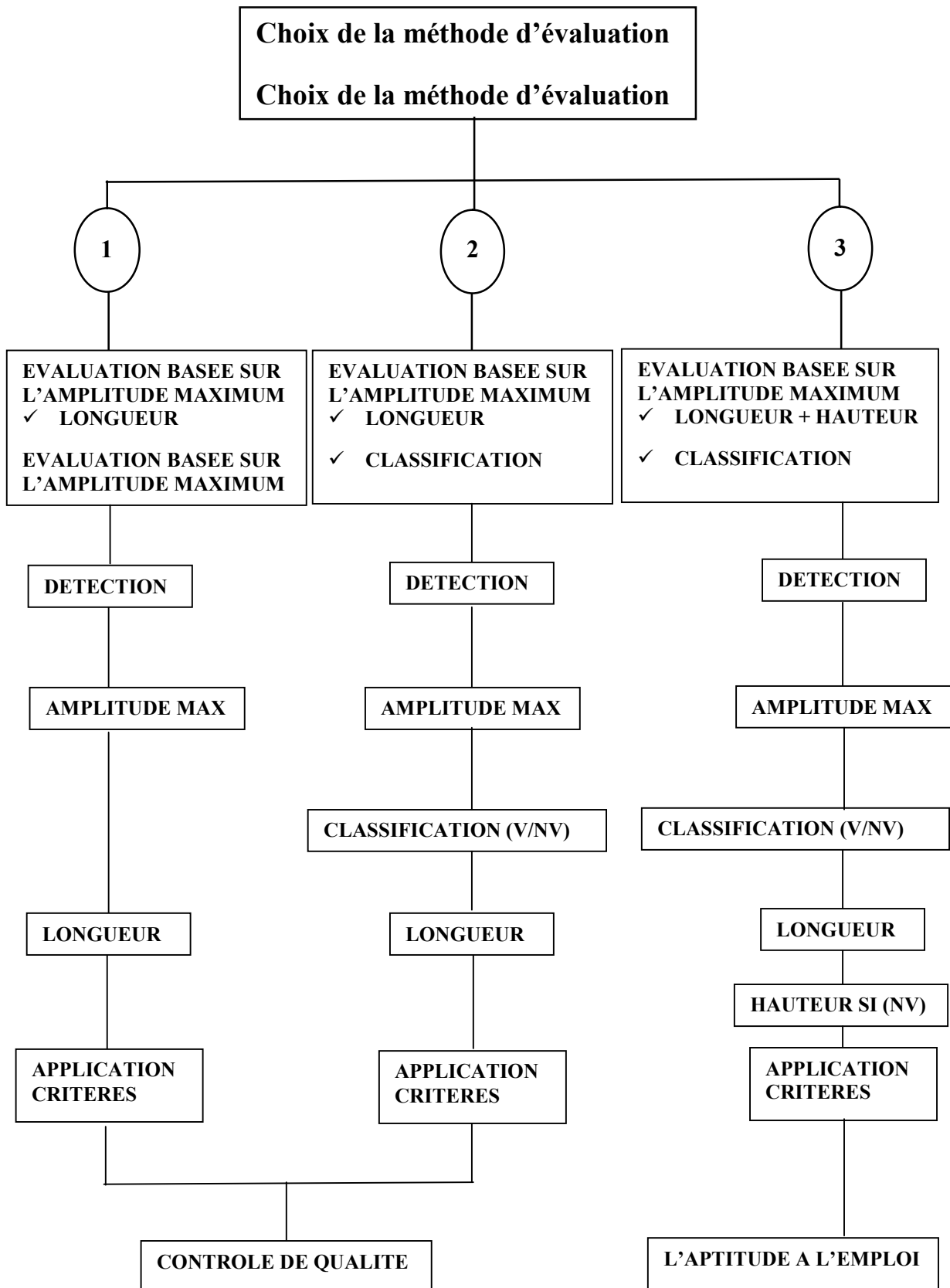
a) Evaluation basée sur l'amplitude du signal de l'indication et sur sa largeur.

b) Evaluation basée sur l'amplitude du signal de l'indication, sa classification (Volumique, Non volumique) et sa largeur.

c) Dans le cas particulier par exemple de l'application de l'aptitude à l'emploi, La deuxième technique sera complétée par une appréciation de la hauteur du Défaut si celui-ci a été classé non volumique.

❖ Ces trois méthodes sont schématisées par l'organigramme III.1

Pour notre travail, nous avons adopté la deuxième méthode.



Organigramme III.1 Choix de la méthode d'évaluation.

LEGENDE *V* : Volumique ; *NV* : Non Volumique

III.3.2 Méthode de cascade

La classification effectuée résulte de l'application en cascade de plusieurs critères discriminatoires [11]:

- Pouvoir réfléchissant.
- Réflectivité directionnelle.
- Allure de l'écho (A-SCAN).
- Comportement dynamique de l'écho.

✓ La procédure « cascade » est interrompue dès que l'un des critères est satisfait. A contrario, lorsque l'un des critères n'est pas satisfait, on passe à l'étape suivante.

✓ Les angles nominaux des traducteurs utilisés pour la classification sont à priori les mêmes que ceux spécifiés pour la détection.

✓ La procédure cascade codifie une approche industrielle et définit des valeurs seuils en décibels (dB), soit par rapport à la courbe amplitude distance (CAD), soit entre différentes incidence de contrôle.

□ Le niveau d'évaluation ainsi que le diamètre du trou du bloc de référence à utiliser sont définis par avance.

□ Les valeurs seuils à utiliser dépendent du diamètre du trou des blocs de référence. Dans notre cas nous avons utilisé un bloc de référence dont le diamètre de trou $\varnothing = 1,5\text{mm}$, dont on utilisera les valeurs seuils mentionnées sur « L'organigramme III.6 »

✓ La procédure cascade comporte cinq étapes ayant chacune un rôle bien défini :

1^{ère} étape: Eviter de prendre en considération les indications peu Réfléchissantes.

2^{ème} étape : Toutes les indications fortement réfléchissantes sont considérées

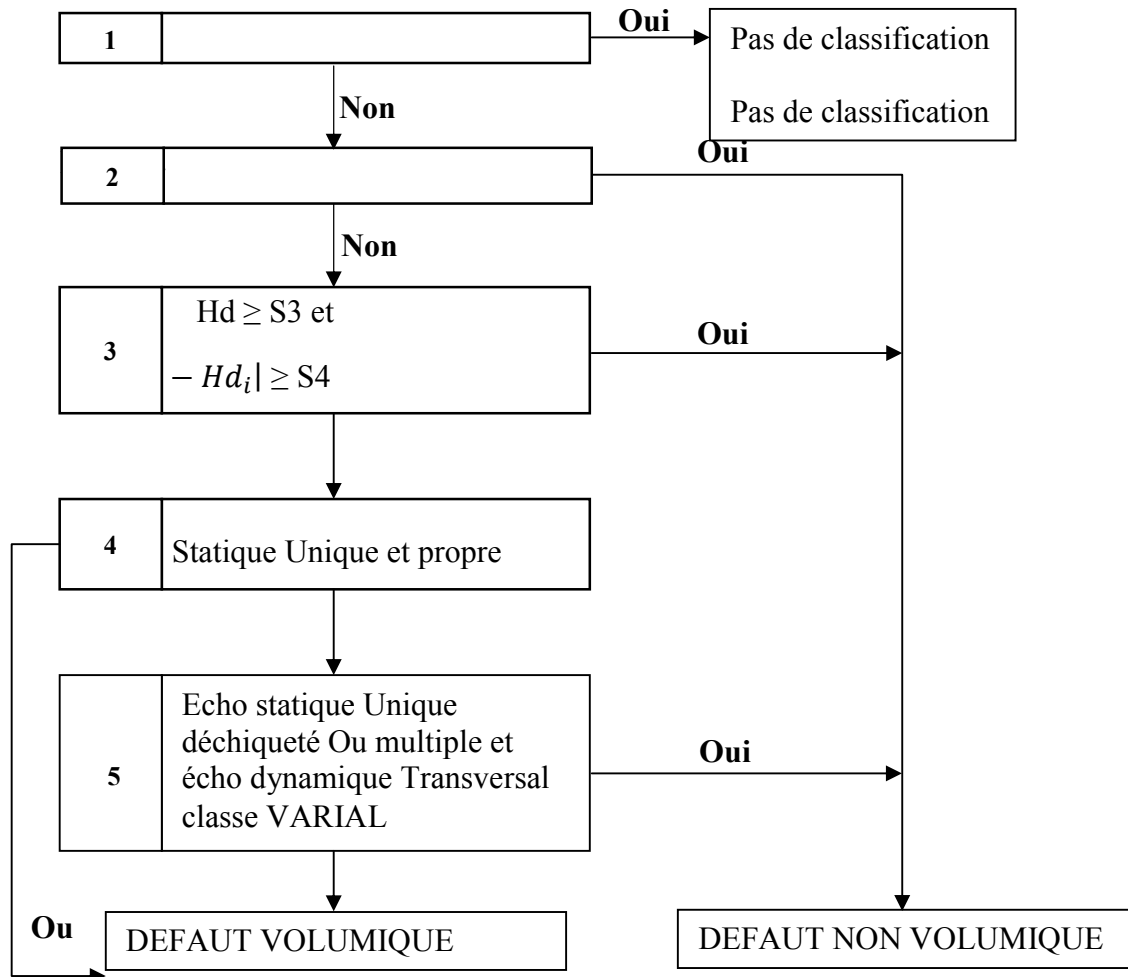
Comme des défauts non volumiques.

3^{ème} étape : Caractérisation préférentielle des manques de fusion sur chanfrein, entre passes ou collage inclusionnaire.

4^{ème} étape : Caractérisation préférentielle de certaines inclusions.

5^{ème} étape : Caractérisation référentielle des fissures.

S1	S2	S3	S4	Echo dynamique
Niveau D'évaluation	CAD + 8 dB	CAD -2dB	$\Delta Hd = 9 \text{ dB}$ $\Delta Hd = 15 \text{ dB}$	VARIAL



Organigramme III.2 Synthétique de la procédure cascade.

- a) (S1 = niveau d'évaluation) : le niveau d'évaluation est fixé généralement avant d'entamer le Contrôle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de classification si l'amplitude de l'écho est en dessous De cette valeur (sauf spécification contraire dans la procédure).
- b) (S2=CAD+8dB):si l'écho de défaut est deux fois et demi plus réfléchissant Que la CAD prise comme référence, le défaut est classé non volumique.
- c) (S3=CAD – 2dB) : si le pouvoir réfléchissant atteint au moins 80% de la CAD prise Comme référence et s'il existe un déséquilibre de réflectivité égal au moins à S4 Alors le défaut est classé non volumique :
- Avec S4 = 9 dB pour les ondes transversales à 4MHz.

- Avec $S_4 = 15$ dB entre une incidence en ondes transversales et une incidence en ondes longitudinales

- Les incidences i de contrôle utilisées sont séparées d'au moins 10° . Les comparaisons doivent être effectuées sensiblement dans la même zone du défaut.

d) Prise en compte des comportements les plus pénalisants. Le diagnostic doit être Redondant pour au moins 2 incidences de contrôle.

e) Si l'écho dynamique n'est pas VARIAL, le défaut est classé volumique, le défaut est classé volumique (VAROUL, CLOCHE).

Remarque : les valeurs mentionnées sur la présente figure sont à utiliser lorsque les échos de référence sont obtenus sur des génératrices d'un diamètre de 1,5 mm.

III.4 Etalonnage de l'appareillage

En métrologie, l'étalonnage est une opération qui concerne les appareils de mesure ou de restitution de données. Deux appareils différents — de conception différente, mais Aussi deux appareils de la même gamme (même marque, même modèle) ne Réagissent pas exactement de la même manière. Il faut donc une procédure Permettant d'obtenir le même résultat à partir de la même situation initiale. [1].

III.4.1 Matériel utilisé

- **Appareil à ultrasons :** D-10+ numérique.

- **Producteur :** Sonatest « France ».

- **Traducteurs :** -palpeur droit « OL », $\varnothing 10$, 4MHz.

- palpeur à angle « OT », « 45° », 2MHz 8*9, « 70° », 4MHz, 8*9

- **Blocs d'étalonnages :** V1. V2

- **Blocs de référence :** ce sont des blocs réalisés dans un matériau présentant des caractéristiques acoustiques voisines, qui présentent des réflecteurs artificiels tels que:

- des trous cylindriques à fond plat,

- des génératrices de trous cylindriques,

- des rainures ou entailles.



Figure III. 7 Matériel utilisé.

III.4.2 L'étalonnage de la base du temps :

L'étalonnage de la base de temps de l'appareil de contrôle a pour but d'établir une correspondance entre la position d'un écho en nombre de carreaux sur l'écran et le Parcours (en mm) de l'onde ultrasonore entre le point d'entrée dans la pièce et le Réflecteur qui est à l'origine de l'écho. (Aller simple).

L'étalonnage prend en compte un « aller simple » de l'onde dans la pièce pour faciliter l'interprétation et le positionnement ultérieur, mais en réalité l'onde fait un « Aller-retour », c'est-à-dire le double parcours. [13]

Il y a deux réglages successifs à prévoir pour l'étalonnage de la base du temps :

1. Réglage qui prend en compte les caractéristiques du matériau et l'échelle choisie. Ce réglage permet d'étaler plus ou moins l'échelle horizontale pour aboutir à une échelle représentative en mm par carreau.
2. Réglage qui prend en compte les caractéristiques du transducteur et couplage : ce réglage permet de compenser le temps de parcours préliminaire dans le transducteur afin que la position zéro corresponde à un parcours sonore (PS) nul (entrée de l'onde dans le matériau).



Figure III. 8 Echo de fond et répétitif.

III.4.3 Vérification du pouvoir de résolution :

Le pouvoir de résolution est relié non pas au palpeur simplement mais à l'appareillage à ultrason tout entier (à la chaîne de contrôle : appareil, câble, palpeur). Un appareillage à ultrason possède un bon pouvoir de résolution si l'on peut observer sur l'écran deux échos nets et bien séparés correspondants à deux obstacles proches l'un de l'autre sur L'axe du faisceau.

La position « H » du palpeur sur le bloc d'étalonnage N°1 sert au contrôle du pouvoir

De résolution lequel est d'autant meilleur que les trois échos obtenus sont nettement Séparés les uns des autres.[1],[13].

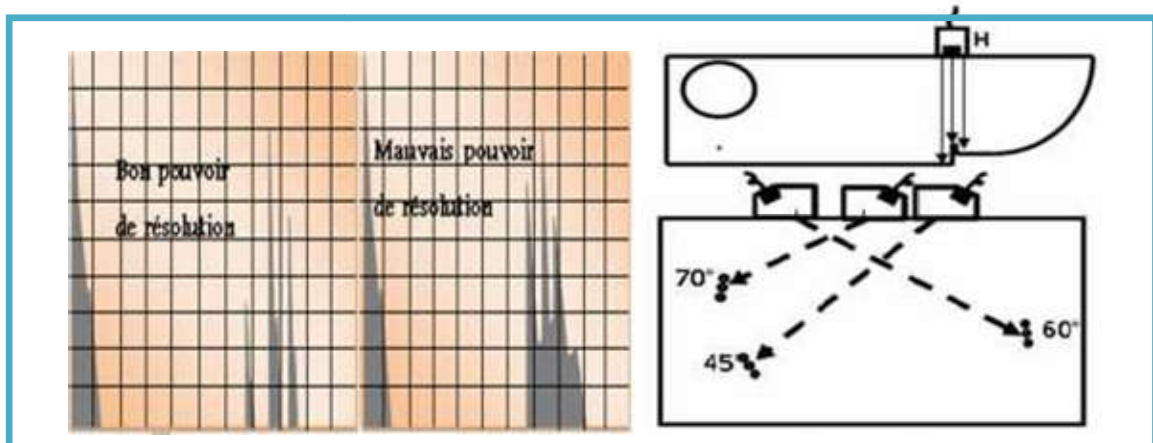


Figure III. 9 Vérification du pouvoir de résolution.

Selon la norme : (NF A 09 320) : échelle : 100 mm (Acier), 2^{ème} et 3^{ème} écho à 80% de La hauteur de l'écran et mesure de la largeur du 1^{er} écho à 20% de la hauteur. Si la Largeur \leq 6mm (acier), alors le, pouvoir de résolution est bon, sinon nous avons un Mauvais pouvoir de résolution.

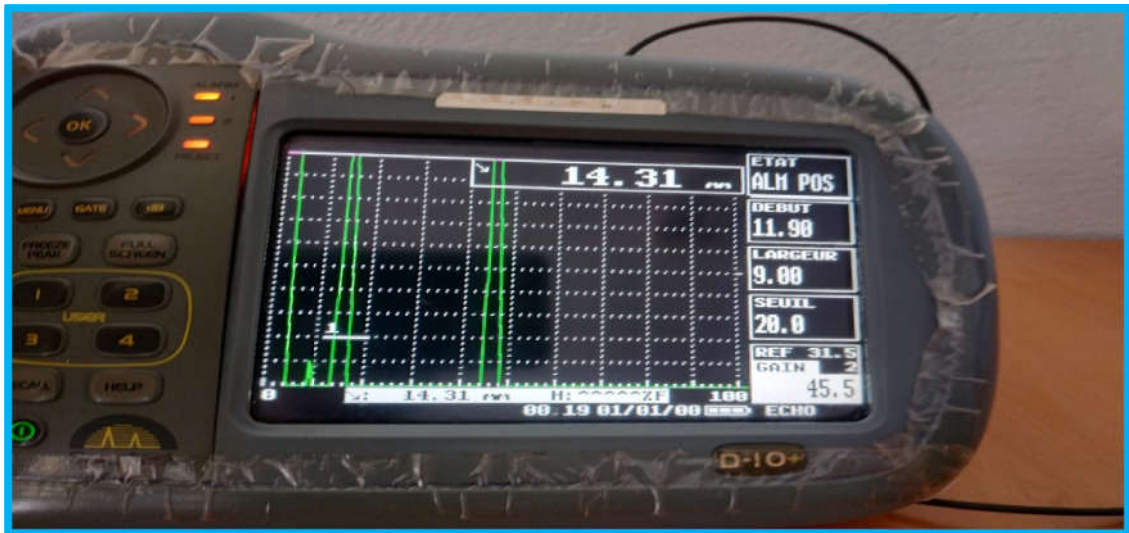


Figure III. 10 Résolution obtenue par un palpeur droit.

III.4.4 Vérification de la linéarité horizontale et verticale

- **Linéarité horizontale** : Les échos de fonds répétitifs sont équidistants sur les Graduations correspondantes théoriquement avec une tolérance maximale de 1% de la Longueur graduée de l'écran.

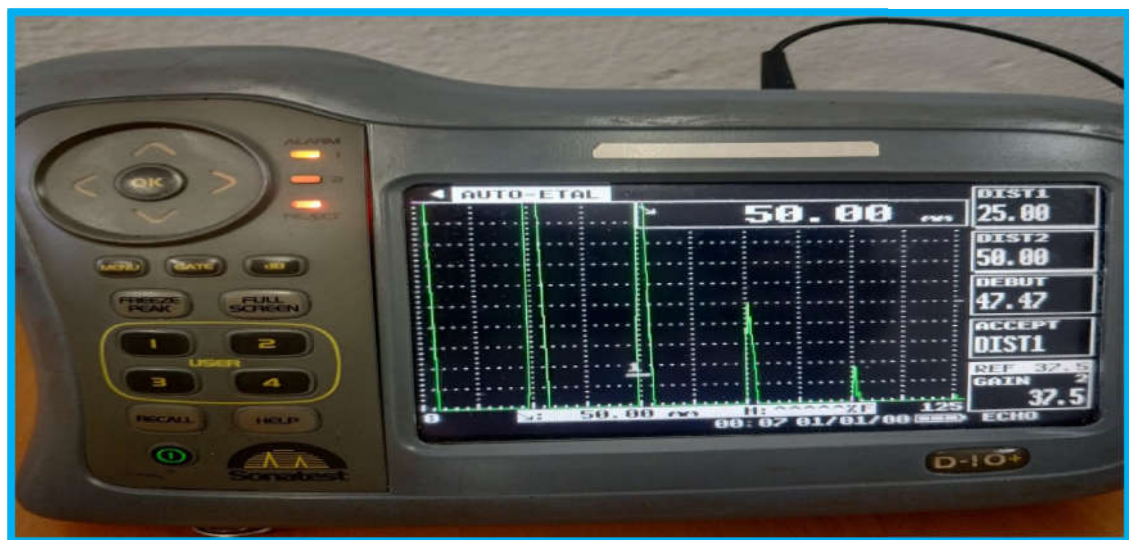


Figure III. 11 Vérification de la linéarité horizontale

- **Linéarité verticale**: Prenant un écho quelconque et on l'amplifie par + 6 dB, si Le pourcentage de son amplitude se double sur l'écran avec une tolérance de 2%, c'est-à-dire nous avons une bonne linéarité verticale.



Figure III. 12 Vérification de la linéarité verticale.

III.4.5 Paramètres de réglage et d'étalonnage d'un appareil à ultrasons

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

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

III.4.5.a Types d'étalons

Cale étalon V1 normalisé EN12223 pour les grands Palpeurs.

Cale étalon V2 normalisé EN27963 pour les palpeurs miniatures.

Étalon en escalier 3421.



Figure III. 13 Types des cales étalons.

III.4.5.b Vérification des caractéristiques des palpeurs :

➤ Palpeur droit

• Détermination de la zone de silence ou la zone morte :

La plus petite distance au-dessus de laquelle un réflecteur donné ne fournit plus un écho net est bien séparé, de l'impulsion initiale détermine (zone morte).

Pour déterminer la zone morte de notre palpeur droit nous avons utilisé une cale à gradins « t » correspond à la durée de l'émission. Pendant ce temps, tout écho correspondant à un défaut ne sera pas visualisé, donc non détecté, puisque son écho sera superposé à celui de l'émission.

« ZM » la zone morte (ou zone de silence) peut être assimilée à une distance.

La détermination de cette zone est donc nécessaire avant tout contrôle avec un «Palpeur droit», afin de connaître avec précision l'étendue du contrôle.

Il suffit de mettre le palpeur sur une position « P » de la cale à gradins correspondante à une épaisseur « e », puis voir si l'écho de ce réflecteur est séparé du signal d'émission, On déplace le palpeur sur une position « P' » correspondante à une épaisseur « e' » Inférieure à « e » et ainsi de suite jusqu'à une position correspondante à une épaisseur Minimum où l'écho du réflecteur arrive presque à toucher le signal d'émission. Et on Dit que la zone de silence est égale à cette épaisseur minimum.

Remarque : Si un contrôle à 100% de la pièce est exigé, c'est un examen près de la surface doit Être effectué alors un « relais » peut être adapté au palpeur ou la technique par Immersion doit être adoptée. [1], [13].

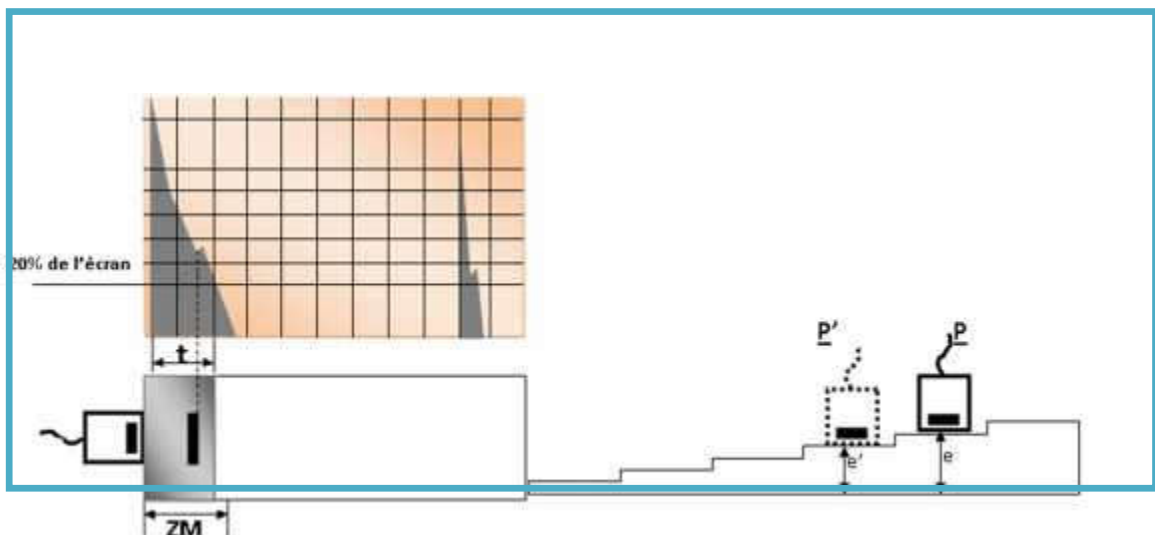


Figure III. 14 Détermination de la zone morte.

Pour notre palpeur la zone de silence égal à 4 mm.

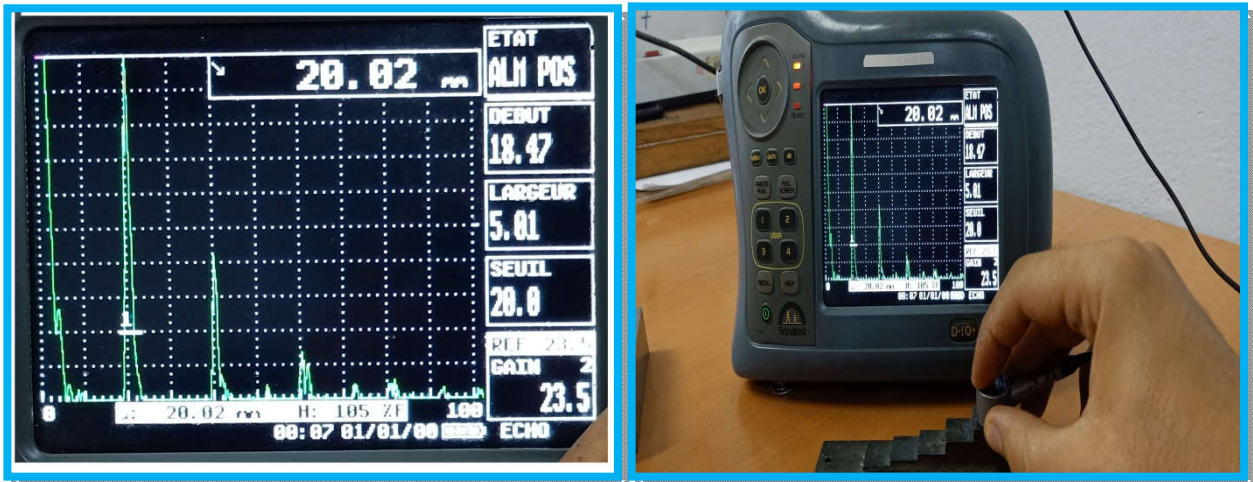


Figure III. 15 Détermination de la zone morte de notre palpeur.

➤ **Palpeur à angle**

• **Détermination du point d'émergence (ou d'incidence)**

Lorsque l'écho atteint son maximum d'amplitudes, le « point d'émergence » du faisceau Ultrasonore coïncide avec le centre de l'arrondi de (rayon=100mm) exactement. [13].

On peut lire la graduation qui correspond sur face latérale du palpeur.

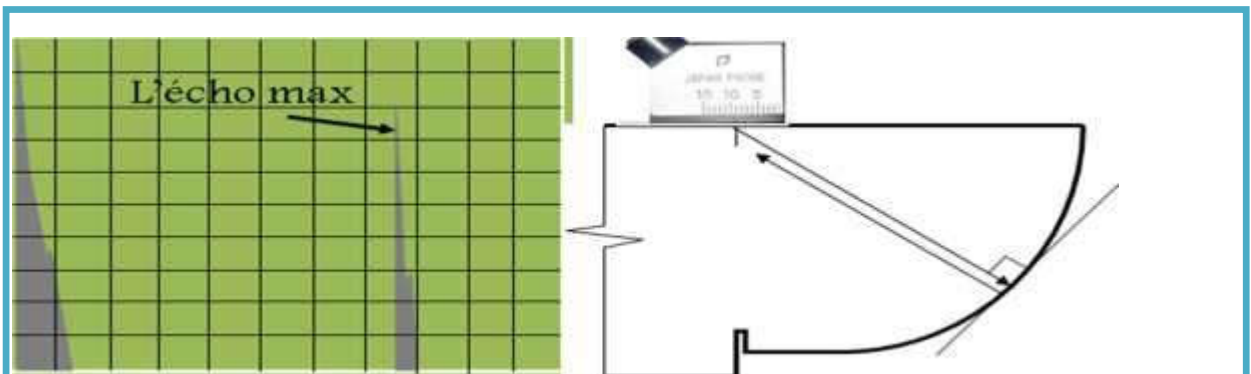


Figure III. 16 Détermination du point d'émergence.

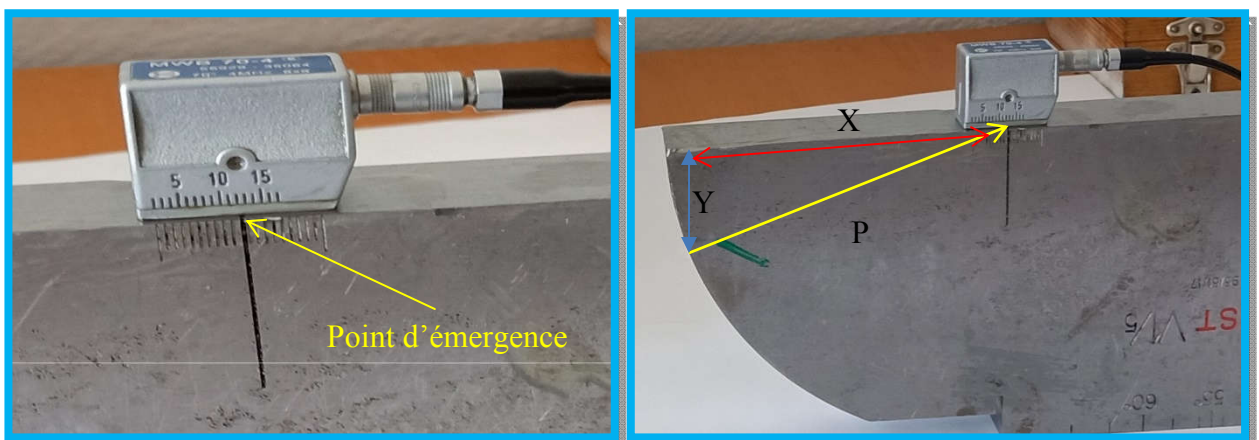


Figure III. 17 Position de point d'émergence.



Figure III. 18 Echo détermination de point d'émergence

Dans notre cas nous avons trouvé les points suivants :

$$P = X/\sin 45^\circ = 93.97/\sin 45^\circ = 100\text{mm}$$

Palpeur (OT 70°) : PE=12.8mm ; P = 100mm ; X = 93,97mm ; Y = 34.20mm.

Palpeur (OT 45°) : PE=13mm ; P= 100mm ; X= 70.8mm ; Y= 70.8mm.

Avec :

«PE» : le point d'émergence.

• Détermination de l'angle de réfraction

Lorsque l'écho atteint son maximum d'amplitude le prolongement de l'axe du faisceau passe exactement par le centre de l'arrondi de diamètre (d=50mm). [13].

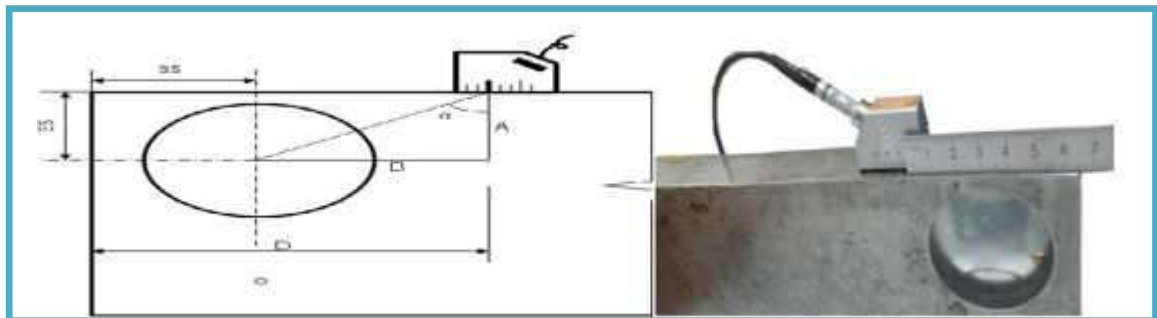


Figure III. 19 Détermination de l'angle de réfraction.

L'angle de réfraction peut être calculé à l'aide de la formule :

$$\tan \alpha = \frac{B}{A}$$

Car la lecture directe sur la cale est souvent imprécise puisque les graduations sont inscrites de 5° en 5°. (D est mesuré à l'aide d'un réglet, B = D – 35 ; A = 30).

- **Palpeur (OT 45°) :** d=67mm, B=32mm, $\alpha=46.84^\circ$
- **Palpeur (OT 70°) :** d=118mm, B=83mm, $\alpha=70.12^\circ$

III.4.6 Traçage de la courbe amplitude distance (CAD)

La courbe de correction amplitude-distance (DAC) sert à tracer la variation d'amplitude des réflecteurs de la même taille situés à des distances différentes de la sonde. Ces Réflecteurs créent des échos dont l'amplitude dans le champ lointain diminue avec la Distance en raison de l'atténuation et de la divergence du faisceau pendant son trajet à Travers la pièce inspectée. La courbe DAC compensent graphiquement l'atténuation du matériau, les effets du champ proche et la divergence du faisceau. Dans une Configuration DAC, l'amplitude des échos provenant de réflecteurs de la même taille que les réflecteurs utilisés pour l'étalonnage correspondront à la hauteur de la courbe, Peu importe la profondeur ou la distance. De la même manière, les réflecteurs plus Petits ou plus grands que les réflecteurs utilisés pour l'étalonnage généreront des échos Au-dessous ou au-dessus de la courbe.

Dans notre cas nous avons utilisé un réflecteur de 1.5mm de diamètre percé dans le Bloc d'étalonnage pour tracer la CAD en utilisant 05 parcours sonores différents afin De tracer 05 points. [1], [2]

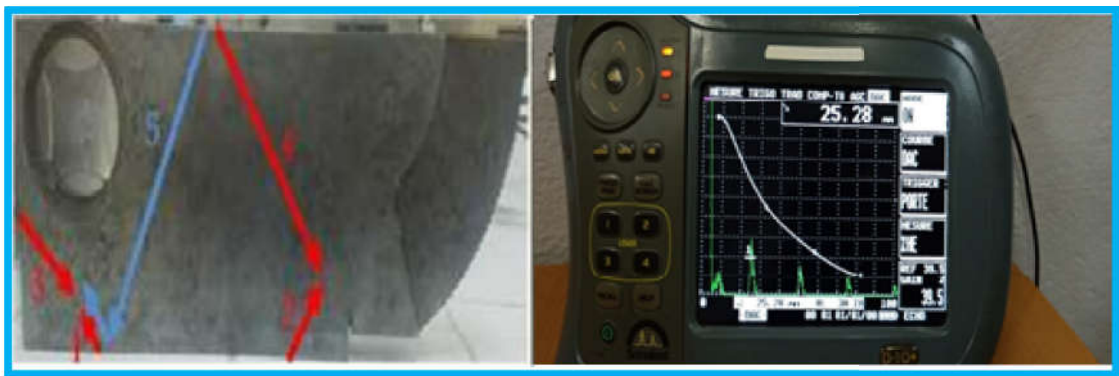


Figure III. 20 Traçages de la CAD.

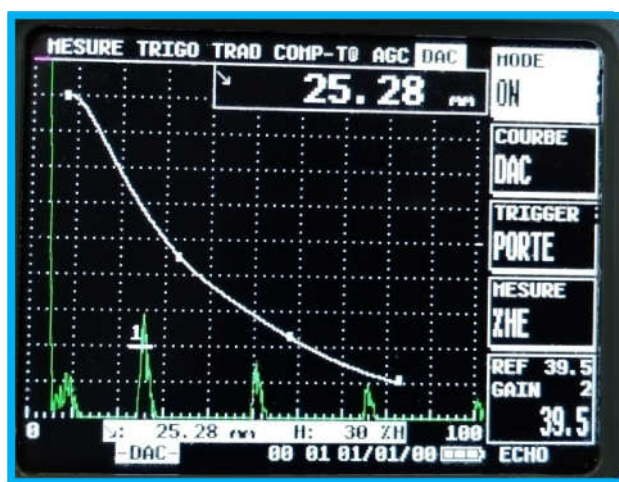


Figure III. 21 Zoom de la courbe de traçage de la CAD.

Palpeur (OT 70°) :

- $G=46\text{db}$ Avec :
- « G » la valeur du gain en décibel

III.4.7 Correction du transfert

La CAD ne peut être utilisé lors du contrôle d'une pièce que celle-ci atténue les ultrasons de même façon que la pièce de référence. Ce point doit être vérifié.

La correction de transfert fait appel à deux transducteurs d'angle identiques à celui utilisé pour tracer la CAD initiale, l'un travaillant en émetteur l'autre en récepteur. On utilise d'abord le bloc de référence. Les transducteurs sont placés en opposition, comme l'indique la figure III.18, l'écho reçu par le transducteur récepteur est amplifié de façon à ce que son sommet soit sur la CAD déjà tracée sur l'écran, on place ensuite les deux Transducteurs sur la pièce à contrôler. [1].

- Amplification sur la référence $G1=15\text{db}$
- Amplification sur la pièce $G2=9\text{db}$

$$\Delta G=G1-G2=6\text{db}$$

Le gain utilisé pour l'établissement de la CAD est 46db dans ce cas le nouveau gain est $46+9=55\text{db}$.

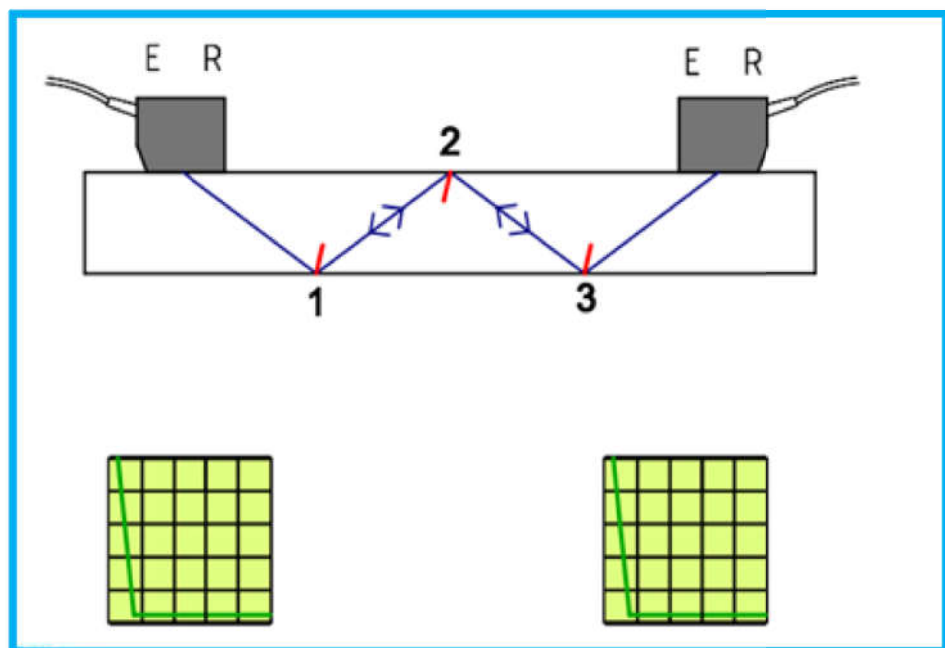


Figure III. 22 Contrôle de fissuration en peau, technique en opposition.

III.5 Détection de défauts dans le bloc étalon

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

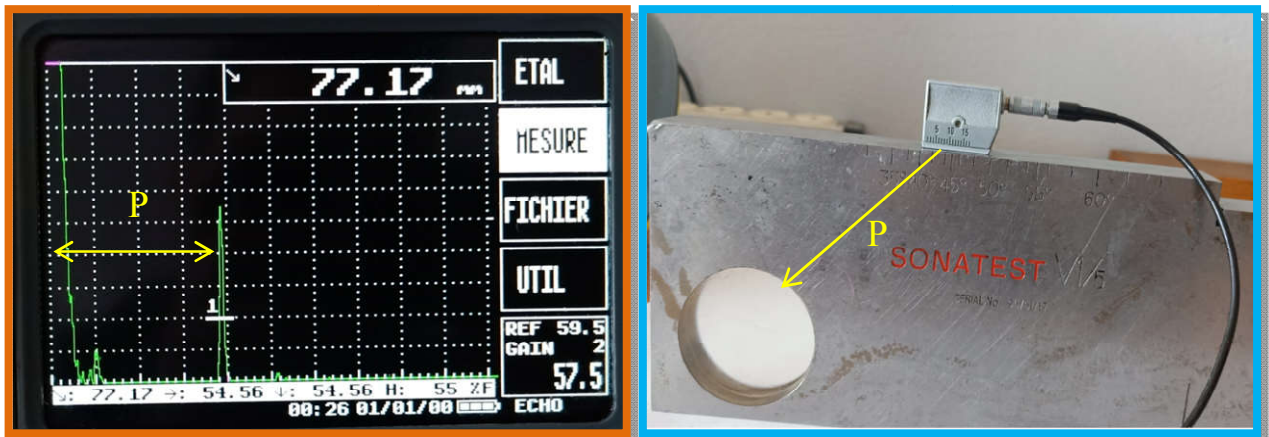


Figure III. 23 Recherche d'un trou de diamètre 50mm sur la cale.

- Le parcours ultrasonore $P = 77.17\text{mm}$
- La plage de mesure sur cadran 200mm (échelle 1 graduation=20mm)
- Un pic apparait à distance $3.85 \times 20 = 77\text{mm}$

➤ Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale



Figure III. 24 Recherche du trou de diamètre 2mm sur la cale.

Le parcours ultrasonore $P = 26.10\text{ mm}$

La plage de mesure sur cadran 200 mm (échelle 1 graduation=20mm)

Un pic apparait à distance $1.3 \times 20 = 26\text{mm}$

III.6 Exécution du contrôle

Pour notre travail, nous avons utilisé la méthode de réflexion, méthode déjà décrite dans le deuxième chapitre, c'est la méthode la plus utilisée, connaissant l'angle la propagation des ondes dans le matériau 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. [1]

Après avoir réussi à étalonner nous allons procéder au contrôle sur deux pièces Aluminium et Acier, en utilise deux palpeurs différent, palpeur droit et palpeur à angle.

III.7 Première expérience

III.7.1 Description de l'expérience

Cette expérience est basée sur la technique pulse-écho par contact le transducteur est placé directement sur la pièce à contrôler et la liaison acoustique est assurée par un gel spécial.

III.7.1.a Pièce aluminium

La pièce sous test est une plaque d'aluminium de dimension (92,5x 18x 29) mm, avec un défaut inséré à la profondeur de 8.5 et 10.

➤ Palpeur droit

Le transducteur est placé directement sur la pièce à contrôler et la liaison acoustique est assurée par un gel spécial.

Le défaut est un trou diamètre de 1mm où une porosité interne vide, Cette expérience ne nécessite qu'un seul transducteur pour émettre le signal ultrasonore et recevoir les échos des interfaces. Dans le signal réfléchi par l'échantillon d'aluminium, trois échos apparaissent consécutivement :

L'écho de signal d'émission(**E1**), l'écho de défaut (**Ed**), et l'écho de fond(**E2**).

L'écho reçu de l'échantillon est représenté dans la Figure III.25 et les figures III.26, 27.

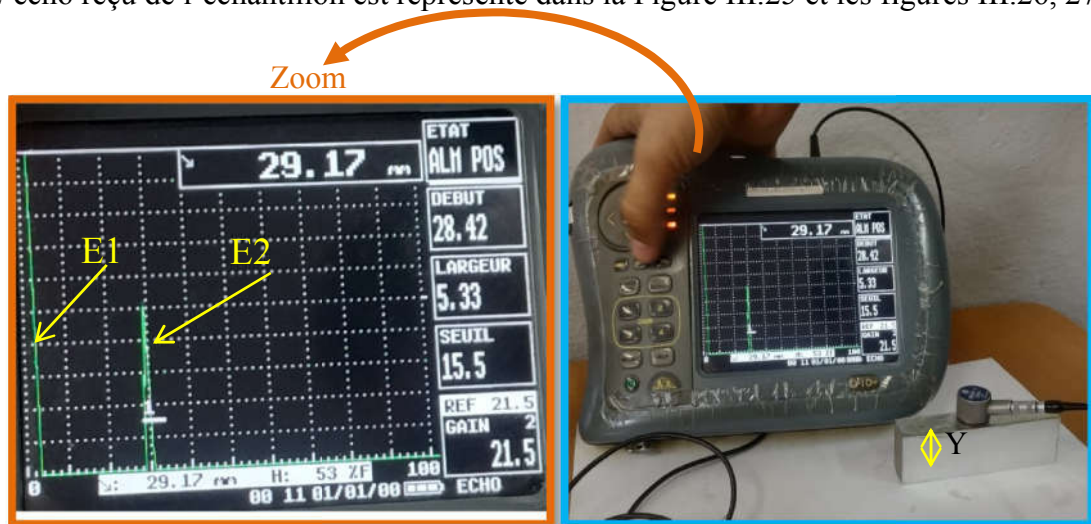


Figure III. 25 Pièce aluminium saine.

En constaté pour Echo (E2) que $Y=29.17\text{mm}$ qui représente l'épaisseur de pièce

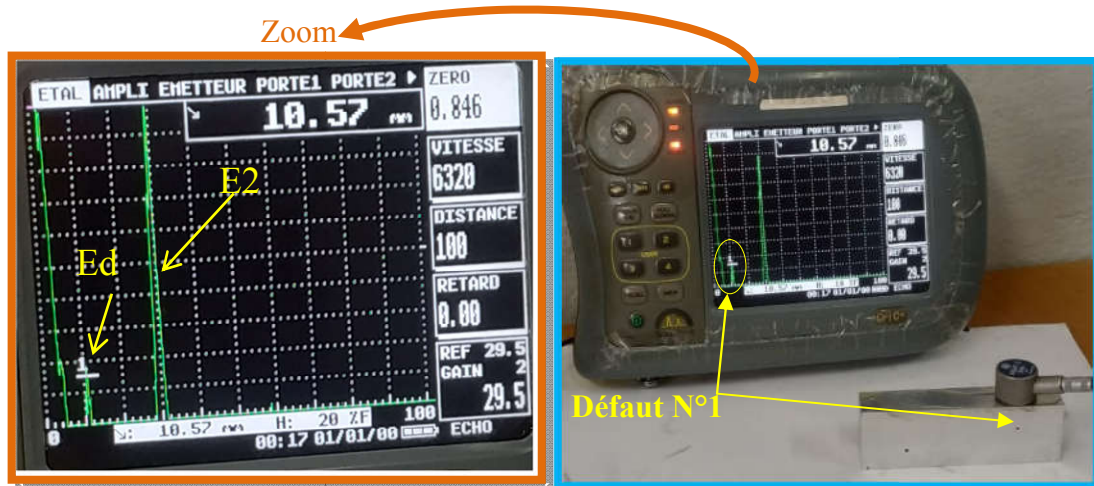


Figure III. 26 Recherche du premier défaut.

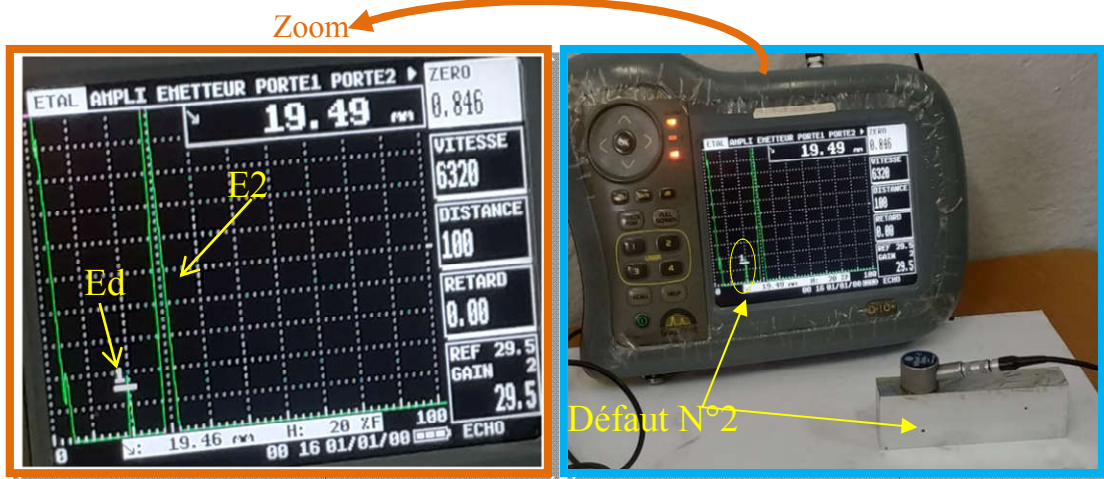


Figure III. 27 Recherche du deuxième défaut.

Interprétation

Le premier pic représente le signal d'émission de la face de l'échantillon, les échos qui suivent sont des pics qui représentent l'intérieur du matériau.

On sait que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'aluminium est égale à 6320m/s et on a le deuxième pic décalé par rapport au premier donc le deuxième pic représente l'écho de défaut de l'échantillon.

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon d'aluminium a une épaisseur de 29mm et présente deux défauts situés à une distance $Y_1 = 10.5\text{mm}$ de la première face pour le premier défaut et une distance $Y_2 = 19.5\text{mm}$ de la première face pour le deuxième défaut.

➤ Palpeur à angle

En utilise le palpeur a angle «OT 70° », 4MHz , 8×9

L'écho reçu de l'échantillon est représenté dans la Figure III.28 et la figure III.29.

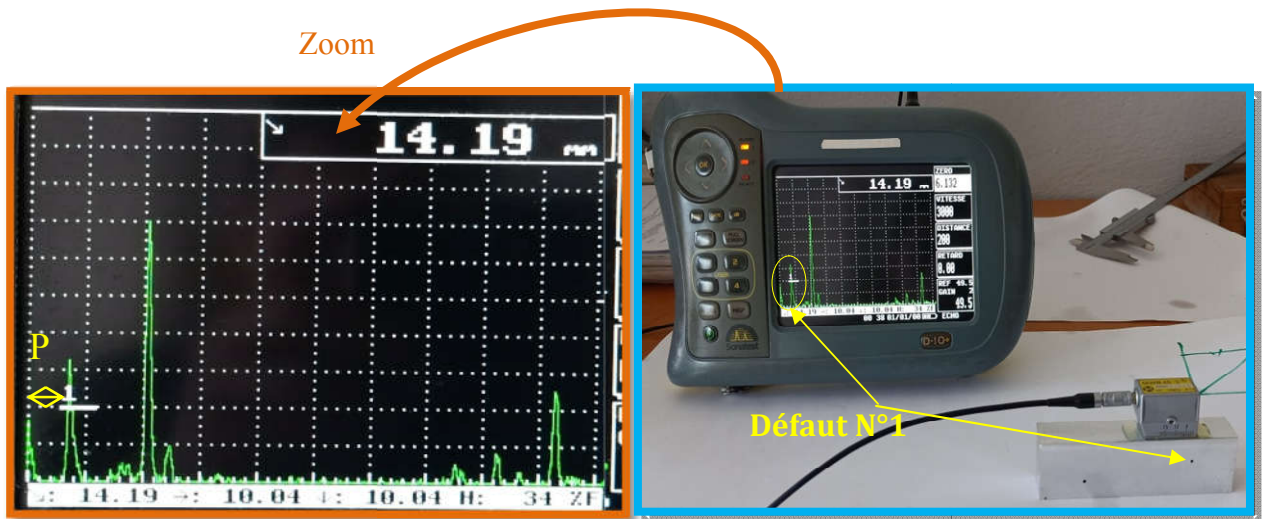


Figure III. 28 Recherche de premier défaut.

La plage de mesure sur cadran 200mm (échelle 1 graduation=20mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale Hmax apparaît à : $P = 0.7 \times 20 = 14.19 \text{ mm}$.

Correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à : $d = P \times \sin\theta = 14,19 \times \sin 45^\circ = 10.3 \text{ mm}$.

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

$$d = P \times \cos\theta = 14.19 \times \cos 45^\circ = 10.3 \text{ mm}$$

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir (figure III.3), aux coordonnées : $X_1=21 \text{ mm}$ et $Y_1=10.3 \text{ mm}$ sur une profondeur $h=8.5 \text{ mm}$.

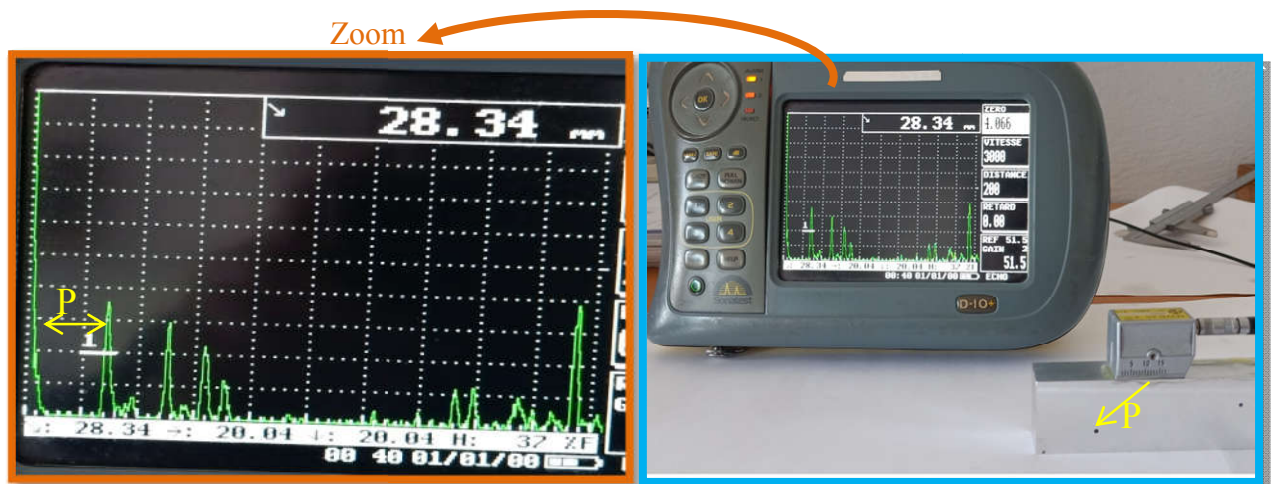


Figure III. 29 Recherche du deuxième défaut.

Le pic sur écran d'amplitude maximale Hmax apparaît à : $P = 1.4 \times 20 = 28 \text{ mm}$.

Correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à : $d = P \times \sin\theta = 28,34 \times \sin 45^\circ = 20.4 \text{ mm}$.

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

$$d = P \times \cos\theta = 28,34 \times \cos 45^\circ = 20.4 \text{ mm}$$

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir (figure III.3), aux coordonnées : $X_1=72\text{mm}$ et $Y_1=19.5 \text{ mm}$ sur une profondeur $h=10\text{mm}$.

III.7.1.b Pièce acier

La pièce sous test est une plaque d'acier de dimension (123x 20x 34.5) mm avec un défaut inséré à la profondeur de 8 mm et 9 mm.

➤ Palpeur droit

En utilise le palpeur droit « OL », Ø10, 4MHz.

L'écho reçu de l'échantillon est représenté dans les Figures III.30 - 33.

The figure consists of two side-by-side images. The left image is a zoomed-in view of the ultrasound device's screen. The screen displays a grid with a single sharp vertical peak labeled 'E2' at a distance of 34.66 mm. The screen also shows various parameters: ETAL, ANPLI, EMETTEUR, PORTE1, PORTE2, ZERO (0.846), VITESSE (5930), DISTANCE (100), RETARD (0.00), REF (29.5), GAIN (2), and 29.5. The right image shows the ultrasound device in its physical form, with a probe connected to it and positioned on a rectangular steel block. An orange arrow labeled 'Zoom' points from the right image to the left image.

Figure III. 30 Pièce acier saine.

En constaté pour Echo (E2) que $Y=34.66 \text{ mm}$ qui représente l'épaisseur de pièce

The figure consists of two side-by-side images. The left image is a zoomed-in view of the ultrasound device's screen. The screen displays a grid with multiple vertical peaks. The first peak is labeled 'Défaut N°1' and is at a distance of 10.10 mm. The screen also shows various parameters: ETAL, ANPLI, EMETTEUR, PORTE1, PORTE2, ZERO (0.846), VITESSE (5930), DISTANCE (100), RETARD (0.00), REF (45.5), GAIN (2), and 45.5. The right image shows the ultrasound device in its physical form, with a probe connected to it and positioned on a rectangular steel block. A yellow arrow labeled 'Défaut N°1' points to the first peak on the screen. An orange arrow labeled 'Zoom' points from the right image to the left image.

Figure III. 31 Recherche de premier défaut.

61

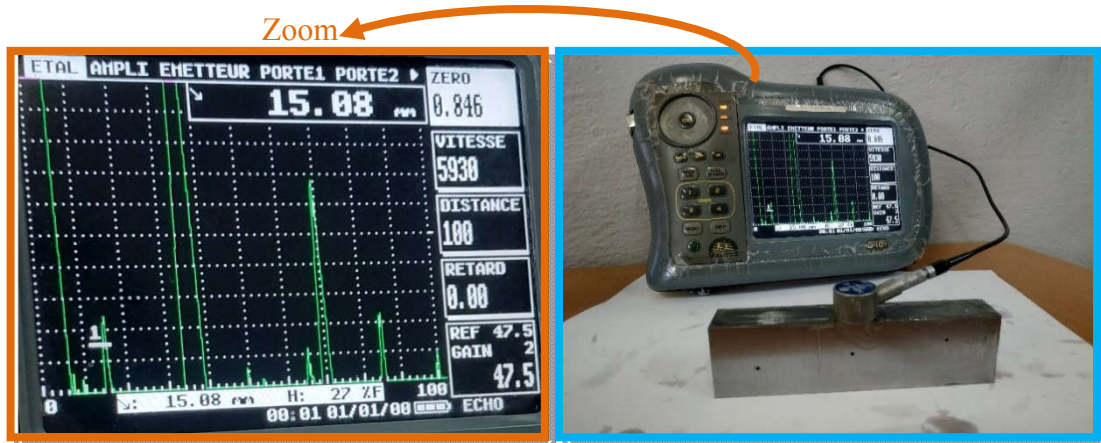


Figure III. 32 Recherche du deuxième défaut.

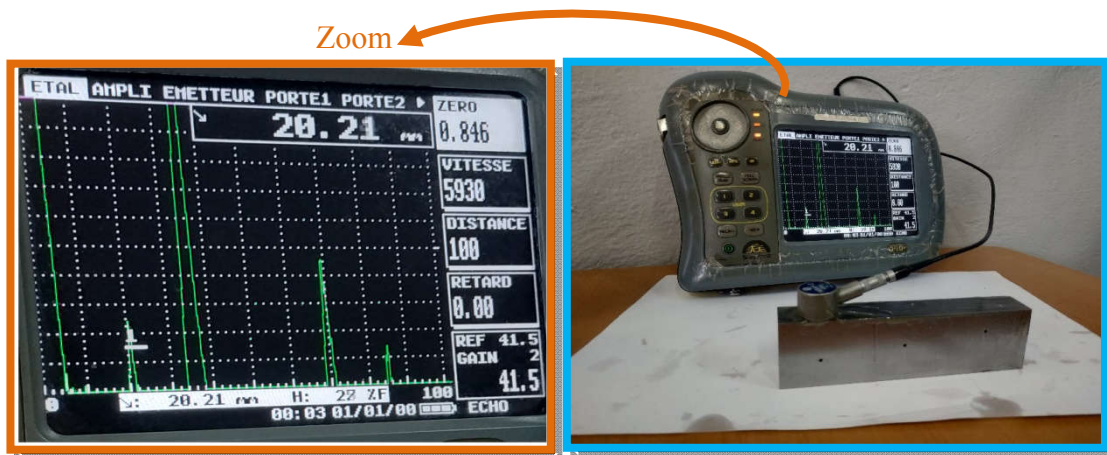


Figure III. 33 Recherche du troisième défaut.

Interprétation

Le premier pic représente le signal d'émission de la face de l'échantillon, les échos qui suivent sont des pics qui représentent l'intérieur du matériau.

On sait que la vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans l'acier est égale à 5930 m/s et on a le deuxième pic décalé par rapport au premier donc le deuxième pic représente l'écho de défaut de l'échantillon.

Les résultats obtenus que l'échantillon d'acier a une épaisseur de 34.5 mm et présente (3) trois défauts situés à une distance $Y_1 = 10 \text{ mm}$ de la première face pour le premier défaut et une distance $Y_2 = 15 \text{ mm}$ de la première face pour le deuxième défaut et $Y_3 = 20 \text{ mm}$.

➤ Palpeur à angle

On utilise le palpeur à angle « OT 70° », 4 MHz , 8×9

L'écho reçu de l'échantillon est représenté dans les Figures III.35, III.36 et III.37

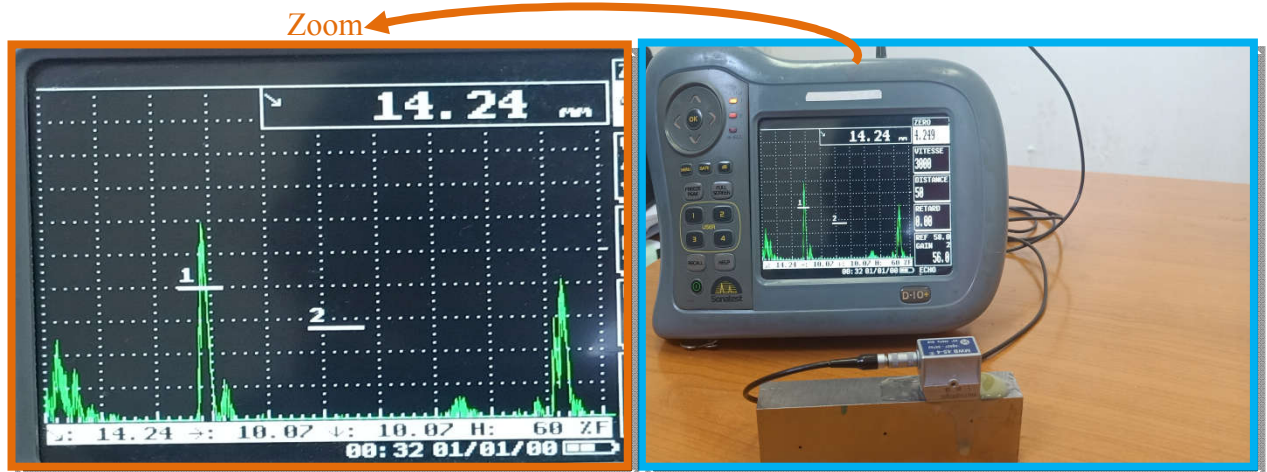


Figure III. 34 Recherche de premier défaut.

La plage de mesure sur cadran 50mm (échelle 1 graduation=5mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale H_{max} apparaît à : $P = 2.8 \times 5 = 14. \text{mm.}$

Correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à : $d = P \times \sin\theta = 14,24 \times \sin 45^\circ = 10.07 \text{mm.}$

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

$$d = P \times \cos\theta = 14.24 \times \cos 45^\circ = 10.07 \text{mm}$$

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir (figure III.6), aux coordonnées : $X_1=24 \text{mm}$ et $Y_1=10 \text{mm}$ sur une profondeur $h=9 \text{mm.}$

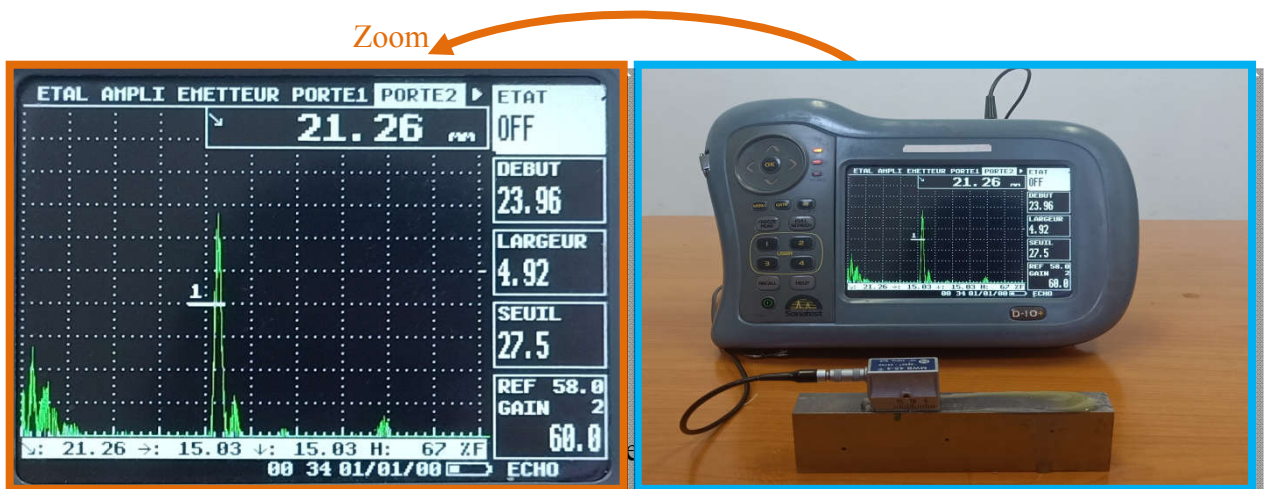


Figure III. 35 Recherche de deuxième défaut.

Le pic sur écran d'amplitude maximale Hmax apparaît à : $P= 4.2 \times 5 = 21\text{mm}$.

Correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à : $d=P \times \sin\theta = 21.26 \times \sin 45^\circ = 15.03\text{mm}$.

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

$$d= P \times \cos\theta = 21.26 \times \cos 45^\circ = 15,03\text{mm}$$

Le deuxième défaut est localisé par rapport au point de référence, voir (figure III.6), aux coordonnées : $X_2=64\text{mm}$ et $Y_2=15\text{ mm}$ sur une profondeur $h=9\text{mm}$.

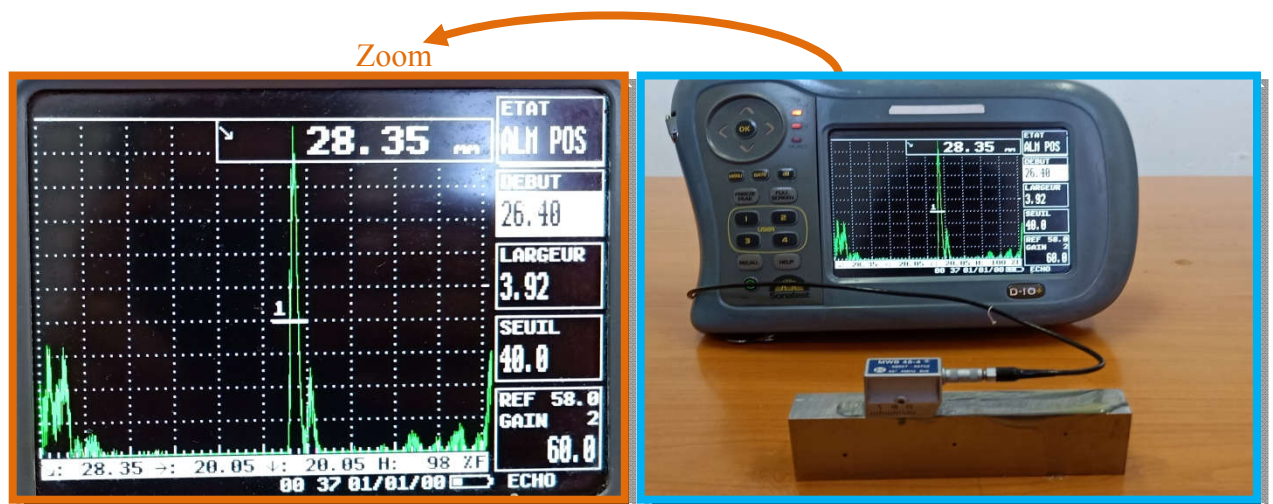


Figure III. 36 Recherche du troisième défaut.

La plage de mesure sur cadran 50mm (échelle 1 graduation=5mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale Hmax apparaît à : $P= 5.6 \times 5 = 28\text{mm}$.

Correspondant au parcours ultrasonore.

La distance entre le palpeur et le défaut suivant l'axe x est égale à : $d=P \times \sin\theta = 28.35 \times \sin 45^\circ = 20.05\text{mm}$.

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

$$d= P \times \cos\theta = 28.35 \times \cos 45^\circ = 20.05\text{mm}$$

Le troisième défaut est localisé par rapport au point de référence, voir (figure III.6), aux coordonnées : $X_3=64\text{mm}$ et $Y_3=15\text{ mm}$ sur une profondeur $h=8\text{mm}$.

III.7.2 Localisation du défaut

Le tableau en dessous montre les résultats obtenus comme il est indiqué sur les figures III.4 et III.6.

Tableau III. 1 Valeur de : vitesse de propagation, épaisseur d'échantillon, position du défaut et de Transducteurs trouvés.

Matériau	Vitesse (m/s)	Position défaut								
		Défaut N°1			Défaut N°2			Défaut N°3		
		X ₁	Y ₁	h	X ₂	Y ₂	h	X ₃	Y ₃	h
Acier	5930 m/s	24mm	10mm	9mm	64mm	15mm	9mm	104mm	20mm	8mm
Aluminium	6320m/s	21mm	10.5mm	8,5mm	20.5mm	19.5mm	10mm	/	/	/

III.8 Deuxième expérience

On a fait une application expérimentale dans l'entreprise ALFAPIPE pour contrôler de joint soudé d'une plaque Acier.

Dans l'entreprise ALFAPIPE, il existe une procédure du contrôle non destructif disponible au service contrôle en ligne : Contrôle par ultrason (US).

III.8.1 Dimension de pièce soudée

Tableau III. 2 Dimensions des pièces soudées.

Dimensions de plaque Acier	Epaisseur	9.5 mm
	Largeur	156 m
	Longueur	200 mm
	Chanfrein	en X
	Nuance	X70MPSL2



Figure III. 37 Plaque en acier assemble par soudage.

III.8.2 Création des défauts

Nous allons créer des défauts sur le cordon de soudure.



Figure III. 38 Création des défauts sur la plaque acier.

- Défaut N°1 : PRC (poche de retassure contenue).
- Défaut N°2 : porosités (inclusion du gaz).

III.8.3 Matériel utilisé

III.8.3.a Appareil à ultrasons USM 35

❖ Caractéristiques de l'appareil à ultrason USM 35

- Type de poste : Poste ultrasons type d'impulsion
 - Marque : Ge
 - Type : USM 35
 - N de série : 14603 a
 - Fréquence comprise entre 1 et 20 Mhz
 - Calibration manuel
 - Batterie rechargeable



Figure III. 39 Appareil d'US d'USM 35.

III.8.3.b Palpeur Droit et Angle 70° technique par réflexion (E/R)

La figure suivante montre un palpeur droit et à angle de 70°.



a) Palpeur Angle

b) Palpeur Droit

Figure III. 40 Différents palpeurs d'utilisés.

III.8.3.c Blocs d'étalonnages : ISO 7963 cales V2

Le bloc d'étalonnage ISO 7963 est représenté par la figure III. 41 .



Figure III. 41 Bloc étalonnage.

III.8.4 Exécution du contrôle

Premièrement, nous avons fait l'étalonnage de l'appareillage USM 35 et palpeur.

III.8.4.a Etalonnage et bloc d'étalonnage

✓ Étalonnage de l'appareil en ondes transversales et longitudinal

En utilisant la cale V 2 universelle d'étalonnage 7963.

Palpeur droit, 5MHz, pour l'étalonnage en angle longitudinal

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

Le palpeur {70°, 4MHz, 8*9 pour l'étalonnage en angle transversal}.

➤ Étalonnage par palpeur droit

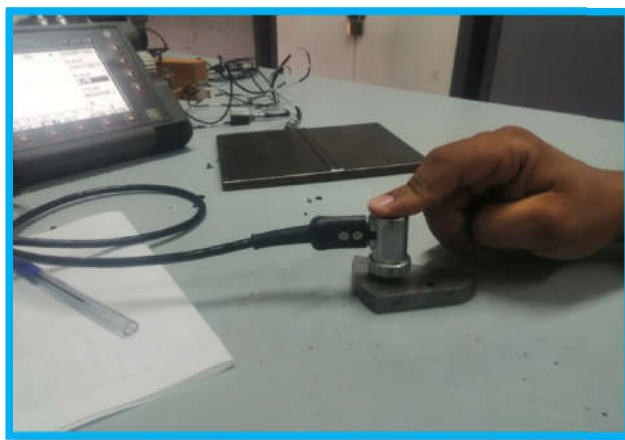


Figure III. 42 Étalonnage de l'appareil à ultrasons par palpeur droit.

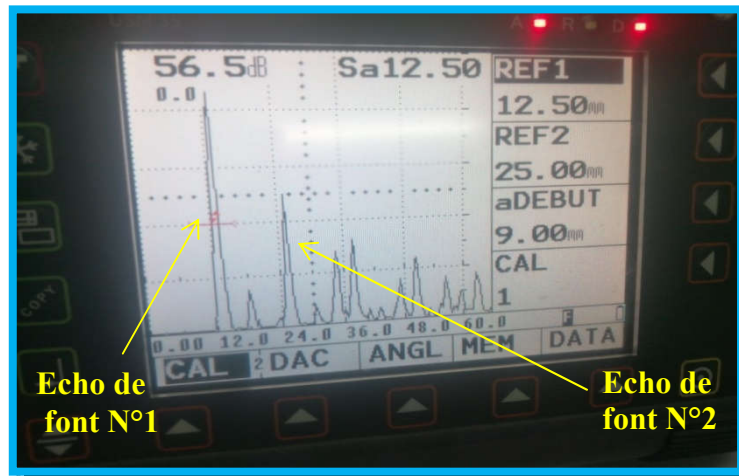


Figure III. 43 Echos reçus de l'échantillon d'acier.

✓ *Palpeur droit :*

La plage de mesure sur cadran 60mm (échelle 1 graduation=-6mm)

Vitesse des US5960m/s

Sur écran : La distance entre deux pics successifs est égale à 12mm,

➤ **Étalonnage par palpeur angle :**



Figure III. 44 Étalonnage de l'appareil à ultrasons par palpeur angle.

✓ *Palpeur angle :*

La plage de mesure sur cadran 100mm (échelle 1 graduation=20mm)

Vitesse des US3250m/s

Sur écran : La distance est égale à 50mm.

III.8.4.b Recherche hauteur du défaut et déplacement suivant l'axe x (y constant)

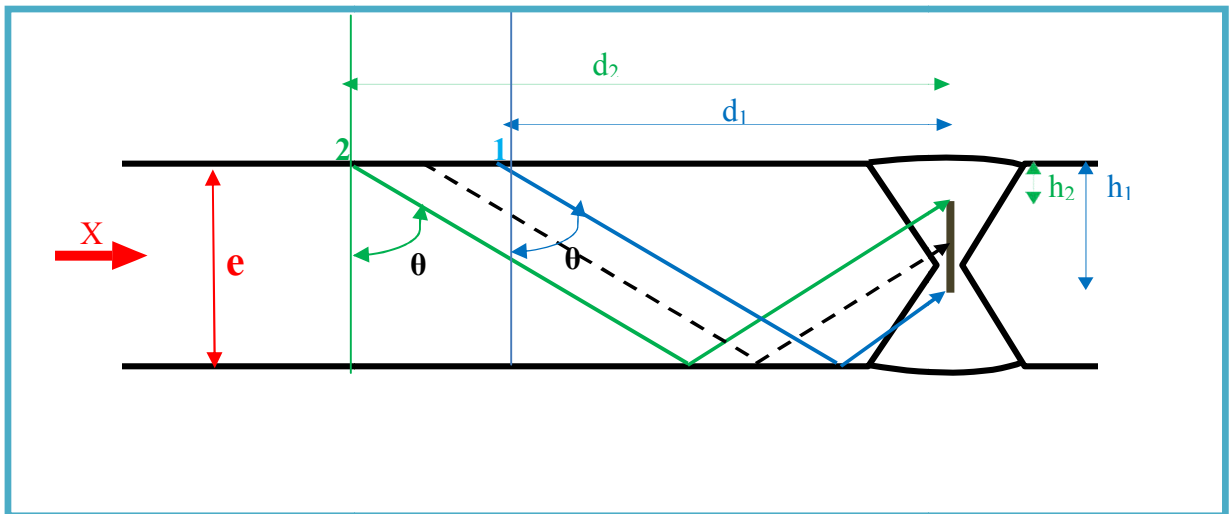


Figure III. 45 Zone de balayage.

$$A = e \tan \theta$$

$$B = 2e \tan \theta$$

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

D'abord en faire un balayage avec palpeur droit dans la zone adjacente de cordon de soudure

Pour vérifier l'existence d'un défaut ou pas, avant de contrôler la zone de soudure.



Figure III. 46 Balayage par palpeur droit.

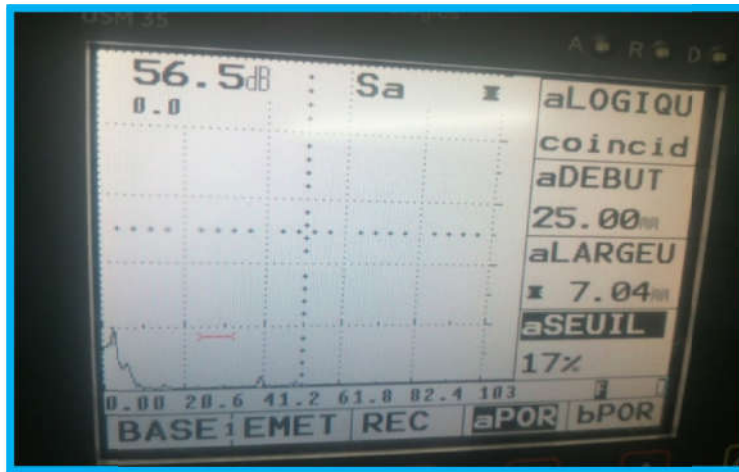


Figure III. 47 Image d'un test sans défaut.

III.8.4.c Localisation et estimation des défauts :

- Positionnement du premier défaut

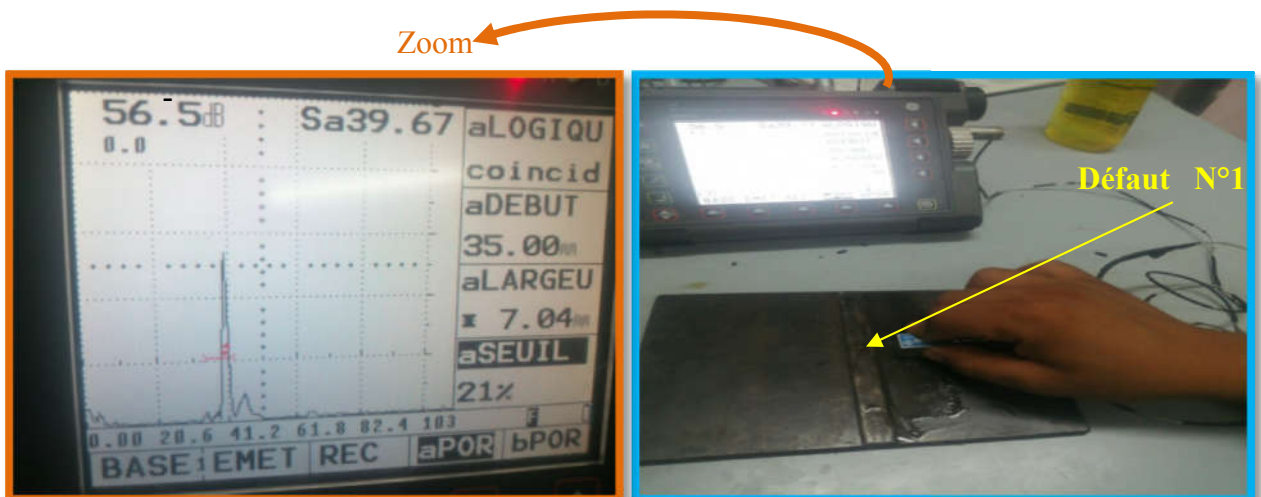


Figure III. 48 Recherche du premier défaut.

La plage de mesure sur cadran 100mm (échelle 1 graduation=20mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale H_{max} apparaît à : $P=1.95 \times 20 = 39 \text{ mm}$, correspondant au parcours ultrasonore.

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

$$d = \sin\theta = 39,67 \times \sin 70^\circ = 37.8 \text{ mm.}$$

La profondeur du défaut :

$$h = 2 \times e - (P \times \cos 70^\circ) = 2 \times 9.5 - (39.67 \times \cos 70^\circ) = 5.43 \text{ mm}$$

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir figure III.38, aux coordonnées : $x=99.8 \text{ mm}$ et $y=76.4 \text{ mm}$ sur une profondeur $h=5.43 \text{ mm}$.

• **Positionnement du deuxième défaut**



Figure III. 49 Recherche du deuxième défaut.

La plage de mesure sur cadran 100mm (échelle 1 graduation=20mm)

Le pic sur écran d'amplitude maximale H_{max} apparait à : $P=1.4 \times 20 = 28 \text{ mm}$, correspondant au parcours ultrasonore.

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

$$d = \sin\theta = 28.55 \times \sin 70^\circ = 26.82 \text{ mm.}$$

La profondeur du défaut :

$$h = 2 \times e - (P \times \cos 70^\circ) = 2 \times 9.5 - (28.55 \times \cos 70^\circ) = 8.78 \text{ mm}$$

Le premier défaut est localisé par rapport au point de référence, voir figure III.38, aux coordonnées : $x=99.8 \text{ mm}$ et $y=154 \text{ mm}$ sur une profondeur $h=8.78 \text{ mm}$.

Interprétation des résultats

Afin d'identifier les deux défauts présents dans les deux pièces soudées en X. Nous avons dans un premier temps utilisé la méthode directe pour localiser les positions des deux défauts

Le contrôle par ultrason nous a aidé à détecter des défauts de poche de retassure contenue et porosités (inclusion du gaz) dans les deux types de soudure.

L'ultra son contrôle les défauts interne des assemblages, en comparaison par les autre contrôle on peut juger que ces défauts peuvent être causés par :

- Une intensité très faible du courant de soudure.
- Une vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal.

Un angle d'inclinaison de l'électrode incorrect.

- Bords à soudés mal nettoyés.

III.9 Conclusion

L'utilisation de la méthode de contrôle par ultrasons est une bonne idée technologique, ces Propriétés peuvent détecter un nombre important des irrégularités Dans le matériau ou dans Un assemblage, ceci dépend fortement de la performance des équipements de contrôle.

La méthode de réflexion est la méthode la plus couramment utilisée et la plus simple à mettre En œuvre un seul transducteur joue le rôle d'émetteur et de récepteur, les ondes ultrasonores Sont émises de façon discontinue, entre deux émissions, le traducteur reçoit les ondes Réfléchies.

Cette méthode permet de détecter un défaut à condition que celui-ci présente une surface Réfléchissante normale au faisceau ultrasonore, avec un étalonnage correct de l'appareil de Contrôle permet de déterminer la position du défaut dans l'épaisseur de la pièce. Lors d'un contrôle en ondes transversales, il est possible d'utiliser un rebond sur la face Opposée de la pièce et ainsi de changer l'angle d'incidence du faisceau par rapport au défaut (travail dans le bond).

Chapitre IV : Approche Expérimentale pour un Contrôle Radiographique

Chapitre IV. Approche expérimentale pour un Contrôle Radiographique

IV.1 Introduction

La bonne exécution d'un produit peut rarement être garantie sans inspection ou contrôle de qualité. A cette fin, la nécessité de disposer d'un système complet de contrôle non destructif s'impose d'autant plus lorsqu'il s'agit d'objets fabriqués tels que des assemblages soudés qui nécessitent un travail minutieux et un grand savoir-faire.

Les méthodes d'examens non destructifs sont nombreuses, seules quelques-unes permettent d'examiner des objets de part en part.

L'une de ces méthodes et des plus utilisées est le contrôle par radiographie.

Les clichés d'objets sont obtenus par rayons « X » ou (gamma) servent à mettre en évidence les éventuelles causes des modifications ou réparations tel que : défauts internes, ou de surface, [16].

IV.2 Approche théorique du contrôle radiographique

IV.2.1 Définition

C'est un essai non destructif qui permet de mettre en évidence des hétérogénéités physiques (criques, retassures, inclusions, etc...) ou chimiques (ségrégations majeures d'éléments de numéros atomiques très différents) par absorption différentielle de rayons X et γ qui impressionnent une émulsion photographique. La lecture des différences de noircissement au négatoscope permet de détecter et identifier les défauts.

IV.2.2 But du contrôle radiographique

C'est d'examiner la structure d'un matériau afin d'y déceler une quantité d'informations de différentes natures sans affecter d'aucune manière ce matériau.

IV.2.3 Principe de la radiographie

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergent de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique.

Le contrôle radiographique des soudures est effectué dans deux chambres à rayons X. le cordon de soudure est visualisé en totalité par radioscope. Toute fois le repérage de défaut est sanctionné par une prise de clichés. Un marquage indélébile repère l'endroit du défaut. Le contrôle des réparations et des indications de l'ultrason ainsi que les extrémités des tubes est réalisé au niveau de la chambre de radiographie.

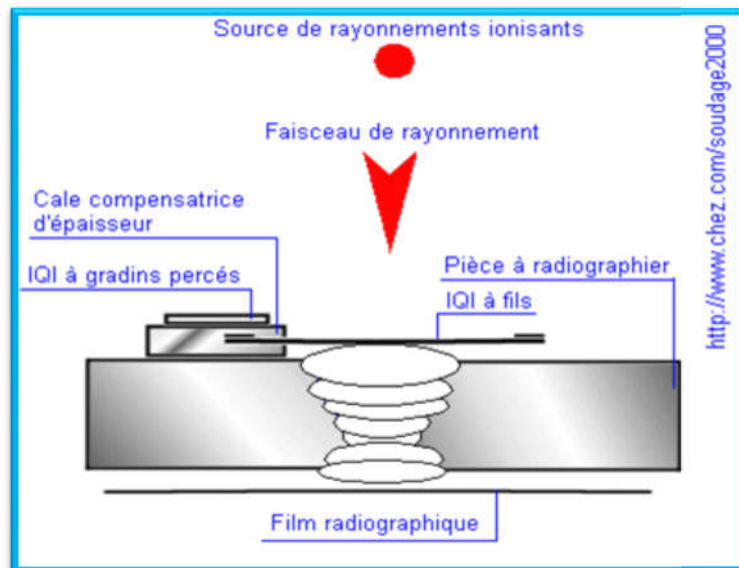


Figure IV. 1 Schéma de principe.

IV.2.4 Sources de rayonnements

Les sources de rayonnements ionisants sont choisies en fonction de la nature des matériaux à contrôler de l'épaisseur traversée de la qualité d'image demandée et des conditions techniques de réalisation, [17].

L'examen radiographique est utilisé pour détecter des défauts sous la surface d'un matériau. Deux types de rayons électromagnétiques sont utilisés :

➤ **Le rayon gamma**

Il est généré par des éléments radioactifs (isotopes).

➤ **Le rayon X**

Les rayons X sont des ondes dont l'énergie est telle qu'elles traversent la plupart des matériaux et en restituent une image sur un film, [18].

✓ **Le tube à rayons X :**

Le tube radiogène ou tube de Coolidge est un tube en verre dans lequel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et il émet des électrons par chauffage d'un filament incandescent de tungstène de la cathode (potentiel négatif). Ce faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers la cible de l'anode ou anticathode (potentiel positif). L'impact des électrons sur la cible ou foyer électronique ou foyer thermique génère 99% de chaleur et 1% de rayons X. L'émission du rayonnement X résulte de la brusque décélération des électrons sur la cible métallique.

- La qualité du rayonnement est déterminée par la tension d'accélération en kV.

- La quantité de rayonnement est définie par l'intensité du courant en mA. Plus le rayonnement est pénétrant (faible longueur d'onde), moins le contraste est élevé.

Les alimentations électriques des générateurs à rayons X sont de plusieurs types :

- Auto-redressé sous tension alternative (la plus courante).
- Circuit VILLARD.
- Circuit GRAETZ.
- Circuit GREINACHER.
- Circuit à une diode.

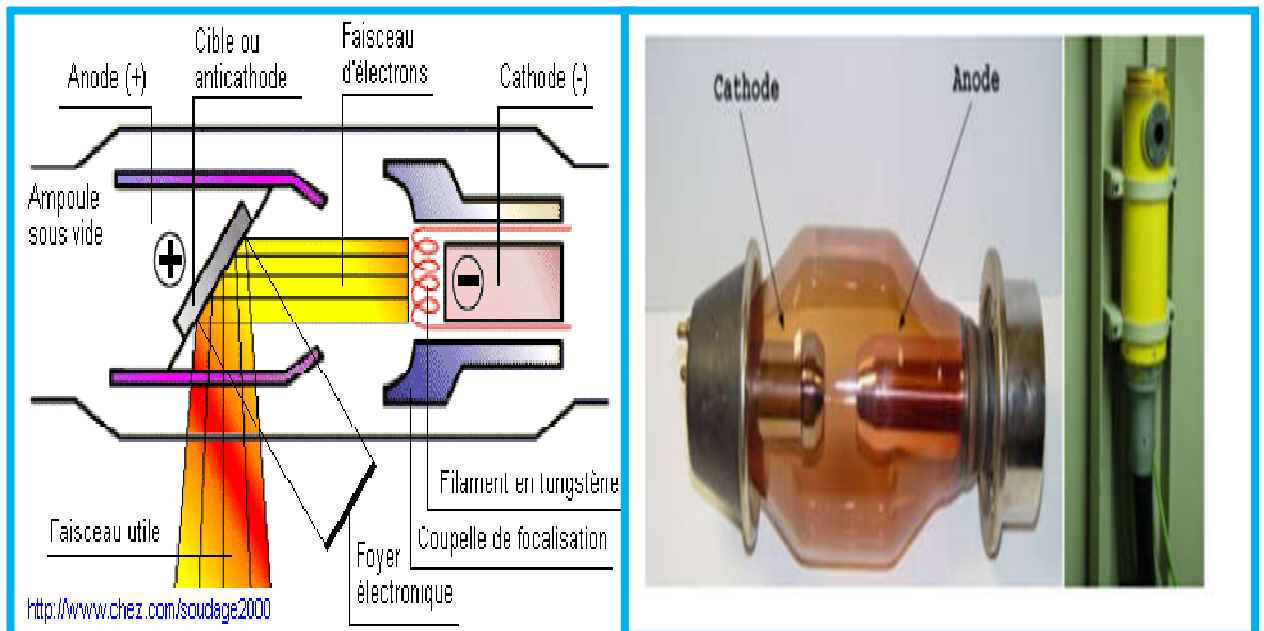


Figure IV. 2 Tube à rayons X.

IV.2.5 Films radiographiques

✓ Structure d'un film :

Les films radiographiques sont constitués d'émulsions photosensibles contenant des halogénures d'argent (sels d'argent), ils sont coulés sur les deux faces d'un support plastique et ils sont protégés par une pellicule de gélatine de protection durcissant. Lors de l'exposition aux rayonnements ionisants, les sels d'argent sont ionisés (Ag^+), [18].

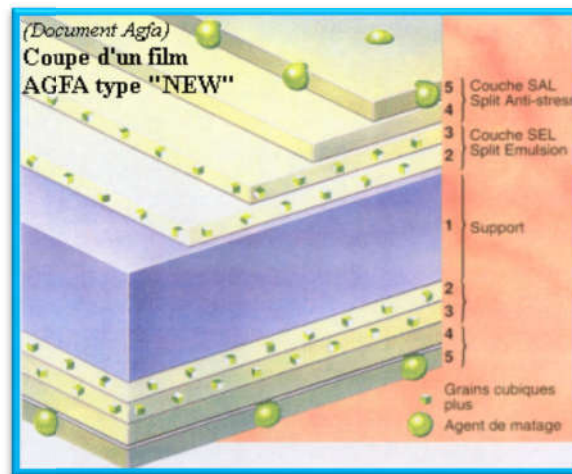


Figure IV. 3 Structure d'un film.

IV.2.6 Equipements du contrôle radiographique

Trois exigences fondamentales doivent être réunies pour produire des rayons X, à savoir,

- Une source d'électrons comme un filament chauffé,
- Des moyens de diriger et accélérer les électrons comme une alimentation à haute tension,
- Une cible dans laquelle les électrons peuvent bombarder, normalement sous forme de cible de métal lourd.

Ces exigences sont remplies dans un tube à rayons X, consistant en une enveloppe de verre dans laquelle deux électrodes sont équipés, une cathode et une anode. La cathode est une source d'électrons. L'application d'une haute tension à travers la cathode et l'anode accélère les premiers électrons, puis les arrête tout à coup avec une cible solide montée sur l'anode. L'arrêt du mouvement rapide des électrons résulte dans la génération de rayons X.

Les principales limites de la radiographie sont que le rayonnement de haute énergie est souvent nécessaire pour des sections épaisses. Si des appareils à rayons X doivent être utilisés, ils peuvent être très lourds, donc difficiles et longs à mettre en place dans le domaine. Le temps d'exposition est également long. Le coût de la radiographie va être élevé, [17].

IV.2.7 Domaine d'application

Le contrôle radiographique par rayon X ou gamma s'applique à toute sorte de matériaux de nature différente (papier, matière plastique, matériaux métalliques).

Les paramètres qui influent sur la probabilité de détection des discontinuités dans la matière sont principalement :

- L'épaisseur et la forme du matériau radiographié.
- La nature de ce matériau.
- La forme et la nature des discontinuités affectant le matériau.
- La position de ces défauts dans l'épaisseur contrôlée.
- La nature de la source de rayonnement et le type du film utilisé. Lorsqu'un défaut est mis en évidence par radiographie, il est possible d'en déterminer la nature ainsi que la dimension apparente sur le film. En revanche, l'appréciation de la profondeur du défaut constitue une opération longue et délicate, [18].

IV.2.8 Avantages et Inconvénients de Radiographie

IV.2.8.a Avantages

- Facilité de détection des défauts internes des pièces.
- Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15 minutes).
- Bonne sensibilité de détection des défauts.
- Traçabilité et archivage des résultats.

IV.2.8.b Inconvénients

- Investissement important.
- Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé.
- Les opérateurs doivent être très expérimentés.
- Les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes.
- Mise en œuvre délicate sur chantier avec tube à rayons X, [17].

IV.3 Analyse expérimentale pour un du contrôle radiographique de joint soudé sur deux plaques en acier

Dans cette partie, nous présenterons les résultats d'une application expérimentale de contrôle radiographique élaboré au sein de dans l'entreprise ALFAPIPE pour une évaluation et contrôle de joints soudés entre deux plaques en Acier.

IV.3.1 Cadre du contrôle radiographique appliqué sur plaques en Acier

IV.3.1.a Préparation d'échantillon

L'échantillon à contrôler est une plaque en : Acier x70 (Figure IV.4).



Figure IV. 4 Plaque acier assemblage bout à bout sans défaut.

Il s'agit d'une soudure longitudinale de rabotage section A-B, (Figure IV.5).

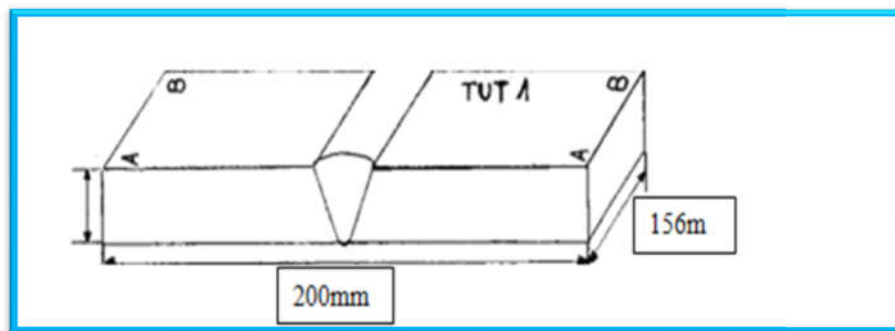


Figure IV. 5 Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier.

IV.3.1.b *Caractéristiques mécaniques et chimique de l'acier utilisé*

- **Données techniques :**
 - **Composition chimique**

Elle est obtenue par l'analyse par spectrométrie (mesure d'onde d'élément).

L'acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.085), La composition chimique est détaillée au (Tableau IV.1).

Tableau IV. 1 Composition chimique de l'acier X70.

Elément	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Value	0.085	0.321	1.52	0.002	0.006	0.033	0.018	0.003	0.038	0.003	0.013
Elément	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+Nb	S+D	Ceq	
Value	0.053	0.007	0.063	0.003	0.604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	

• **Propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques sont détaillées au (Tableau IV.2).

Tableau IV. 2 Caractéristiques mécaniques de l’X70 selon l’API5L.

Caractéristiques API5L	EPAISSEUR Mm	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Rc/Rm
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90

✓ **Obtention des rayons X**

Les rayons X :

Ils sont produits par un tube radio gène (Figure IV.6) qui est constitué d'une enceinte dans laquelle on a fait le vide et qui contient principalement deux électrodes :

- L'une négative (cathode) constituée d'un filament qui porté à incandescence émet des électrons,
- L'autre positive (anode) qui reçoit les électrons accélérés par une différence de potentiel.

Ce bombardement électronique produit de la chaleur (99% de l'énergie à 200 kV) et des rayons X.

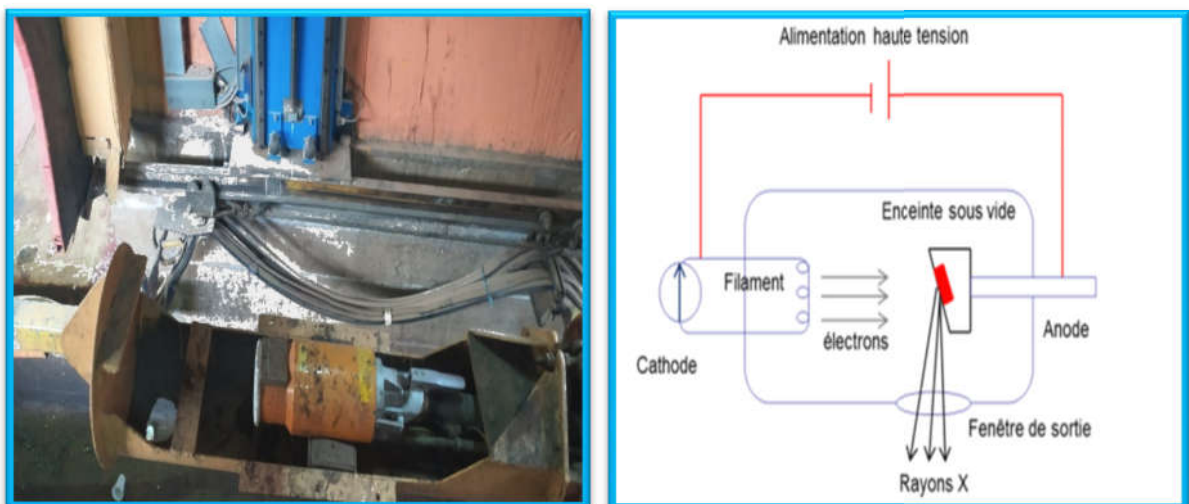


Figure IV. 6 Tube à rayons X (radio gène).

IV.3.2 Description de la cabine de rayonnement

Les Figure IV. 7 et 8 montrent respectivement la station d'acquisition d'image, et Cabine de rayonnement.



Figure IV. 7 Station d'acquisition d'image.



Figure IV. 8 Cabine de rayonnement.

Le générateur radiographique est illustré par la figure suivante :



Figure IV. 9 Générateur de la radiographie.

➤ **Caractéristiques principales des générateurs de rayons X :**

- La tension d'accélération qui détermine la vitesse des électrons (140 kV).
- Le courant cathodique, qui conditionne la production des électrons (4 mA).
- Les dimensions de la tache focale (partie active de l'anode).
- Le temps d'utilisation lié aux problèmes de refroidissement de l'anode.

IV.3.3 Description de la Méthode de contrôle par radiographie (RX)

Dans cette étude, Concernant notre plaque à contrôler on utilise la technique de prise de l'image désignée sous le terme tir en simple image ou simple paroi on pose la plaque entre la source a rayon X et la tablette avant de commencer le bombardement par rayon X, en suite commence le tire (le bombardement) par rayon X, l'acquisition de l'image est fait par le pc d'acquisition qui est transmettre l'image intégrés à l'autre Pc pour l'interprétation.

Dans la télévision de dépouillement l'image affiché contenir deux défauts à l'aide de l'logiciel image 3500, en mesure la longueur et largeur et le diamètre des défauts détecter, ces résultats nous permettre de giguée les conformités des défauts selon la norme API5I.

- Description de la technique de contrôle, Figure (IV. 10). :

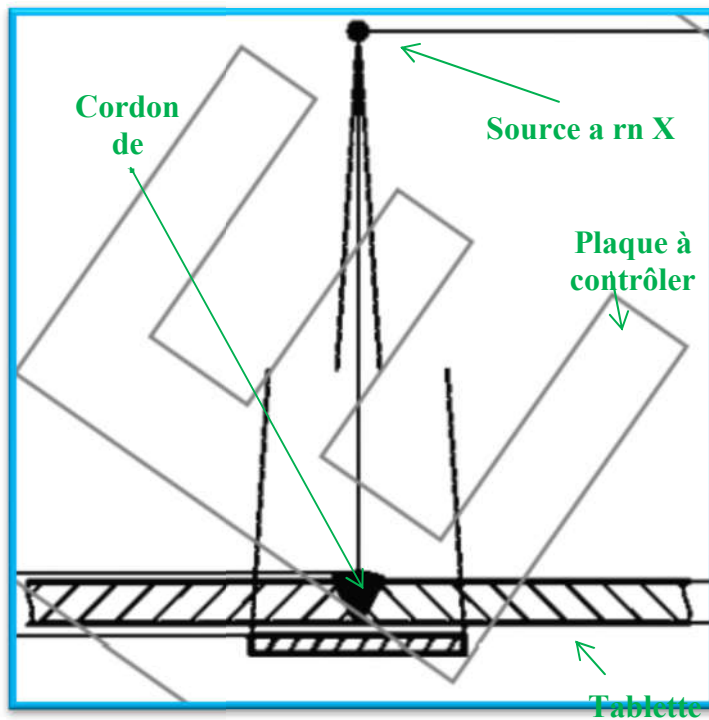


Figure IV. 10 Technique à simple parois.

- Paramètre de contrôle de plaque acier par radiographie :

➤ Tableau IV. 3 .Paramètre du contrôle.

Generator a rayon x	ISOVOLT 225 Titane E de marque GE
Tube radiogène	SEIVERT X-ray Tubehousing
Taille de foyer	0.4-3.0 (EN 12543)
Type de foyer	Petit foyer
Détecteur	Y Panel XRD 0822- 16 Bit-65536 niveau de gris
Système d'imagerie	Y IMAGE 3500 Fr
Taille de pixel	200µm 1024*1024 pixels
Temps D'intégration	Varier de 100 a 200 images
Grossissement	1 :1 OU 1 :2
Technique de tire	Technique simple paroi; IQI coté détecteur
FDD	500 mm
FOD	350 mm
DOD	50mm
Tension	120Kv
Intensité	4 m A

IV.3.4 Dimensionnement d'un défaut par radiographie

La détection et le dimensionnement d'un défaut résulte de l'application des méthodes de segmentation des images radiologiques (comme l'approche frontière, l'approche région, etc.). Ces derniers sont difficiles en application due à l'inhomogénéité du fond (irrégularité de l'épaisseur du matériau) influant ainsi l'extraction des caractéristiques comme une par région comme l'intensité et le niveau de gris sur lesquelles se basent la définition du contour de défaut. Le dimensionnement manuel du défaut se fait d'une manière directe sur l'image radiologique.

IV.3.5 Description du Logiciel de traitement d'image (X YXLON image 500)

Le système Y. Image x500 est un logiciel pour contrôler machine

Dans cette étude expérimentale nous avons utilisé le logiciel (Y. Image x500) pour l'interprétation de l'image de cordons de soudure d'une plaque en acier après le contrôle radiographique. Il permet obtention et affichage des défauts sous formes de photos numériques avec taille (longueur, largeur et diamètre) existant éventuellement à l'intérieur du cordon de soudure.

C'est un système d'amélioration d'image et d'archivage avec de nouvelles solutions de création, affichage, traitement et archivage de radiographies 8 bits, et même 16 bits en utilisant Y. Image 2500-D/3500, avec un contraste dynamique très élevé. Il a été développé spécialement pour radiographier avec des détecteurs numériques modernes, par cinématographique. L'utilisation de détecteurs numériques offre une qualité d'image haute résolution grâce à la technologie 16 bits. Les images numériques peuvent être sauvegardées en fichiers. Le système permet d'afficher en une seule image les défauts sur différentes épaisseurs de matériaux. Grâce à une fonction image de référence, les fonctions réalisées sur l'image actuelle peuvent être simultanément appliquées à l'image de référence. Dans la version Y. Image 3500 les exigences des normes ASTM relatives au travail avec des détecteurs numériques (DDA) sont satisfaites.

IV.3.6 Types d'images lors du travail avec le système Image

Lors du traitement d'image, le système d'image fait la distinction entre les différents types des images qui découlent de la suite des étapes, de la lecture d'une image à sa sauvegarde permanente en passant le traitement dans la mémoire principale avec affichage à l'écran Image réelle.

En outre l'utilisation du logiciel procession permettra la visualisation des obstacles sont détectés sur ordinateur en temps réel.

IV.3.7 Visualisation et enregistrement de l'image radiographique

IV.3.7.a Image radiographie avec les défauts

- Interface de Visualisation des résultats :

L'interface de visualisation de résultats par Logiciel de traitement d'image (X YXLON image 500) est représentée par la figure (IV.11).

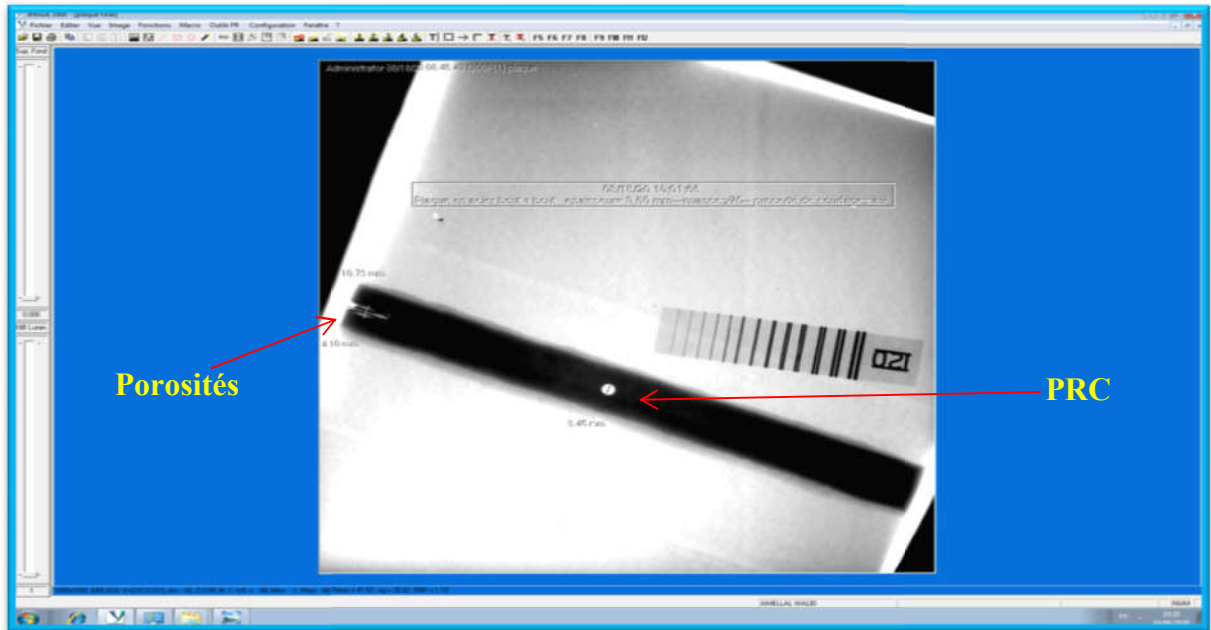


Figure IV. 1 Image radiographique des défauts détectés dans le cordon de soudure par logiciel.

- Après le traitement d'image on obtient l'image suivante :



Figure IV. 2 Image d'interprétation des défauts dans le cordon de soudure.

IV.3.7.b Classification et localisation des défauts détectés

Après le contrôle de la plaque par radiographie le système détecte les défauts suivants :

- Défaut N°1 : PRC(poche de retassure contenue).
 - Diamètre: 8.45mm
- Défaut N°2 : porosités (inclusion du gaz).
 - Longueurs : 10.73 mm
 - Largeur : 4.10mm

IV.3.7.c Interprétation des résultats

Dans cette étude élaborée et les résultats obtenus on conclut après l'examen par radiographie de la plaque acier à contrôler et suite d'interprétation selon la norme API 5L et à l'aide de logiciel Image 3500 on sort par ci-dessous :

Il existe deux défauts non conforme dans le cordon de soudure.

Interprétation selon API 5L c'est la norme utilisée par ALFAPIPE voir le tableau IV.2

Tableau IV. 4 Représente les exigences de la norme API5L.

Reparation	À 150 mm de l'extrémité
Longueur de Réparation	≤ 5 % de la longueur du cordon
les inclusions circulaires isolées et les poches de Gaz circulaires isolées	≤ 3 mm ou t/3 sont acceptables.
la séparation entre inclusions circulaires ou entre soufflures	4t, la somme de leur diamètre calculées sur une longueur 150 mm ou 12t mesurée sur le cordon de soudure ≤ 6 mm ou 0.5t
la longueur cumulée d'imperfections circulaires sur une longueur de soudure de 150 mm	0.5t et 6 mm
Inclusions allongées isolées	longueur ≤ 12 mm ou t largeur ≤ 1.6mm sont acceptables.
la séparation entre inclusions isolées	4t, la longueur cumulée maximale de toutes imperfections isolées admissible, calculée sur la plus petite des valeurs de 150 mm ou 12t mesurée sur le cordon de soudure ≤ 12 mm
la longueur cumulée des inclusions isolées sur une longueur de soudure de 150 mm	12 mm
Manque de pénétration, fissure, manque de fusion.	sont pas acceptables
Désaxage	défaut d'alignement des cordons de soudures ne doit pas excéder 3 mm
Défaut de structure et d'aspect	Non admis aux extrémités des tubes et de soudures sur une longueur de 50 mm perpendiculairement à l'extrémité.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, après un aperçu théorique sur le contrôle par radiographie, nous avons fait une étude expérimentale de la technique du contrôle non destructif par radiographie (RX) d'une plaque en acier pour rechercher les défauts internes qui peuvent exister dans le cordon de soudure. Les résultats obtenus à l'aide de logiciel Image 3500 montrent qu'il existe deux défauts dans le cordon et que la pièce non conforme. L'utilisation de la méthode de contrôle par radiographie (RX) est une bonne idée technologique, ces propriétés peuvent détecter un nombre important des irrégularités dans le matériau ou dans un assemblage, ceci dépend fortement de la performance des équipements de contrôle.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les techniques de CND en générale et plus particulièrement les CND par ultrasons et radiographie. Il nous a relevé plusieurs points, telles que les notions de bases des ultrasons, les techniques de contrôle et les méthodes d'estimation des défauts. Ce mode de contrôle non destructif permet d'estimer la valeur du défaut interne même pour des pièces d'épaisseur importantes, et cela sans être obligé de démonter la pièce.

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

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

La combinaison de plusieurs capteurs, ou différentes techniques, donne de meilleurs résultats. La position de l'écho du défaut entre le pic d'émission et l'écho de fond est proportionnelle à sa profondeur.

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

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

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

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

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

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

L'utilisation de la méthode de contrôle par radiographie (RX) est une bonne idée technologique, ces propriétés peuvent détecter un nombre important des irrégularités dans le matériau ou dans un assemblage, ceci dépend fortement de la performance des équipements de contrôle.

Perspectives

Les perspectives sont données avec l'objectif d'améliorer ce travail :

- ✓ *Il serait intéressant de poursuivre l'évaluation expérimentale des procédés par ultrasons et radiographie avec d'autres échantillons composites formés de matériaux différents (sandwichs).*
- ✓ *A cet aspect expérimental, ajouter des modèles de simulation numérique sous Comsol Multiphysics.*
- ✓ *Faire des essais avec des échantillons différents dans lesquels des défauts calibrés auraient été introduits permettraient de vérifier la possibilité de les dimensionner.*

Annexes

Annexes

Annexe 1 : propriétés des ultrasons

➤ Propriétés acoustiques et constantes physiques des éléments.

ELEMENTS	ρ	ν	E	G	VL	VT	ZL	ZT
Acierdoux	7.85	0.3	21	8.1	5.94	3.24	46.6	25.5
Acierallié	7.8				5.9	3.23	46	
Ferdoux	7.35				5.6	3.2	40	
Acier à outils	7.7				6.01	3.22	46	
Acierinox	7.9	0.3	19.8	7.7	5.66	3.12	44.7	24.5
Aluminium	2.71	0.35	7.3	2.7	6.35	3.1	17.2	8.3
Argent	10.49	0.38	7.6	2.7	3.64	1.63	38.2	17
Béryllium	1.85	0.05	30	14	12.8	8.71	23.7	15.9
cadmium	8.02				2.78	1.5	22.8	
cuivre	8.9	0.37	11.2	4.1	4.7	2.26	41.8	18
Laiton 70/30 (Cu/Zn)	8.5	0.37	10.5	3.85	4.7	2.14	39.7	18
Etain	7.3	0.34	5.6	2.1	3.38	1.68	24.7	12.2
Fonte grise	7.2				4.6	2.16		
Magnésium	1.76	0.31	4.6	1.6	5.78	3.06	10.02	5.3
Manganèse	7.3				4.66	2.35	34	
Molybdène	10.2				6.25	3.35	63.8	
Nickel	8.8	0.34	21	8	2.96	2.64	49.5	26.7
Inconel (80Ni/14Cr/6Fe)	8.5				5.82	3.02	49.5	
Monel (67Ni/30Cu/3Fe)	8.83				5.35	2.72	47.2	
Or	19.32				3.24	1.2	63	
Platine	21.55	0.3	18.3	6.5	3.15	1.73	67.8	37.2
plomb	11.34				2.1 6	0.7	24.5	
Titane	4.5				6.1	3.12	27.5	

ELEMENTS	ρ	ν	E	G	VL	VT	ZL	ZT
Tungstène	19.25	0.28	41.2	16.2	5.2	2.87	100	55.2
Uranium	19	0.25	17.8	7.1	2.38	1.93	63	36.4
Zinc	7.1				41.7	24.1	29.6	
Zirconium	6.5	0.33	10.2	3.3	4.55	2.6	29.6	16.9
Air (tpn)	0.00129				0.33		0	
Verre à vitre	2.5				5.77	3.4	14.4	7.6
Verrepyrex	2.23				5.57	3.4	12.4	
Glycérine	1.26				1.92		2.4	
Huile machine SAE 20	0.87				1.74		1.5	
Huiletransformateur	0.92				1.38		1.27	
Huileparaffine	0.9				2.2		2	
Plexiglas, lucite	1.18	0.4	0.33	0.14	2.67	1.2	3.2	
Nylon	1.1	0.4	0.36	0.12	2.62	1.1	2.9	1.2
Téflon	2.2				1.35		3	
Caoutchouc	1.5				2.3		3.3	
Polyéthylène	0.9	0.46	0.8	0.03	1.96	0.5	1.76	0.5
Polystyrène	1.06	0.4	0.53	0.12	2.34	1.1	2.47	1.2
Araldite	1.2				2.5	1.1	3	
porcelaine					5.45	3.4		
Eau douce (tpn)	0.999				1.48		1.43	
Eau de mer (tpn)	1.025				1.51		1.55	
Pétrole	0.8				1.32		1.06	

Tableau annexe. 1 Propriétés acoustiques et constantes physiques des éléments

Annexe 3 : Composition chimiques des deux plaques.

Thermo
S C I E N T I F I C

Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 1663
Mode General Metals
Time 2020-08-17 11:11
Duration 32.64
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 No Match : *4.40
Alloy2 No Match : *4.50
Flags
SAMPLE
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

	%	±	Error
Sn	< LOD	:	0.017
Pd	< LOD	:	0.014
Ag	< LOD	:	0.024
Ru	< LOD	:	0.005
Mo	0.006	±	0.002
Nb	< LOD	:	0.003
Zr	< LOD	:	0.002
Bi	< LOD	:	0.004
Pb	< LOD	:	0.027
Se	< LOD	:	0.005
W	< LOD	:	0.053
Zn	< LOD	:	0.019
Cu	0.301	±	0.036
Ni	0.225	±	0.047
Co	< LOD	:	0.227
Fe	96.420	±	0.327
Mn	0.998	±	0.060
Cr	0.488	±	0.029
V	< LOD	:	0.049
Ti	< LOD	:	0.078
S	0.074	±	0.008
P	< LOD	:	0.024
Si	0.827	±	0.060
Mg	< LOD	:	0.002
Sb	< LOD	:	0.020
Al	< LOD	:	0.583

Supervised By: _____

Figure annexe. 3 Composition chimique de la pièce acier



Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

NL31-62240

Reading No 1664
Mode General Metals
Time 2020-08-17 11:12
Duration 32.21
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 No Match : *5.01
Alloy2 No Match : *5.35
Flags
SAMPLE
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

	%	±	Error
Sn	< LOD	:	0.006
Pd	< LOD	:	0.006
Ag	< LOD	:	0.013
Ru	< LOD	:	0.002
Mo	< LOD	:	0.002
Nb	< LOD	:	0.002
Zr	0.057	±	0.002
Bi	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.003
Se	< LOD	:	0.002
W	< LOD	:	0.089
Zn	4.617	±	0.091
Cu	0.839	±	0.025
Ni	< LOD	:	0.016
Co	< LOD	:	0.014
Fe	0.208	±	0.021
Mn	0.230	±	0.029
Cr	0.219	±	0.011
V	< LOD	:	0.011
Ti	0.057	±	0.007
S	< LOD	:	0.002
P	< LOD	:	0.002
Si	0.392	±	0.048
Mg	3.553	±	0.558
Sb	< LOD	:	0.008
Al	89.793	±	0.454

Supervised By: _____

Figure annexe. 4 Composition chimique de la pièce aluminium.

Annexe 4 : Spécifications techniques du tube en spirale :

Tube Gaz et Pétrole selon API 5L :

Gamme de fabrication :

Diamètre extérieur	Epaisseur	Longueur unitaire
20" à 64"	7,92 à 14,30 mm	8 à 12,5 m

Grade de l'acier	Limite élastique E 0,2 MPA	Résistance à la rupture MPA
X42 M	290	415
X46 M	320	435
X52 M	360	460
X56 M	390	490
X60 M	415	520
X70 M	485	570

Tube hydraulique selon API 5L Constructions pipeline :

Grade de l'acier	Tube hydraulique	Tube de construction
A partir du grade B Jusqu'à X70 M PSL 1 et PSL 2	Réemploi pour les usages dans le secteur de l'eau avec un profil d'utilisation : - Résistance à des pressions jusqu'à 45 bars et plus sur commande. - Protection intérieure et extérieure anticorrosion de qualité. - Longue durée de vie.	Réemploi pour les activités du BTP (poteaux, pieux battus pour fondation).

Exigences matérielles :**Caractéristiques chimiques :**❖ **Composition chimique :**

La composition chimique de l'acier utilisé pour la fabrication du tube fourni, selon cette spécification devra satisfaire aux exigences figurant dans le tableau ci-dessous de la présente spécification pour l'acier X70 PSL2.

Elément	Composition maximum% sur coulée	Composition maximum% sur produit
C	0.09	0.10
Mn	1.70	1.60
Si	0.35	0.30
Al	0.06	0.06
Nb	0.07	0.064
V	0.07	0.064
Ti	0.025	0.025
Ni	0.30	0.31
Cu	0.25	0.10
Cr	0.30	0.10
Mo	0.10	0.10
B	0.0005	0.0005
S	0.004	0.005
P	0.015	0.02
N	0.009	0.01
Ca	0.005	0.006

Machine à soude en spiral❖ **Caractéristiques techniques :**

Largeur de bande	
Bande non rongée	630 à 1830mm
Bande rongée	600 à 1800mm
Poids de bobine	Max .30MP=30tonnes
Diamètre extérieur de bobine	1200 à 2000mm
Diamètre intérieur de bobine	600 à 820mm
Angle d'entrée de bobine	18° à 45°
Epaisseur de la paroi du tube	8 à 16mm
Gamme de diamètre du tube	16 à 64pouce (406.4 à 1625.6mm)
Gamme de longueur du tube	9 à 16m
Qualité de tube	Acier+Fer

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **Formation Ultrason NIVEAU 2 professionnelle** février 2009 société IS (institut de Soudure industrielle)
- [2] **Formation de control Non destructif CND "Ultrason théorie".**
- [3] **Formation control par Ultrason " juillet 2005".**
- [4] BENSALAH Oussama, "**Contrôle non destructif par courants de Foucault par capteur différentie,**" Université de m'sila, m'sila, mémoire de Master 2012.
- [5] Mouhoub SALHI, « **Modélisation Electromagnétique des Capteurs à Fonctions Séparées dans les Dispositifs Axisymétriques de Contrôle Non Destructif par Courant de Foucault (CND-CF),** » Université de Bejaia, mémoire de Magistère Magistère JUIN 2008.
- [6] Wissem SLIMANE, « **Conception d'un Système Multi-Capteurs à Courants de Foucault pour le Contrôle Non Destructif (CND),** » Université de BATNA, Mémoire De Magistère 2008.
- [7] KHEBAL Merwane, DALI Abderrahmane, « **contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques,** »Université de m'sila, mémoire de Master 2019.
- [8] ZEMOURI Nassima, « **Etude et Réalisation d'un Système Multicapteurs Destiné au Diagnostic des Matériaux Conducteurs,** » Université de de TIZI-OUZOU, mémoire de Magistère 2016.
- [9] Ala-Eddine Lakhdari, "**Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures,**" mémoire de Master 2011.
- [10] RABHI Mouldi, « **Support de cours,** » de Institut Supérieur des Etudes Technologiques de (GAFSA-Tunisi) 2017.
- [11] AOUI Mahfoud, KHODJA Lakhdar, « **Etude et réalisation d'un banc d'essai dédié aux applications du contrôle non destructif (CND) par courants de Foucault (CF),** »Université de m'sila, mémoire de Master 2019.
- [12] OUAMOUR ASMA, ZAMOUM AMINA, « **Application de la méthode des éléments finis pour la simulation 3D d'un dispositif de détection de défauts dans les matériaux conducteurs,** » Université de –BOUMERDES, mémoire de Master 2019.
- [13] TAREK BOUCHALA,«**Modélisation Semi-Analytique des Courants de Foucault– Application au Contrôle Non Destructif par des Capteurs à Noyau de Ferrite –** »Université de Batna, Mémoire de Magister 2008.

- [14] ZERGUINI SAKINA, "**Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault,**" Université de Constantine, Thèse de doctorat en science, 2009.
- [15] ZADAM Mabrouk, «**Localisation des défauts dans les structures par Ultrasons**» Université 08 mai 1945 GUELMA.
- [16] Rapport de stage, « **Formation radiographie industriel** », (GTP) 10/11/2005.
- [17] H. HANA et SRAIDI Samira, « **Contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs** », Université de Guelma, mémoire de Master, 2016.
- [18] Cours théorique, « **Contrôle non destructif**», Institut Supérieur de JENDOUBA, 2006.

Résumé:

Dans ce travail, en premier lieu, nous avons présenté les principales méthodes de CND du solides, ces méthodes nous avons basé sur l'ultrason et la radiographie (rayon X), ces dernières sont vérifiées expérimentalement dans les entreprises :ALPHAPIPE et M.E.I, celles-ci devraient permettre la mesure de divers paramètres physiques des solides et la détection d'inhomogénéités locales.

On a fait appel à l'analyse du signal ultrasonore (amplitude et phase) ayant traversé un échantillon métallique d'épaisseur constante. L'analyse de ce signal permet d'atteindre les variations d'atténuation et de vitesse de propagation des ultrasons dans l'échantillon.

Nous avons étudié aussi les défauts dans les joints de soudure pour les pièces soumises à des pressions destructifs et quantifier leurs tailles (détection, localisation et évaluation).

Le CND a pour but d'évaluer l'intégrité d'une pièce sans la détériorer, cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées.

Mots clés: Contrôle Non Destructif (CND), ultrason, radiographie, cordon de soudure, défauts.

Abstract:

In this work, first of all, we presented the main methods of NDT of solids, among these methods we based on ultrasound and radiography (X-ray), the latter are verified experimentally in companies: ALPHAPIPE and MEI, these should allow the measurement of various physical parameters of solids and the detection of local in homogeneity's.

We called on the analysis of the ultrasonic signal (amplitude and phase) having passed through a metal sample of constant thickness. The analysis of this signal makes it possible to reach the variations in attenuation and in the propagation speed of the ultrasound in the sample.

We also studied the defects in weld joints for parts subjected to destructive pressures and quantify their sizes (detection, localization and evaluation).

The purpose of NDT is to assess the integrity of a part without damaging it, this step of the industrial process is intended to guarantee the safety of use of the controlled parts.

Keywords: Non Destructive Testing (NDT), ultrasound, radiography, weld seam, defects.

ملخص:

في هذا العمل ، أولاً وقبل كل شيء ، قدمنا الطرق الرئيسية للمواد الصلبة ومن بين هذه الطرق التي اعتمدها الموجات ، يجب أن ALPHAPIPE و MEI: فوق الصوتية والتصوير الشعاعي، تم التحقق من هذه الأخيرة تجريبياً في الشركات .تسمح هذه بقياس المعلمات الفيزيائية المختلفة للمواد الصلبة واكتشاف عدم التجانس المحلي

لقد طلبنا تحليل إشارة الموجات فوق الصوتية (السعة والمرحلة) التي مرت عبر عينة معدنية بسمك ثابت. يتيح تحليل هذه الإشارة إمكانية الوصول إلى الاختلافات في التوهين وسرعة انتشار الموجات فوق الصوتية في العينة

كما درسنا عيوب وصلات اللحام للأجزاء المعرضة للضغط المدمرة وقياس أحجامها (الكشف، الموقع والتقييم). الغرض من هذه الاختبارات هو تقييم سلامة جزء ما دون إتلافه حيث تهدف هذه المرحلة من العملية الصناعية ضمان سلامة استخدام الأجزاء الخاضعة للرقابة

الكلمات المفتاحية: الاختبارات غير التدميرية، الموجات فوق الصوتية ، التصوير الشعاعي ، اللحام ، العيوب.