

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE
Option : Génie des matériaux (GM)



Thème :

**Caractérisation des différents endommagements
sur les pipes industrielles par les méthodes non
destructives**

Réaliser par : Encadré par :

- *ADOUNE Wissem*
- *BAHRI Yamina*

Dr. K. TAHAR CHAOUCH

Dr. HATEME BOUNATIRO

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU, le tout puissant, de nous avoir insufflé suffisamment de force, de courage et de patience pour entreprendre ce modeste travail.

Ce travail de mémoire intervient à un moment charnière de nos études.

Au cours de ces derniers mois, nous avons découvert et explorés de nouvelles disciplines. Cette progression et ces découvertes n'auraient pas été possibles sans l'aide de la personne qui nous 'a encadré, conseillé et soutenue au cours des derniers mois.

MADAME TAHAR CHAOUCH

Nous vous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance pour avoir dirigé notre encadrement, pour votre grande disponibilité, pour vos précieux conseils et pour votre gentillesse, compréhension et compassion.

Les membres de jury

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury M.MECHRAOUI et M. DJERDJOUR pour l'intérêt qu'ils ont portés à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous exprimons également toute notre gratitude au Co-Promoteur
M.HATEME BOUNATIRO

Nous exprimons aussi toute notre gratitude au personnel du département de génie mécanique.

Dédicace

Je dédié ce modeste travail à mes parents qui m'ont apporté un soutien inconditionnel, merci de me soutenir et m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Merci pour le soutien financier et moral, si je suis ici aujourd'hui c'est grâce à vous,

A moi-même,

A mes frères, mes sœurs, et toute ma famille qui sont une source de joie et de bonheur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant mes années d'études,

A mes très chères meilleures amies,

A mes camarades de promotion, je les remercie pour les années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires,

A mon binôme Wissem.

Yamina

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont apporté un soutien inconditionnel, merci de me soutenir et m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Merci pour le soutien financier et moral, si je suis ici aujourd'hui c'est grâce à vous,

A moi-même,

A mes frères, mes sœurs, et toute ma famille qui sont une source de joie et de bonheur, qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant mes années d'études,

A mes très chères meilleures amies,

A mes camarades de promotion, je les remercie pour les années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires,

A mon binôme Yamina.

WISSEM

Résumé :

.....

ملخص:

.....

Sommaire :

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Résumé	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale.....	01

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE

I.1. Introduction	04
I.2. Définition de soudage.....	05
I.3. Les procédés de soudage de pipelines	06
I.4. Morphologie d'une soudure à l'arc	06
I.5 Source et types des défauts de soudage.....	07

CHAPITRE II : CONCEPTS GENERAUX SUR LES TECHNIQUES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF

II.1. Introduction.....	12
II.2. Critères de fiabilités d'une procédure du CND	12
II.3. Principe de détection de défauts	13
II.4. Les différentes méthodes de contrôle non destructif.....	15
II.4.1. Examen visuel	15
II.4.2. Le contrôle par ressuage	16
II.4.2.1. Le principe de la technique	16
II.4.2.2. Les produits de ressuage	18
II.4.2.3. Les défauts observables par ressuage.....	18
II.4.2.4. Les avantages et inconvénients de la méthode	19
II.4.3. Contrôle par radiographie	20
II.4.4. Le contrôle non destructif par magnétoscopique	25
II.4.4.1. Principe	26

II.4.4.2. Paramètres influents sur les indications	27
II.4.4.3 Les méthodes d'aimantation	29
II.4.4.4. Matériels et produits utilisés en magnétoscopie	21
II.4.4.5. Intérêt et limitation de la méthode	32
II.4.5. Le contrôle non destructif par Courants Foucault (CF)	33
II.4.5.1. Introduction	33
II.4.5.2. Principe de la méthode CF	34
II.4.5.3. Avantages et limites de la méthode	36
II.4.6. Le contrôle non destructif par ultrasons	36
II.4.6. 1 Principe de la méthode	36
II.4.6.2. Propriétés et différents types d'ondes ultrasonore	36
II.4.6.3. Fonctionnement d'un appareil ultrason	39
II.4.6.4. Les avantages et limites des US	41
II.4.6.5. Appareillage utilisé en US	41
II.4.6.6. Procédures de contrôle	49
II.4.6.7. Types de mesures	50
I.5. Conclusion	55

Chapitre III : Etude expérimentale appliquée sur des joints soudés

III.1. Introduction	57
III.2 Matériaux	57
III.3. Les techniques CND utilisées	59
III.3.1. Préparation du contrôle par ultrasons	59
III.3.1.2. Exécution des tests	62
III.3.2. Contrôle par radiographie	64
Conclusion Générale	68
Références bibliographiques	70
Annexes	73

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 : Caractéristiques de Tube gaz et Pétrole Selon API 5L	5
--	---

Chapitre II :

Tableau II.1 :L'apparence radiographique de quelques défauts de soudure	22
Tableau II.2 : Moyens de contrôle par magnétoscopie	31
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de la méthodes CF	36
Tableau II.4 : Vitesse des ondes en fonction de la nature du matériau	39
Tableau II.5 : Les différents types de palpeurs	43
Tableau II.6 : Les fréquences des palpeurs classés par type de matériau	45

Chapitre III :

Tableau III.1 : Composition chimique des deux matériaux 2205 et X42 (%w)	57
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques des aciers X42 et duplex 2205	58

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure.I.1 : Soudage bout-à-bout de pipeline	04
Figure I.2 : Représentation schématique des différents procédés de soudage à l'arc	06
Figure I.3 : Présentation macrographique d'un joint soudé	06
Figure I.4 : Les différents types des défauts de soudage	10

Chapitre II :

Figure II.3 : Le contrôle par endoscope	16
Figure II.4 : Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié	16
Figure II.5 : Schéma de principe de contrôle par radiographie	21
Figure II.6 : Les différentes formes de porosités	23
Figure II.7 : Morphologie radiographique des Inclusions de laitier	24
Figure II.8: Morphologie radiographique du défaut manque de pénétration	24
Figure II.9 : Morphologie radiographique d'un caniveau à la racine	24
Figure II.10 : Morphologie radiographique d'un caniveau externe	25
Figure II.11 : Les radiographies des fissures	25
Figure.II.12 : Le contrôle par magnétoscopique	26
Figure II.13 : Evolution de la perméabilité magnétique relative μ_r (henry/m) en fonction du champ magnétique H	28
Figure II.14 : Les méthodes d'aimantation	30
Figure II.15 : Principe de la détection par les courants de Foucault	35
Figure II.16 : Propriété d'une onde	37
Figure II.17 : Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide	38
Figure II.18: Schéma de fonctionnement d'un appareil à ultrason	40
Figure II.19 : Schéma descriptif d'un palpeur	42
Figure II.20 : Les étalons type B et V2 et leurs caractéristiques	47
Figure II.21 : Appareils utilisés dans le cadre de cette étude Olympus et ECHO LT	48
Figure II.22 : Principe du contrôle par ultrasons : exemple du contrôle d'une soudure ...	49
Figure II.23 : Les différentes représentations	51
Figure II.24 : Méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction).....	52
Figure.II.25 : Comparaison entre faisceau US conventionnel et phasedarray	53
Figure II.26: Balayage sectoriel	53

Chapitre III :

Figure III.1 : Tube en acier au carbone	58
Figure III.2 : tube en acier inoxydable duplex	58
Figure III.3 : Deux plaques on acier au carbone	58
Figure III.4 : Préparation du contrôle par ultrasons	59
Figure III.5: Appareils US utilisés	60
Figure III.6 : Résultats des tests par ultrasons des soudures des tubes	63
Figure III.7 : Les résultats d'inspection par US des tôles	64
Figure III.8 : Présente des exemples de l'analyse par radiographie de soudures.....	65
Figure III.9 : Les radiographies des soudures des plaques et des tubes	65

Introduction Générale

Introduction générale :

Le transport d'hydrocarbure par pipelines s'impose depuis le début du siècle dernier, reconnu comme le moyen le plus sûr et économique, il se développe davantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché.¹

La partie conduite d'un pipeline est une construction mécano-soudée, ainsi la soudabilité des aciers des tubes a des répercussions sur le coût de réalisation et sur la fiabilité de la conduite.²

Il faut noter qu'il s'agit de centaines de kilomètres de soudures réalisées sur les chantiers de construction de conduites. Ainsi, toute modification importante au niveau de la composition de l'acier ou des dimensions des tubes nécessite de nouvelles mesures techniques, technologiques et beaucoup de précaution afin d'obtenir des joints de soudure fiables. Au-delà de la soudabilité locale ou métallurgique, la recherche de nouveaux aciers pour les conduites doit être entreprise par d'autres aspects qui intègrent le procédé de soudage et son environnement opératoire.

Les défauts des joints de soudure constituent la deuxième cause de défaillances des conduites, après la corrosion. C'est ainsi que, durant la fabrication des tubes en usine et la construction des conduites, le soudage est une étape très importante et décisive. Le développement du réseau mondial des canalisations de transports des hydrocarbures doit suivre l'accroissement des besoins énergétiques mondiaux. La préoccupation primordiale du constructeur doit être la définition des assemblages soudés qui permettent de faire passer les efforts avec un maximum de sécurité et réaliser la soudure au moindre coût, tout en prenant en considération l'accroissement de la quantité du métal à déposer en fonction de l'augmentation des dimensions des conduites, l'emploi de nouveaux aciers à composition chimique de plus en plus complexe et les conditions difficiles d'exécution des soudures d'assemblage des tubes sur chantier.

¹ Document de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012

² Documents Technique COSIDER Biskra 2012.

Ainsi l'évolution de la technologie et des techniques de soudage doit suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques des aciers des tubes et des dimensions des conduites afin de répondre aux besoins des constructeurs et aux exigences des utilisateurs.³

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par méthodes non destructives des assemblages soudés. Ce travail est réalisé au niveau du centre de recherche CRTI-Bousmail. Le contrôle non destructif est fait sur un cordon de soudure bout à bout pour l'assemblage des tubes en acier au carbone et acier inoxydable (duplex), réalisé à l'arc électrique procédé TIG.

Cette étude est composée de deux parties principales :

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique et est composée de deux chapitres essentiels:

- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage et défaut de soudage.
- Le deuxième chapitre contient une présentation des concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif.

La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale sur les techniques d'application des CND sur le joint soudé (tubes et tôles), résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout.

On termine cette étude par une conclusion générale et perspectives.

³ Document de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.

Chapitre I :
Etude bibliographique

I.1. Introduction

Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus fréquent et le plus sécurisant. Les pipelines sont souvent construits à partir de tubes d'aciers soudés bout-à-bout. Ils'agit de centaines de kilomètres de soudures réalisées sur une ligne de transport (Figure.I.1).



Ligne de pipelines



Soudage à l'arc électrique tube de pipeline

Figure.I.1 : Soudage bout-à-bout de pipeline

Généralement, les conduites destinées pour le transport de gaz ou pétrole sont fabriqués à base d'aciers à haute limite élastique (HLE) de différents grades (tableau I.1):

- Les aciers au carbone faiblement alliés : comme les aciers X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à 0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si.
- Les aciers faiblement alliés à basse teneur en carbone comme les aciers X56, X50, X65, X70 renfermant 0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1% Nb, 0,015 % Al.

Tableau I.1 : Caractéristiques de Tube gaz et Pétrole Selon API 5L [2]

Grade de	Limite élastique E0.2	Résistance à la rupture
----------	-----------------------	-------------------------

l'acier	MPa	MPa
X42	289	413
X46	317	434
X52	378	455
X65	386	489
X60	413	517
X70	482	566

I.2. Définition de soudage

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler généralement par fusion des parties en contact. Le joint qui en résulte est la *soudure*.

La source de chaleur utilisée pour le soudage est généralement un arc électrique généré par le poste à souder. Le soudage basé sur un arc est appelé *soudage à l'arc*.

La fusion des pièces peut se produire uniquement sur la base de la chaleur produite par l'arc de sorte que les pièces à souder fondent ensemble (*soudure autogène*). Cette méthode peut notamment être utilisée en soudage TIG.

Habituellement, un métal d'apport est toutefois fondu dans le cordon de soudure pour former le joint soudé. Il s'agit d'une *soudure hétérogène*.

Avant de commencer le soudage, les bords des pièces à souder sont façonnés en une rainure de soudage adéquate, par exemple une rainure en V. Au fur et à mesure que le soudage progresse, l'arc fusionne les bords de la rainure et le métal d'apport, créant ainsi un bain de soudure.

Pour que la soudure soit durable, le bain de soudure doit être protégé de l'oxygénation et des effets de l'air ambiant, par exemple avec des gaz de protection ou du laitier. Le gaz de protection est alimenté dans le bain de soudure en fusion par la torche de soudage. L'électrode de soudage est également revêtue d'un matériau qui produit du gaz de protection et du laitier sur le bain de soudure en fusion.

I.3. Les procédés de soudage de pipelines :

En fonction des exigences et des conditions de soudage, les procédés de soudage appropriés pour les pipelines sont le soudage manuel à l'arc, le soudage TIG, le soudage MIG/MAG (Figure I.1) au gaz actif ou le soudage oxyacétylénique

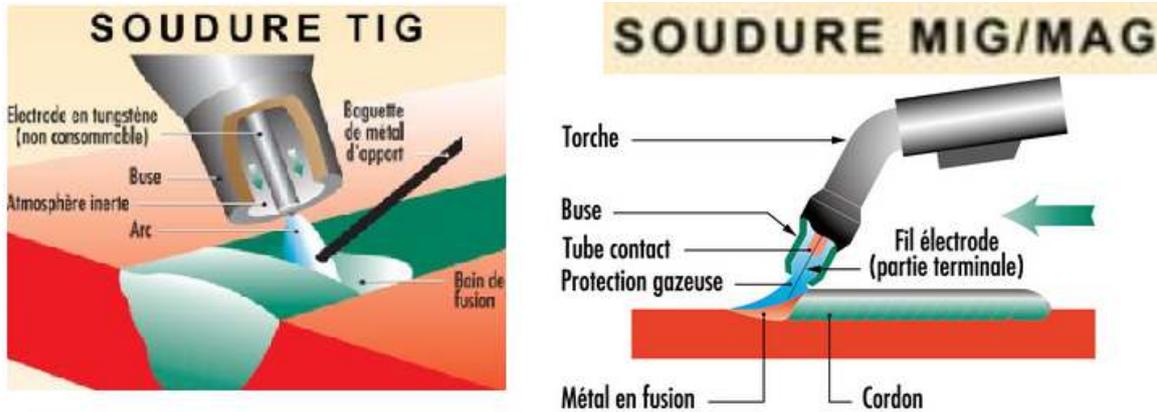


Figure I.2 : Représentation schématique des différents procédés de soudage à l'arc

I.4. Morphologie d'une soudure à l'arc :

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide puis fusion, à laquelle succède une phase de refroidissement et solidification dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage.⁴

On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé:

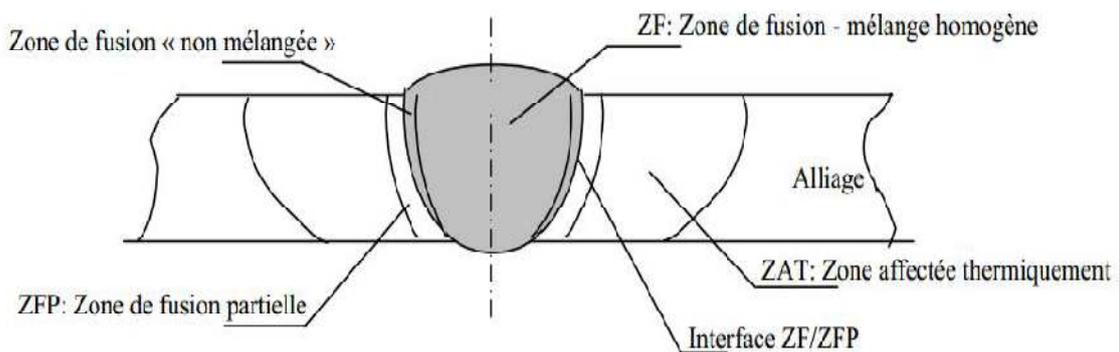


Figure I.3: Présentation macrographique d'un joint soudé.

- Le métal de base (MB)
- La zone affectée thermiquement (ZAT)
- La zone de liaison (ZL)

⁴ Guide de soudage, Soudage à l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996 (En cyclopie).

- La zone fondue (ZF)
 - Métal de base (MB) : Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune réaction thermique.
 - Zone affectée thermiquement (ZAT) : La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage
 - Zone de liaison (ZL) : Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
 - Zone fondue (ZF) : Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification.⁵

I.5. Source et types des défauts de soudage

Les défauts de soudage sont en général inhérents aux procédés de soudage. En fait, ils dépendent de plusieurs facteurs : mauvaises exécutions (surcharge, pression, durée d'application, etc.), qualité du métal de base et/ou du produit d'apport, propreté des régions à souder et choix du procédé lui-même.⁶

On donne ici une brève description et les causes probables des principaux défauts de soudage (Figure I.4):

Fissure : Rupture dans le métal qui résulte de la présence des contraintes localisées qui dépassent la résistance limite du matériau.

Soufflure : Cavité gazeuse emprisonnée durant le processus de solidification, due essentiellement à la présence de l'humidité dans les pièces et les électrodes.

Retassure : Cavité due au retrait du métal au moment de la solidification.

⁵ Saint-Germain, Benoît. 2006. « Étude expérimentale et numérique des distorsions de structures mécano-soudées ». Ph.D. France, École centrale Paris (France).

⁶ L. Mouchat, S. Malek, "Mise en oeuvre de classificateurs basés sur la notion de distance et classification statistique. Applications : Identification des défauts de joint de soudure sur les images radiographiques". *Mémoire d'ingénierat*. Université de Blida. 2002.

Inclusion : Corps solide étranger emprisonné dans la masse du métal fondu dû à un nettoyage insuffisant des cordons ou à un piquage mal fait du laitier dans le cas du soudage multi passe.

Manque de fusion : Manque de liaison dans le cordon de soudure ou bien entre celui-ci et le métal de base dû à une intensité du courant de soudage trop faible, une avance trop rapide ou des cordons trop bombés formant entre eux un angle aigu dans le cas du soudage multi passe.

Manque de pénétration : Remplissage incomplet du fond de la rainure de soudage avec le métal de la soudure, dû à l'utilisation d'électrodes de diamètres trop grand, à l'emploi d'un courant d'intensité trop faible ou d'une mauvaise préparation des chanfreins.

Défauts de forme :

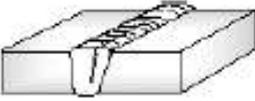
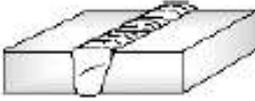
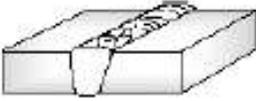
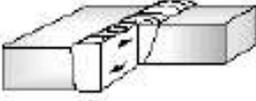
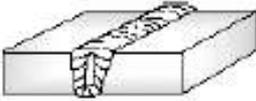
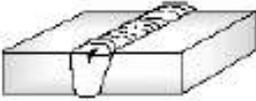
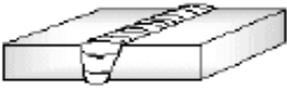
Cordon trop bombé, dû à une intensité du courant de soudage trop faible.

Cordon trop aplati, dû à une intensité du courant de soudage trop forte.

Cordon irrégulier, dû à une avance irrégulière, un mauvais choix de l'intensité de soudage, une mauvaise longueur d'arc ou une utilisation d'électrodes non appropriées au métal de base.

Les défauts de soudage peuvent prendre différentes formes⁷, plusieurs types de défauts sont répertoriés dans la figure ci-après (Figure I.4) :

⁷“Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires explicatifs”.
Norme of International Standard Organization, 6520-1982, 1982.

GROUPE N° 1 - FISSURES			
			
FISSURE LONGITUDINALE	FISSURE TRANSVERSALE	FISSURES RAYONNANTES	FISSURES DE CRATÈRE
GROUPE N° 2 - CAVITÉS OU POROSITES			
			
SOUFFLURE SPHEROÏDALE	SOUFFLURES ALLIGNÉES	NID DE SOUFFLURES	SOUFFLURES ALLONGÉES
			
SOUFFLURE VERMICULAIRE	PIQÛRE	RETASSURE INTERDENTRITIQUE	RETASSURE DE CRATÈRE
GROUPE N° 3 - INCLUSIONS SOLIDES			
			
INCLUSION DE LAITIER	INCLUSION DE FLUX	INCLUSION D'OXYDE	INCLUSION MÉTALLIQUE
GROUPE N° 4 - MANQUE DE FUSION			
			
MANQUE DE FUSION DES BORDS OU COLLAGE		MANQUE DE FUSION ENTRE PASSES	
GROUPE N° 5 - MANQUE DE PÉNÉTRATION			
			
MANQUE DE PÉNÉTRATION		MANQUE D'INTERPÉNÉTRATION	

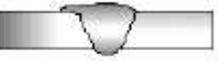
GROUPE N° 6 – DÉFAUTS DE FORME			
 CANIVEAU	 MORSURE	 CANIVEAU A LA RACINE	 SURÉPAISSEUR EXCESSIVE
 EXCÈS DE PÉNÉTRATION	 GOUTTE OU EXCÈS LOCAL DE PÉNÉTRATION	 DÉBORDEMENT	 DÉFAUT D'ALIGNEMENT
 DÉFORMATION ANGULAIRE	 EFFONDREMENT	 MANQUE D'ÉPAISSEUR	 RETASSURE A LA RACINE

Figure. I.4 : Les différents types des défauts de soudage (suite)⁸

⁸ Site Internet :

<http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a>Fichier pratique de scruté ED83 3E Edition. Septembre 2009

Chapitre II :
Concepts généraux sur les
techniques de contrôle non
destructif.

II.1. Introduction

On définit usuellement le Contrôle Non Destructif (CND) ou l'Evaluation Non Destructive (END) comme étant un moyen de mise en évidence des anomalies ou défauts (fissures, discontinuités de matière, fatigue, usure, ...etc.) susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné, sans porter atteinte à l'état globale du produit. D'où l'importance majeure du CND dans le contrôle de la qualité des produits et dans la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens dans divers secteurs industriels. On peut citer notamment :

- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs) ;
- L'industrie navale (contrôle des coques) ;
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ;
- L'aérospatiale et l'armée ;
- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- L'asidérurgie ;
- Lafonderie ;
- L' chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication ;
- L'industrie de l'énergie : réacteurs nucléaires, chaudières, tuyauterie, turbines, etc.

L'objectif de ce chapitre consiste à exposer un état de l'art en passant en revue les différentes méthodes du contrôle non destructif, leur principe et leurs différentes applications industrielles.

II.2. Critères de fiabilité d'une procédure du CND

L'opération de contrôle non destructif 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 et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants: le coût de l'opération de contrôle, 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.

- **La 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.
- **Le coût** : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.
- **La reproductibilité** : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- **La fiabilité** : Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.
- **La 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.
- **La résolution** : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut.

II.3. Principe de détection de défauts

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Quelle que soit la technique adoptée, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND selon le synoptique de la figure suivante (Figure II.1).

Quelle que soit la méthode employée, on peut généralement distinguer les étapes suivantes :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (excitation);
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts (perturbation);
- Détection de ces modifications par un capteur approprié (révélation);
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

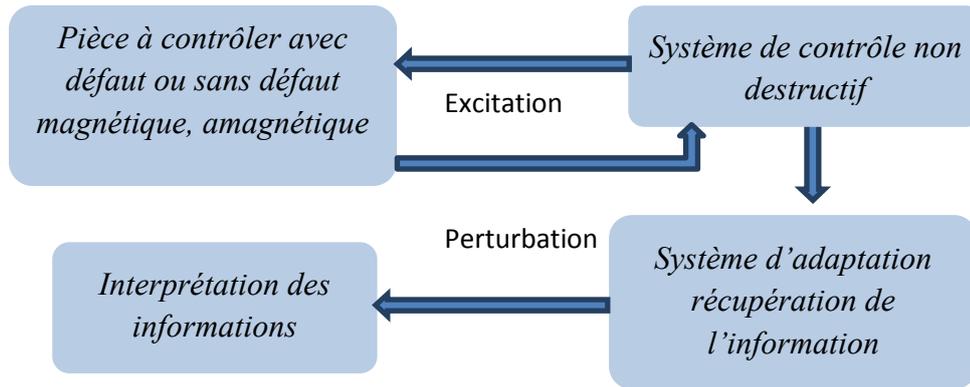


Figure II.1 Schéma synoptique de détection des défauts

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

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

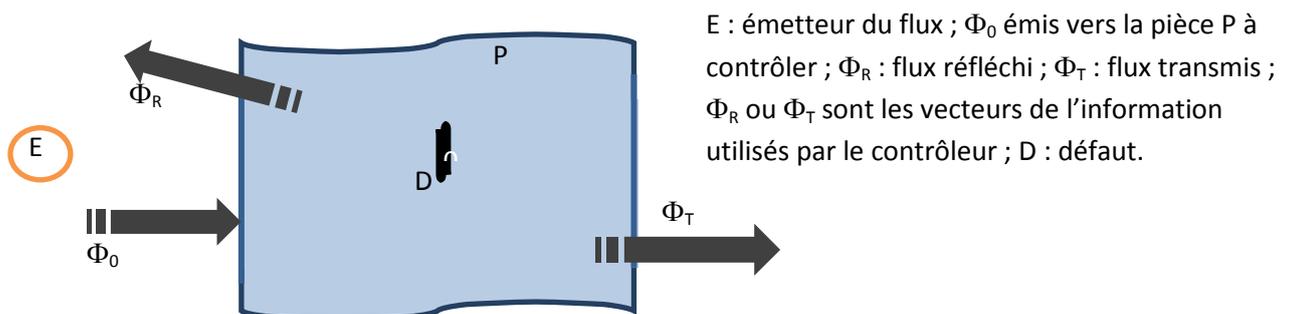


Figure II.2 Principe du contrôle non destructif

b- Les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont de natures différentes, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique.

II.4. Les différentes méthodes de contrôle non destructif

Plusieurs types de CND existent et se répartissent en 3 catégories :

- Les Contrôles surfaciques : comme l'examen visuel, ressuage, magnétoscopie...etc.
- Les Contrôles volumiques : comme radiographies, ultrasons, les courant de Foucault (les CF).

Le choix d'une méthode dépend de :

- la pièce à contrôler (nature du matériau, forme, ...).
- le type de contrôle à effectuer (détection de défauts, mesure d'épaisseur, ...).
- les conditions dans lesquelles le contrôle doit être effectué.

II.4.1. Examen visuel :

C'est le contrôle le plus élémentaire, le plus simple et le plus général des contrôles non destructifs. L'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des **hétérogénéités locales et superficielles** constituant des défauts. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures et qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique :

- Dans tous les cas d'observation d'un objet, les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique.
- L'œil est un capteur optique remarquable mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif : La lecture d'une image associe en fait l'œil et le cerveau de l'observateur, initiant ainsi à la fois des problèmes objectifs et des problèmes subjectifs. Les premiers concernent l'aspect optique avec un paramètre qui est l'acuité visuelle et les deuxièmes problèmes sont liés au pouvoir d'accommodation à la distance de l'opérateur.

Dès lors, il faut avoir recours à des instruments d'aides optiques. Il s'agit des instruments d'optique permettant d'accroître les performances de l'œil ou encore plus généralement de donner la possibilité de contrôler des surfaces inaccessibles à la vision

directe de l'observateur tels que : les loupes, les verres grossissants, ou encore des appareils spécifiques pour le CND comme par exemple l'endoscope(Figure II.3).



Figure II.3 : le contrôle par endoscope⁹

II.4.2. Le contrôle par ressuage :

II.4.2.1. Le principe de la technique

Cette technique se classe parmi les méthodes visuelles, appelée aussi optico-chimique. Malgré son ancienneté, la méthode de ressuage reste très utile même de nos jours surtout pour détecter les défauts surfaciques. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes (Figure II.4) :

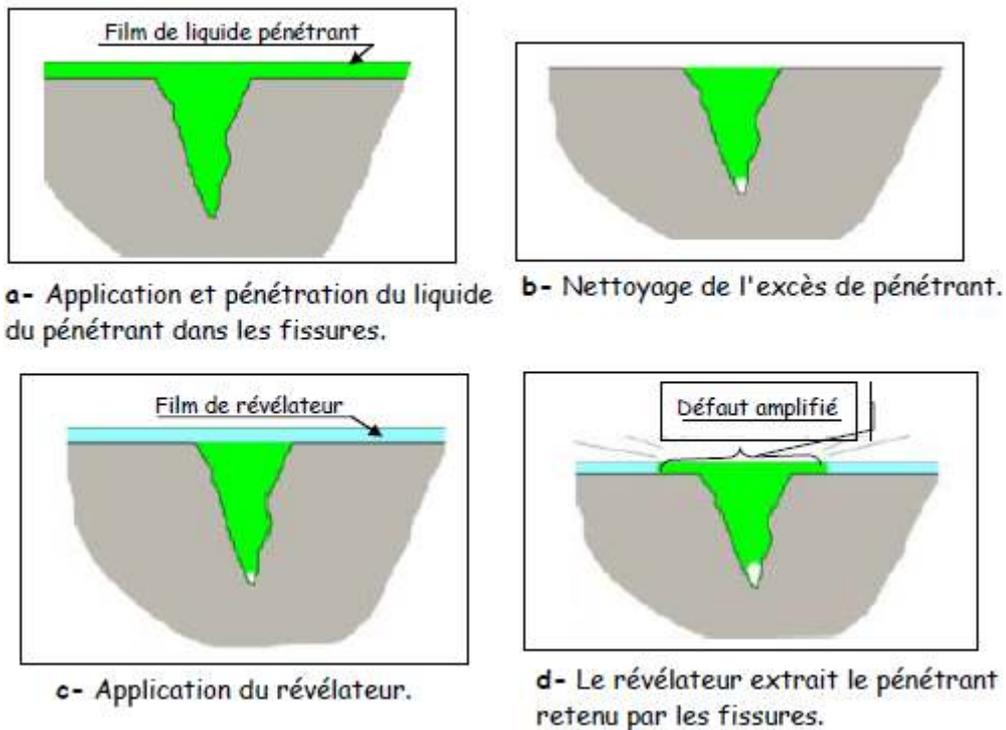


Figure II.4 Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié

⁹ ECOLE D'ADAPTATION AUX PROFESSIONS DU SOUDAGE, contrôle des constructions non soudées, 1995.

Étape.1 -application d'un pénétrant :

Un liquide pénétrant (en général un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à la lumière ultraviolet) de faible tension superficielle et de bonne capillarité est appliqué sur la surface à contrôler préalablement nettoyée (Figure II.4.a). La surface à examiner doit être constamment mouillée de façon complète par le pénétrant. Celui-ci peut être appliqué au pinceau, par pulvérisation, par arrosage ou par immersion de la pièce. On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface. Cette durée peut être déterminée par un essai préliminaire. Elle est en général comprise entre 5 minutes et 1 heure. Plus le temps d'imprégnation est long, plus les discontinuités fines et étroites peuvent être mises en évidence.

Étape.2 - élimination de l'excès du pénétrant :

Après un temps d'imprégnation suffisant, la pellicule superficielle de pénétrant doit être éliminée par moyen approprié : solvant, eau émulsifiant et l'eau (Figure II.4.b).

Étape.3 –Séchage et application d'un révélateur :

La plupart des révélateurs nécessitent un séchage de la surface sur laquelle ils seront appliqués. Le séchage peut s'effectuer de diverses façons :

- Par évaporation naturelle à température ambiante.
- Par contact d'air chaud.
- Par essuyage avec du papier « Joseph » ou un chiffon sec blanc propre et non pelucheux
- Par jet d'air comprimé déshydraté et déshuile.

Immédiatement après séchage, un révélateur, produit opaque et absorbant, est alors appliqué sur la surface (Figure II.4.c). Le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace (Figure II.4.d). Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.

Les gammes opératoires : le déroulement des opérations dans les différents cas est donné par les tableaux synoptiques en annexes 1-2-3-4 de cette procédure

II.4.2.2. Les produits de ressuage

- ❖ **Les produits de nettoyage** : D'une façon générale, on utilise des dégraissants recommandés par les fournisseurs
- ❖ **Les produits de ressuage** sont constitués par les pénétrants, les émulsifiants et les révélateurs.

- **Les pénétrants** : Les pénétrants utilisés sont les suivants :

- ***Pénétrant coloré*** visible en lumière normale :

- Pré émulsionné (directement lavable à l'eau),

- Post émulsionné (éliminable à l'eau après l'application d'un émulsifiant séparé),

- Éliminable à l'aide d'un solvant spécial.

- ***Pénétrant fluorescent*** :

- Pré émulsionné,

- Post émulsionné,

Éliminable à l'aide d'un solvant spécial.

- ***Pénétrant mixte***, doté de traceurs colorés et fluorescents, visible en lumière normale ou sous rayonnement ultraviolet.

- **Produits d'élimination de l'excès de pénétrant**

On utilise de l'eau à une température comprise entre 10 et 50 °C ou du solvant choisi parmi l'un de ceux recommandés par le fabricant de produits de ressuage

- **Les révélateurs** : ils sont de trois types :

- Révélateurs secs,

- Révélateurs humides,

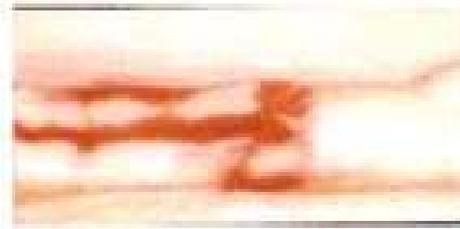
- Révélateurs pelliculaires dit improprement pelables

Le choix du révélateur dépend du type de contrôle ; en particulier, on utilise toujours un révélateur non aqueux en association avec un pénétrant coloré ; ce sont d'ailleurs, de loin, les révélateurs les plus utilisés.

II.4.2.3. Les défauts observables par ressuage

Les indications sont caractérisées par leurs dimensions. Elles sont classées en linéaires ou non linéaires. Une indication est dite linéaire lorsque sa plus grande dimension est supérieure à 3 fois la plus petite. Les autres indications sont dites non linéaires ou arrondies :

a) ***Ligne continue*** : indication d'origine les fissures, les replis de forge, les rayures.



b) Ligne discontinue : indication apparaît lorsque la pièce subit une préparation mécanique ou toute autre opération qui peut enfermer une partie d'un défaut débouchant.

c) Forme arrondie : indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piqûre, structure poreuse de la pièce...).



d) Tache ponctuelle : indication apparaissant surtout lors de contrôle des pièces moulées. Elle est d'origine la nature poreuse de la pièce, des piqûres ou de la structure grossière de la pièce.

e) Tache diffuse : Présence de micropore dans les pièces.

II.4.2.4. Les avantages et inconvénients de la méthode :

Les avantages

- Mise en œuvre est relativement simple.
- Bonne sensibilité de détections des défauts débouchant
- Localisation précise des défauts et appréciation de leurs longueurs.
- Contrôle relativement économique et rapide

Les inconvénients :

- Interprétation délicate.
- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués en profondeur.
- Nettoyage rigoureux des pièces à contrôler
- Produits dangereux (inflammables volatils et nocifs)
- Non utilisable dans les matériaux poreux.

II.4.3. Contrôle par radiographie :

Bien qu'elle fasse appel à des équipements des plus complexes, cette technique est fréquemment utilisée pour le contrôle des soudures pour détecter des discontinuités et des défauts internes de compacité souvent très fins (fissures, inclusions, manque de fusion, manque de liaison.).

Les 02 moyens industriels de contrôle radiographique les plus utilisés sont :

- ❖ Radiographie gamma (ou gammagraphie), non dépendante d'une source d'énergie électrique.
- ❖ Radiographie X, cette méthode permet le réglage de l'énergie de rayonnement et de son intensité.

Le contrôle par radiographie repose sur la capacité des rayonnements électromagnétiques à traverser la matière à inspecter. Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus ou moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial placé sur la face inverse au rayonnement (cas de radiographie industrielle) (Figure II.5 (a, b et c)).

□ **Les avantages du contrôle par radiographie :**

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

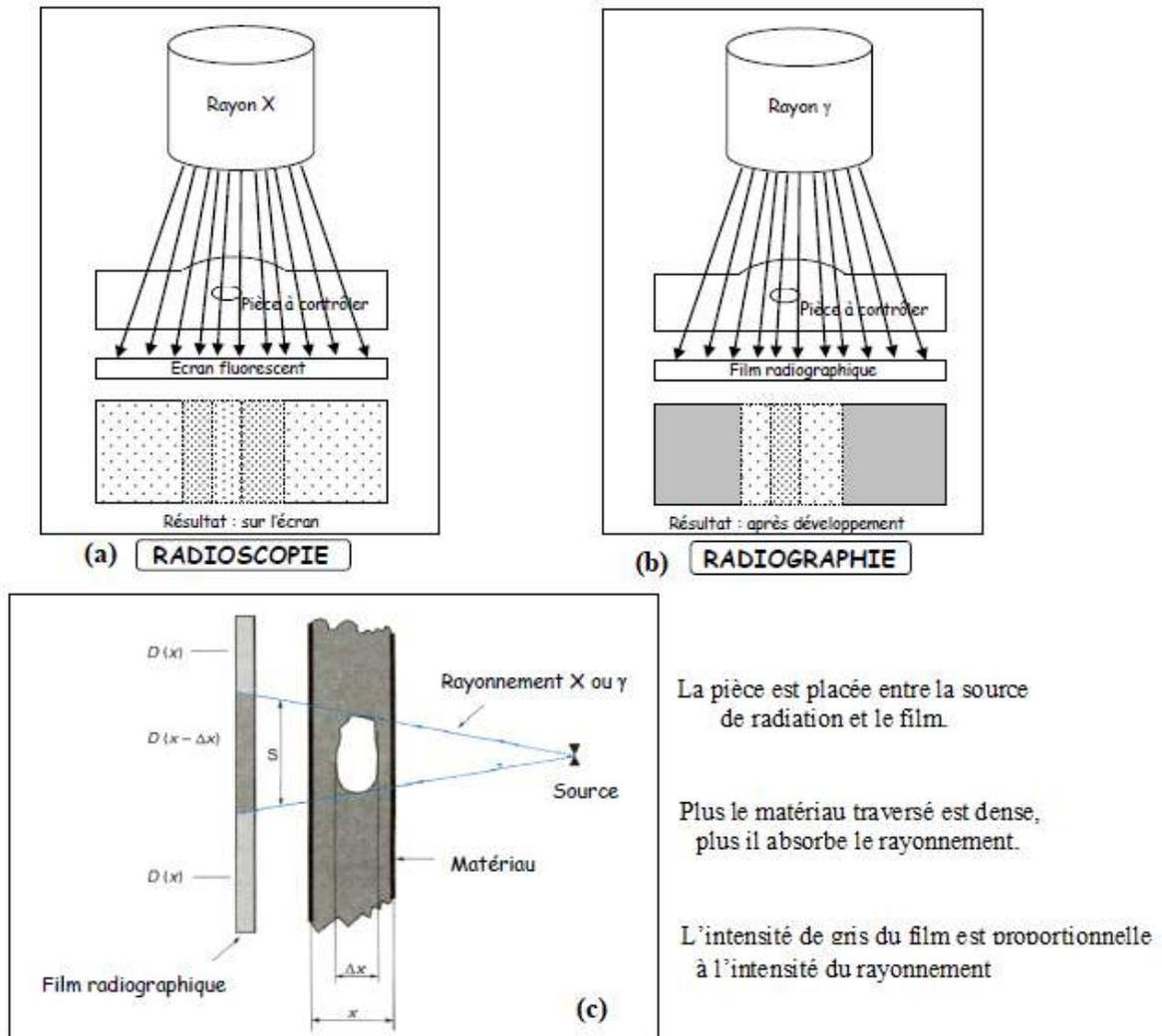


Figure II.5 Schéma de principe de contrôle par radiographie

□ Les inconvénients du contrôle par radiographie

Malgré sa bonne réputation parmi les méthodes de contrôle non destructif surtout pour l'inspection des soudures et la détection des défauts débouchant et internes, cette technique comporte plusieurs points faibles :

- L'exigence de mettre en place une procédure de protection du personnel et de l'environnement,
- Coût important de l'opération,
- Influence de l'orientation du défaut par rapport à la direction principale du rayonnement émis par la source.
- Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé.
- Mise en œuvre délicate sur chantier.

➤ **Méthode d'interprétation des résultats des radiographies**

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par : l'impression de films photographiques (une image en niveaux de gris), l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision, l'utilisation de détecteurs de rayonnements.

En cas de présence de défaut, ceci engendrera généralement des teintes plus sombres (présence d'air ou de gaz par exemple) ou parfois plus claires (présence d'inclusions solides particulières).

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme (NF EN 444, NF EN 462-1...). Le tableau II.1 suivant donne quelques indications sur les apparences radiographiques de quelques défauts de soudure.

Tableau II.1 : L'apparence radiographique de quelques défauts de soudure

Défaut	Apparence radiographique
Soufflures sphériques	Taches sombres à contours circulaires.
Soufflures vermiculaires	Taches sombres à contours allongés.
Inclusions de laitier	Taches sombres à contours irréguliers.
Cavités allongées	Lignes sombres plus ou moins interrompues et parallèles aux bords de la soudure.
Mauvaise reprise	Tache sombre isolée au niveau de la reprise.
Manque de fusion	Mince ligne sombre avec des bords nettement définis.
Manque de pénétration	Ligne sombre, continue ou intermittente au milieu de la soudure.
Fissures longitudinales Fissures transversales	Fines lignes sombres, rectiligne ou non.
Caniveau	Ligne sombre, large et diffuse le long du bord de la soudure.

La porosité est le résultat de l'occlusion du gaz dans le métal lors de sa solidification. Les porosités peuvent prendre plusieurs formes sur une radiographie (Figure II.6 a, b, c), mais apparaissent souvent comme des taches foncées ou des points ronds ou irréguliers. La porosité peut se produire seule, en groupe ou alignée. Parfois la porosité a une forme allongée et peut avoir l'aspect d'une queue. C'est le résultat du gaz essayant de s'échapper tandis que le métal est toujours dans un état liquide et dans ce cas, elle s'appelle porosité

vermiculaire. Toute porosité est un vide dans le métal. Elle a donc une densité radiographique plus grande que celle de son voisinage.

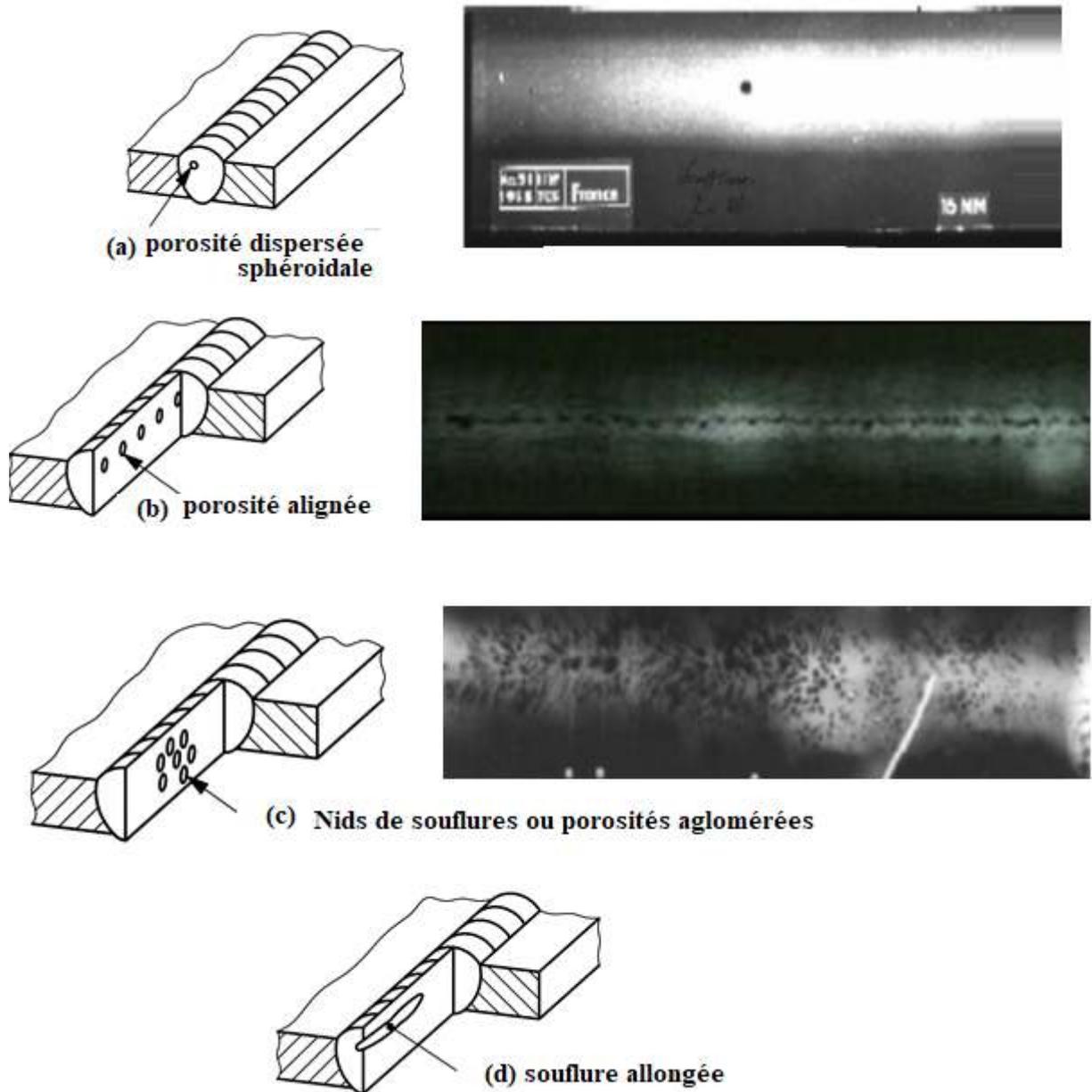


Figure II.6 les différentes formes de porosités

Le **nid de soufflures** (Figure II.6.c) est produit quand les électrodes enrobées sont contaminées par l'humidité. Une fois l'électrode chauffée, cette humidité se transforme en gaz et devient piégée dans la soudure pendant le procédé de soudage. Le nid de soufflures apparaît juste comme une porosité régulière dans la radiographie, mais seulement les indications seront étroitement groupées

Les inclusions de laitier sont des corps solides non métalliques enfermés dans le métal de la soudure ou entre ce dernier et le métal de base. Dans une radiographie, le noircissement et la forme asymétrique et biscornue dans la zone du joint soudé sont indicatifs des inclusions de laitier. (Figure.II.7)

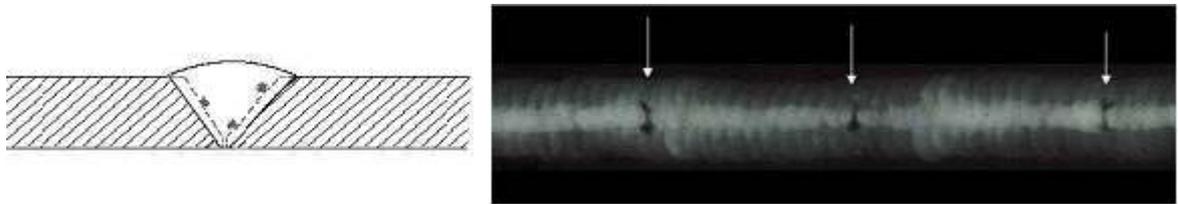


Figure II.7 : Morphologie radiographique des Inclusions de laitier

Le manque de pénétration se produit quand il y a un remplissage incomplet du fond de la rainure de la soudure avec le métal de soudage. Elle est l'une des discontinuités de soudage les plus répréhensibles. Le manque de pénétration produit une canalisation de contraintes où une fissure peut se propager. L'aspect sur une radiographie donne une zone foncée avec des bords bien définis et rectilignes et qui est centrée sur la racine du joint soudé (**Figure II.8**).

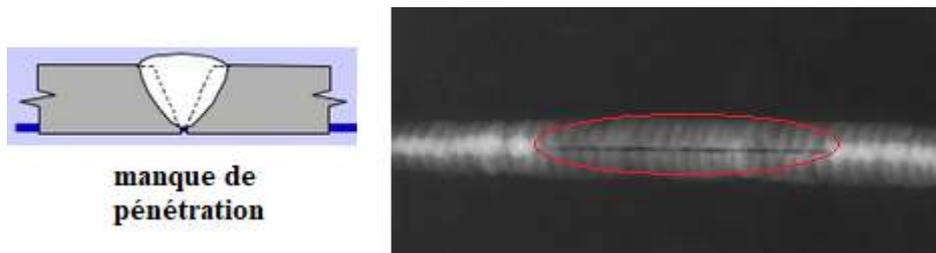


Figure II.8: Morphologie radiographique du défaut manque de pénétration

Le caniveau interne ou caniveau à la racine : est une érosion du métal de base sur les bords latéraux de la racine du joint. Dans l'image radiographique, il apparaît comme une ligne irrégulière foncée excentrée de l'axe de la soudure (Figure II.9). Le caniveau n'a pas des bords aussi droits que le manque de pénétration parce qu'il suit des arêtes en forme de sillon.

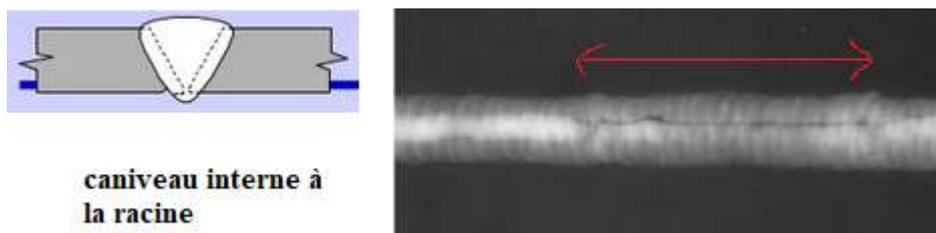


Figure II.9 : Morphologie radiographique d'un caniveau à la racine

Le caniveau externe : est une érosion du métal de base sur le ou les bords de la couronne du cordon de soudure. Dans la radiographie, il apparaît comme une ligne irrégulière foncée le long du bord extérieur de la zone du joint (Figure II.10).

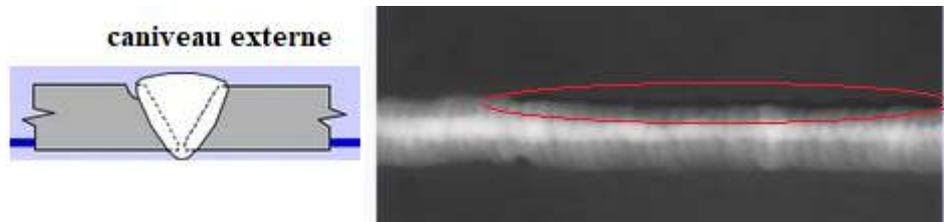


Figure II.10 : Morphologie radiographique d'un caniveau externe

La fissure qui peut être détectée dans une radiographie est seulement celle qui se propage dans une direction qui a produit une variation d'épaisseur, laquelle est parallèle au faisceau du rayonnement. Les fissures apparaissent comme des lignes irrégulières quelconques et souvent très fines (Figure II.11).

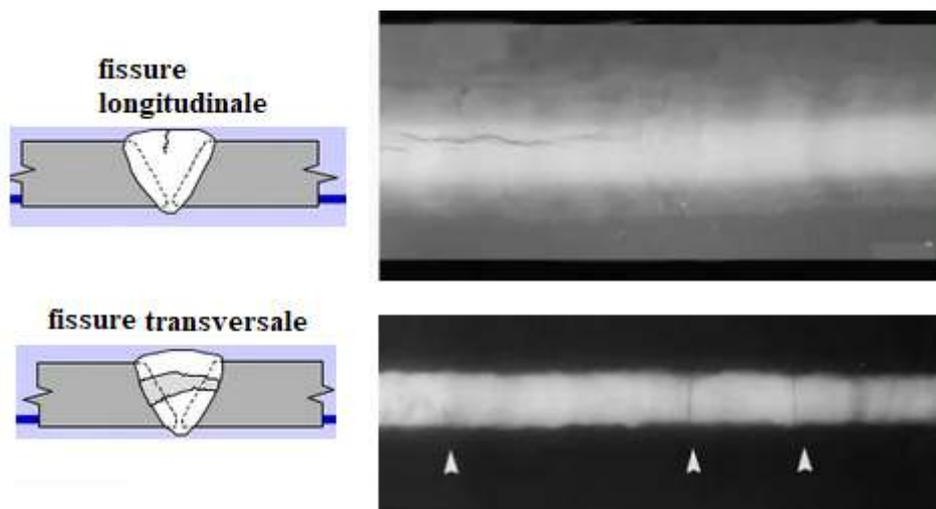


Figure II.11 : les radiographies des fissures

II.4.4. Le contrôle non destructif par magnétoscopique :

La magnétoscopie complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté. Parfois même si les anomalies débouchent, le milieu ne permet pas d'avoir recours au ressuage (pièces immergées par exemple). Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes : passage de courant électrique, passage de flux magnétique. L'examen magnétoscopique nécessite que le

matériau soit ferromagnétique. Un matériau est dit ferromagnétique si lorsqu'il est soumis à un champ magnétique de 2400 A/m il présente une induction d'au moins 1 Tesla.¹⁰

II.4.4.1.Principe :

Elle consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité (ou défaut), les lignes de force du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un "champ de fuite", appelé également "fuite de flux magnétique" (Figure II.6).

Un produit indicateur (composé d'une poudre magnétique très fine) est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique d'aimantation résiduelle). Le produit indicateur coloré et/ou fluorescent est attiré au droit du défaut par les forces magnétiques pour former des indications. Ces indications sont observées, dans des conditions appropriées, soit en lumière blanche (lumière artificielle ou du jour), soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A).

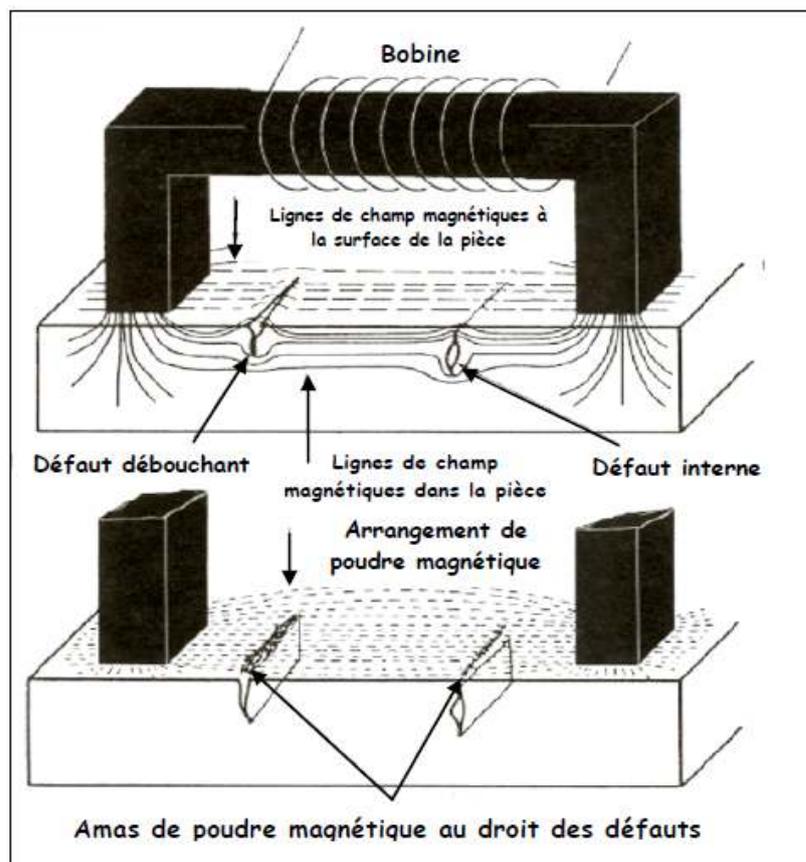


Figure.II.12 : le contrôle par magnétoscopie.

¹⁰ JACQUES SAPRIEL ultrasons , les techniques de l'ingénieur .E 1910 .

Cette méthode de CND permet la localisation précise et le dimensionnement en longueur des défauts de surface ou légèrement sous-jacent (jusqu' à 3 mm sous la surface de la pièce contrôlée) tel que les fissures. L'ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure est de 0.5 mm pour sa longueur et de 1 mm pour sa largeur.

Les indications données par le contrôle magnétoscopique sont conservées sur des supports plastiques soit photographiques ou utilisation d'un ruban adhésif transparent.

Après contrôle, en fonction des conditions d'utilisation de la pièce, celle-ci peut nécessiter une désaimantation à l'aide d'un démagnétiseur ou de tout autre dispositif ou technique appropriés.

II.4.4.2. Paramètres influents sur les indications :

Les paramètres importants à prendre en considération durant l'opération sont :

- la nature du champ magnétique,
 - l'intensité du champ magnétique,
 - la direction du champ magnétique.
 - nature ferromagnétique du matériau,
 - géométrie de la pièce,
 - géométrie et position du défaut,
 - nature et géométrie des particules du révélateur
- La nature du champ magnétique :** On peut rencontrer, suivant les installations utilisées, les formes d'ondes suivantes : monophasée sinusoïdale, monophasée redressée simple ou double alternances, triphasée redressée simple ou double alternance. La forme d'onde utilisée réagit essentiellement sur la pénétration des lignes d'induction dans la section de la pièce ce qui agit sur la précision de détection des défauts.
- L'intensité du champ magnétique :** Ce paramètre influe sur les conditions d'aimantation du matériau : une valeur trop élevée provoque la saturation de l'induction dans le matériau, ce qui n'est pas souhaitable.
- La direction du champ magnétique :** Les indications sont d'autant mieux détectées qu'elles se situent perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique. Pour détecter toutes les discontinuités à la surface d'une pièce, il faut effectuer deux aimantations orthogonales l'une par rapport à l'autre. L'aimantation longitudinale met en évidence les discontinuités transversales ($\pm 45^\circ$), et l'aimantation transversale met en évidence les discontinuités longitudinales ($\pm 45^\circ$).

- **Nature ferromagnétique du matériau** : La courbe d'évolution de la perméabilité magnétique relative μ_r en fonction du champ magnétique H est une caractéristique propre du matériau, présentant un maximum pour une valeur précise du champ excitateur : c'est pour cette valeur maximale que l'efficacité de la méthode est la plus grande. Dans la pratique, un compromis est adopté autour de cette valeur (Figure II.7).

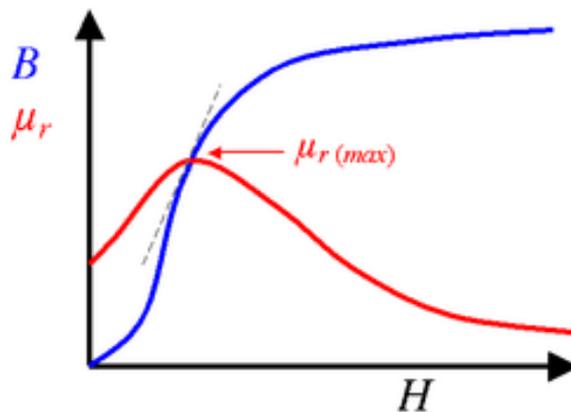


Figure II.13 : évolution de la perméabilité magnétique relative μ_r (henry/m) en fonction du champ magnétique H ($\mu_r = B/H$, B est la densité du flux magnétique (Tesla))

- **Géométrie de la pièce** : La carte des lignes d'induction dans la pièce, ou son voisinage immédiat, est influencée par le profil de la pièce.
- **Géométrie et position du défaut** : La perturbation des lignes d'induction, localement à l'aplomb de défaut conduit à un gradient d'induction dont l'intensité est fonction de la largeur du défaut, de sa profondeur et de sa position sous la surface.
- **Nature et géométrie des particules du révélateur** : Le mécanisme mis en jeu dans la phase de révélation résulte d'un équilibre des forces auxquelles sont soumises les particules de révélateur : force due à la pesanteur, force due à l'action mécanique de projection et force magnétique due au gradient local d'induction. Cette dernière force dépend du volume de la particule et de son aimantation. En d'autres termes, les paramètres influençant la formation du spectre sont les suivants :
- Nature ferromagnétique des particules,
 - Volume et géométrie des particules,
 - Valeur locale de l'induction à l'aplomb du défaut

II.4.4.3 Les méthodes d'aimantation

Dans la pratique, on procède à l'aimantation des pièces suivant deux techniques principales (Figure II.14):

- ✓ La pièce est aimantée totalement ou localement par l'intermédiaire d'un électroaimant,
- ✓ La pièce est aimantée par l'intermédiaire d'un courant la traversant totalement ou localement.

La représentation schématique de ces deux techniques fait l'objet des figures II.7 suivantes.

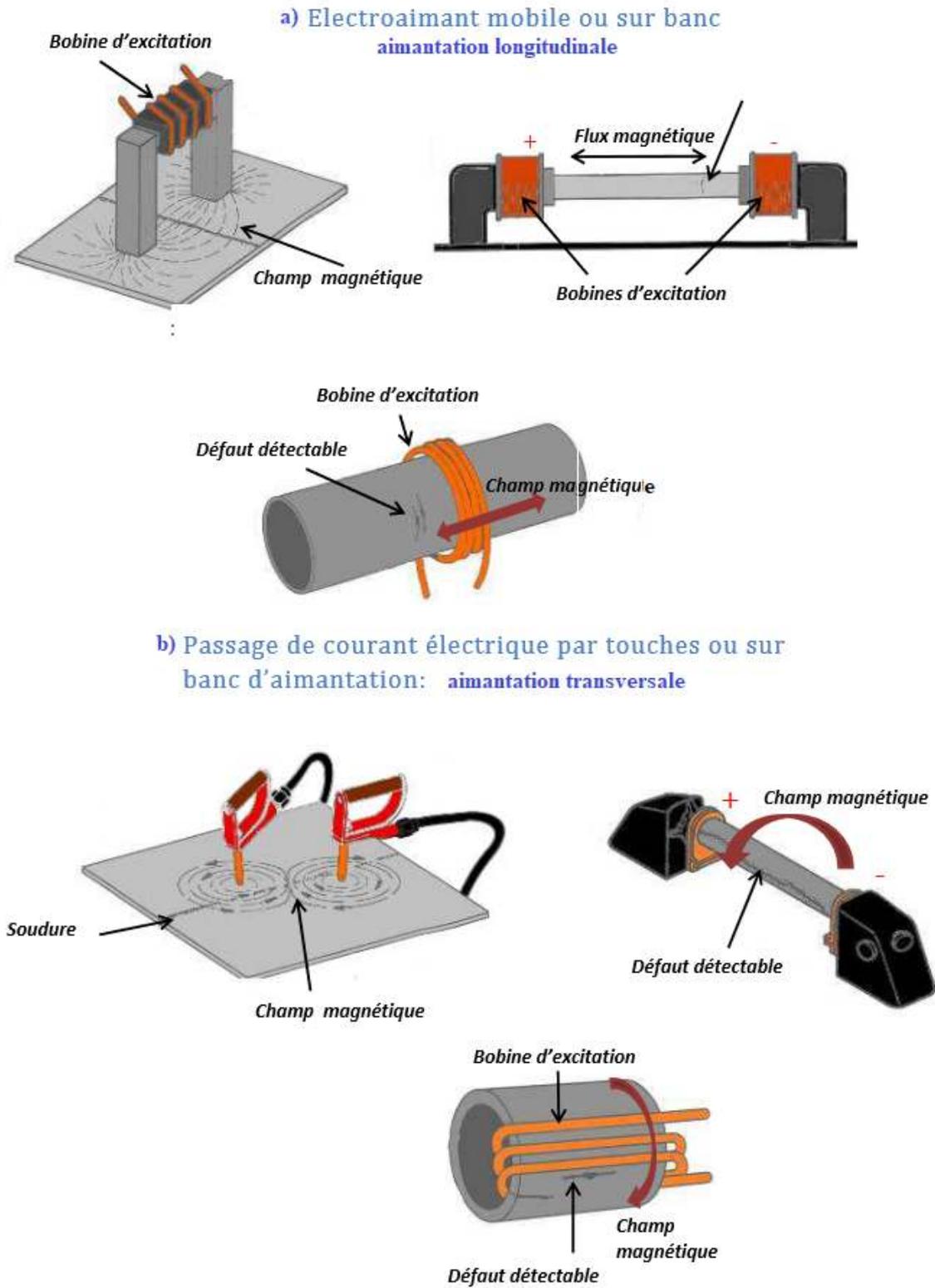
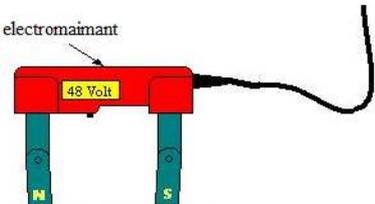


Figure II.14 : Les méthodes d'aimantation

II.4.4.4. Matériels et produits utilisés en magnétoscopie :

Des exemples des différents moyens et produits nécessaires pour un contrôle par magnétoscopie sont donnés dans le tableau suivant

Tableau II.2 : Moyens de contrôle par magnétoscopie

Les équipements utilisés pour l'aimantation	Représentation	Description
Matériel pour l'aimantation par passage de flux magnétique dans la pièce		Aimant permanent à câbles
		Électroaimant portatif à bras articulés portatif
Les générateurs de courants,		Générateur de courant permettant la magnétisation et la démagnétisation par passage de flux et/ou de courant
Cales et étalons		<p>Cale à trous permettant de vérifier la polarité des bobines d'un banc de contrôle magnétoscopique ou l'efficacité d'une aimantation longitudinale.</p> <p>Cale à gradins fendu longitudinalement, il permet de vérifier les performances du circuit d'aimantation transversale des bancs de contrôle magnétoscopique</p>
Moyens de visualisation		Eclairage lumière blanche. Eclairage UV (ressuage fluorescent).

<p>Produits de nettoyage</p>		<p>L'utilisation de produits de nettoyage a pour principal but de faciliter la mobilité des particules magnétiques à la surface de la pièce et d'éviter l'apparition d'images magnétiques fallacieuses.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nettoyants utilisés: acétate d'éthyle, acétone, alcool isopropylique,...
<p>Indicateurs magnétiques</p>		<ul style="list-style-type: none"> -liqueurs magnétiques -Poudre magnétiques -Poudre Magnétique Fluorescente

II.4.4.5. Intérêt et limitation de la méthode

Les intérêts de la méthode

- Méthode globale
- Détection de tous les défauts débouchant
- Contrôle de pièces de quelques millimètres à plusieurs mètres de long
- Inspections relativement rapides et peu coûteuses
- Résolution importante
- Matériel robuste, pouvant être utilisé dans des environnements difficiles

Principales limitations

- Contrôle limité aux pièces ferromagnétiques
- Méthode non entièrement automatisable
- Détection de défauts internes parfois difficile (suivant leur taille, leur profondeur, etc.)
- Nécessite l'emploi de produits chimiques (révélateurs)

II.4.5. Le contrôle non destructif par Courants Foucault (CF) :

II.4.5.1. Introduction

Les courants de Foucault permettent l'examen non destructif des matériaux conducteurs de l'électricité. Leur utilisation ne nécessite pas d'agent de couplage et peut être menée à travers un léger dépôt.

Les premières applications industrielles du contrôle par courants de Foucault apparurent aux Etats Unis et en Europe. Farrow fut ainsi l'un des pionniers des contrôles non destructifs puisque, dès 1930, il utilise les courants de Foucault pour inspecter des tubes soudés à une échelle industrielle¹¹. Toutefois, les Courants de Foucault sont restés un peu en marge des autres procédés de CND en raison :

- Du caractère abstrait des phénomènes électromagnétiques ;
- De la difficulté d'interprétation des résultats ;
- De l'importance des paramètres expérimentaux dont la théorie ne rend pas compte de manière simple ;
- De la non-représentativité des défauts artificiels par rapport aux défauts naturels recherchés.

Cependant, l'essor des industries aéronautique et nucléaire favorisa le développement rapide des applications et des équipements de contrôle par courants de Foucault. La sensibilité des appareils, la possibilité de contrôle à des vitesses de défilement élevées, et le récent apport de l'informatique permettant une automatisation du contrôle expliquent l'importance prise, à l'heure actuelle, par ce mode de contrôle dans de nombreux secteurs industriels, notamment le nucléaire, l'aéronautique, la métallurgie, la pétrochimie, la chimie, la mécanique, la production d'énergie...

Le contrôle par courants de Foucault est surtout utilisé pour détecter et quantifier divers défauts superficiels, tels que les fissures et les hétérogénéités chimiques, microstructurales ou mécaniques. Il est également utilisé pour mesurer les épaisseurs de revêtements métalliques ou isolants sur des matériaux conducteurs¹². Ses applications dans le milieu industriel se trouvent dans la détection de fissures sur les pièces d'avions, les échangeurs de chaleur, les tubes de condenseurs dans les zones laminées, les bords des aubes de

¹¹ Vuillermoz P.L., Les courants de Foucault : Principes, mesure et contrôle, AFNOR, 1994

¹² B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, D.

turbines, des ailettes de compresseurs et de ventilateurs, les réacteurs des unités d'hydrocracking de raffinerie.

II.4.5.2.Principe de la méthode CF.

Le procédé est basé sur l'induction électromagnétique créée dans l'échantillon contrôlé par une bobine (Haute Fréquence ou Basse Fréquence), création de courant en boucle fermée dans la pièce (courants de Foucault), ceux-ci, à leur tour, vont réagir sur l'impédance de la bobine.

C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle. En effet le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré ainsi que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

Si un défaut vient perturber la circulation des courants de Foucault, l'induction en retour sur la bobine excitatrice ou sur la bobine de mesure sera elle-même modifiée et l'impédance de cette bobine variera. Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau) (*Figure II.9.b*).

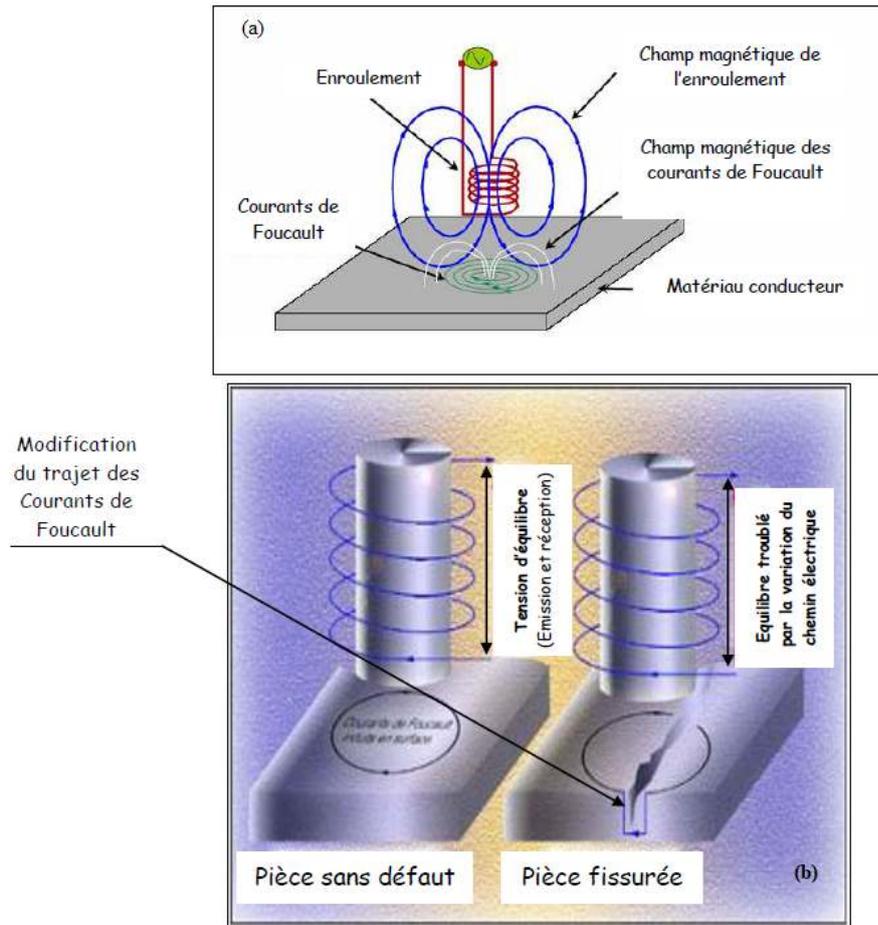


Figure II.15 : Principe de la détection par les courants de Foucault

L'observation est réalisée par visualisation sur un oscilloscope des variations de l'impédance électrique de la sonde entre une zone saine et une zone défectueuse.

Cette méthode est applicable sur tous matériaux conducteurs de l'électricité et ne permet de mettre en évidence que des défauts superficiels (ou en peau).

- **L'effet de peau**

L'intensité des courants de Foucault dans un cible constituée d'un matériau conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ (en Sm^{-1}) et une perméabilité magnétique μ (en Hm^{-1}), diminue avec la profondeur. Cet effet est décrit par la profondeur de pénétration conventionnelle δ (en m), souvent nommée épaisseur de peau. En pratique, on peut détecter des défauts jusqu'à une profondeur de quelques δ . L'épaisseur de peau est définie :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad \text{ou } \omega = 2\pi f \quad \text{et } f \text{ est fréquence du courant d'excitation } (\omega \text{ la pulsation rd/s})$$

II.4.5.3. Avantages et limites de la méthode

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de la méthodes CF

Avantages	Inconvénients
Pas de contact nécessaire et aucun couplant, poudres, ou <i>d'autres substances physiques</i> n'est requise d'être appliquée sur le matériau d'essai. Le seul lien nécessaire entre la sonde et du matériel d'essai est un champ magnétique.	Il n'est pas adapté pour détecter des défauts à forte profondeur.
Les résultats des tests sont généralement instantanés.	Méthode par comparaison
<i>Grande sensibilité (petits défauts)</i>	Sensible aux parasites et à la température
<i>Ferreux et non ferreux</i>	Exclusivement sur métaux
Donne des informations sur la dimension des défauts	Sensible à de nombreuses variables y compris la conductivité et l'épaisseur du matériau, et les variations de perméabilité
les tests par courants de Foucault ne sont pas risqués; il n'y a pas de danger de rayonnement ou d'autres dangers	
la préparation du matériel n'est généralement pas nécessaire et le nettoyage n'est pas non plus demandé.	

II.4.6. Le contrôle non destructif par ultrasons :

II.4.6.1 Principe de la méthode

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde.

Celles-ci sont produites par effet piézoélectrique par des transducteurs, et introduites dans le matériau à inspecter via un fluide de couplage. L'onde ultrasonore est en partie réfléchiée à chaque fois qu'elle rencontre un changement brutal de milieu (bords supérieur et inférieurs d'une plaque, défauts...).

II.4.6.2. Propriétés et différents types d'ondes ultrasonore :

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 0.5 à 25MHz.

On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période (Figure II.16).

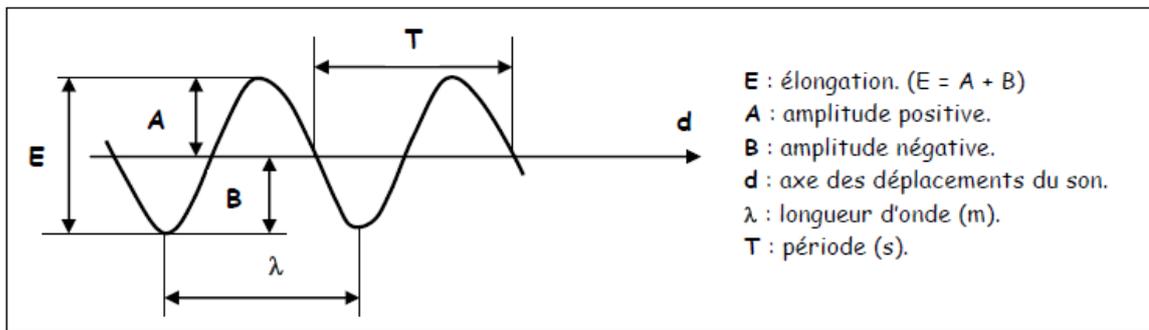


Figure II.16 : Propriété d'une onde

- La fréquence f (nombre de cycles par seconde) de réapparition du phénomène est donc donnée par l'inverse du temps :

$$f = 1/T \text{ (} f \text{ en Hz et } T \text{ en s)}$$

- L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde : $\lambda = v T = v / f$ (λ en m, v en m/s et f en Hz)

Plusieurs types d'ondes ultrasonores sont susceptible de se propager dans les milieux solides. Ces ondes se différencient les unes des autres par :

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

Ainsi on peut distinguer trois types d'onde (Figure II.17) :

1-Les ondes longitudinales ou de compression : La direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les ondes les plus couramment utilisées pour le contrôle non destructif par ultrasons et ce sont celles qui voyagent le plus rapidement, soit environ 5900 mètres par seconde (0,23 pouce par microseconde) dans l'acier. Les ondes longitudinales peuvent se transformer en ondes transversales sous l'effet de la réfraction ou de la réflexion.

2- Onde transversale ou de cisaillement : la direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Les ondes transversales sont plus lentes et elles ont une longueur d'onde plus courte que les ondes longitudinales de la même fréquence. Elles sont utilisées dans la plupart des inspections par sonde d'angle pour la recherche de défauts par ultrasons. La vitesse de propagation des ondes transversales dans l'acier est d'environ 3250 mètres par seconde (0,128 pouce par microseconde). Ce type d'ondes ne se propage que dans les solides. On ne les trouve ni dans les liquides, ni dans les gaz. Elles peuvent se transformer en ondes longitudinales sous l'effet de la réflexion ou de la réfraction lorsqu'elles frappent une interface.

3- Onde de surface : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide. Les ondes de surface peuvent servir à détecter les fissures débouchantes à la surface d'une pièce.

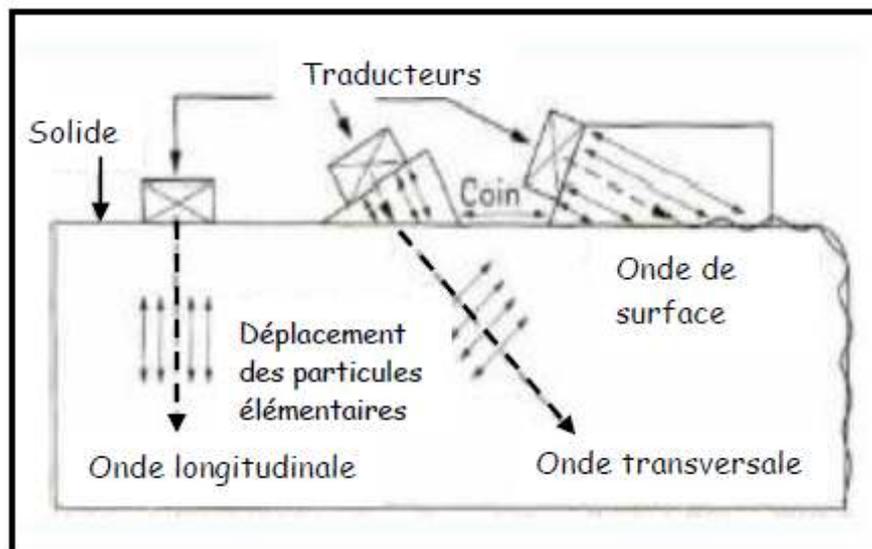


Figure II.17. :Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide

- **Vitesse de propagation**

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type d'hétérogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions (Tableau II.3).

Tableau II.4 : Vitesse des ondes en fonction de la nature du matériau

Matériau	vitesse m/sec.	
	ondes L	ondes T
Acier doux	5960	3240
Aluminium	6250	3100
Cuivre	4630	2140
Nickel	6040	3010
Acier inox (347)	5750	3100
Air	330	-
Eau	1500	-

La vitesse de l'onde dépend de la nature de matériaux que la transporte et de type d'onde :

- **Onde longitudinale :** $V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$
- **Onde Transversale :** $V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$
- **Onde de surface (ou de Rayleigh):** $V_S = 0.9 V_T$

où

E : Module d'Young du matériau N/m² ;
 ρ : masse spécifique du matériau (Kg/m³) ;
 ν : coefficient de Poisson

II.4.6.3. Fonctionnement d'un appareil ultrason

Pour décrire sommairement le principe de l'appareil à ultrasons, nous choisissons la méthode par impulsion-écho (Figure II.18). Cet appareil comporte un générateur qui envoie des impulsions électriques au palpeur PIEZOELECTRIQUE. Au même instant, ce signal est visualisé sur l'écran sous forme de pic : cette déflexion du spot lumineux est appelée "top d'émission". Au niveau du palpeur le signal est instantanément transformé en onde ultrasonore. Ce faisceau pénètre dans la pièce à contrôler. Lorsque le faisceau ultrasonore rencontre la face opposée de la pièce, il y a réflexion sur le miroir que constitue l'interface pièce-air, et les ultrasons reviennent vers le palpeur. Le spot se déplace toujours sur l'horizontale. Lorsque le faisceau ultrasonore provient au palpeur, celui-ci émet un signal électrique qui est à son tour visualisé sur l'écran de l'appareil, par une déflexion de la trace horizontale : c'est l'écho de fond.

L'espace compris entre le top d'émission et l'écho de fond, correspond au temps mis par les ultrasons pour parcourir l'épaisseur du matériau en aller et retour.

Si un défaut se trouve sur le parcours du faisceau ultrasonore, une partie des ultrasons est immédiatement réfléchi vers le palpeur, avant que la partie complémentaire n'ait atteint le fond de la pièce. On observe alors sur l'écran un écho intermédiaire, dont l'amplitude est fonction de la surface et de l'orientation du défaut.

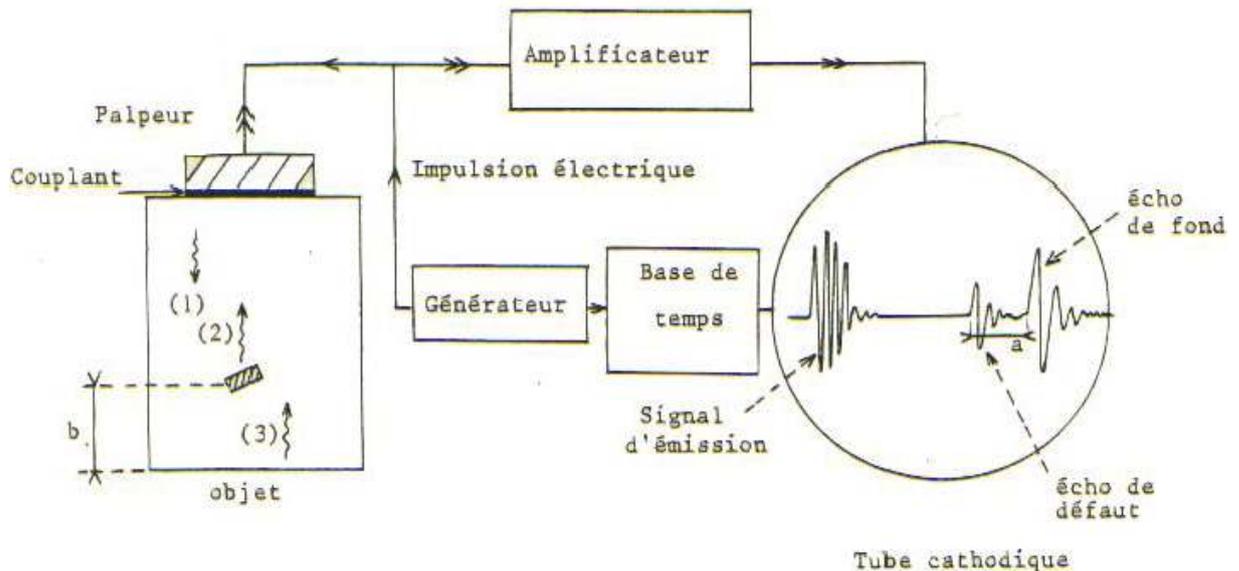


Figure II.18: schéma de fonctionnement d'un appareil à ultrason

En fait, la mise en œuvre d'un appareil à ultrasons nécessite des étalonnages préalables qui ont pour but de régler, de contrôler l'appareil et ses accessoires, suivant des normes. Ces opérations menées avec l'aide de cales ou d'étalons, doivent être parfaitement maîtrisées et mises en pratique par l'opérateur. Il est à noter que de l'interprétation de l'oscillogramme obtenu lors du contrôle, dépendra la conclusion quant au défaut présent dans le matériau. En voici quelques exemples :

- 1- Dans le cas d'une grande quantité d'impuretés microscopiques, on observe sur l'écran une diminution de l'écho de fond, et une trépidation plus importante de la trace horizontale, appelée aussi "herbe".
- 2- Dans une pièce saine comportant une soudure, le faisceau ultrasonore de fréquence 4MHz est réfléchi sur la face opposée. Quand une défectuosité se trouve sur le parcours des ultrasons, une réflexion a lieu, et un écho de défaut apparaît sur l'écran de l'oscilloscope : son amplitude est fonction de la taille et de l'orientation de ce défaut. L'espace compris entre les deux pics correspond au temps mis par le faisceau

ultrasonore pour parcourir un aller-retour palpeur-défaut. L'examen de cette pièce saine donne deux échos de fond, mais la présence d'inclusion est très facilement détectée : l'amplitude de l'écho de fond disparaît à cause de l'effet de masque provoqué par l'inclusion.

II.4.6.4. Les avantages et limites des US

□ **Les avantages du contrôle par ultrasons sont :**

- Il est rapide
- Les résultats sont immédiats.
- Il est utilisable sur la plupart des matériaux.
- Il n'est pas nécessaire d'avoir accès aux deux côtés de la pièce.

□ **Les inconvénients du contrôle par ultrasons sont :**

- Un produit de couplage est exigé.
- Les défauts parallèles aux ondes ultrasonores sont difficiles à déceler.
- L'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise.
- Le matériel doit être étalonné de façon régulière pour chaque épaisseur et chaque type de matériau.

II.4.6.5. Appareillage utilisé en US

L'ensemble de contrôle US comporte:

- Un générateur de signal électrique
- Palpeurs : (exp. cristal piézoélectrique)
- Un couplant pour le palpeur émetteur
- L'échantillon à tester
- Un indicateur électrique type oscillographe cathodique, accompagné parfois d'un enregistreur analogique ou numérique (Fig 10-25)
- Blocs d'étalonnage.

a) Les palpeurs :

Les ondes ultrasonores utilisées pour la recherche de défauts sont générées et reçues par des petites sondes à ultrasons. Ces sondes convertissent les impulsions électriques en ondes

sonores et les ondes sonores en énergie électrique. Les sondes destinées à la recherche de défauts sont offertes dans une grande variété de tailles, de fréquences et de boîtiers, mais la structure interne de la plupart d'entre elles est identique (Figure II.19).

En règle générale, l'élément actif de la sonde est constitué d'un disque, d'un carré ou d'un rectangle de céramique piézo-électrique mince convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique (vibrations ultrasonores), et vice versa. Lorsque cette céramique piézo-électrique est excitée par une impulsion électrique, elle génère des ondes sonores, et quand les échos de retour la font vibrer, elle génère une tension. L'élément actif, souvent appelé « cristal », est protégé contre les dommages par une plaque d'usure ou une lentille acoustique et supporté par un bloc de matériau amortisseur qui élimine le bruit de la sonde après la génération de l'impulsion. Ce sous-ensemble ultrasonore est monté dans un boîtier avec les connexions électriques nécessaires. Toutes les sondes de contact, d'angle, à ligne à retard et d'immersion utilisent cette conception de base. Les sondes à émission-réception séparées, généralement utilisées dans les applications de contrôle de la corrosion, ont toutefois une conception différente. En effet, elles ont des éléments différents pour l'émission et la réception, lesquels sont séparés par un isolant acoustique ; elles n'ont pas de renfort et sont munies d'une ligne à retard intégrale à la place de la plaque d'usure ou de la lentille pour diriger et coupler l'énergie. La fréquence d'émission dépend de l'épaisseur de l'élément piézoélectrique.

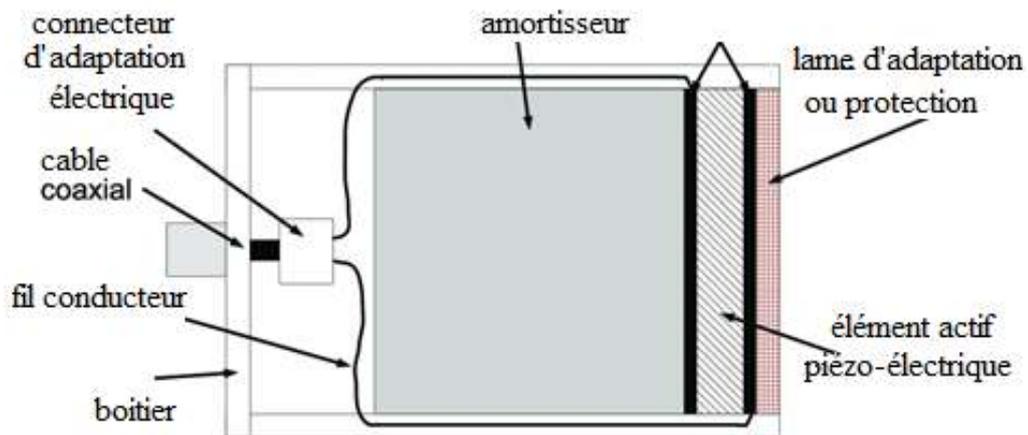


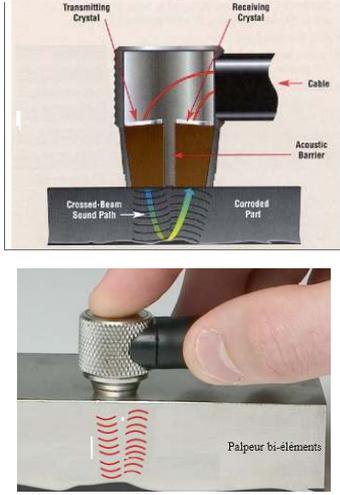
Figure II.19 schéma descriptif d'un palpeur

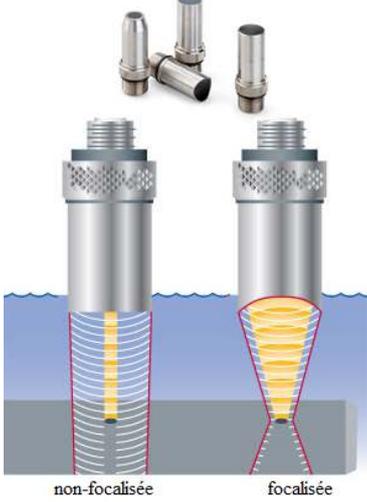
▪ **Différents types de palpeurs :**

Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques adaptées aux différents modes d'utilisation : contrôle par contact ou en immersion, nature du produit à sonder, des défauts, etc. Les 4 types de palpeurs les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants (Tableau II.4) :

- Palpeur droit cylindrique,
- Palpeur d'angle à sabot,
- Palpeur droit focalisé,
- Palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE).

Tableau II.5 : Les différents types de palpeurs

Type palpeur	Description	Représentation
Palpeur droit cylindrique	Une sonde de contact comprend un élément unique à ondes longitudinales utilisé en contact direct avec la pièce inspectée.	
Palpeur d'angle à sabot	Les sondes d'angle standard sont munies d'un seul élément transmetteur large et sont jointes à un sabot, ce qui permet de générer une onde longitudinale ou une onde transversale de réfraction dans la pièce inspectée.	
Palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE)	L'inclinaison vers l'intérieur de ces deux éléments l'un par rapport à l'autre permet de générer un parcours sonore en forme de V dans le matériau inspecté. Cette focalisation simulée améliore la résolution dans la zone focale. Une sonde à émission-réception séparées comprend deux éléments à cristaux logés dans le même	

	boîtier et séparés par une barrière acoustique. Un des éléments sert à émettre des ondes sonores longitudinales et l'autre sert de récepteur.	
Palpeur à immersion	Une sonde d'immersion se compose d'un seul élément émetteur à ondes longitudinales muni d'une couche quart d'onde acoustiquement adaptée à l'eau. Lors d'une inspection, elles transmettent les ultrasons dans des pièces partiellement ou totalement immergées dans l'eau, permettant ainsi un couplage efficace et uniforme assurant un balayage rapide. L'ajout d'une lentille de focalisation permet d'augmenter la sensibilité et la performance de la sonde dans une zone ciblée d'une pièce. Les sondes à immersion peuvent être focalisées de manière sphérique ou cylindrique.	

Certaines applications particulières font appel à des palpeurs spéciaux tels que les palpeurs droits rectangulaires, les palpeurs à focalisation cylindrique et les barrettes multi-palpeurs, nées dans le domaine médical et dont l'emploi se développe dans l'industrie.

▪ *Choix du palpeur*

Un palpeur est caractérisé par son type (droit, angle...), sa fréquence, son diamètre (quelques mm à 300 mm), son amortissement.

Le choix du palpeur est subordonné au contrôle à effectuer. Le tableau suivant illustre l'influence de la fréquence sur la longueur d'onde (mm) dans différents milieux.

Tableau II.6 : les fréquences des palpeurs classés par type de matériau

Fréquence	1MHz	2MHz	3MHz	5MHz
Acier	5.85	2.93	1.95	1.16
Aluminium	6.22	3.11	2.07	1.24
Cuivre	4.7	2.35	1.57	0.94
Fonte grise	4.6	2.3	1.53	0.92
plexiglass	2.7	1.35	0.9	0.54

-Palpeurs obliques : Les palpeurs obliques, produisent des ondes transversales à partir d'ondes longitudinales, en tirant profit du phénomène de réfraction. C'est-à-dire, pour que l'écho revienne sur le palpeur, il faut que la direction du réflecteur (défaut) soit orthogonale au faisceau. On choisit généralement des angles d'incidences de manière à n'avoir que des O.T. dans le matériau à contrôler. Les angles les plus courants dans le commerce sont: 45°, 60° et 70° (sous-entendus dans l'acier).

Certains sabots permettent l'ajustement de l'angle d'incidence. L'utilisation de la technique de contrôle avec un traducteur à angle est très utilisée dans le contrôle des soudures.

-Palpeur droit (ou normal) : Il émet des ondes longitudinales et les transmet à la pièce perpendiculairement au plan de la surface sur laquelle il est appliqué. Il est utilisé dans les méthodes d'examen par réflexion en jouant successivement le rôle d'émetteur et de récepteur dans les techniques de transmission.

Tous les palpeurs doivent être convenablement amortis à l'aide d'un matériau ayant une impédance acoustique plus grande que celle du cristal et une bonne isolation électrique (ex. caoutchouc synthétique).

b) Le couplant :

Si on applique un palpeur directement sur une pièce, la réponse sera mauvaise sur l'oscilloscope. Les ultrasons ne passent pas dans l'air, il faut utiliser un intermédiaire entre le palpeur et la pièce. Celui-ci chasse l'air entre le palpeur et la pièce en plus en plus d'amoinrir les pertes causées par les irrégularités de la surface. Les couplants peuvent être liquides, semi-liquides, pates. Un bon couplant satisfera les conditions suivantes :

- Il doit posséder une impédance acoustique comprise entre celle du palpeur et celle du spécimen.
- Le couplant doit mouiller à la fois la surface du palpeur et la surface de la pièce et doit chasser l'air entre les deux.
- Le couplant doit s'appliquer facilement, être homogène et exempt de bulles d'air
- Le couplant doit adhérer facilement aux surfaces mais être également facile à enlever
- Le couplant doit être chimiquement inerte avec le palpeur et la pièce.

Le choix du couplant dépend essentiellement de l'état de surface de la pièce à inspecter. Dans tous les cas, le couplant sera aussi mince que possible.

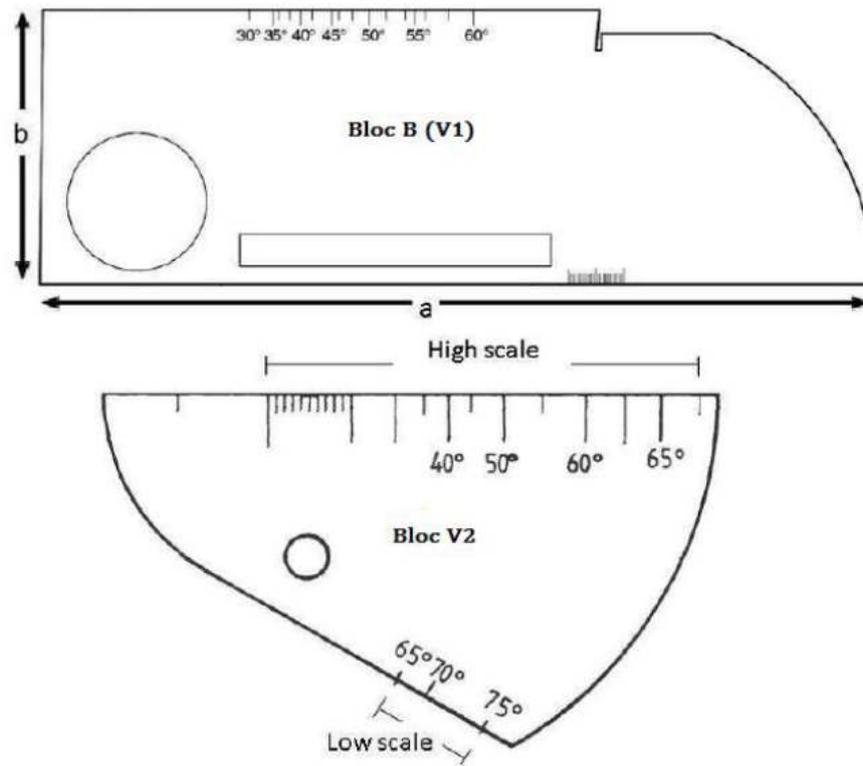
c)Étalonnage :

L'étalonnage concerne essentiellement la vitesse de propagation et du zéro, qui doit être effectué chaque fois que le matériau inspecté ou la sonde utilisée change

- **Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2.**

C'est un acier non allié dont la teneur en carbone est inférieure à 0.15%. L'indice de grosseur du grain ferritique G doit être supérieur ou égal à 8 et les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement de 5920 et 3255 m.s⁻¹. L'écrouissage après usinage doit être minimale et la rugosité Ra inférieure à 3.2 µm. Le bloc d'étalonnage V1 est le plus complet. Il existe un modèle réduit et léger appelé V2 pour les applications sur chantier (Figure II.20).

Avant tout contrôle d'une pièce, il est nécessaire d'étalonner la base de temps du générateur à ultrasons et les caractéristiques du palpeur. Les blocs d'étalonnage sont utilisés pour déterminer le point d'émergence du traducteur, l'angle de réfraction. Le réglage est plus précis lorsque le matériau à contrôler ne diffère pas de celui du bloc (acier ferritique faiblement allié).



Dimensions des blocs de référence V1		et	V2
Épaisseur	25		12.5
Rayon de courbure	100		50
Largeur b	100		
Longueur a	300		

Figure II.20 Les étalons type B et V2 et leurs caractéristiques

d) Description générale des appareils de recherche de défauts

Les appareils de recherche de défauts modernes sont des appareils compacts portables équipés de microprocesseurs convenant aussi bien à l'utilisation en usine que sur le terrain (Figure II.21). Ils génèrent et affichent une forme d'onde ultrasons interprétée par un inspecteur formé, souvent à l'aide de logiciel d'analyse, pour situer et catégoriser les indications présentes dans la pièce. Ils comprennent généralement un appareil et un émetteur-récepteur ultrasons pour la capture du signal et un logiciel pour son analyse, un écran d'affichage de la forme d'onde et un module d'enregistrement des données. S'il est vrai que des appareils de recherche de défauts analogiques sont toujours fabriqués, la

plupart des appareils modernes utilisent un traitement numérique du signal pour une meilleure stabilité et une meilleure précision.

La partie émetteur/récepteur ultrasonore est située à l'extrémité avant du détecteur de défauts. Elle fournit l'impulsion d'excitation qui actionne la sonde, et assure l'amplification et le filtrage des échos de retour. Il est possible de contrôler l'amplitude, la forme et l'amortissement des impulsions afin d'optimiser la performance de la sonde, et de régler le gain de réception et la largeur de bande pour optimiser le ratio signal sur bruit.

Les appareils de recherche de défauts modernes captent généralement la forme d'ondes numériquement pour ensuite la mesurer et l'analyser. Une horloge ou une minuterie est utilisée pour synchroniser les impulsions de la sonde et permettre l'étalonnage de la distance.



Figure II.21 : Appareils utilisés dans le cadre de cette étude Olympus et ECHO LT

Le traitement du signal peut simplement générer l'image de la forme d'ondes indiquant l'amplitude du signal en fonction du temps sur une échelle de mesure étalonnée, ou alors utiliser des algorithmes de traitement numérique sophistiqués qui intègrent la correction amplitude-distance et les calculs trigonométriques des parcours sonores angulaires. Des portes d'alarmes sont souvent utilisées pour contrôler les niveaux des signaux à des points sélectionnés dans le train d'ondes pour indiquer les échos générés par les indications.

L'écran peut être à cristaux liquides, électroluminescent ou, dans les modèles plus anciens, CRT. Il est normalement étalonné en unités de profondeur ou de distance. Des écrans en couleurs permettent de faciliter l'interprétation de l'image.

II.4.6.6. Procédures de contrôle :

Les deux principales procédures de contrôle par US sont :

- **Parcontact** : Le palpeur est appliqué directement sur la pièce examinée. Un liquide de couplage (ou couplant) est interposé entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran. La Figure II.21 décrit le principe de mise en œuvre dans le cas de contrôle d'une soudure.

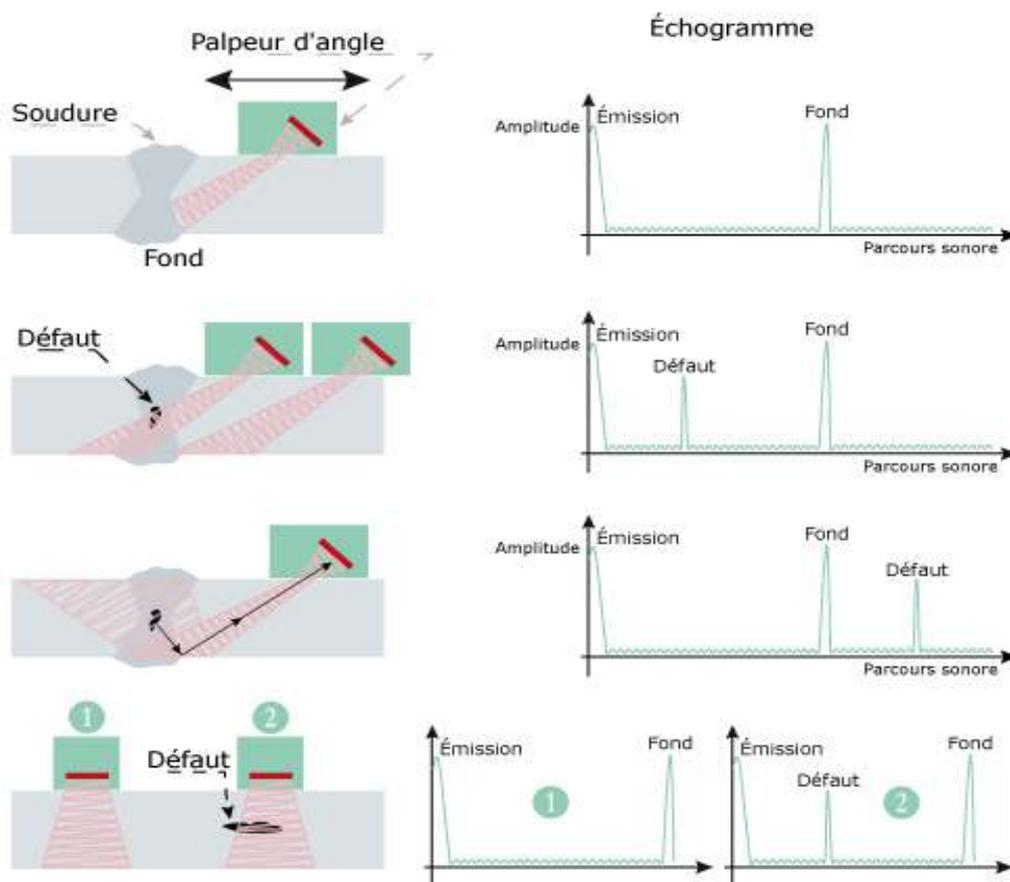


Figure II.22 : Principe du contrôle par ultrasons : exemple du contrôle d'une soudure

2) **Par immersion** : La pièce à contrôler est immergée complètement dans le liquide de couplage. Le palpeur et la pièce ne sont plus directement en contact, le sondage peut être manuel mais dans la plupart des cas, il est automatique.

II.4.6.7 Types de mesures

Les manières de réaliser les mesures peuvent être classées en deux catégories :

- Mesure par réflexion
- Mesure par transmission.

□ Mesure par réflexion ;

C'est la méthode la plus utilisée. En utilisant un appareil ultrasonore contenant un palpeur jouant le rôle d'émetteur/récepteur (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. Entre deux impulsions le palpeur reçoit les ondes réfléchies qui sont discriminées de l'émission dans le temps.



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.

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

La visualisation :

La figure Figure.II.23 schématise les différentes manières de visualisation.

- La visualisation de type A (A Scan) : 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

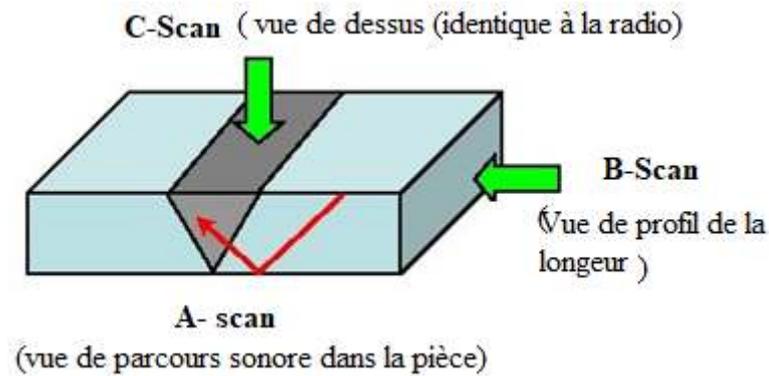


Figure II. 23 Les différentes représentations[11]

□ Mesure par transmission :

Cette méthode est appliquée pour des pièces de faible épaisseur, elle nécessite deux palpeurs ultrasonores (un émetteur et un récepteur).

La difficulté de cette dernière méthode vient dans le fait que le récepteur doit se trouver exactement là où le signal "sort" de la pièce

Ils existent deux variantes :

- a) **Méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)** : Il consiste à contrôler une soudure en utilisant deux palpeurs positionnés de part et d'autre de la soudure, fonctionnant en transmission. Les palpeurs sont choisis de telle manière que le faisceau soit très divergent et qu'il "Insonifie" le plus grand volume possible de la soudure, si ce n'est la totalité de celle-ci. Si une discontinuité est présente dans cette soudure, celle-ci va diffracter une partie de l'énergie suivant les lois habituelles de l'acoustique. C'est cette énergie diffractée qui va être récupérée par le palpeur de réception et qui va servir à localiser la discontinuité (Figure.II.24).

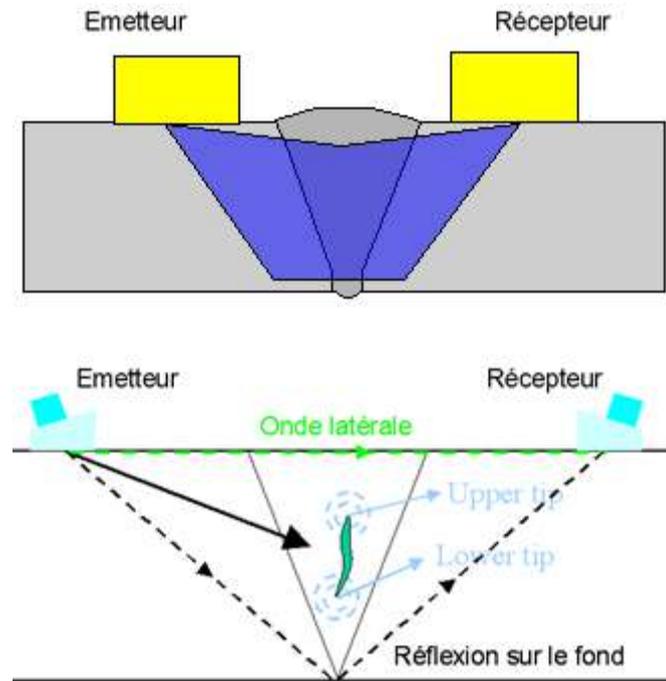


Figure II. 24 : Méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)¹³

b) La technologie multiéléments (PhasedArray) : Elle consiste à utiliser des palpeurs divisés en plusieurs petits palpeurs élémentaires et à exciter chacun de ces traducteurs élémentaires avec un écart de temps (retard) qui va permettre de créer un faisceau par interférence constructives. On peut ainsi créer des faisceaux inclinés ou focalisés avec des palpeurs au contact sur des surfaces droites. En modifiant d'un tir à l'autre ces retards, le faisceau pourra être soit déplacé, soit modifié dans sa direction. On crée ainsi un phénomène de " balayage " qui est soit un balayage linéaire, soit un balayage sectoriel. De plus, on peut superposer à cela une focalisation électronique sans déplacer le palpeur ou sans adapter sa surface d'entrée. Ces technologies sont directement issues des technologies médicales et ont été adaptées aux problèmes industriels et aux matériaux industriels.

Dans le contrôle des soudures, le contrôle par technique "PhasedArray" présente l'avantage de supprimer le mouvement de va et vient traditionnel du traducteur (Figure II.25). En effet, celui-ci est remplacé par un balayage électronique en utilisant des traducteurs comportant par exemple 64 éléments qui vont couvrir la totalité de la soudure.¹⁴

¹³ <https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/flaw-detection/weld-inspection/>

¹⁴ <https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/flaw-detection/weld-inspection/>

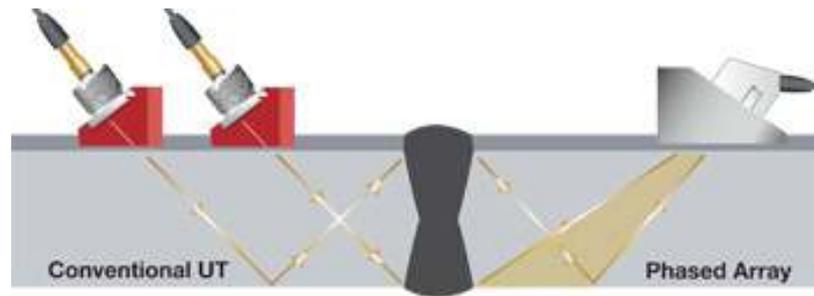


Figure.II.25 : Comparaison entre faisceau US conventionnel et phasedarray

Un autre élément intéressant peut être de remplacer le contrôle sous plusieurs incidences successives (45°; 60°; 70°) par un seul passage avec un balayage sectoriel (Figure.II.20) qui couvrira l'ensemble des angles compris entre 45° et 70° par exemple.

Le grand nombre de données générées rend utile la visualisation sous forme d'imagerie. Plusieurs types d'imagerie peuvent être générées par un contrôle "PhasedArray".

Tout d'abord le S-scan (ou sectoriel scan) qui représente une imagerie de type B-Scan (coupe) en utilisant l'axe électronique comme un axe mécanique. C'est-à-dire que si l'on paramètre le contrôle "PhasedArray" en balayage sectoriel, l'imagerie de type S-scan représente la coupe sous le transducteur avec les différents angles de contrôle. C'est ce type d'imagerie qui est couramment utilisée en échographie médicale.



Figure II. 26: balayage sectoriel

- **Mode opératoire :**

- Mode opératoire identique aux ultrasons conventionnels
- Plan de balayage adapté en fonction du nombre d'éléments utilisés et des angles de réfractions choisis,

Phase 1

- Etalonnage rigoureux de l'ensemble de l'appareillage à ultrasons (poste, traducteurs) à l'aide de blocs d'étalonnage et de référence de nuances similaires aux pièces à inspecter.

Phase 2

- Nettoyage mécanique des zones de déplacement des traducteurs.
- Appliquer un gel de couplage sur la zone de déplacement du ou des traducteurs.

- **Les avantages de la méthode multiéléments :**

- Rapidité de mise en œuvre (environ 3 fois plus rapide que les ultrasons conventionnels)
- Les systèmes à ultrasons multiéléments peuvent être utilisés pour presque tous les types d'inspections effectuées traditionnellement à l'aide d'appareils de recherche de défauts à ultrasons conventionnels.
- Les ultrasons multiéléments peuvent également servir à établir de façon efficace le profil d'épaisseur de paroi restante dans les applications de contrôle de la corrosion.
- Les avantages de la technologie des multiéléments comparativement à la technologie des ultrasons conventionnels viennent de la possibilité d'utiliser plusieurs éléments assemblés dans une seule et même sonde pour orienter, focaliser et balayer les faisceaux. La déflexion des faisceaux, communément appelée balayage sectoriel, peut servir à cartographier les composants selon les bons angles. L'inspection de composants de formes complexes peut ainsi être nettement simplifiée. La petite surface de contact de la sonde et la possibilité de balayer le faisceau sans avoir à déplacer la sonde facilitent l'inspection de ces pièces lorsque l'accès limité à la pièce rend difficile le balayage mécanique.
- La possibilité d'inspecter les soudures sous plusieurs angles avec une seule sonde augmente considérablement les probabilités de détection des anomalies.

- La focalisation électronique permet d'optimiser la forme et la taille du faisceau à l'emplacement où l'on s'attend à trouver une indication, et améliore encore davantage la probabilité de détection.
- Les possibilités de focalisation à différentes profondeurs améliorent également la capacité d'évaluer la taille des indications critiques lors des inspections volumétriques. La focalisation peut nettement améliorer le ratio signal sur bruit dans les applications difficiles et le balayage électronique d'un grand nombre de groupes d'éléments permet de produire très rapidement des C-scans.
- Les désavantages potentiels des systèmes à ultrasons multiéléments sont :
 - Les coûts un peu plus élevés et le besoin de formation de l'inspecteur. Cependant, ces coûts sont souvent contrebalancés par la plus grande flexibilité d'inspection et la réduction de la durée de l'inspection.
 - Épaisseur mini limitée à 6mm pour les assemblages soudés.
 - Contrôle des assemblages soudés en acier inoxydable aléatoire.
 - Nécessite une grande expérience pour l'interprétation des signaux

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, le procédé des courants de Foucault, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, et enfin les essais ultrasonores. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients. Il n'y a pas de technique de CND qui soit valable pour tous les matériaux et tous les défauts, le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs, nature (conducteur ou isolant), dimensions et état de surface du matériau à contrôler, type de défaut débouchant, sous cutané ou interne, le but final du « CND » est le contrôle de la qualité et l'état du matériau.

Chapitre III :
Etude expérimentale appliquée
sur des joints soudés

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différentes étapes de notre travail ainsi que les méthodes CND utilisées pour identifier les défauts dans des soudures pipelines.

Toute cette étude a été réalisée au niveau de l'unité CRTI-Bousmail.

III.2 Matériaux :

Dans le cadre de cette étude on a considéré deux aciers différents : un acier inoxydable duplex 2205 et un acier au carbone X42

- 1- L'acier inoxydable considéré est un acier austéno-ferritique duplex de nuance UNS 31803 (appellation commerciale SAF 2205). Caractérisé par une structure biphasique constituée d'austénite γ de structure C.F.C et de ferrite δ de structure C.C, dont les proportions sont respectivement de 52% et 48%. Cet acier nous a été livré sous forme de tube soudé avec le procédé TIG.
- 2- Et l'acier au carbone le X42 : qui est un acier faiblement allié de nuance API 5L, de limite d'élasticité minimale de 42(ksi), c'est un acier largement utilisé dans l'industrie du pétrole et de gaz. Cet acier nous a été livré sous deux formes soudées : sous forme d'un tube soudé (TIG) et sous forme de plaques soudées (SMAW).

Les dimensions des tubes et des plaques sont respectivement :

SAF 2205 : D = 22,27 cm et épaisseur, e = 8 mm,

Tube en X42 : D = 17 mm, épaisseur e = 8 mm,

Plaques X42 : épaisseur = 19 mm et longueur : 150 mm,

Les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques de ces deux matériaux sont données dans les tableaux III.1 et 2 ci-dessous.

Tableau III.1 : Composition chimique des deux matériaux 2205 et X42 (%w)

Elément	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S	V	Cu	N
SAF2205	0.03	0.36	1.77	5.7	2.58	22.05	0.018	0.015	0.10	0.20	0.13
X42	C	Mn	Si	P	S	Al	Autres (Mo+V+Ti)				
	0.26	1.30	1.3%	0.03	0.03	0.04	<0.039				

Tableau III.2.2 : Propriétés mécaniques des aciers X42 et duplex 2205

Désignation	Limite élastique MPa	Résistance à la rupture MPa	Allongement à La rupture %	Elasticité E (GPa)	Dureté Brinell	HRC
UNS 2205	>450	>620	>25	200	<290	<32
X42	290	414	23			



Figure III.1 : Tube en acier au carbone Figure III.2 : tube en acier inoxydable duplex



Figure III.3 : Deux plaques on acier au carbone

III.3. Les techniques CND utilisées

III.3.1. Préparation du contrôle par ultrasons :



Figure III.4 : Préparation du contrôle par ultrasons

a) Le matériel :

Les moyens utilisés pour le contrôle par US sont représentés par la figure III.3.1.1

Deux appareils US sont utilisés pour détecter les défauts dans les différents cordons de soudures considérés

- *L'EPOCH LT* : est le détecteur à défaut par ultrasons idéal lorsqu'il besoin de faire un relevé de défauts sommaire et rapide dans des conditions difficiles ou des contextes de production exigeants. Avec cet appareil, le contrôle a été effectué à l'aide d'un palpeur (E/S) à angle.

- *L'appareil OLIMPUS (Omni scan MX2)* : cet appareil de recherche de défauts à ultrasons multiéléments produit des images de coupe transversale précises et détaillées transversale de structures internes à des vitesses d'inspection rapides. La technologie multiélément utilise plusieurs éléments à ultrasons et des retards électroniques pour créer des faisceaux qui peuvent être dirigés, balayés et concentrés par voie électronique, ce qui permet des inspections rapides, le stockage des données complètes et l'inspection dans des angles multiples. La technologie multiélément fournit des mesures précises et les résultats les plus fiables. L'Omni Scan MX2 offre un module à ultrasons multiéléments (PA2) muni d'un canal UT, un module à ultrasons conventionnels à deux canaux (UT2) qui peut être utilisé en mode TOFD (Cf. chapitre II).



Figure III.5: Appareils US utilisés

b) Configuration des appareils et étalonnage des sondes US

Avant chaque examen de contrôle, on doit respecter quelques conditions requises avant l'examen parmi eux on peut citer :

- Méthode d'évaluation des indications : Méthodes par réflexion ou par écho ;
- Etat de surface, dimensions et nettoyage et la limite de la plage de balayage ;
- Choix du type de palpeur : palpeur a Angle 60° et 70° technique par réflexion (E/R) ;
- L'étalonnage des appareils ;
- Choix de milieux de couplage : Graisses.

Sélection de la sonde :

Bien souvent, ce sont les normes (comme les normes AWS D1.1 et ASTM E-164 ...) d'inspection ou des exigences procédurales suivies par l'inspecteur qui détermineront le type de sonde à utiliser et les sabots recommandés. S'il n'existe aucune norme ou procédure, l'inspecteur doit sélectionner la sonde appropriée en fonction des exigences de l'inspection basées sur sa connaissance des pratiques générales d'inspections et les techniques ultrasons. Parfois, il doit faire des essais avec plusieurs types de sondes sur des pièces représentant la pièce à inspecter pour déterminer le type de sonde qui donne la meilleure réponse.

Une fois la sonde sélectionnée, il reste d'autres facteurs importants influant sur la performance : fréquence, diamètre et largeur de bande.

Fréquence : Les sondes à fréquence élevée permettent de trouver des petites indications grâce à la petite longueur d'onde, alors que les sondes à basse fréquence permettent aux ondes ultrasons de pénétrer plus loin dans le matériau, car l'atténuation diminue avec la fréquence.

Diamètre : Les sondes de grand diamètre peuvent balayer une zone plus rapidement, alors que les sondes de petit diamètre répondent mieux aux petits réflecteurs et se placent plus efficacement sur les surfaces courbes.

Bande passante : Les sondes bande étroite offrent une meilleure pénétration des ondes ultrasons, mais une résolution à faible profondeur diminuée, alors que les sondes bande large offrent une meilleure résolution à faible profondeur et une plus faible pénétration.

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé deux types de palpeurs : palpeur à angle et palpeur A10 32 avec un sabot multiélément (Rexolite Wedge for 16 éléments probes) dont les caractéristiques sont :

Fréquence : 4MHz

Bande passante : 1 / 2 (64 mm intérieure)

L'étalonnage :

Avant de procéder au contrôle, on doit effectuer l'étalonnage. L'étalonnage pour l'inspection avec une sonde d'angle nécessite l'utilisation d'un bloc étalon avec deux trajets sonores de longueur connue. Généralement, on utilise un bloc étalon comme le bloc étalon type V1, bien que d'autres peuvent être utilisés. La procédure est décrite dans le manuel d'utilisation de l'instrument [], les étapes de calibration concernent la procédure est d'étalonnage a été expliqué dans le chapitre II (*cf.* Etalonnage):

- Calibration de la vitesse et du zéro
- Calibrage de l'angle de réfraction

III.3.1.2 Exécution des tests

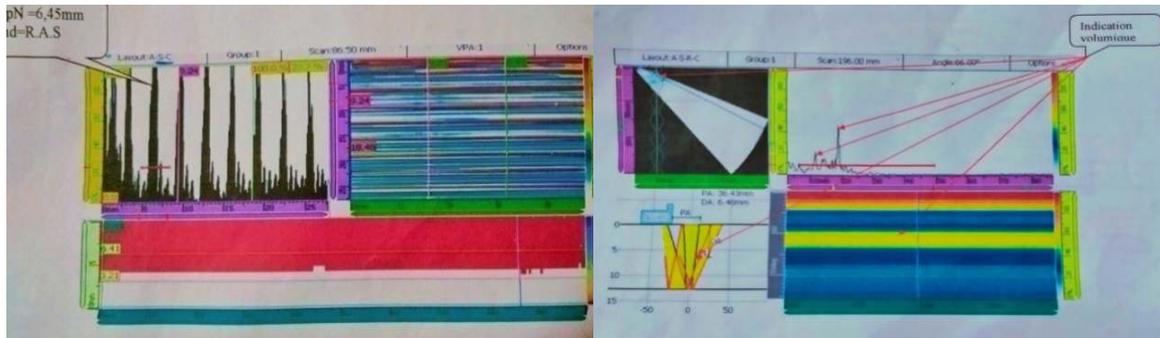
Après l'étalonnage de l'appareillage et des palpeurs, Le balayage est effectué de manière à obtenir l'écartement maximal entre l'impulsion de départ et les échos éventuels la plus éloignées. Pour l'étalonnage, seules les distances entre échos multiples correspondant à des réflecteurs distants d'une valeur connue (distance par rapport au fond) peuvent être utilisées. La méthode la plus courante de réglage de l'échelle utilise l'épaisseur 91mm du bloc d'étalonnage (la norme NF A 09-310 prévoit deux blocs V1 et V2) pour le calibrage en ondes longitudinales et l'épaisseur de 50mm en ondes transversales. Cela permet de faire correspondre l'écart entre deux échos multiples à l'échelle choisie

- Vérification du point d'émergence et de l'angle de réfraction : Il s'agit de déterminer l'endroit exact ou l'écho réfléchi par la surface cylindrique à une amplitude maximale. Le point d'émergence est repéré sur l'un des côtés du transducteur en face de la rainure matérialisée sur le bloc.
- Après étalonnage du matériel ultrasonore, le sondage ultrasonore appliqué se fait de manière à ce toute surface susceptible de contenir d'éventuels défauts soit contrôlée. On a opté pour un sondage en balayage ;
- Ensuite on dépose le couplant entre la pièce et le palpeur, Et fait le mouvement de palpeur sur toute la longueur de la plage de balayage ;
- Le balayage est effectué sur les deux côtés de la soudure dans le but de localiser le maximum des défauts. L'aire de la zone de balayage est traversée un mouvement autour de la soudure : en même temps qu'on approche et qu'on s'éloigne du joint soudé, avec ce type de mouvement, on peut distinguer entre les défauts volumiques et les défauts linéaires.

➤ **Résultat d'inspection des soudures des tubes :**

A travers l'écho visualisé sur l'écran Olympus on constate (Figure III.3.1.2) :

- ❖ Acier au carbone : aucun défaut remarqué sur les scans.
- ❖ Acier inoxydable duplex : révèle un type de défauts qui est bien claire sur les scans A scan, S et C scan. (voir annexes B) .



Tube acier au carbone UT(OL)

Tube acier inoxydable par UT(OL)

Figure III.6 : Résultats des tests par ultrasons des soudures des tubes.

➤ **Examen ultrason pour les plaques** (Appareil à ultrasons EPOCH LT et palpeur a Angle 60° et 70° technique Par réflexion (E/R)) :

Après le nettoyage des plaques on procède de la même étape que pour les soudures tube :

- L'étalonnage de l'appareillage (EPOCH LT et palpeur),
- Pui son limite la plage de balayage, ensuite on dépose le couplant entre la pièce et le palpeur.
- Ensuite on fait le mouvement de palpeur sur toute la longueur de la plage de balayage. Le balayage est effectué sur les deux côtés de la soudure grâce à deux types de mouvements.
- Un mouvement en zigzag parallèlement à l'axe de la soudure avec un pas ne dépassant pas la largeur du palpeur.
- Un mouvement pivotant : en même temps qu'on approche et qu'on s'éloigne du joint soudé, avec ce type de mouvement, on peut distinguer entre les défauts volumiques et les défauts linéaires.

➤ **Résultat d'inspection des soudures des plaques :**



Figure III.7 : les résultats d'inspection par US des tôles

A travers les échos visuels sur l'écran EPOCH LT on remarque :

- ❖ **Pièce.1** : trois piques qui présentent trois défauts dans les profondeurs suivantes :
4.75mm ; 4.74mm et 5.65mm.
- ❖ **Pièce. 2** : on a deux piques donc deux défauts aux profondeurs : 7.58 mm et 6.50mm.

(Voir annexe B).

III.3.2 Contrôle par radiographie :

La radiographie est un type d'essai « non destructif » ce type de contrôle permet de détecter les défauts internes. Les éprouvettes sont identifiées avec des chiffres et lettres en plomb, elles sont ensuite placées dans la cabine radio, par-dessus le film argentique la technicienne va lancer le « tir radio », une fois le tir terminé, le film va être développé, la densité du film est contrôlée avant l'interprétation selon la norme applicable l'interprétation commence et peut être longue, pour détecter les défauts.

Les films sont ensuite numérisés pour une meilleure qualité visuelle des résultats et pour l'archivage.

- Description du matériel radiographique utilisé :

Le générateur utilisé pour l'inspection radiographique utilise un tube à rayons X, avec une cathode en cuivre (Cu), de marque SEIFERT et de puissance maximale de 900 KW, avec des paramètres de réglage propre à l'acier. (Cette technique a été réalisée par les techniciens de l'entreprise).



Générateur à rayon X SEFERT

La figure III.8 : présente des exemples de l'analyse par radiographie de soudures.



Plaque 01 en acier au carbone



plaque 02 en acier au carbone



Tube en acier inoxydable



Tube en Acier au carbone

Figure III.9 : les radiographies des soudures des plaques et des tubes

La radio de la pièce.1 révèle trois types de défauts :

- Deux lignes droites de densité plus sombre situées en parallèle dans le sens de la longueur du cordon de soudure (point 3) qui présentent un défaut de manque de pénétration et (point 4) qui sont sombres un caniveau.
- On remarque aussi un défaut sous forme d'un cercle (point 5), il est sombre d'une soufflure.

La radio de la pièce 2 :

- L'image radiographique révèle une région irrégulière à densité plus claire avec des zones de densité plus sombre (point 2). Ce défaut est dû à la quantité de métal d'apport à la racine du cordon de soudure excédentaire.
- L'image radiographique de la pièce 2, révèle aussi un défaut de type caniveau (point 1). Lors d'un caniveau tel que celui-ci, la densité de ce défaut sera toujours plus sombre que la densité des pièces à souder.

La radio de tube au carbone : aucun défaut n'a été décelé.

La radio de tube inoxydable : L'image radiographique de tube inoxydable duplex, révèle un défaut de type soufflure.

(Voir annexe B)

Conclusion :

L'interprétation des signaux ultrasons permet de positionner les défauts et de définir leurs dimensions ; qui on peut voir les types de ces défauts par la radiographie.

Conclusion Générale

Dans le secteur industriel, la défaillance des pièces mécaniques peut entraîner des conséquences plus ou moins graves. L'évaluation non destructive (END) qui vise à contrôler sans endommager les pièces en question, représente une phase importante dans la maintenance et la surveillance des installations industrielles afin d'éviter les dégâts qui peuvent avoir lieu suite à une défaillance dans l'installation. De ce fait, l'END est devenue une nécessité industrielle.

Le travail que nous avons présenté porte essentiellement sur trois points :

- Documentation sur les méthodes de contrôle non destructif en portant un intérêt particulier aux techniques de contrôle par ultrason en générale ;
- présentation et classification des différents défauts de soudures
- Application du contrôle par ultrasons pour la détection des défauts de soudure, et validation du type de défaut par l'inspection radiographie.

Au cours de leurs vingt premières années de commercialisation, les appareils à ultrasons fonctionnaient uniquement avec des sondes monoélément comprenant un seul cristal piézo-électrique pour l'émission et la réception des ondes acoustiques, des sondes à émission-réception séparées équipées de cristaux différents pour l'émission et la réception des ondes ultrasonores et des systèmes à transmission directe utilisant deux sondes monoélément en tandem. Ces approches sont toujours utilisées dans la majorité d'appareils à ultrasons commerciaux destinés à la recherche de défauts et à la mesure d'épaisseur dans le domaine de l'industrie. Toutefois, les appareils à ultrasons multiéléments deviennent de plus en plus importants dans le domaine CND par ultrasons.

Dans ce travail, nous avons utilisé les deux approches sur des tôles et tubes soudés en passant par plusieurs étapes :

- Configuration des appareils utilisés, le choix de la vitesse, de la plage de mesure
- Étalonnage des instruments par un bloc normalisé
- Ajustement final des paramètres pour l'obtention d'un bon échographe
- Inspection des soudures.

Les résultats obtenus sont des performants en matière d'aptitude des ultrasons pour l'inspection de soudures.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques :

Ouvrages :

- [1]. LAMBERT , Y. PRALUS et J. RIVNEZ , Ultrasons –propagation des ondes ultrasonores (Niveau 1)CETIM – juin 1997 .
- [2]. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, D. Boutassouna, Detection and measurement of surface cracks in ferromagnetic materials using eddy current testing, NDT&E International, Elsevier, Vol. 39, Issue 1, March 2006, pp. 384-390.
- [3]. BERNARD NORMAND et NADINE PEBERE Caroline Richard Martine Wery, prévention et lutte contre la corrosion .
- [4]. CHAMBRE SYNDICALE de la RECHERCHE et de la PRODUCTION du PETROLE ET DU GAZ NATUREL, contrôle non destructif du matériel tubulaire –Edition TCHNIP 1975
- [5]. Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires explicatifs”. Norme of International Standard Organization, 6520-1982, 1982.
- [6]. Do Haeng Hur, Myung Sik Choi, Deok Hyun Lee, Seon Jin Kim, Jung Ho Han, A case study on detection and sizing of defects in steam generator tubes using eddy current testing, Nuclear Engineering and Design, Vol. 240 (2010), pp. 204–208
- [7]. Document de l’industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012
- [8]. Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [9]. ECOLE D4ADAPTATION AUX PROFESSIONS DU SOUDAGE , contrôle des constructions non soudées ,1995 .
- [10]. Guide de soudage, Soudage l’arc sous gaz de protection TIG ,MIG ,MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- [11]. J.L. PELLETIER ,Y.LE TOHIC , J.C.CARON , la pratique du contrôle industriel par ultrasons (Tome 1). ENSAM – paris 1997 .
- [12]. JACQUES SAPRIEL ultrasons , les techniques de l’ingénieur .E 1910 .

- [13]. L. Mouchat, S. Malek, "Mise en oeuvre de classificateurs basés sur la notion de distance et classification statistique. Applications : Identification des défauts de joint de soudure sur les images radiographiques". Mémoire d'ingénieur. Université de Blida. 2002.
- [14]. Les techniques de l'ingénieur , M4130 .
- [15]. Maurice Wanin . « Evaluation non destructive de la qualité des matériaux » .
- [16]. R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.
- [17]. R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOUT1995.
- [18]. S.BENSAADA.D.FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ».Office de publication universitaires.2e Edition.01-2009
- [19]. SAF-AIR LIQUIDE, Procédés TIG. et plasma, Ed.1-SUY 542/20/2000.
- [20]. Saint-Germain, Benoît. 2006. «Étude expérimentale et numérique des distorsions de structures mécano-soudées». Ph .D. France, École centrale Paris (France).
- [21]. V.RYBARCOV, « le soudage et le coupage des métaux».2^e EDITION.1983.EDITION MIR.MOSCOU
- [22]. VARIANTE DE BROCHE TIG PAR IMPULSION, Soudage électrique à l'électrode réfractaire ; publications Centre de Soudage de Cheraga.
- [23]. Vuilleumoz P.L., Les courants de Foucault : Principes, mesure et contrôle, AFNOR, 1994

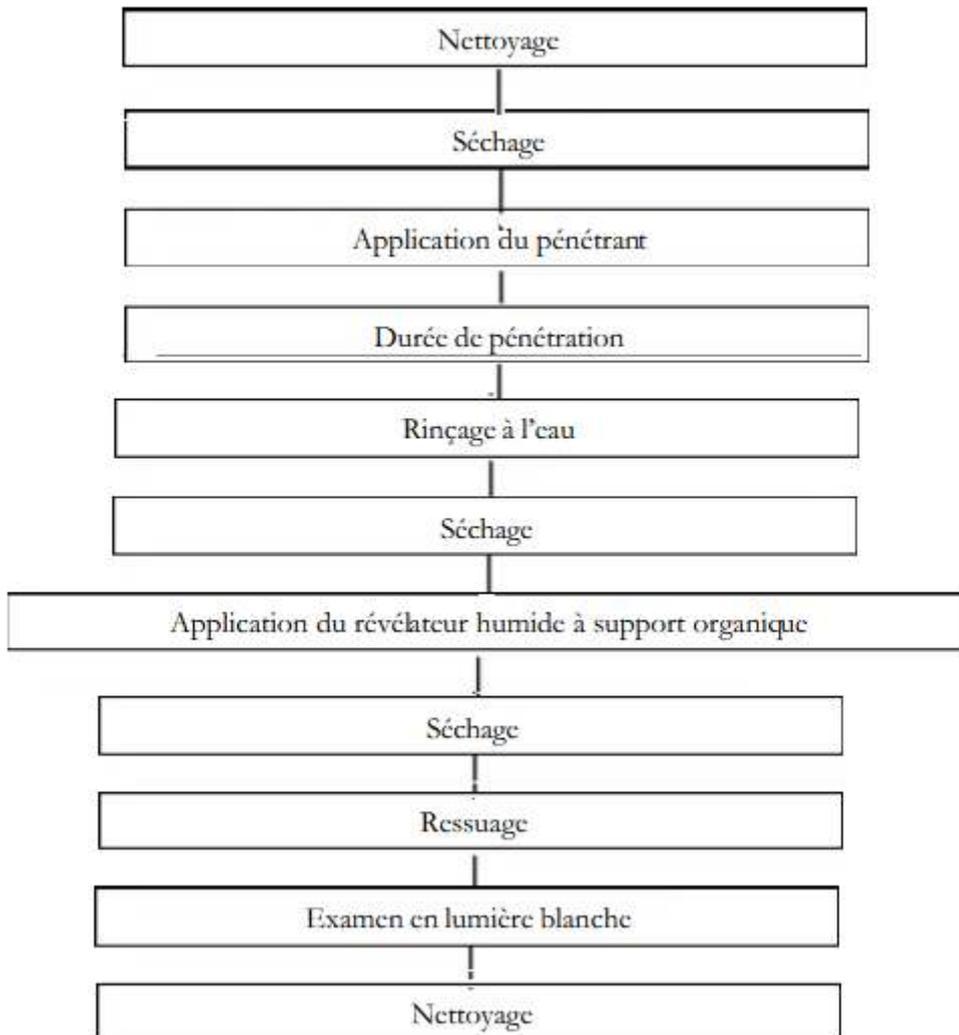
Sites internet:

1. <https://www.olympus-ims.com/fr/ndt-tutorials/flaw-detection/weld-inspection/>
2. Site Internet :
<http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a> Fichier pratique de scruté ED83 3E Edition. Septembre 2009 .
3. Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines Yamani Institute of Technology.

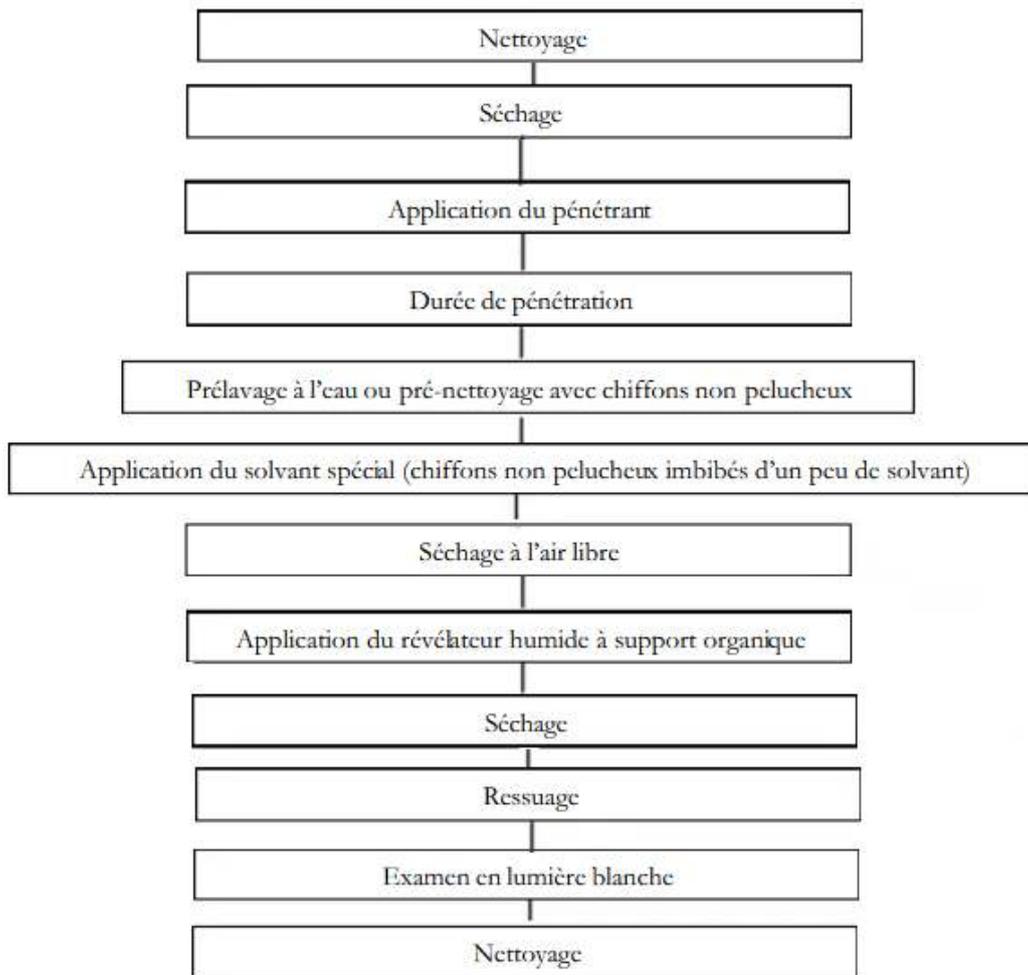
Annexes

Annexes (A) :

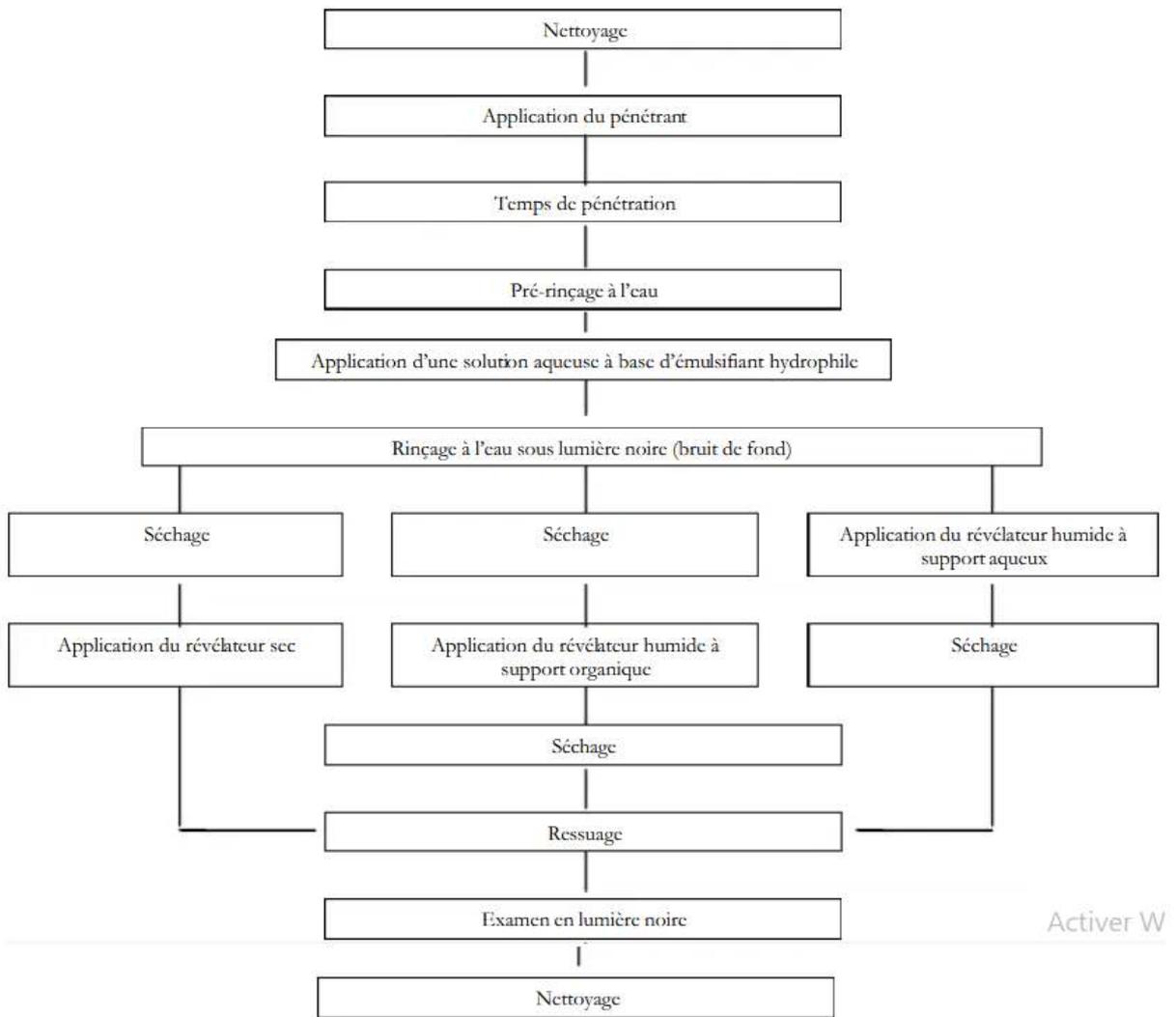
Exemple 1 : Utilisation d'un pénétrant coloré lavable à l'eau



Exemple 2 : Utilisation d'un pénétrant coloré éliminé à l'aide d'un solvant

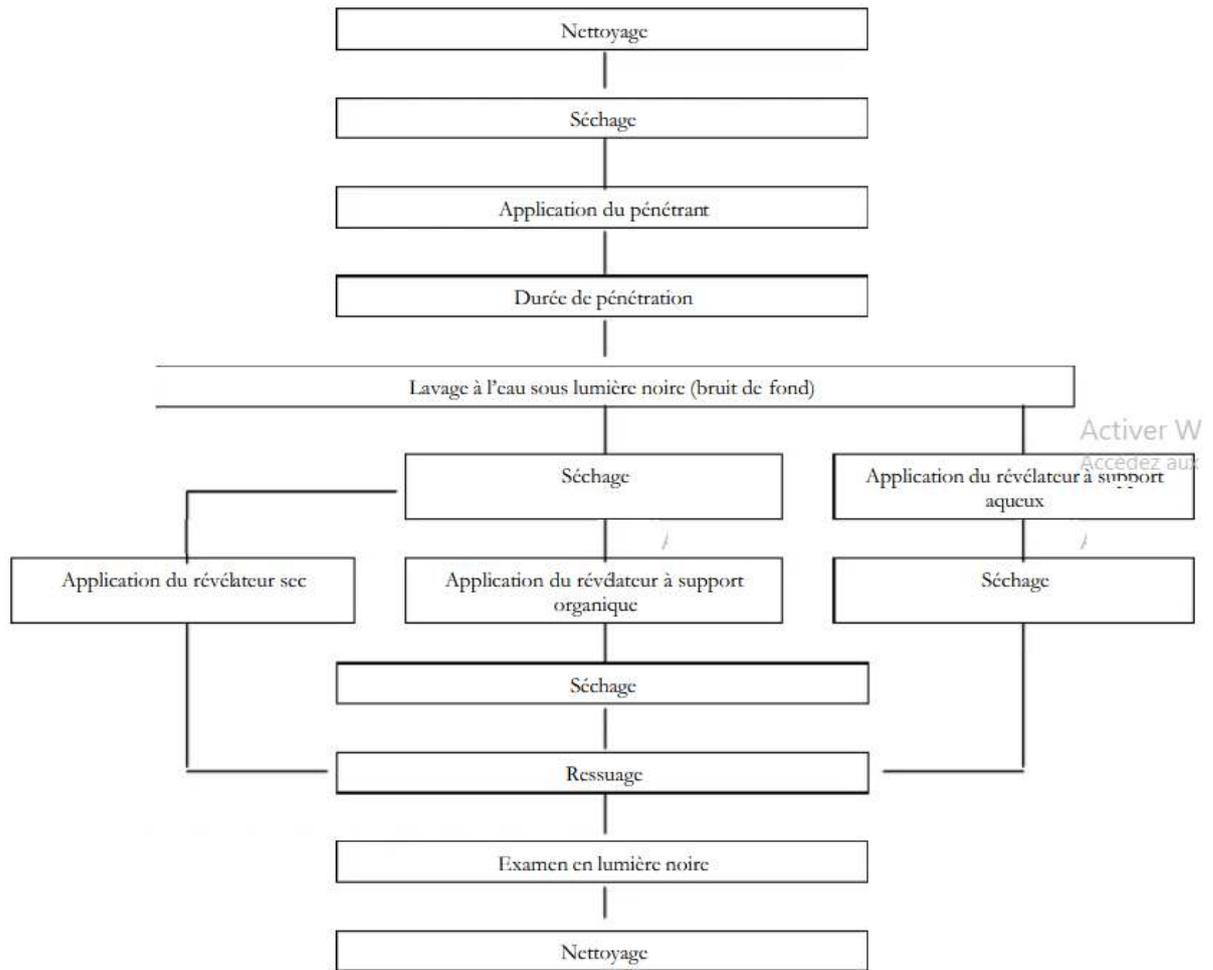


Exemple 3 : Utilisation d'un pénétrant fluorescent à post émulsion (Emulsifiant hydrophile)



Activer W

Exemple 4 : Utilisation d'un pénétrant fluorescent pré émulsionné.



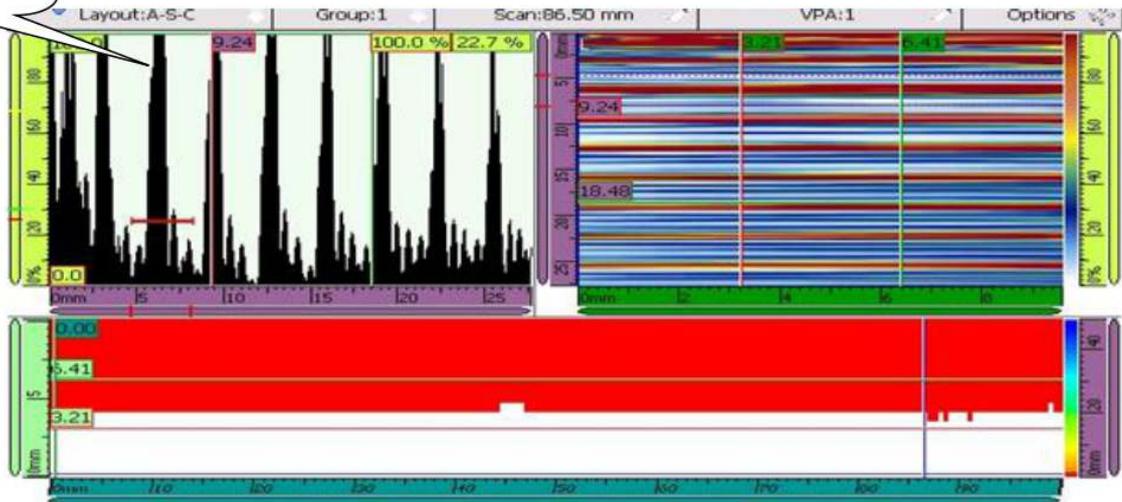
Annexes (B) :

INSPECTION PAR ULTRASON DES TUBE

Inspection de tube acier au carbone par UT(OL)

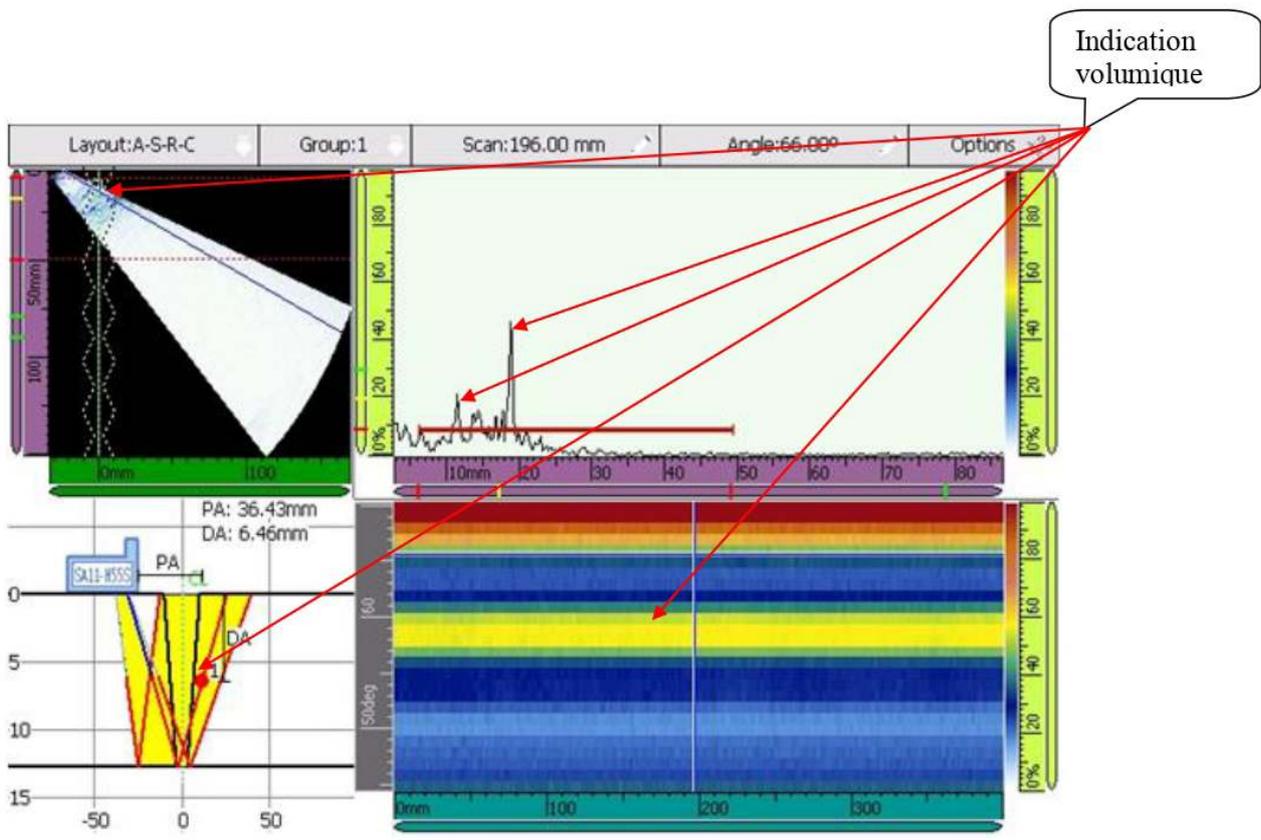
Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode							
2021 / 06 / 09	MXU - 4.1R7	csc.opd	2021 / 06 / 09	MXU - 4.1R7	Inspection Data							
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Calibration Due	Data File Name							
OmniScan MX2	OMNI2-100738	OMNI-M-PA1664	OMNI-800254	2015/3/12	2021/06/09							
Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	A% (%)	DA^ (mm)	PA^ (mm)	SA^ (mm)	U(m-r) (mm)	I(m-r) (mm)	I*U(m-r) (mm)	S(m-r) (mm)
1 *	86.50	0.30	1	VPA 1	200.0	6.00	0.00	6.00	9.24	3.20	9.78	0.00
Indication #	Scan	Index	Group	Channel	A%	DA^	PA^	SA^	U(m-r)	I(m-r)	I*U(m-r)	S(m-r)
1	86.50 mm	0.30 mm	1	VPA 1	200.0 %	6.00 mm	0.00 mm	6.00 mm	9.24 mm	3.20 mm	9.78 mm	0.00 mm

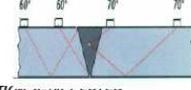
EpN =6,45mm
Ind=R.A.S



Inspection de tube acier inoxydable par UT(OT)

Report Date	Report Version	File Name	Inspection Date	Inspection Version	Save Mode							
2021 / 06 / 09	MXU - 4.1R7	inspection des joints.ops	2021 / 06 / 09	MXU - 4.1R7	Report							
OmniScan Type	OmniScan Serial #	Module Type	Module Serial #	Calibration Due	Data File Name							
OmniScan MX2	OMNI2-100738	OMNI-M-PA1664	OMNI-800254	2015/3/12	Fichier####							
Beam Delay	Start (Half Path)	Range (Half Path)	PRF	Type	Averaging Factor							
29.6 μs	3.83 mm	201.47 mm	60	PA	1							
Scale Type	Scale Factor	Video Filter	Pretrig.	Rectification	Filter							
Compression	40	On	0.00 μs	FW	None (0.5 - 19 MHz)							
Voltage	Gain	Mode	Wave Type	Sound Velocity	Pulse Width							
40 (Low)	47.74 dB	PE (Pulse-Echo)	User-Defined	3225.8 m/s	100.00 ns							
Scan Offset	Index Offset	Skew	C-scan time resolution									
0.00 mm	-25.00 mm	90.0°	10.0 ns									
Indication #	Scan (mm)	Index (mm)	Group	Channel	A% (%)	DA^ (mm)	PA^ (mm)	SA^ (mm)	U(m-r) (mm)	I(m-r) (mm)	I*U(m-r) (mm)	S(m-r) (mm)
1 *	196.00	-25.00	1	66.00°	46.2	6.46	36.43	46.56	38.52	3.21	38.66	0.00
Indication #	Scan	Index	Group	Channel	A%	DA^	PA^	SA^	U(m-r)	I(m-r)	I*U(m-r)	S(m-r)
1	196.00 mm	-25.00 mm	1	66.00°	46.2 %	6.46 mm	36.43 mm	46.56 mm	38.52 mm	3.21 mm	38.66 mm	0.00 mm



 		Rapport d'Examen par Ultrasons Ultrasonic Examination Report											
Rapport N° 001/CSC/2021 Report N° :		Date : 12/07/2021		N° AFF/Job N°: 11893									
Client : CEPSA		Ligne N° : PICES ETUDIANTS		Code client / Service/ Location/ : NA		Maître de l'œuvre/ Costumer/ : NA							
Chantier : BOUSMAIL W.TIPAZA		Code de référence Standard : ASME V Art4		Procédure : PR P04		Code sous affaire / Job code : CONTRÔLE DES JOINTS SOUDURES							
Critère d'acceptabilité suivant : ASME IX		Contrôle visuel : OK		Visual Examination :									
Stade de l'examen : T, Thermique N/A		PWHT N/A : X		Avant T, Thermique :		Après T, Thermique :							
Inspection stage :		Before PWHT :		After PWHT :									
Element Examiné / Item Examined													
Chanfrein / Chamfer : V		Matériel / Material : ACIER AU CARBONE		Etat de surface /Surface : Brut / Rough		BROSSE / BRUSHED : X							
Mode de soudage / Welding method : SMAW		Meulé / grinding :		Usiné /Machine d :									
Appareillage utilisé / Equipment Used													
Générateur / Générateur : OLYMPUS		Type / Type : EPOCH LT		Numéro / Number : 1705524012									
Palpeurs / probes : SOFRANEL		Ondes L ou T / L or T Waves : L		Référence/Reference :		Angle / Angle (°) : 0°							
GE		T		GE		Fréquence (Mhz) : 4Mhz							
GE		T		GE		Dimensions / Dimensions (mm) : 10mm							
GE		T		GE		N° DE Série/Serial N° : 1003096							
GE		T		GE		N° DE Série/Serial N° : 56928-8077							
GE		T		GE		N° DE Série/Serial N° : 56928-31293							
Bloc de Référence / Reference Block				Bloc d'étalonnage / Calibration Block									
Dimensions : 150*75*19 mm		Ø trou : 3mm		Positions trous : In The width		V1							
Dimensions :		Hole diameter :		Hole Position :									
Couplage / Coupling : huile / oil		Graisse /grease :		Eau / Water :		Glécyrine/ Glycyrine :							
Colle / Glue :		X											
Technique Opératoire /operating procedure													
1 / 2 BOND / 1/2 bound : 30 mm		BOND / BOND : 64 mm		Intérieur / Inside :		Extérieur / Outside : X							
Sensibilité d'Examen / Examining Sensitivity													
Echelle de profondeur / Depth scale : 250		Puissance / Amplification : 67db		Seuil / Therschold : 20%		moyenne							
Résultat d'inspection / Inspection Result													
Didentification / Identification	N° de joint/ Joint N°/POSITION	Diametre /Diamter	%	Epaisseur /Thick (mm)	Repère Soudeur /Welder Rep	Distance de point de reference / Distance from datum (mm)	Amplitude /Amplitude (dB)	Profondeur /depth (mm)	Longueur / length (mm)	Accepte r / Accept	A réparer / to be repair	Rejeter /reject	Obs / Obs
PIECE N° 1	2G	NA	10	W01			67			X			
	3G	NA	10	W02			67				X		
PIECE N° 2	2G	NA	10	W03			67			X			
	3G	NA	10	W04			67				X		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Conclusion / conclusion</p>  </div> <div style="width: 40%;">  </div> <div style="width: 25%;"> <p>PIECE N°1 -POSITION 2G: ACCEPTER -POSITION 3G: REPARER Piqûre(5a7)/Caniveau Ext(12a17)/M.P(19a26)</p>  <p>PIECE N°2 -POSITION 2G: ACCEPTER -POSITION 3G: REPARER Defaut de forme-exces de penetration-concavite-manque de metal(7a14) Manque de penetration(22a26)</p> </div> </div>													
CSC Expertise				Validité par / Valid by				Client / Client					
Nom / Name : BOUGUERNOUT Ahmed Date : 12/07/2021 Signature :				Nom / Name : BOUNATIRO Hatem Fonction / Function : Chef Departement Inspection Date : 12/07/2021 Signature :				Nom / Name : Date : Signature :					

 		C.S.C EXPERTISE SPA Rapport d'Examen par Radiographie Radiographic Examination Report									
Rapport N° / Report N° : 001/RT/2021		Date : 12/07/2021		N° AFF/Job N°:		Code client / Service/ Lieu/ Maître de l'oeuvre/ Code sous affaire / Client code/ / Service/ Location/ Costumer/ Job code					
Client : WISSEM		Ligne N° : Line N° :		PICES ETUDIANTS		Plan N° : DWG n° : N.A					
Chantier : Plant : BOUSMAIL W.TIPAZA		Code de référence NDT N° : ASME V - Art. 2				Procédure : Procédure code : Pr P.02					
Critère d'acceptabilité selon : Acceptance Standard : ASME IX				Contrôle visuel : Visual Examination : OK							
Rayon Gamma / Gamma Ray S/N Gammagraphe : Type / Type Ir 192		Rayon X / X ray Type : Marque : Nature de la fenêtre Tension / voltage (Kv) Courant / current (mA) Dimension / Focal size		Développement films / Films développement : Température (°C) : 20 Révélateur / Révelation : 20 Temps (min) : 5 Bain d'arrêt/stop revelation : 21 Temps (min) : 2 Fixateur / Fixation : 20 Temps (min) : 15 Rinçage/Cleaner : 23 Temps (min) : 5		Activité / Activity (curies) : 84 Ci Dimension / size (mm) : 2x3					
Marque / film marque : Type film/ type film : Position :		AGFA D5 10 ISO 16 Coté Film		Lecture des films / Read films : Densité / Density : 2±4 Sensibilité / Sensitivity : 2% flou géométriques : 0,3		Autre Organisme (sous traitant) :					
Technique de prise de vue / view technique : Simple Paroi Simple Image (SWSI) x Double Paroi Simple Image (DWSI) Double Paroi Double Image (DWDI)		Nbre d'exposition : 1		Elliptique / Elliptic Panoramique / Panoramic							
Identification / identification				Résultat / Result				Jugement / Judgment			
Identification des films / films identification		N° soudeur / Welder N°		N° du joint		Diamètre / diamètre (inch) Epaisseur / Thickness (mm)		Fissure L / L, crack Fissure T, / T/ Crack Soufflures / Porosity Nid de soufflures/ Cluster P Inclusion de laitier / Slag incl,		M, Fusion / Lack of fusion M, Pénétration / Lack penetration Caniveaux / undercut Excès pénétrations / Excess P Mauvaise reprise / Poor start Pénétration concave / concavity Dénivellements / slope Inclusion de Tungstène / Tungsten inclusion Acceptable / Acceptable A réparer / To be repaired Zone à réparer / Zone to repair A reprendre pour confirmer / to reshoot to confirm defect A couper / To be cut A reprendre le film / to reshoot film Film défectueux / Film defect Extension/ Shoot Extension	
PIÈCE N°1		W01 2G NA 10 W02 3G NA 10		x		x x		x		X (5a7)(12a17)(19a26)	
PIÈCE N°2		W03 2G NA 10 W04 3G NA 10		x		x x		x		X (7a14)(22a26)	
Nombre film 10x20		04		Nombre film 10 x 40		00					
Remarques:						Reste à réaliser:					
CSC Expertise Spa				CSC Expertise Spa				Client			
Interprété par: Nom / Name : BOUGUERNOUT Ahmed Date 12/07/2021 Signature :				Approuvé par: Nom / Name: Fonction / Function : Date : Signature :				Approuvé par: Nom / Name : Fonction / Function : Date : Signature :			
le présent rapport d'interprétation a été établi après un examen des clichés radiographique traités dans les meilleurs conditions techniques, notre responsabilité ne serait être engagé en cas des contestations ou de détections des défauts n'ayant pas été mis en évidence sur les radiographies, conformément à la législation en vigueur, la responsabilité du constructeur des pièces contrôlées demeure entière,											