

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université SAAD DAHLAB 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique.

Option: Conception Mécanique.

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Contrôle non destructif des pipes par radiographie

Dirigé par :

Tiberkak Rachid

Présenté par:

TARHIOUA Ibrahim El khalil

BAHIEDDINE Abdelouahab

Promotion : Juin 2016

REMERCIEMENTS

Nous tenons dans un premier temps à remercier **ALLAH** le tout puissant pour nous avoir donné la chance et le privilège d'étudier et d'arriver là où on est.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur **Monsieur Tiberka Rachid** qui a été à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des membres de jury d'avoir accepté bien voulu examiner notre travail.

Nous adressons également notre profonde gratitude à tous les enseignants de l'université Saad Dahlab de Blida 1 et en particulier ceux du département de Génie Mécanique.

Un grand merci à tous les membres de nos familles pour leur soutien matériel et moral ainsi que nos amis.

Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص:

إن الهدف من هذه المذكرة هي دراسة العيوب التي تظهر أثناء وبعد تلحيم خطوط الأنابيب الخاصة لنقل الغاز والبتروول في مؤسسة الوطنية للأشغال البترولية الكبرى ENGTP، ومعرفة أسباب ظهورها وكيفية معالجتها.

Résumé :

Le but du présent travail est l'étude des défauts qui apparaissent pendant et après le soudage de pipelines pour transporter le gaz et le pétrole dans une institution ENGTP, et de trouver les raisons de son apparition et comment y faire remédier.

Abstract:

The purpose of this work is the study of defects that appear during and after welding of pipelines to transport gas and oil in an institution ENGTP, and find out the reasons for its appearance and how to address them.

SOMMAIRE

Notations utilisées.....	I
Index des figures et des tableaux.....	II
Les abréviations.....	III
Introduction générale	1
<i>Chapitre 1 : Technologie de soudage des pipes</i>	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Propriétés des métaux	3
I.3. Choix d'un tube pour canalisation.....	4
I.4. Les assemblages soudés.....	5
I.4.1. Les procédés de soudage.....	5
I.4.1.1.Classement des procédés de soudage.....	5
I.4.1.1.1. Soudage manuel à l'arc.....	6
I.4.1.1.2.Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG)..	8
I.4.1.1.3. Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène (TIG).....	9
I.4.1.1.4. Soudage automatique.....	10
I.5. Choix du métal de base.....	11
I.6.Choix du métal d'apport.....	11
I.7. Préparation des joints à souder.....	12
I.7.1.Types des joints soudés.....	12
I.7.2. Les défauts de soudure.....	13
I.7.3.Contrôle des joints soudés.....	15
I.7.3.1.Contrôle avant soudage	15
I.7.3.2.Contrôle pendant le soudage	15
I.7.3.3.Contrôle après soudage.....	15
I.8. Conclusion.....	15

Chapitre 2: généralité sur les contrôles destructifs et non destructifs

II.1.Introduction.....	17
II.2. Les contrôles destructifs	18
II.2.1. Essai de traction.....	18
II.2.2. Essai de pliage	19
II.2.3. Essai de résilience.....	19
II.2.4. Essai de dureté.....	20
II.2.4.1. Principe.....	20
II.2.4.2. Différents types d'essais de dureté	20
II.2.5. Essai de texture	21
II.3. Les contrôles non destructifs	22
II.3.1.Introduction.....	22
II.3.2.Historique sur les contrôles non destructifs.....	23
II.4.Différentes techniques du C N D.....	24
II.4.1.L'examen visuel.....	24
II.4.1.1. Principe.....	24
II.4.1.2.Domaine d'application.....	24
II.4.2.Le ressuage	26
II.4.2.1. Principe.....	26
II.4.2.2. Domaine d'application.....	26
II.4.3.La magnéto copie.....	28
II.4.3.1.Principe.....	28
II.4.3.1.Domaine d'application.....	28
II.4.4. Les courants de Foucault	30
II.4.4.1. Principe.....	30
II.4.4.2. Domaine d'application.....	30
II.4.5.Les ultrasons.....	31
II.4.5.1Principe	31

II.4.5.2.Domaine d'application.....	32
II.4.6.La radiographie	33
II.4.6.1. Principe	34
II.4.6.2.Domaine d'application.....	34
II.4.7.L'émission acoustique	35
II.4.7.1.Principe.....	35
II.4.7.2.Domaine d'application.....	36
II.5.Les avantages des contrôles non destructifs.....	37
II.5.1.Augmentation de la productivité et des bénéfices.....	37
II.5.2.Augmentation de la durée d'utilisation.....	38
II.5.3.Augmentation de la sécurité	38
II.5.4.Augmentation de l'identification des matériaux	38
II.6.Conclusion.....	38

Chapitre 3: contrôle non destructif des pipes par radiographie

III.1.Introduction	39
III.2.Caractéristiques et propriétés des rayons X et gamma.....	39
III.2.1.Les rayons X.....	39
III.2.2.Les rayons gamma	39
III.3.Caractéristiques d'une substance radioactive pour la radiographie..	40
III.3.1.Choix d'une substance radioactive.....	41
III.4.Comparaison entre la radiographie X et gamma	42
III.5.Variation de l'intensité de radiation	44
III.6.Appareils à rayon X pour radiographie industrielle	44
III.6.1. Tube à rayons X.....	44
III.6.2.Génératrices hautes tensions.....	46
III.6.3.Pupitre en commande.....	46
III.6.4.Circuits d'alimentation.....	46

III.7. Les films radiographiques et leur traitement.....	46
III.7.1.Les films radiographiques.....	46
III.7.1.1.Les écrans renforçateurs.....	47
III.7.1.2.densité d'un film	47
III.7.2.Traitement des films radiographiques	48
III.7.2.1.La chambre noire.....	50
III.8.Contrôle et mise en point des appareils	51
III.8.1.Exécution du contrôle.....	51
III.8.2.Préparation des surfaces à contrôler	51.
III.8.3.Repérage des soudures et identification des radiographies.....	52
III.8.4.Mise en place des films, écrans et cassette.....	52
III.8.5.Mise en place des équipements	53
III.8.6.La technique radiographique.....	53
III.8.6.1.Utilisation des rayons gamma.....	53
III.8.6.2.Utilisation des rayons X de haute énergie.....	54
III.8.6.3.Interprétation des films.....	54
III.8.6.4.Evaluation de la qualité d'image.....	54
III.9.Les types des IQI.....	55
III.9.1.Positionnement des IQI	55
III.9.2.Sensibilité des IQI.....	55
III.9.3.Note du film ou indice visibilité	56
III.9.4.Examen des films.....	56
III.9.4.1.Recherche des défauts	56
III.9.4.2.Localisation des defaults.....	56
III.10.Etablissement du rapport.....	57
III.10.1.Les normes d'acceptation.....	57
III.11.Protection contre les rayonnements X et gamma	58
III.12.Conclusion.....	59

Chapitre 4: Etude expérimentale

IV.1. Contrôle par radiographie.....	60
IV.2. Description de la technique utilisée.....	60
IV.3. Préparation de l'éprouvette pour le contrôle.....	60
IV.4. Calcul du temps d'exposition.....	64
IV.4.1. Exécution de l'exposition et règles de sécurité.....	65
IV.5. Développement des films.....	66
IV.6. Estimation de la qualité d'image.....	67
IV.6.1. Calcul de la sensibilité de l'IQI.....	67
IV.6.2. Calcul de l'indice de visibilité.....	68
IV.7. Résultats du contrôle.....	68
IV.8. Enregistrement et classification des résultats d'essai.....	70
IV.9. Relèves des indications.....	71
IV.10. Analyse et discussion des résultats.....	72
IV.11. Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	75
Bibliographie.....	76
Annexes.....	78

Conclusion générale

Dans cette étude, on a utilisé la méthode du contrôle non destructif par radiographie pour un exemple pratique de contrôle.

A partir de ce travail, on conclut que :

- Plusieurs types de défauts sont observés dans un cordon de soudure, comme : (Fissure, Cavités, Inclusion solide, Manque de fusion et de pénétration, défauts de forme, défauts divers).
- Les techniques de détection des défauts s'effectuent par un contrôle visuel et par radiographie.

Parmi l'application de contrôle radiographie, le domaine des assemblages soudés était intéressant pour juger l'utilité et l'efficacité de ce technique où on les a appliqué sur un assemblage soudé de forme tubulaire en essayant de suivre et de comprendre toutes les étapes et les nonnes conduisant à des résultats d'un contrôle professionnel.

Le contrôle par radiographique donne une image réelle et permanente des défauts qui peuvent définir leurs natures et leurs positions ; cette définition obtenue est la meilleure par rapport aux autres techniques de contrôle surtout pour les défauts volumiques comme les inclusions gazeuses ou de laitier et les défauts de forme. Mais cette technique reste peu sensible aux défauts linéaires.

Alors quelle que soit la performance de réalisation d'un contrôle non destructif, il ne soit jamais suffisant pour une qualification totale d'un assemblage.

Pour une entreprise qui fabrique des assemblages soudés ou des canalisations, elle doit être capable d'appliquer au moins ces deux techniques de contrôle avec quelques contrôles de surface pour assurer la qualité de ses produits dans les normes internationales de qualité puisque ce technique exigent toujours une certification des personnels de contrôle ainsi la réalisation suivant des normes définissant chaque méthode, ses conditions et ses résultats.

Chapitre I

Technologie de soudage des pipes

I.1. Introduction

Souder des pipelines consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler. Cela implique qu'il n'y a pas de matières non métalliques interposées entre les éléments réunis. Cette technique d'assemblage est différente du rivetage, de l'agrafage ou du collage.

Quelques types d'assemblage les plus utilisés sont représentés par la figure ci-dessous:

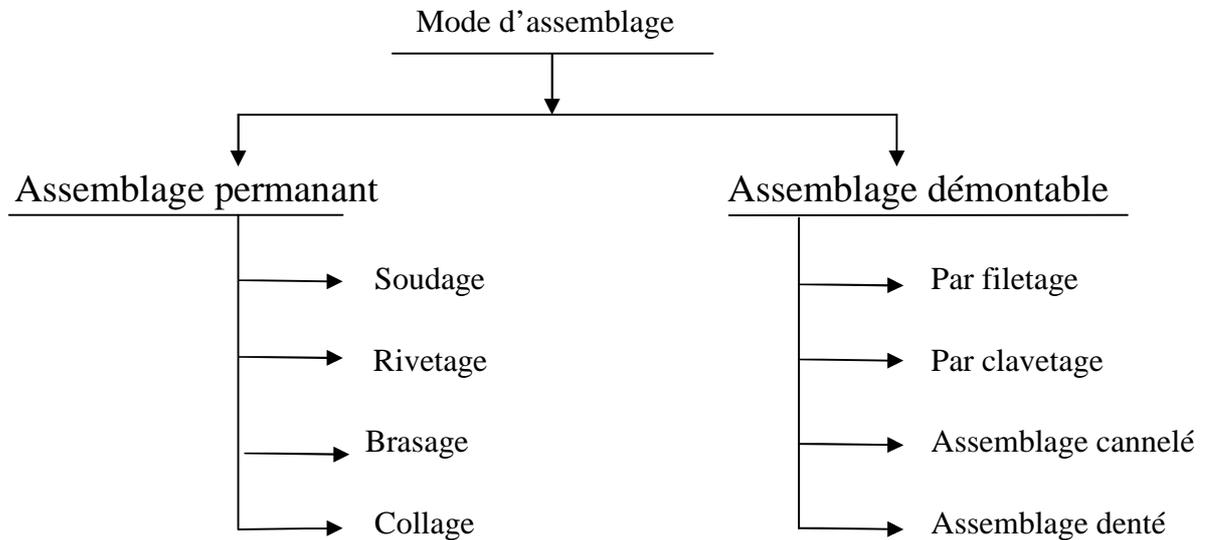


Figure I. 1 : Les modes d'assemblage.

I.2. Les propriétés des métaux:

Chaque métal est caractérisé par les propriétés suivantes :

➤ Propriétés physiques:

Ils sont caractérisés par: La couleur, la masse spécifique, le point de fusion, la conductibilité thermique et électrique et le coefficient thermique de dilatation. La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 Kg/m³, celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 Kg/m³. Plus la densité du métal est petite et plus les éléments de construction qui en découlent sont légers et efficaces. Cela explique le fait que les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés dans la construction. Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir les traiter à chaud afin d'obtenir des éléments coulés. La dilatation produite par l'échauffement est caractérisée par le coefficient de dilatation, ce coefficient est pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température,

➤ **Propriétés mécaniques:**

Ils sont caractérisés par: La résistance, la dureté, la résilience, la fatigue. La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs, suivant la nature de ces efforts on distingue : la résistance à la traction, à la compression, à la flexion et à la torsion qui sont caractérisés par les charges limites par lesquelles le métal se rompt. La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône. La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs. La fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statiques ou dynamiques).

➤ **Propriétés technologiques:**

Ils sont caractérisés par la possibilité d'usinage des métaux ce qui est conditionnée par leur plasticité.

I.3. Choix d'un tube pour canalisation:

Le choix judicieux du diamètre d'une canalisation tend à améliorer le bilan économique au niveau des investissements, mais également le fonctionnement des installations pour obtenir une exploitation fiable ; avant toute chose, il est nécessaire :

- De bien définir les conditions d'exploitation du réseau pour lequel on doit déterminer le diamètre à savoir le fluide véhiculé (eau, air, réactifs ...), ses caractéristiques (agressif, corrosif, abrasif, colmatant,), son débit et sa pression.
- De bien choisir le matériau de la canalisation.
- De bien connaître les caractéristiques normalisées du tube sélectionné.

Les différentes normes définissent le diamètre extérieur des tubes et les classent en fonction de leur diamètre nominal (DN) qui se rapproche de leur diamètre intérieur. La vitesse d'écoulement dans une conduite se calcule non pas à l'aide du diamètre nominal mais à l'aide de diamètre intérieur réel, d'où la nécessité de connaître le matériau de la conduite. Les principaux matériaux utilisés pour les réseaux sont :

- L'acier au carbone.
- L'acier inoxydable.
- La fonte.
- Les matériaux synthétiques PRV.PVC. PE.

I.4. Les assemblages soudés:

Parmi les assemblages utilisés dans le domaine des constructions mécaniques, les assemblages soudés trouvent un large espace d'application; ceci est obtenu par sa grande productibilité et sa disponibilité en différentes techniques et procédés. Ainsi, les développements importants atteints depuis le début du 20^{ème} siècle, au niveau des techniques des assemblages soudés, ont mené le soudage dans une position remarquable à l'industrie.

I.4.1. Les procédés de soudage:

Une soudure idéale est celle qui assure une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgiques et physiques entre les pièces assemblées, de telle sorte qu'on ne puisse distinguer le joint du métal qui l'entoure. Bien qu'en pratique, ce cas idéal ne soit jamais réalisé, il existe cependant de nombreuses manières d'obtenir des soudures dont les propriétés sont suffisamment proches de celle d'une soudure idéale, pour donner une entière satisfaction. Il faut à cet effet, que les procédés de soudage utilisés soient judicieusement adaptés à chaque application, de manière à permettre la réalisation des joints qui possèdent toutes les caractéristiques nécessaires à leur bonne tenue en service. Chaque procédé de soudage est défini en ordre principal par sa source d'énergie et le type de protection ; il doit satisfaire à un certain nombre de conditions :

La première de ces conditions est de permettre l'élimination de la contamination superficielle des éléments à souder. On ne peut, en effet, réaliser un joint convenable que si les bords des pièces à assembler sont propres, exemptes d'oxydes, de films organiques et de gaz absorbés. Un nettoyage parfait de ces bords avant le soudage, bien qu'utile, n'est cependant pas toujours nécessaire.

La seconde condition est de permettre d'éliminer la contamination atmosphérique et ses effets. Dans la plus part des procédés, le soudage s'effectue à l'abri de l'atmosphère, car il faut éviter que les pellicules superficielles, qui viennent d'être éliminées, ne se reforment pas pendant le soudage.

En fin, **la troisième** condition est de permettre l'obtention des joints présentant les propriétés désirées. A cet effet, dans les méthodes où il y a fusion de bords des pièces, il est souvent nécessaire d'ajouter au métal d'apport des éléments désoxydants ou d'alliages.

I.4.1.1. Classement des procédés de soudage:

Les procédés de soudage peuvent être classés de différentes manières et notamment suivant des différentes conditions. Une classification plus répandue est celle basée sur les sources d'énergie et sur les moyens de protection mis en œuvre contre la contamination atmosphérique. Comme exemples, on peut donner le principe de quelques procédés de soudage les plus employés:

I.4.1.1.1. Soudage manuel à l'arc: [1-2]

a) Source d'énergie :

La source d'énergie est de type électrique, la chaleur est produite par un arc électrique amorcé entre une électrode enrobée et les pièces à assembler ; le courant peut être continu ou alternatif.

b) Métal d'apport :

Le métal d'apport se présente sous une forme d'une électrode enrobée caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.

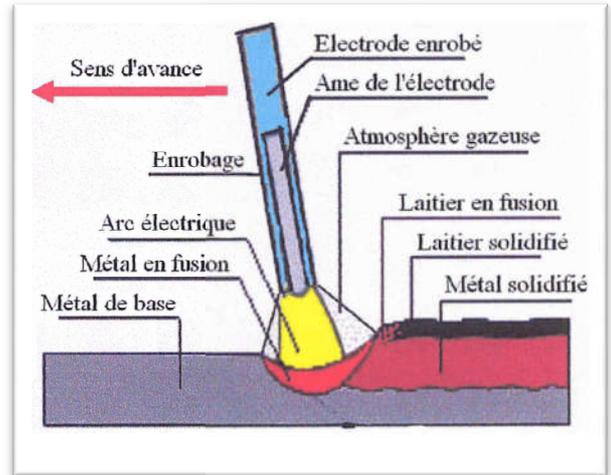


Figure I.2 : Soudage manuel à l'arc.

c) Eléments de protection:

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc.

d) Domaine d'utilisation:

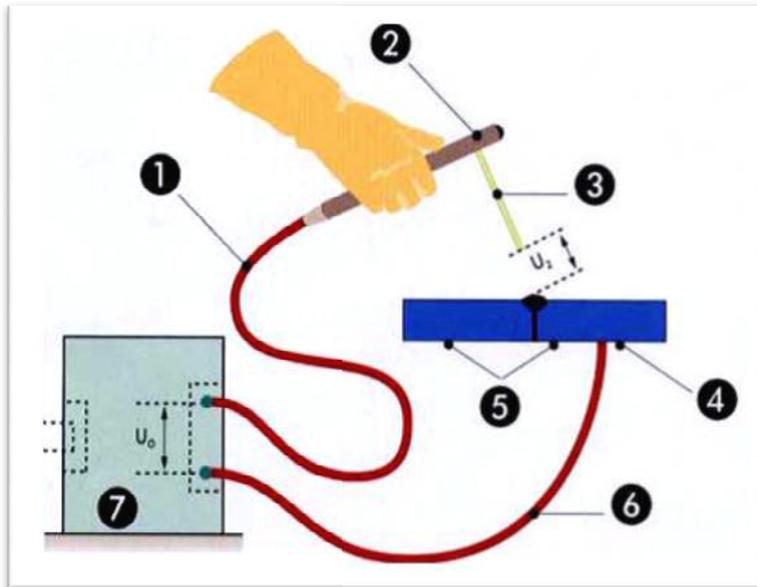
Le soudage manuel à l'arc convient pour l'assemblage des métaux ferreux et certains métaux non ferreux. Pratiquement, il permet de souder tous les types de joints dans toutes les positions et mettre en œuvre toutes les épaisseurs à partir de 1 mm.

e) Avantages :

Comme avantages de ce procédé, on peut citer son faible coût en équipements, ainsi que les possibilités qu'il offre de souder des joints des différents types, en toutes positions et pour une gamme très étendue d'épaisseurs.

f) Inconvénients :

Ce procédé présente l'inconvénient d'une faible productivité et exige des opérateurs adroits pour obtenir des soudures de bonne qualité ; de plus, on doit prévoir l'enlèvement du laitier de protection.



1. Conducteur de soudage.
2. Porte-électrode isolé.
3. Electrode enrobée consommable.
4. Connecteur de pièce.
5. Pièces à assembler.
6. Connecteur de retour.
7. Générateur de courant de soudage.

Figure I.3 : Principe de soudage manuel [1-2].



Figure I.4 : Soudage des pipelines (type manuel).

I.4.1.1.2. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG) : [3]

a) Source d'énergie :

Le soudage semi-automatique MIG « Metal Inert Gas » à une source d'énergie de type électrique, la chaleur est fournie par un arc électrique amorcé entre un fil électrode et les pièces à assembler, le courant est continu.

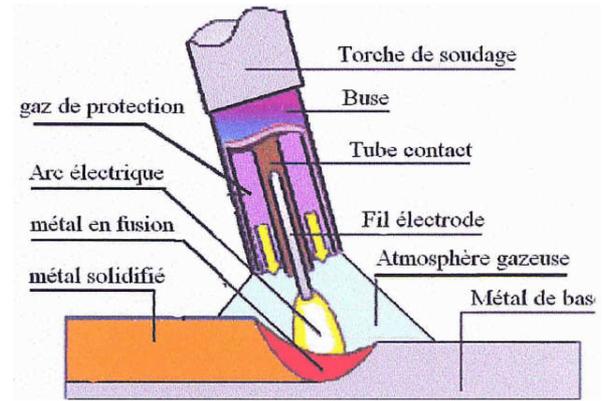


Figure I.5 : Soudage semi-automatique (MIG) [3].

b) Métal d'apport :

Le métal d'apport se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0.5 et 3.2 mm.

d) Élément de protection:

La protection du bain de fusion est assurée principalement soit par des gaz inertes (argon) ou actif (CO₂), soit par le flux continu dans un fil électrode fourré.

e) Domaine d'utilisation:

Ce procédé convient pour l'assemblage des métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tout les types de joints en toutes positions et de mettre en œuvre des épaisseurs de 0.5 mm.

f) Avantages:

Un des principaux avantages du soudage sous protection gazeuse est d'être un procédé semi-automatique ou automatique qui ne réclame pratiquement aucune opération de finition, il présente une productivité nettement supérieure à celle du soudage manuel à l'arc.

e) Inconvénients:

L'opération de soudage ne peut être effectuée à une trop grande distance de la source de courant, à cause de l'alimentation en fil électrode. Ainsi l'intensité de soudage est liée au dédit du fil électrode, ce qui conduit à certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.

I.4.1.1.3. Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène (TIG) : [3-4]**a) Source d'énergie :**

Le soudage sous gaz inerte TIG

« Tungsten Inert Gas » à une source d'énergie de type électrique, la chaleur est produite par un arc électrique amorcé entre un fil électrode de tungstène et les pièces à assembler, le courant peut être alternatif ou continu.

b) Métal d'apport :

Le métal d'apport est indépendant de la torche de soudage et se présente sous forme d'un filou d'une baguette.

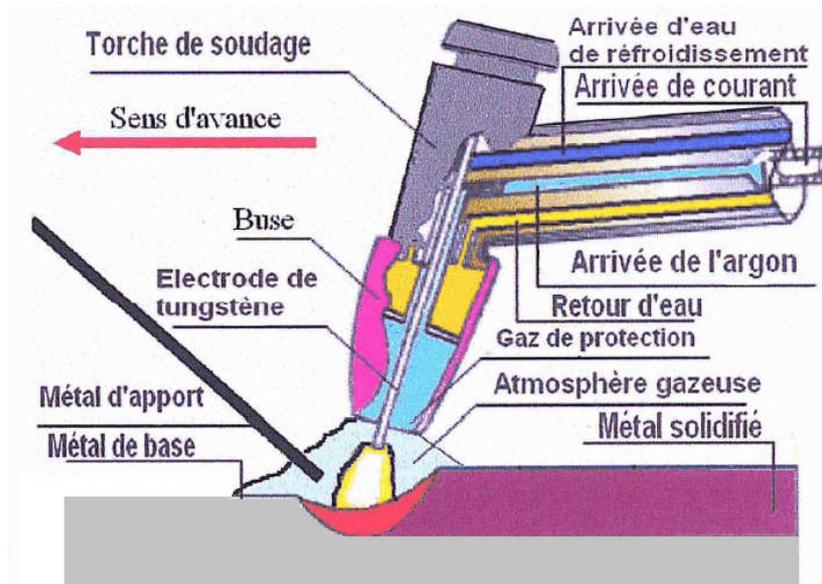


Figure I.6 : Soudage sous gaz inerte [3-4].

c) Élément de protection:

La protection du bain de fusion est assurée par un gaz inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium, on peut aussi utiliser un mélange de ces deux gaz, avec éventuellement de l'hydrogène de faible quantité ceci à cause de l'oxydation rapide du tungstène.

d) Domaine d'utilisation :

Ce procédé est utilisé pour l'assemblage de la plus part des métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous les types de joints en toutes positions et de mettre en œuvre des épaisseurs de 0.1 mm.

e) Avantages:

Le procédé permet de réaliser des joints de haute qualité, il convient pour une large gamme de métaux différents et peut être aisément autorisé dans le cas de soudage sans métal d'apport.

f) Inconvénients:

Le procédé impose une préparation soignée des joints, une grande précision dans la réalisation des chanfreins et la propreté des pièces à souder.

I.4.1.1.4. Soudage automatique : [4]

➤ Introduction :

Robot de soudure TIG-MIG :

Ce robot de soudure, dédié au soudage TIG (aciers et inox) et au soudage MIG (aciers, inox et alu), nous permet de nous positionner et d'être performants en rapport qualité-prix sur des séries de pièces répétitives (Fig I.7). On note que certaines soudures sont difficiles à réaliser sans robot.

➤ Exemple:

le robot nous permet de réaliser des soudures hélicoïdales sur des tubes inox d'épaisseur 1 mm et de longueur 4,20 mètres. Cette technologie met en œuvre les 6 axes du robot + l'axe externe du positionneur (axe intégré au robot qui tourne le tube en même temps que le bras du robot se déploie longitudinalement) avec des écarts autorisés à l'axe de soudure inférieurs à 0,2 mm pour assurer des soudures de qualité « radio ». Dès lors qu'un soudeur qualifié a programmé le robot pour souder une pièce positionnée de façon très précise dans un outillage de maintien, le robot de soudure TIG-MIG reproduira automatiquement le même chemin (avec une tolérance extrême inférieure à 0,02 mm) en utilisant les paramètres programmés de soudage (intensité, vitesse d'avance, vitesse de fil, etc.).

➤ Avantages:

- ✓ Taux de dépôt élevé.
- ✓ Meilleures propriétés mécaniques et chimiques de la soudure.
- ✓ Fatigue moindre du soudeur.
- ✓ Temps de formation du soudeur réduit.
- ✓ Soudage de joints longs possible.
- ✓ Soudage dans toutes les positions.
- ✓ Économie de temps.
- ✓ Facteur de marche atteignant généralement 100 %.

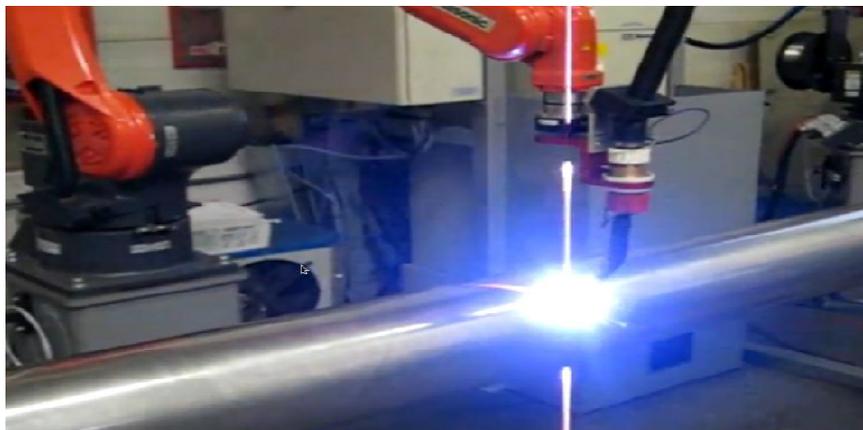


Figure I.7 : Soudage des pipelines type automatique.

I.5. Choix du métal de base:

Le choix du métal de base est abordé en général sous l'aspect de la soudabilité, il ne s'agit donc pas du choix de la nuance de l'acier qui est fait par le bureau d'étude, lors du dimensionnement de la construction. Les méthodes permettant de choisir le métal de base, ne prennent généralement en compte que le risque de rupture fragile, les autres aspects de la soudabilité étant supposés envisagés au cours de l'exécution des assemblages. Ainsi le choix du métal de base d'une catégorie donnée de construction, est basé sur la classification selon les caractéristiques des métaux à souder qui peut donner leurs domaines d'utilisation, leur composition chimique et leurs caractéristiques mécaniques. Le tableau suivant donne une estimation de soudabilité de quelques aciers:

Teneur en carbone (%)	Teneur d'additions (%)	Soudabilité
Jusqu'à 0.25%	Mn+Si+Cr +Ni < 1%	Bonne
De 0.25 à 0.35%		Assez bonne
De 0.35 à 0.45%		Assez mauvaise
De 0.45% et plus		Mauvaise
Jusqu'à 0.20%	Mn+Si+Cr+Ni = 1 à 3%	Bonne
De 0.20 à 0.30%		Assez bonne
De 0.30 à 0.40%		Assez mauvaise
De 0.40 % et plus		Mauvaise
Jusqu'à 0.18%	Mn+Si+Cr+Ni >3%	Bonne
De 0.18 à 0.28%		Assez bonne
De 0.28 à 0.38%		Assez mauvaise
De 0.38% et plus		Mauvaise

Tableau I.1 : Soudabilité des aciers.**I.6. Choix du métal d'apport:**

Le métal d'apport doit être choisi de manière telle qu'il permet d'obtenir des joints présentant un maximum d'homogénéité, sur le plan des propriétés mécaniques, de la composition chimique et des structures métallurgiques. Il est en générale difficile d'obtenir une homogénéité complète. En pratique, le choix de métal d'apport dépend de la nature du métal de base et des exigences qui peuvent être extrêmement variées et la manière de les respecter dépend du procédé de soudage mis en œuvre. Des catalogues élaborés par les producteurs du métal d'apport avec une collaboration des producteurs du métal de base peuvent donner des indications permettant d'orienter le choix.

1.7. Préparation des joints à souder:

La qualité d'un joint soudé dépend, dans une large mesure, du soin apporté à la préparation des pièces à assembler. Une bonne préparation ne doit altérer sensiblement, ni les propriétés mécaniques, ni les propriétés métallurgiques des pièces à souder, elle doit être d'une précision suffisante pour permettre un soudage aisé. Il est en effet difficile, parfois impossible, de réaliser un assemblage qui présente un bon comportement en service si, au départ, la géométrie du chanfrein n'est pas uniforme sur toute la longueur du joint ou si le métal des pièces est altéré ou fissuré, par suite d'une préparation inadéquate. Ainsi, un choix convenable de l'opération pour préparer les chanfreins est très important puisque la géométrie et l'état de surface de la zone à souder influent directement sur la qualité de soudure [1].

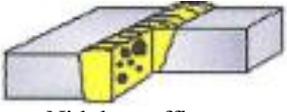
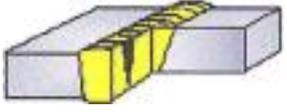
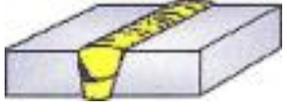
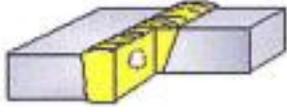
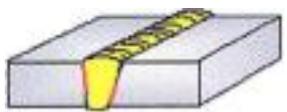
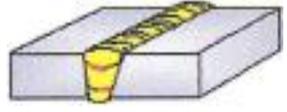
1.7.1. Types des joints soudés:

Le but de la préparation et du chanfreinage des pièces est d'assurer la pénétration voulue de la soudure et de faciliter l'exécution des joints soudés. Les principaux facteurs qui conditionnent la préparation des joints soudés sont:

- ❖ Les procédés de soudage.
- ❖ Les positions de soudage.
- ❖ Les épaisseurs des pièces à assembler.
- ❖ Le degré de pénétration des soudures.
- ❖ Les coûts de préparation.
- ❖ Les quantités de métal à déposer.
- ❖ La nature du métal des pièces.

Avec les différents procédés de soudage et leurs conditions imposées, les domaines de variation de ces facteurs soient étendus. Si on se concerne par l'assemblage bout à bout qui est le plus fréquent dans le cas des constructions en acier, les soudures bout à bout sont celles qui assemblent deux ou plusieurs éléments, en assurant généralement les continuités de la pleine section de ces éléments par le seul métal d'apport de la soudure [1]. Les soudures bout à bout peuvent être effectuées sur des bords relevés, sur des bords non chanfreinés ou chanfreinés avec ou sans support. Les types des chanfreins rencontrés dans ce mode de soudure sont dits: en V, en Y, demi V, en X, en K, en U, en J ou en demi U et en double U.

I.7.2. Les défauts de soudure: [5]- [6].

Types de défauts	Descriptions	Principales causes	Moyens d'éviter les défauts	Schémas
Inclusions gazeuses	<ul style="list-style-type: none"> -Inclusions gazeuses sous forme de soufflures sphériques - Inclusions gazeuses sous forme de soufflures vermiculaires se disposant les unes à la suite des autres. 	<ul style="list-style-type: none"> -Gaz occlus, gaz résultants des réactions chimiques dans le métal des pièces, dans le métal d'apport et dans les enrobages. - Humidité des pièces et des électrodes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'acier calmé - Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation. - Séchage des pièces avant soudage. - Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C, avant soudage. 	 <p>Nid de soufflures.</p>  <p>Soufflures vermiculaires</p>
Inclusions solides ou inclusions de laitier.	<ul style="list-style-type: none"> Restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint se disposant: - Entre passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures. - De formes et d'orientations quelconques. - Alignées ou en chapelet. - Alternées de part et d'autre de l'axe du cordon. 	<ul style="list-style-type: none"> - Insuffisance de nettoyage des cordons - Préparation inadéquate des pièces. - Technique de soudage défectueuse. - Utilisation d'outils de burinage inadéquats ou mal aiguisés. - Défectuosités dans les reprises à l'envers. - Utilisation d'électrodes de diamètres trop importants. - Morsures en angle aigu, localisées sur les faces de chanfrein et difficiles à nettoyer. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle visuel pendant le soudage. - Nettoyage convenable des cordons avec des outils appropriés. - Soins dans la préparation des pièces, dans l'emploi des électrodes et dans l'exécution des reprises à l'envers. - Utilisation d'électrodes dont le diamètre est adapté à l'épaisseur des pièces et au type de préparation. 	 <p>Inclusion de laitier</p>  <p>Inclusion métallique</p>
Défauts de fusion	<ul style="list-style-type: none"> Discontinuité de métal, avec manque de liaison: - Entre la soudure et une face de chanfrein (collage) ou entre deux passes. 	<ul style="list-style-type: none"> Intensité trop faible de courant de soudage. -Avancement trop rapide ou balancement trop rapide de l'électrode, ne permettant pas la fusion du métal des pièces. - Préparation des pièces non adaptées aux conditions de soudage, surtout dans le cas des chanfreins en 1/2 V, en K et en J 	<ul style="list-style-type: none"> Contrôle visuel pendant le soudage. - Choix judicieux de l'intensité du courant de soudage, de la vitesse d'avancement et de la vitesse de balancement de l'électrode; temps d'arrêt entre chaque balancement. - Préparations adaptées aux conditions de soudage. - Dépôt de cordons suffisamment plats. 	 <p>Manque de fusion des bords.</p>  <p>Manque de fusion entre passes.</p>

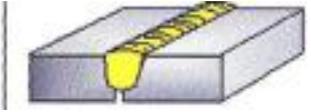
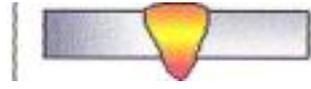
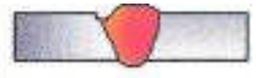
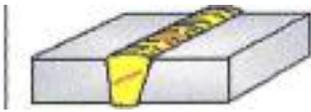
Types de défauts	Descriptions	Principales causes	Moyens d'éviter les défauts	Schémas
Défauts de pénétration	Absence de métal à la racine des chanfreins.	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'électrodes de diamètres trop importants. - Intensité trop faible ou très élevé du courant de soudage. - Mode d'exécution inadéquat. - Mauvaise préparation du chanfrein. - Position relative déficiente des pièces, avec chevauchement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle visuel pendant le soudage. - Choix judicieux de l'intensité de courant de soudage, du mode d'exécution et de la préparation du chanfrein. - Fixation correcte de la position relative des pièces. - Elimination des défauts de pénétration par gougeage et reprise à l'envers. 	 <p>Manque de pénétration</p>  <p>Excès de pénétration.</p>
Sillons ou caniveaux Morsure en surface.	<p>Sillons ou caniveaux : rainures ou gorges à la surface des pièces, le long des bords des joints soudés.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Morsure en surface. - Rainures ou gorges de faible longueur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité trop forte du courant de soudage. - Position déficiente de l'électrode dans le cas des cordons d'angles. - Température des pièces trop élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle visuel pendant le soudage. - Choix judicieux de l'intensité de courant de soudage, de la position de l'électrode et de la température des pièces, pendant le soudage. 	 <p>Caniveau</p>  <p>Morsure</p>
Fissurations	<p>Fissures longitudinales ou transversales par rapport au joint, dans le métal fondu ou dans la ZAT :</p> <p>Fissuration à chaud, à froid ou à réchauffage.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fissuration dans le métal de base. 	<ul style="list-style-type: none"> - A basse température après le soudage. - Contraintes en service. - Lors de refroidissement. - Due au traitement thermique après le soudage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon nettoyage et bonne préparation des pièces. - Séchage et conservation dans des conditions appropriées. - Bon choix d'électrodes et de métal de base. - Limité la température de recuit de détente et sa durée. 	 <p>Fissure longitudinale</p>  <p>Fissure transversale</p>

Tableau I.2 : Les défauts de soudure [5]- [6].

1.7.3. Contrôle des joints soudés:

Quelque soit le procédé de fabrication, pour obtenir des produits de qualité bien définie et constante, il est important non seulement de vérifier que les pièces terminées sont conformes, mais encore de s'assurer qu'au cours des divers stades de fabrication les facteurs qui agissent sur la qualité finale sont maintenus dans les normes prévues, n'opérer qu'un contrôle final conduit, en effet, à constater qu'on produit des pièces non conformes, lorsqu'il est trop tard pour l'éviter. Ceci est particulièrement vrai en soudage, où les facteurs qui agissent sur la qualité sont nombreux et complexes, c'est pourquoi on prévoit, en général, trois types de contrôles distincts:

1.7.3.1. Contrôle avant soudage:

Il a pour but de vérifier :

- Que le projet est convenablement conçu en ce qui concerne la disposition des soudures, leur ordre et leur cadence d'exécution, que les joints sont accessibles et peuvent être correctement positionnés, que l'ordre d'exécution évite aux mieux les déformations.
- Que le métal de base est soudable dans les conditions prévues.
- Que les matériaux d'apport ou les flux éventuels ont des qualités spécifiées.
- Que les soudeurs sont suffisamment adroits pour accomplir le travail demandé.

1.7.3.2. Contrôle pendant le soudage:

Il a pour but de vérifier:

- Que la préparation des bords, d'accostage des tôles et le pointage sont exécutés correctement
- Que la mise en œuvre du procédé s'effectue dans les règles de l'art.

1.7.3.3. Contrôle après soudage

Il consiste à faire subir certains essais aux assemblages terminés au fur et à mesure de leurs exécutions, afin de pouvoir agir à temps sur les causes de variation de la qualité.

1.8. Conclusion:

Dans une première vue, le soudage apparaît comme une simple technique d'assemblage ; mais après une étude un peu approfondie, la complexité de procédés et son domaine d'application soient un sujet très vaste. Alors une étude complète de cette technologie n'est pas évidente. Le problème de qualité des assemblages soudés est toujours posé à cause des carences naturelles des procédés de soudage ce qui nous oblige à proposer chaque fois des solutions pour le résoudre; où il apparaît le contrôle des assemblages soudés.

Chapitre II

Généralités sur les contrôles destructifs et non destructifs

II.1.Introduction :

Dans l'industrie, les exigences de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Au niveau de la production, il faut dimensionner les pièces au plus juste tout en garantissant leurs disponibilités et leurs performances. Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue. Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND) [7]. Les applications générales de la méthode CND sont la détection de défauts, la mesure d'épaisseur et l'identification de métaux et des alliages. Des exemples spécifiques dans les industries de métaux sont l'inspection de tubes ou de barres lors de leurs fabrications. La méthode est aussi utilisée dans le domaine de l'aéronautique (détection de fissures), de l'évaluation des dommages par la chaleur et la détection de couches de corrosion cachées [8].

On distingue diverses techniques [9, 10, 11] dont principalement :

- Les ultrasons,
- Les rayons X ou Gamma,
- Le ressuage ou la thermographie infrarouge,
- La magnétoscopie,
- Les courants de Foucault.

Le choix de l'une d'entre elles dans une application est basé par la nécessité que les propriétés de la pièce à contrôler soient compatibles avec le phénomène physique mis en jeu [12].

Le CND, repose sur un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les abîmer, soit au cours de la production soit en cours d'utilisation. Il faut donc choisir, pour chaque opération de contrôle, la méthode adéquate en fonction du type de défaut, des caractéristiques de la pièce, des conditions de mise en œuvre [13].

II.2 Les contrôles destructifs :

II.2.1. Essai de traction : (NF EN 10002 – 1 (Octobre 1990))

• Forme de l'éprouvette :

L'éprouvette est constituée soit par un tronçon de tube, soit par une bande longitudinale ou transversale découpée dans le tube et ayant l'épaisseur totale de la paroi du tube (figure II.1). Dans le cas d'essais sur bandes prélevées sur tubes soudés et en l'absence de prescription contraire de la norme de produit, la bande est découpée hors du cordon de soudure [14].

• Tronçon du tube

Pour pouvoir être serré aux deux extrémités par les mors de serrage, le tronçon de tube peut être (figure II.2) :

- soit obturé au moyen de tampons adaptés à son diamètre,
- soit obturé par deux éléments plats s'adaptant à son diamètre, puis comprimé.
- soit aplati.

• Bandes longitudinales ou transversales

La longueur calibrée (L_c) des bandes longitudinales ne doit pas être aplatie, mais les têtes d'amarrage peuvent l'être pour permettre l'accrochage dans la machine d'essai (voir figure II.1).

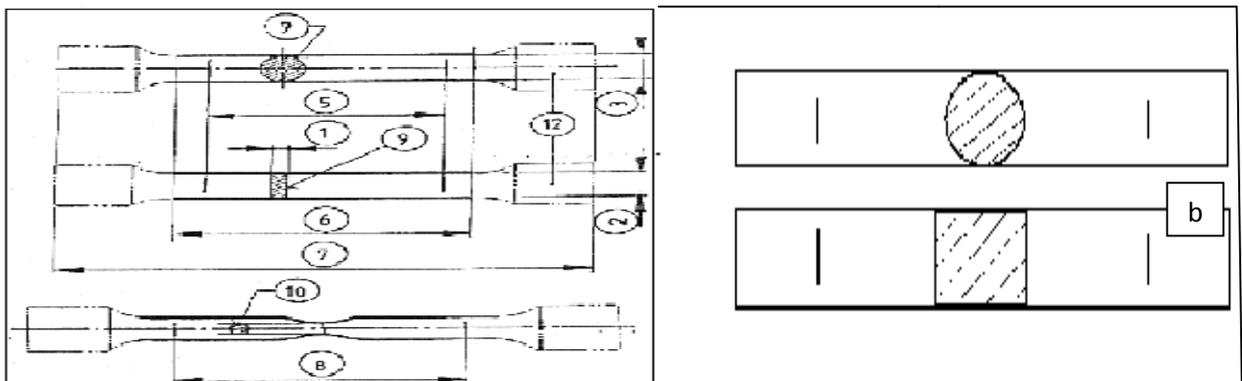


Figure II.1 : Epreuves constituées d'une portion a) usinée b) non usinée.

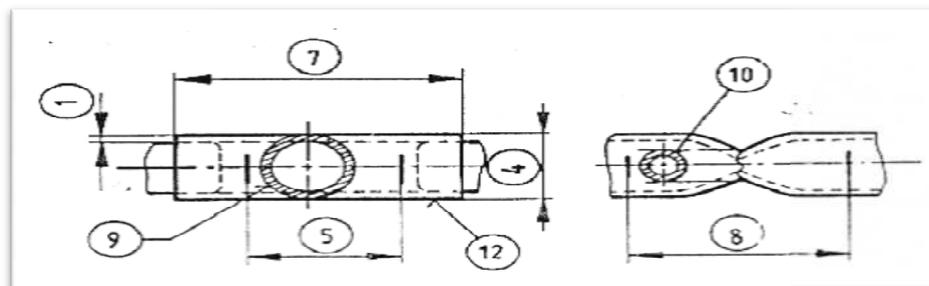


Figure II.2 : Epreuves tronçon du tube.

II.2.2. Essai de pliage :

« L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante, une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est prélevée transversalement ou longitudinalement à l'assemblage soudé. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers ou coté). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle déterminé avec le prolongement de l'autre branche ».

(La norme de référence est la NF EN 910 Mai 1996)

II.2.3. Essai de résilience Charpy (entaille en V) ISO 148 (1983) :

On appelle résilience l'énergie de rupture ramenée ou non à la section sous entaille de l'éprouvette : elle s'exprime donc en joules ou en joules/cm². Les notations précises pour cette résilience sont :

- **KV** pour la résilience sur éprouvette **ISO** à entaille en V en Joules,
- **KCV** pour la résilience sur éprouvette **ISO** à entaille en V en Joules/cm².

a) Principe : La présente norme internationale spécifie la méthode d'essai de résilience Charpy (entaille en V) pour déterminer la résistance au choc (figure II.3). L'essai consiste à rompre en un seul coup de mouton-pendule, dans des conditions définies ci-après, une éprouvette entaillée en V en son milieu et reposant sur deux appuis. L'éprouvette normalisée doit avoir 55 mm de longueur et une section carrée de 10 mm de côté. Elle doit comporter, au milieu de sa longueur, une entaille en V à 45°, de profondeur 2 mm, avec un rayon à fond d'entaille de 0,25 mm. Les éprouvettes doivent être complètement usinées. L'éprouvette doit porter exactement sur les appuis, de telle sorte que le plan de symétrie de l'entaille ne s'écarte pas de plus de 0,5 mm du plan de symétrie des appuis, elle doit être disposée sur le porte-éprouvette de telle sorte que l'arête du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la face opposée à celle-ci. Les conditions de l'essai normal correspondent à une énergie nominale de la machine de 300 ± 10 J. Si la température d'essai n'est pas spécifiée dans la norme de produit, elle doit être prise égale à 23 ± 5 °C [15].

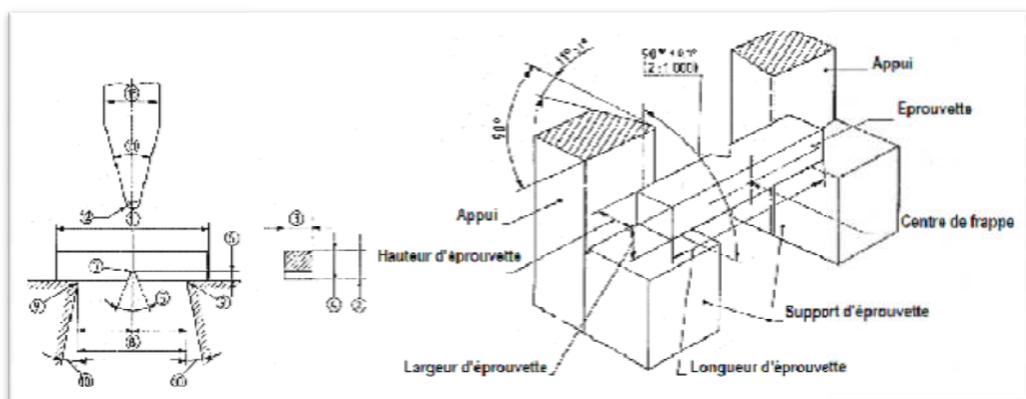


Figure II.3 : Essai de résilience Charpy (entaille en V) et position des appuis.

- Les températures de l'essai de résilience :

Les essais de résilience sont réalisés principalement à la température ambiante et à des températures inférieures à 0° Celsius (de -20 °C à -196 °C).

- Les liquides réfrigérants utilisés pour abaisser la température des éprouvettes sont :
 - L'alcool jusqu'à -80 °C.
 - Le fréon jusqu'à -155°C.
 - L'azote liquide de -155 °C à -196 °C.

Plus la température de l'essai est faible, la structure ductile de l'éprouvette devient fragile.

II.2.4. Essai de dureté :

II.2.4.1. Principe : L'essai consiste à imprimer en deux temps à la surface de la pièce à essayer un pénétrateur (cône diamant ou bille d'acier) et dans les conditions conventionnelles définies à mesurer l'accroissement rémanent e et de la profondeur de pénétration (figure II.4). L'unité de mesure de e est égale à 0,002 mm. De cette valeur, est déduit un nombre appelé dureté Rockwell. L'essai doit être effectué sur une surface lisse et plane, exempte d'oxyde et de matières étrangères et, en particulier, exempte de lubrifiant. La préparation doit être effectuée de manière que toute altération de la dureté de la surface, par exemple par échauffement ou par écrouissage, soit minimisée [16].

II.2.4.2. Différents types d'essais de dureté :

- Essai Brinell-HB : Le pénétrateur est une bille en acier trempé ou carbure de tungstène de diamètre donné sous une charge en Newtons maintenue 15 secondes et on mesure le diamètre de l'empreinte.
- Essai Vickers-HV : Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F . On mesure les diagonales de l'empreinte.
- Essai Rockwell C-HRC : Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° d'angle et de charge égale à 1373N, On mesure l'accroissement en profondeur ou enfoncement rémanent.
- Essai Rockwell B-HRB : Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1.6 mm de diamètre et de charge égale à 883 N. On mesure l'accroissement en profondeur ou enfoncement rémanent.

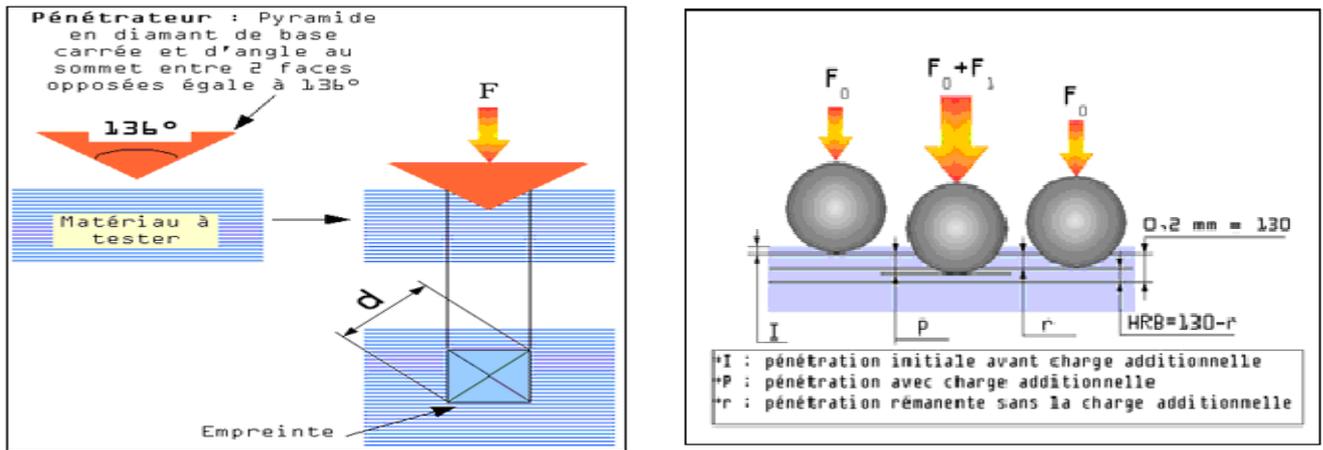


Figure II.4 : Principe de la dureté Vickers (pyramide) et Rockwell [17].

II.2.5. Essai de texture :

« L'essai consiste à rompre un assemblage soudé par pliage ou par traction après avoir réalisé une entaille longitudinale ou latérale sur la surface de la soudure. L'essai de texture permet de révéler les types, les dimensions et la répartition des défauts internes sur la surface de la cassure d'une soudure».

L'essai de textures est effectué :

- Par un choc dynamique (a l'aide d'un marteau).
- Par pression dans un étau, une machine de pliage ou une presse d'atelier .
- Par traction avec une machine spéciale.

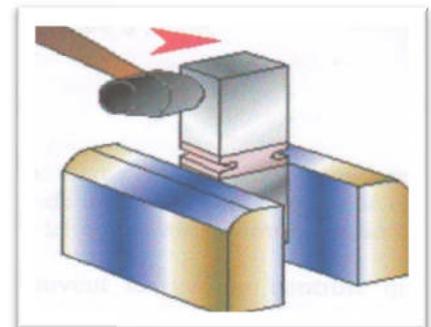


Figure II.5 : Essai de texture.

- La surface de la rupture de la soudure est examinée visuellement sous un bon éclairage ou avec une loupe pour les défauts fins.

La détection et l'identification des défauts internes exigent une expérience confirmée de la part de l'observateur.

II.3. Les contrôles non destructifs :

II.3.1. Introduction :

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des Systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques. Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels comme l'industrie automobile, aéronautique, pétrolière, navale et nucléaire. La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante, cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées, elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance [18].

Le CND constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants et des organismes d'étude et de recherche. Vu l'étendue du champ d'application du CND, de nombreuses techniques ont été développées et étudiées pour l'inspection et la détection des défauts pour différentes applications industrielles [19][20] [21],

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [22] :

- la reproductibilité : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- la fiabilité : le contrôle doit remplir son cahier de charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.
- la possibilité d'inspection globale et locale : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.
- la sensibilité : il s'agit du rapport entre la variation de la mesure et la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- la rapidité d'exécution : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.
- le coût : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

la résolution : la résolution est la plus petite variation du signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

II.3.2. Historique :

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960/1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. Les dernières décennies enfin, voient l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide dans contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique [18,19],

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique de qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue, il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser. Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans les composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande. Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre car les lois de la physique sont ce quelles sont et aussi, dans ce domaine, les progrès sont lents. Il n'en va pas de même l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes. L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes [18].

II.4 Différentes techniques du CND :

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler. Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur. Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière. Il existe plusieurs techniques de CND, elles peuvent être classées comme suit :

II.4.1. L'examen visuel :

L'inspection visuelle est la plus ancienne procédure de contrôles non destructifs. Il peut être aidé, par un éclairage classique ou laser. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité, Les résultats prospères ont dépendu de la compétence de l'opérateur, le bon nettoyage, illumination adéquate de la zone inspecté et la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui, mais le matériel est devenu beaucoup plus sophistiqué. Habituellement, l'inspection visuelle ne peut pas être utilisée pour vérifier des résultats de test, ni ce peut être utilisé pour remplacer d'autres méthodes de CND [23, 24,25, 26].

II.4.1.1. Principe :

L'examen visuel est le plus simple et le premier des procédés de contrôle et il doit précéder tout autre type d'investigation. Il consiste à examiner à l'œil nu dans des conditions d'éclairage satisfaisantes et à distance appropriée de la surface des métaux, des soudures et des équipements. H peut être complété par l'utilisation de moyens optiques : loupe, binoculaire, endoscope... et de jauges ou moyens de mesure (pied à coulisse...)

II.41.2. Domaine d'application :

➤ Contrôle des soudures : l'examen visuel permet d'une part, de déceler des défauts de forme et autres défauts débouchant en surface des joints soudés, d'autre part, de fournir les indications (aspect de métal, largeur des cordons, inclinaison des stries...) qui renseignent l'observateur sur les conditions dans lesquelles la soudure à été exécutée, et par la suite sur la probabilité de l'existence de défauts internes. Il est le préliminaire indispensable à tous les examens conventionnels de surface (ressuage, magnétoscopie...) et de compacité (radiographie et ultrasons...).Le contrôle visuel est souvent complété par des mesures réalisées à l'aide de jauges spécifiques comme par exemple :

- La mesure de la hauteur de gorge d'une soudure d'angle.
 - La valeur du bombé du cordon.
 - Les dimensions d'un cordon soudé.
 - Les défauts d'alignement, o Les dimensions d'un chanfrein.
- Le contrôle visuel peut aussi être effectué en cours du procès (soudage, emboutissage...) ou immédiatement après à l'aide de caméra vidéo, le procédé est assez facilement automatisable, ce qui autorise la tri automatique entre les pièces bonnes et mauvaises.
- Le contrôle d'équipement : L'examen visuel est souvent le premier contrôle qui permet de repérer :
- L'absence d'une soudure ou d'un accessoire.
 - Une fuite ou une zone de surchauffe.
 - Une déformation anormale.
 - La détérioration d'un revêtement.
- **Avantages**
- Examen simple, rapide et pas coûteux;
 - Souplesse d'inspection.
- **Inconvénients**
- Détection limitée aux défauts superficiels;
 - La surface doit être propre;
 - Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.



Figure II.6 : Examen visuel.

II.4.2. Le ressuage :

Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste en l'amélioration de l'inspection visuelle de défautuosité. Cet essai permet de déceler les défauts qui apparaissent à la surface. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.). Son mode d'emploi est très simple. Il consiste à l'aspiration du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux quatre phases, application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [27, 28,21].

II.4.2.1. Principe :

Le ressuage consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré ou fluorescent qui va pénétrer par capillarité dans des défauts débouchant :

- a) après un temps d'imprégnation de 15 à 20 min à température ambiante, l'excès de pénétrant est éliminé par lavage.
- b) Après séchage, un révélateur blanc est appliqué sur la surface à contrôler.
- c) Le pénétrant contenu dans les défauts éventuels ressué alors dans le révélateur.
- d) Les images des défauts apparaissent immédiatement ou jusqu'à 30 min après l'application du révélateur.

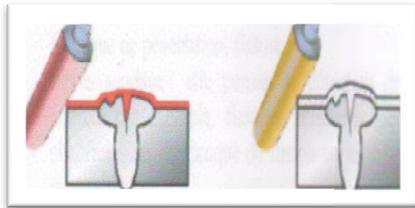
II.4.2.2. Domaine d'application :

Le ressuage permet de détecter les défauts de compacité débouchant en surface sur des métaux non poreux. Le ressuage est utilisé pour le contrôle :

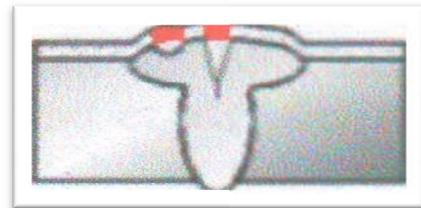
- Des pièces moulées et forgées.
- Après rectification et/ou traitement thermique des pièces mécaniques.
- Sur produits laminés ou étirés.
- En service.
- Les fissures de fatigue ou de corrosion peuvent si les conditions sont favorables être mises en évidence par ressuage.

Pendant le soudage, il peut être mis en œuvre par exemple :

- Lors d'une reprise envers pour s'assurer l'élimination complète de défauts pouvant subsister à la racine du joint (manque de pénétration, fissures....).
- Entre passes, dans ce cas, le contrôle peut être effectué après la première passe, puis toutes les passes ou toutes les trois passes par exemple (température < 200°C).
- Après soudage, il permet la détection des défauts suivants pourvu qu'ils débouchent à la surface : fissures, piqûres, retassures et certains manques de fusion.



Pénétrant Révélateur



Ressuage

Figure II.7 : Etapes du contrôle par ressuage.

➤ **Avantages :**

- Facile à mettre en œuvre manuellement sur chantier.
- Insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface.
- Détection possible de petits défauts capables de générer des fuites.
- Possibilité de lignes automatisées de contrôle.
- Utilisable sur des métaux non ferromagnétiques pour lesquelles les contrôles magnétoscopiques sont inefficaces.
- Utilisable sur des ferromagnétiques lorsque les problèmes de désaimantation sont critiques ou lorsque les pièces présentent une géométrie trop complexe.

➤ **Inconvénients du contrôle par ressuage :**

- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués.
- Nettoyage rigoureux des pièces à contrôler.
- Les opérateurs doivent être expérimentés pour certaines techniques.
- Produits inflammables, volatils et nocifs.
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout.

II.4.3. La magnétoscopie :

Appliquée exclusivement sur des matériaux ferromagnétiques (fer, acier, fonte, ...), la magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des discontinuités débouchant en surface ou sous-cutanées. Comparée au ressuage, elle est donc plus restrictive mais elle lui est préférée, quand elle est applicable, car elle est beaucoup plus rapide [29,30]. La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler, ou une partie de celle-ci, à l'aide d'un champ magnétique constant et suffisamment élevé figure II.8. L'existence de discontinuités de surface ou sous-jacentes provoquent une distorsion des lignes de force du champ magnétique qui génère des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques micronisés et déposés sur la surface de la pièce, en attirant les particules du révélateur, les flux de fuite fournissent des signatures particulières des discontinuités. Cependant, une meilleure détection n'est obtenue que si les discontinuités 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.

II.4.3. 1. Principe :

La magnétoscopie consiste à soumettre une zone à contrôler à l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif, les défauts éventuels engendrent un champ de fuite à surface de la pièce, le champ de fuite est matérialisé par une poudre ferromagnétique très fine pulvérisée sur la surface à examiner et attirée au droit du défaut par des forces magnétiques existe de nombreux moyens d'aimantation et de produits adaptés à :

- La forme de la pièce.
- L'orientation du défaut.

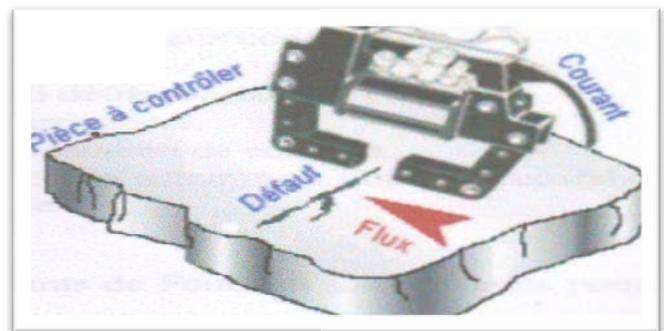


Figure II.8 : Alimentation pour le contrôle magnétoscopique.

II.4.3.2 Domaine d'application.

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de compacité débouchant en surface ou proche de la surface sur des métaux ferromagnétiques tels que les aciers, fontes, nickel, cobalt...

La magnétoscopie est utilisé pour le contrôle :

Des pièces moulées : criques dans les congés de raccordement et réseaux de fissures superficielle.

Des pièces forgées : criques correspondants à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion.

Après traitement thermique.

- En service : les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détecter, les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique.
- Des soudures :

Avant soudage : elle peut être utilisée par exemple pour effectuer un contrôle des faces des chanfreins de soudure.

Pendant soudage : elle peut être mise en œuvre par exemple, lors d'une reprise envers pour assurer l'élimination complète de défauts pouvant rester à la racine du joint (manque de pénétration, fissures ...).

Après soudage: elle permet la détection des " défauts " superficiels ou sous-jacent comme par exemple, fissures, retassures de cratères, manque de pénétration sur chanfreins en X, manque de fusion situé entre le métal de base et au voisinage des raccordements.

➤ **Avantages du contrôle par magnétoscopie:**

- Facile à mettre en œuvre manuellement sur chantier Economique. Résultats quasi immédiats.
- Détection des défauts débouchant matés ou bouchés des défauts sous jacent

➤ **Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :**

- Contrôle exclusivement réservé aux matériaux ferromagnétiques.
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur).
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- Risque électrique par passage direct de courant.
- Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- Démagnétisation obligatoire après contrôle.
- Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

II.4.4. Les courants de Foucault:

II.4.4.1. Principe:

Les courants de Foucault autorisent le contrôle de compacité des métaux conducteurs de l'électricité. La profondeur de contrôle dépend des caractéristiques magnétiques et électriques du matériau à contrôler (de quelque dixième de millimètre pour l'acier à plusieurs millimètres pour le titane) et de la fréquence de la sonde utilisée. Le contrôle consiste à comparer les signaux observés lors du déplacement de la sonde avec ceux générés par les défauts artificiels réalisés sur un bloc étalon et de même nuance [7]

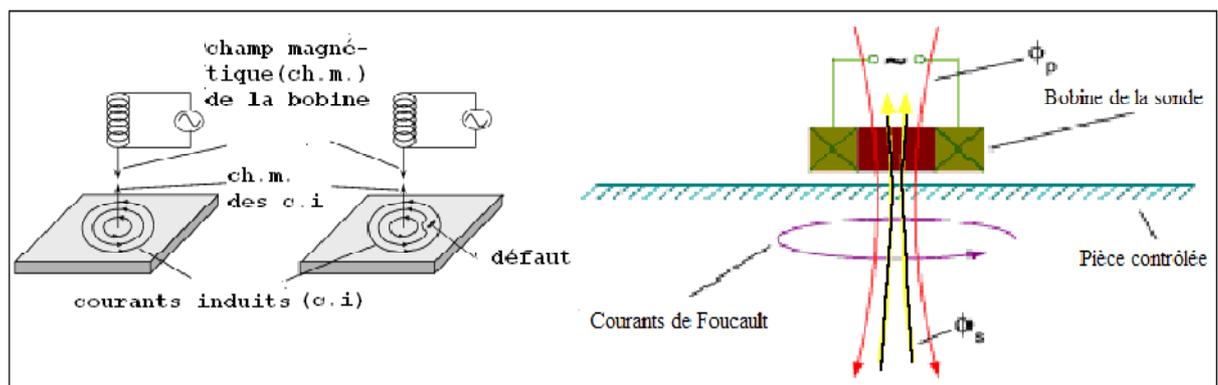


Figure II.9 : détection des défauts par les courants de Foucault.

II.4.4.2. Domaine d'application:

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisées pour effectuer les opérations suivantes.

- Tri de nuance.
- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe et recherche des fissures dans les structures aéronautiques.
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau et recherche d'endommagement d'un matériau revêtu.
- Mesure d'épaisseurs de revêtement (conducteur non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur).
- Recherche des défauts sur produits en sortie de fabrication (tube, rails, barres ...).
- Suivi d'installation et de matériels en service.
- Contrôle d'échangeurs tubulaires, condenseur ... de l'industrie nucléaire et de l'industrie chimique en vue de détecter des corrosions, érosions, chocs et fissures, dans les secteurs.

➤ **Avantages :**

- Le contrôle ne nécessite l'accès qu'à un seul côté de la pièce.
- Contrôle sans contact ni milieu de couplage de tous les métaux conducteurs.
- Contrôle possible à haute température (à plus de 900°C).
- Grande vitesse de contrôle (exemple: contrôle de fil défilant à 100 m/s).
- Réalisation de capteurs adaptés à une application particulière.
- Si requis, l'automatisation relativement facile de l'opération de contrôle.
- Alternative possible au ressuage ou à la magnétoscopie notamment pour la recherche de défauts en service lors des opérations de maintenance.

II.4.5. Les ultrasons:

Le contrôle non destructif par ultrasons consiste à générer une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à contrôler par un transducteur piézoélectrique et analyser sa propagation. L'onde ultrasonore est réfléchiée par le fond de la pièce et par d'éventuelles discontinuités présentes dans le matériau. La localisation d'un défaut dans la profondeur de la pièce se fait grâce à la position de son écho obtenu sur écho gramme. L'amplitude relative des différents échos peut renseigner sur l'importance du défaut. Toutefois, les anomalies de surface sont difficilement détectables. La méthode peut être appliquée à tous les matériaux qui ne présentent pas une très forte atténuation ni une anisotropie très importante à l'instar des matériaux métalliques, composites, céramiques etc. [31]. Elle offre une grande sensibilité de détection qui peut atteindre par exemple 1 mm à 0,2 mm dans le cas de l'acier, et permet la détection de défauts localisés dans le volume de pièces d'épaisseur importante,

II.4.5.1. Principe:

Les ultrasons sont des ondes mécaniques générés à partir d'un élément piézoélectrique excité à une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 MHz, cet élément appelé le traducteur. Les ultrasons sont transmis dans la pièce à contrôler par l'intermédiaire d'un milieu de couplage, et se propagent à une vitesse qui dépend du matériau. Lorsque les ultrasons rencontrent un défaut favorablement orienté par rapport à l'onde incidente, un écho revient vers le traducteur. Cette énergie mécanique réfléchiée est transformée en signal électrique par l'élément piézoélectrique et se signale par un écho sur le système de visualisation de l'appareil à ultrason. La position de l'écho permet de déterminer la profondeur de l'indication dans la pièce et d'en apprécier le caractère volumique ou non volumique.

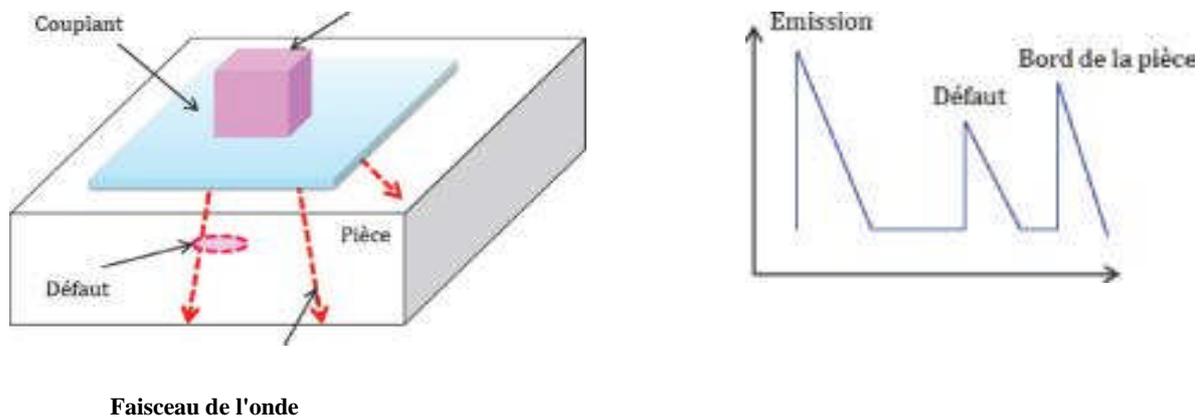


Figure II.10 : Principe des ultrasons.

II.4.5.2. Domaine d'application:

Le contrôle par ultrasons est applicable à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent ni une trop forte atténuation ni une anisotropie importante. Les matériaux métallique, thermoplastiques, composites et céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé. Les ultrasons permettent la détection de tous défauts engendrant une variation locale des propriétés ultrasonores de la pièce. Le contrôle des soudures peut être effectué entre 20°C et 150°C. Il existe des solutions en dehors de cette gamme mais plus complexes à mettre en œuvre. Le contrôle ultrasonore est notamment utilisé pour le contrôle:

- Des pièces moulées : retassures, vermiculures, variations locales de structure, ségrégations et porosités.
- En service: les défauts apparaissent en service tels que fissures ou corrosions peuvent être détectés par ultrasons.
- Des soudures: avant et après traitement thermique le contrôle par ultrasons peut être appliqué avec profit aux soudures réalisées sur les aciers non alliés et faiblement alliés de nuance ferritique ainsi sur les alliages légers. Avant le soudage, il est nécessaire d'effectuer, dans le cas des tôles et des produits gorgés, un contrôle par ultrasons pour détecter des défauts pouvant gêner le contrôle après, soudage. Pendant soudage, le contrôle ultrasonore peut être effectué mais il est délicat de mise en œuvre car le remplissage partiel de la soudure peut gêner le contrôle.

Après soudage, le contrôle ultrasonore est bien adapté pour le contrôle des épaisseurs soudées comprises entre 8 et 100 mm mais il est adaptable en dehors de cette fourchette. Grâce aux techniques d'examen mises en œuvre, tous les types de soudure peuvent être examinées (bout à bout, d'angle et à recouvrement).

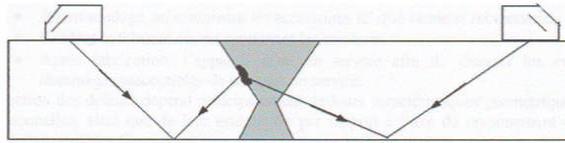


Figure II.11 Control par ultrasons des soudures

➤ **Avantages :**

- Accès nécessaire à un seul côté de la pièce.
- Très sensible pour la détection des défauts plans.
- Contrôle possible de compacité de la totalité d'un volume donné.
- Positionnement des indications détectées dans l'épaisseur.
- Estimation de l'importance d'une indication à l'aide de son pouvoir réfléchissant (contrôle en réflexion) ou de l'atténuation produite (contrôle en transmission).
- Automatisation et suivi possibles à l'aide de moyens d'imageries.

➤ **Inconvénients :**

- Nécessité d'utiliser un milieu de couplage entre le palpeur et la pièce.
- Interprétation de la nature des défauts et de leur dimension délicate nécessitant un personnel qualifié.
- Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (Fonte par exemple).
- Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis à vis de la direction.

II.4.6. Contrôle par radiographie :

La radiographie est une méthode couramment employée pour contrôler l'intérieur d'une pièce, il s'agit de traverser la matière à examiner par un rayon ionisant de très courte longueur d'onde, en franchissant la pièce, l'énergie des photons de ce rayon est partiellement absorbée par la matière rencontrée selon sa densité, un détecteur (film, écran...) est placé derrière la pièce et fournit un radiogramme de la zone traversée. Les défauts sont représentés dans cette image par une variation locale de l'intensité [7].

II.4.6.1. Principe :

Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques de forte énergie, générés par des tubes à vide ou des éléments radioactifs (cobalt, Iridium ...), lorsqu'ils traversent la matière, les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé. Le rayonnement émergent de l'objet à contrôler impressionnera le film radiographique qui, après développement par voie chimique, donnera une image en négatif de la pièce examinée. Le défaut sera d'autant mieux détecté qu'il présente une dimension importante dans la direction du rayonnement.

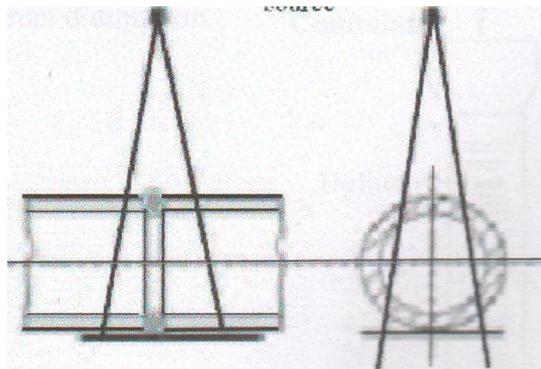


Figure II.12 : Contrôle radiographique des soudures.

II.4.6.2. Domaine d'application :

Les rayonnements ionisants (X et gamma) sont applicables au contrôle de la majorité des matériaux métalliques usuels dans leur état de base et qu'ils soient soudés d'une manière homogène ou hétérogène. Cette méthode est aussi applicable aux matériaux non métalliques comme exemple les thermoplastiques.

Le contrôle radiographique peut être exécuté à tous les stages de fabrication d'un appareil :

- Avant soudage, en examinant les accessoires tel que vanne et robinetterie.
- Pendant la fabrication, en examinant les soudures.
- Après fabrication, l'appareil étant en service afin de détecter les éventuels dommages susceptibles de survenir en service.

La détection des défauts dépend principalement de leurs caractéristiques géométriques et/ou dimensionnelles, ainsi que de leur orientation par rapport à l'axe de rayonnement et de la sensibilité du système film utilisé. De ce fait, les défauts volumiques (cavités, inclusions,...) sont généralement bien détectés ainsi que les défauts plans d'ouverture suffisante et dont le plan principal est quasi parallèle à l'axe du rayonnement. La radiographie est applicable pour le contrôle des :

- Pièces moulées : porosités gazeuse, retassures et fissures diverses, matières étrangères, inclusions de sable, ségrégations et inclusions d'oxydes.

- Produits laminés et étirés : ségrégations et fissures liées au formage.
- Soudure au stade de la fabrication : fissures, cavités, inclusions solides, manques de fusion et de pénétration, défauts de forme.
- Défauts survenant en service dans les soudures ou dans le matériau de base, fissures de fatigue d'origine thermique ou mécanique, corrosions (piques, cavernes, fissures), érosions mécaniques (cavitations....) déformation suite à un choc.

➤ **Avantages :**

- Génère un document de contrôle archivable : le film radiographique qui peut être repris, étudié et discuté, longtemps après la prise initiale.
- Produit l'image de l'ombre portée du défaut, ce qui permet de mettre un nom sur ce dernier.

Vérification de la mise en œuvre du procédé grâce à des **Indicateurs de Qualité d'Image** normalisés (IQI).

- Matériel robuste.
- Autonomie : la gammagraphie ne nécessite pas d'alimentation en courant électrique
- Possibilité d'exposition panoramique.
- Numérisation possible avec traitement d'image afin de renforcer la détection de défauts difficiles.

➤ **Inconvénients :**

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur;
- Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel;
- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité .
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

II.4.7.L'émission acoustique :

II.4.7.1. Principe :

L'émission acoustique (EA) résulte d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau comportant une dégradation active ou se propageant sous l'effet d'une sollicitation externe, judicieusement choisie.

Différents phénomènes physiques peuvent être générateurs d'émission acoustique :

- Propagation de fissures.
- Déformation plastique.
- Relaxation de contraintes dans les soudures.
- Corrosion.
- Fuites (de liquide ou de gaz).

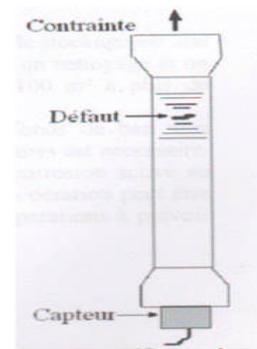


Figure II.13 : Contrôle par émission acoustique.

Le principe de mesure de l'émission acoustique réside dans la détection des ondes ultrasonores générées par l'activité de la structure. La détection est généralement réalisée par des capteurs de type piézoélectrique placés au contact de l'équipement. L'acquisition et le traitement des données enregistrées sont alors réalisés par le système antérieurement réalisé.

II.4.7.2. Domaine d'application:

La principale application industrielle de l'émission acoustique est le contrôle des équipements métalliques sous pression et des réservoirs de stockage. Ces équipements sont en général, des structures de taille importante pour lesquelles un suivi périodique est réglementé. L'émission acoustique est aussi appliquée sur les métaux composites. En effet, le requalification périodique ou la réception pour les équipements neufs, comporte une épreuve hydraulique souvent problématique (arrêt de production et maintenance, corrosion et surcharge pendant l'épreuve, ...). Le contrôle par émission acoustique est particulièrement adapté pour satisfaire à ces exigences réglementaires. Le contrôle peut être réalisé aussi bien durant une épreuve hydraulique que pneumatique. Une surpression de 10% par rapport à la pression de service 'vue par l'appareil au cours des 6 derniers mois, permet d'obtenir des résultats d'EA décisifs. Dans certains cas un suivi en service (ou lors des changements de processus) peut suffire à évaluer l'intégrité d'un appareil. Les capteurs EA classiques supportent des températures de l'ordre de 100°C. Si nécessaire, l'utilisation des capteurs à haute température permet de contrôler des structures jusqu'à quelques centaines de degrés.

Les principaux secteurs d'utilisation sont:

Le suivi d'épreuve hydraulique ou pneumatique d'équipement sous pression (sphère de stockage, réservoirs, réacteurs, chimiques, tuyauteries, condenseurs, échangeurs et réacteurs à paroi froid.

Le contrôle des bacs de stockage : la maintenance des fonds de bac de Stockage est une opération longue et coûteuse. Elle nécessite une vidange complète, un nettoyage et un examen du fond (la surface à contrôler, peut varier d'environ 100 m² à plus de 2000 m² suivant le diamètre du bac).

L'émission acoustique présente l'avantage d'évaluer l'état des fonds de bac sans aucune préparation préalable seule une interruption de service de 24 à 48 heures est nécessaire. Ce contrôle a pour objet principal d'évaluer la présence de fuites et de corrosion active au niveau du fond de bac (durée

d'écoute acoustique de 1 à 3 heures). Cette opération peut être réalisée avant les interventions de maintenance et permet d'évaluer les réparations à prévoir (dimensions et emplacement des tôles de fond à remplacer).

➤ **Avantages :**

- Suivi de l'évolution des sources d'émission acoustique sans interrompre l'exploitation de l'équipement concerné.
- Localisation des sources d'émission acoustique générées par des défauts de la structure.
- L'utilisation de l'émission acoustique lors du suivi des épreuves sur équipements sous pression présente les avantages évidents qui sont :
 - Le suivi en temps réel de l'évolution des indications d'où une amélioration de la sécurité des installations et des personnels.
 - L'évaluation de l'intégrité globale d'une structure.
 - La possibilité de surveiller une structure, sans arrêt de processus où vidange âge ni démontage ou qui est inaccessible à des contrôles non destructifs conventionnels.

II.5. Les avantages des essais non destructifs :

Les contributions apportées à l'industrie par les essais non destructifs peuvent être divisées en quatre catégories : accroissement de la productivité, de la durée d'utilisation, de la sécurité, et de l'identification des matériaux.

II.5.1. Augmentation de la productivité et des bénéfices:

Les essais non destructifs permettent :

- ❖ D'éviter le gaspillage de matériaux, de diminuer les rebuts et de mieux utiliser la matière première.
- ❖ D'éviter les divergences par rapport à la qualité standard, d'obtenir une qualité meilleure et uniforme et de satisfaire l'acheteur.
- ❖ D'éviter le gaspillage de temps d'usinage (temps qui ne sont jamais retrouvés).
- ❖ De diminuer les frais d'entretien.
- ❖ De diminuer les frais de production.
- ❖ De contrôler et d'améliorer les procédés de production (en décelant les causes de mauvais fonctionnement et en trouvant les traitements nécessaires).
- ❖ D'augmenter la récupération de matériaux (certains matériaux défectueux peuvent être utilisables).
- ❖ De guider les études et avant-projets.
- ❖ De localiser et déterminer les défauts.
- ❖ D'utiliser plus efficacement les équipements.
- ❖ De trouver les matériaux défectueux.

- ❖ De trouver les procédés corrects de production.

II.5.2. Augmentation de la durée d'utilisation:

Les essais non destructifs permettent :

- ❖ De déterminer les régions de contraintes mécaniques.
- ❖ De déterminer les défauts dus à la fatigue mécaniques.
- ❖ D'éviter le mauvais fonctionnement d'un équipement vital.
- ❖ D'éliminer les ruptures d'équipement.
- ❖ De diminuer les frais d'entretien et de production.

II.5.3. Augmentation de la sécurité :

Les essais non destructifs permettent d'éviter:

- ❖ Les accidents.
- ❖ Les pertes humaines.
- ❖ Les pertes matérielles.

II.5.4. Augmentation de l'identification des matériaux :

Les essais non destructifs permettent de classer les matériaux et de différencier:

- ❖ Les compositions chimiques.
- ❖ Les traitements thermiques.
- ❖ Les propriétés métallurgiques.
- ❖ Les propriétés physiques.

II.6. Conclusion:

Comme il existe plusieurs types d'essais et contrôles, l'utilité d'un essai ne peut pas être connue sans savoir le domaine d'application des autres essais, leurs avantages et leurs inconvénients et les comparer avec l'essai d'étude, ce qui peut distinguer son importance et son but d'existence ; Ceux ci nous oriente à choisir la méthode de contrôle la plus correspondante et la plus idéale pour nos besoins.

Chapitre III

Contrôle non destructif des pipes par radiographie

III.1.Introduction :

Parmi les contrôles non destructifs, deux techniques très voisines, la radiographie X et gamma, font appel aux. Propriétés des rayonnements dits X et gamma en traversant la matière. le rayonnement émis subit une absorption fonction de la nature, de la compacité et de l'épaisseur du matériau, à la sortie, le rayonnement vient impressionner un film qui, après développement, présente des différences de noircissement traduisant les variations dans le matériau, le type et l'importance du défaut dans la pièce a contrôler seront précises après l'interprétation du film.

III.2. Caractéristiques et propriétés des rayons X et gamma:

Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques-de même nature que les ondes hertziennes, la lumière visible et les rayons ultraviolets, dont elles ne diffèrent que par leurs longueurs d'onde plus courtes.

Les longueurs d'ondes de rayons X et gamma utilisées en radiographie des soudures se situent entre environ 1 \AA ($1 \text{ angström} = 1.10^{-10} \text{ m}$) et quelques centièmes d'un Å . La longueur d'onde détermine la possibilité de pénétration des rayonnements.

La différence entre les rayons X et gamma réside en une différence de leur production. et de leur distribution spectrale.

III.2.1. Les rayons X :

Les rayons X sont obtenus par l'arrêt brutal, sur une plaque de métal convenablement placée, d'un flot d'électrons accéléré par une différence de potentiel élevée.

Pratiquement, on utilise toujours des électrons accélérés sous une différence de potentiel comprise entre 20 et 400 KV dans les équipements usuels. Cette différence de potentiel conditionne l'énergie cinétique atteinte par les électrons.

Il est à noter en effet qu'une partie seulement de l'énergie cinétique des électrons est transformée en rayonnement X, l'autre partie, plus importante étant dissipée sous forme de chaleur.

Les longueurs d'onde des rayons X sont comprises entre 10 \AA et 0.001 \AA .

Ainsi, en ajustant la différence de potentiel, la longueur d'onde obtenue pour les rayons X peut être réglée comme on la désire.

III.2.2.Les rayons gamma:

Des rayonnements électromagnétiques d'une longueur d'onde convenable pour la radiographie sont aussi émis par certaines substances radioactives.

Durant le processus de désintégration d'un noyau atomique instable, des photons sont émis (rayonnement gamma) Initialernent, des substances radioactives naturelles (radium, mésothorium,

radon) ont été utilisées en radiographie, mais le choix était très limité et le prix relativement élevé. La possibilité d'obtenir une radioactivité artificielle a été découverte en 1934, mais ce n'est qu'à partir de 1950, lorsqu'les réacteurs nucléaires furent en fonctionnement, que des substances radioactives artificielles (radio-isotopes) furent produites sur une grande échelle. De nos jours, les substances naturelles ne sont utilisées en radiographie industrielle [25].

III. 3. Caractéristiques d'une substance radioactive pour la radiographie

Plusieurs isotopes radioactifs différents sont connus et beaucoup d'entre eux sont disponibles commercialement. Pour la radiographie, cependant, un certain nombre de propriétés spécifiques est exigé et cela limite le nombre des radio-isotopes utilisables à environ cinq ; ces conditions sont :

a) Genre de rayonnement :

Généralement, ces substances radioactives émettent des rayonnements α , γ et β et sous certaines conditions, parfois des neutrons; la plus part des isotopes. Émettent plusieurs radiations. Pour la radiographie cependant, seuls les isotopes donnant des rayons gamma sont Intéressants.

b) Energie de rayonnement:

Le rayonnement gamma émis est une caractéristique de chaque radio-isotope particulier, et chaque élément est applicable dans un champ défini de contrôle selon son énergie. seul les éléments ayant un pouvoir de pénétration des matériaux sont utilisables.

c) Activité :

C'est une importante propriété d'un radio-isotope, a cause de son influence sur le temps d'exposition est le nombre de photons émis par unité de temps. L'activité des sources de rayonnements gamma utilisée en radiographie industrielle varie entre quelques centaines de milli curies à 2000 curies.

d) Décroissance de la radioactivité ou demi-vie :

L'intensité du rayonnement -émis par une 'source 'radioactive n'est pas constante .mais diminue avec le temps. Le temps après Lequel une substance radioactive perd 'la moitié de son activité est une constante appelé (« demi-vie » ou (« période »

Des radio-isotopes ayant une demi-vie très courte ne sont pas souhaitables pour la plus part des travaux radiographiques.

e) Dimensions - activités spécifiques:

Du point de vue, de la radiographie, il est souhaitable d'avoir une source de rayonnement ayant des dimensions géométriques faibles et une grande activité.

f) Capsules de sécurité :

Le matériau radioactif ne peut être utilisé sans certaines précautions: Pour éviter les fuites radioactives. L'élément actif doit être enfermé dans une capsule hermétiquement scellée.[26]

III.3.1. Choix d'une substance radioactive:

Lorsque l'application d'une source de rayons gamma est nécessaire, un choix doit être fait à partir des radio-isotopes ci-dessous. Ce choix est déterminé par la qualité d'image désirée, le temps de pose admissible...

Ceci se trouve résumé dans le tableau suivant

source	symbol	Gamme d'utilisation (mm d'acier)
Cobalt 60	Co ⁶⁰	40 – 150
Césium 137	Cs ¹³⁷	25 – 75
Césium 134	Cs ¹³⁴	25 – 100
Iridium 192	Ir ¹⁹²	10 – 60
Thulium 170	Tm ¹⁷⁰	3 – 13

Tableau III.1 : Les substances radioactives et leurs gammes d'utilisation [26].

III.4. Comparaison entre la radiographie X et gamma

	Rayons X	Rayons gamma
Alimentation	Alimentation électrique indispensable à partir d'une ligne ou d'un générateur.	Pas d'alimentation électrique, mais certains conteneurs sont manœuvrés électroniquement.
Contrôle	Les appareils de mesures du tableau de commande doivent être vérifiés durant l'exposition; des ajustements mineurs doivent être effectués.	Pas de contrôle autre que ceux exigés par la sécurité.
Poids et dimensions.	Les appareils sont volumineux et relativement lourds	La source de rayons gamma avec son conteneur de protection peut être relativement légère. Exception faite toutefois pour les sources de Co60, surtout dans le cas d'examen de forte épaisseur (>100mm) lequel exige un conteneur de protection qui est lourd.
Manipulation.	Le temps de mise en place est considérable et celle-ci est même parfois difficile,	Le transport et la mise en place sont relativement simples excepté pour les grosses sources de Co6.
Protection contre le rayonnement.	Le danger existe seulement durant l'exposition mais le risque de radiation relativement fort pendant ce temps.	Le danger existe en permanence: les sources doivent être surveillées aussi pendant le transport, le stockage,.... etc

	Rayons X	Rayons gamma
Foyer.	Pas de différence importante, des sources radioactives de faibles dimensions pouvant aussi être obtenues.	
Cône de rayonnement.	Habituellement, suivant un cône de 60° perpendiculaire à la direction longitudinale du tube. Toutefois, il existe des tubes spéciaux (par exemple à anode longue).	Le rayonnement est émis dans toutes les directions pour des raisons de sécurité le rayonnement doit être capturé dans les directions non désirées.
Temps d'exposition.	Les temps courts d'exposition sont possibles dans la gamme normale d'épaisseur.	Les temps d'exposition sont généralement plus longs (jusqu' à quelques heures).
Contraste du film.	L'énergie de rayonnement peut être choisie en fonction de l'épaisseur.	Le choix de l'énergie de rayonnement est limité et de ce fait, le contraste est presque toujours inférieur à celui obtenu avec les rayons X.
Coût de l'équipement	Le coût initial est élevé, ainsi que celui de l'entretien et de la réparation, surtout en travaux de chantiers.	Le coût initial est faible mais l'entretien et la réparation sont considérables, le coût des dispositions à prendre pour satisfaire aux exigences légales sur les dangers des radiations est élevé.

Tableau III.2 : Comparaison entre la radiographie X et gamma [26].

III.5. Variation de l'intensité de radiation :

Le but d'une radiographie est d'obtenir des images claires et précises des défauts présentant dans une pièce. Ces images résultent des variations de I 'intensité des radiations après que celles-ci sont passées a travers la pièce examinée.

En outre, les rayons X et les rayons gamma sont susceptibles de passer a travers les substances opaques a la lumière ordinaire ; on peut noter cependant, que le faisceau émergeant présente une intensité plus faible que le faisceau incident; cette diminution d'intensité est une fonction de la nature et de l'épaisseur de la couche traversée.

Si l'on appelle I_0 I 'intensité du faisceau incident et **I** l'intensité du faisceau émergeant, on peut en première approximation, écrire la relation suivante.

$$I = I_0 \exp(-\mu a) \quad (\text{III.1})$$

Avec : μ : Coefficient d'absorption qui dépend du nombre atomique, la masse spécifique de la substance traversée et de la longueur d'onde de la radiation utilisée [cm^{-1}].
 a : épaisseur traversée.

Cette équation néglige deux points :

1- Le faisceau de rayons X n'est pas monochromatique, donc, μ n'est pas constant.

2- une partie du rayonnement est diffusée par la pièce radiographiée.

Des lors μ est plus strictement une atténuation qu'un vrai coefficient d'absorption

III.6. Appareils à rayon X pour radiographie industrielle :

Un appareil a rayons X comporte les pièces essentielles suivantes: tube a rayons X, générateur a haute tension, circuits d'alimentation et coffret de commande

III.6.1. Tube à rayons X :

Un tube a rayons X est constitué d'une ampoule en verre dans laquelle on produit un vide poussé et ou sont placés la cathode, le filament et l'anticathode ou l'anode :

a) Filament :

Le filament est un fil (habituellement de tungstène) enroulé sous une forme appropriée et qui émet des électrons lorsqu'il est porté a une température suffisamment élevée. Quand le tube fonctionne, le flux d'électrons s'écoule du filament vers l'anticathode.

Le filament est centre dans une cupule de forme étudiée pour concentrer le flux d'électrons sur une zone restreinte de l'anticathode. Cette cupule est fixée sur la cathode mais leur alimentation est différente.

b) Anti-cathode ou anode :

L'anode est un bloc de métal à bonne conductibilité thermique (généralement de cuivre) portant l'anticathode, pastille (cible) de forme appropriée en métal a haut point de fusion le plus souvent en tungstène, cette pastille est inclinée de 60° à 70° par rapport a la direction des électrons accélères incidents. L'anode est reliée au pole positif du circuit haute tension.

Une très faible partie (moins de 1%) de l'énergie libérée soit s'utilisée par la production des rayons X, tout le reste est transformée en chaleur, c'est pour cette raison, l'appareil de production des rayons X doit s'occuper d'un système de refroidissement efficace pour évacuer les calories et protéger la vie du tube.

c) enceinte extérieure :

Le tube enfermé dans une enveloppe métallique reliée à la terre et remplie avec un liquide isolant (huile) ou gaz isolant (fréon); une gaine en plomb ou en autre matériau lourd double l'enceinte pour absorber les rayons X de fuite.

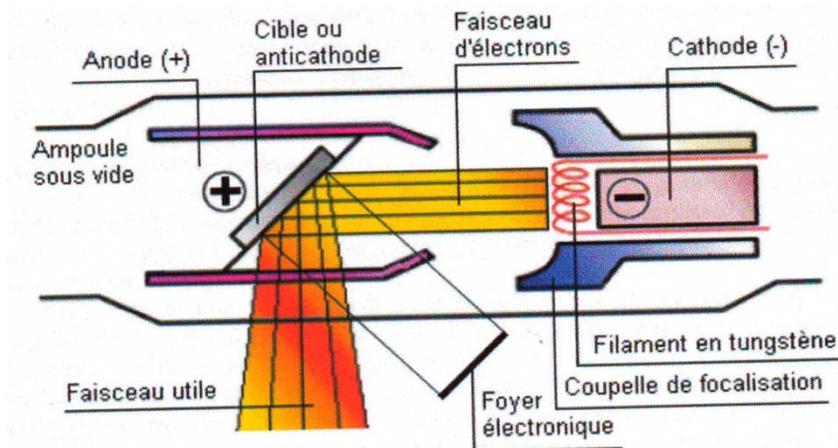


Figure III.1 : tube à rayant X.

III.6.2. Génératrices hautes tensions:

Dans les appareils radiographiques généralement utilisés pour le contrôle des soudures, la haute tension est fournie par des transformateurs à très grand rapport de transformation, les générateurs sont alimentés en courant alternatif directement par le secteur.

III.6.3. Pupitre en commande:

Toutes les commandes nécessaires à la marche de l'appareil sont groupées sur un pupitre. Le pupitre comporte en général des interrupteurs de commande à distance pour la basse et la haute tension et des équipements de mesure de tensions et de courants.

III.6.4. Circuits d'alimentation:

La tension à la sortie du transformateur est alternative et doit donc être redressée. Alors ces circuits comportent les éléments nécessaires pour le redressement.

III.7. Les films radiographiques et leurs traitements.

Les techniques du contrôle radiographiques sont faites essentiellement par deux éléments : les sources de radiations et les films radiographiques. En mettant la pièce à contrôler à l'exposition du rayonnement qui traverse le matériau, ensuite le résultat du contrôle est affiché sur un film radiographique. Ces films radiographiques permettent l'enregistrement de l'image du matériau contrôlé, alors il est nécessaire d'apporter en plus grand soin le choix de tous les matériels et produits mis en jeu pour les traitements consécutifs des films dont dépend la formation de l'image permanente finale.

III.7.1 Les films radiographiques:

Les films utilisés pour la radiographie aux rayons X et gamma sont constitués par un émulsion de sels halogènes d'argent dans de la gélatine. Cette émulsion est coulée sur les deux faces d'un support flexible et transparent de telle façon à obtenir un milieu sensible aux rayonnements.

Lorsqu'on expose l'émulsion à l'action des rayons X ou gamma, il se produit une modification invisible dans sa structure physique. En traitant ensuite le film dans une solution chimique, connue sous le nom de « révélateur », les grains d'halogénures d'argent se transforment par le rayonnement en petites particules d'argent métallique amorphe et noir. C'est cet argent en suspension dans la gélatine sur les deux faces du support qui constitue l'image.

Les films radiographiques sont classés en films rapides et lents ceci est par rapport à la grosseur des grains d'argent, un film à gros grains est un film rapide or un film à petits grains est un film lent.

Le film doit être manipulé dans son enveloppe jusqu'au moment où il est nécessaire de l'en sortir, par exemple pour le placer entre les écrans renforceurs.

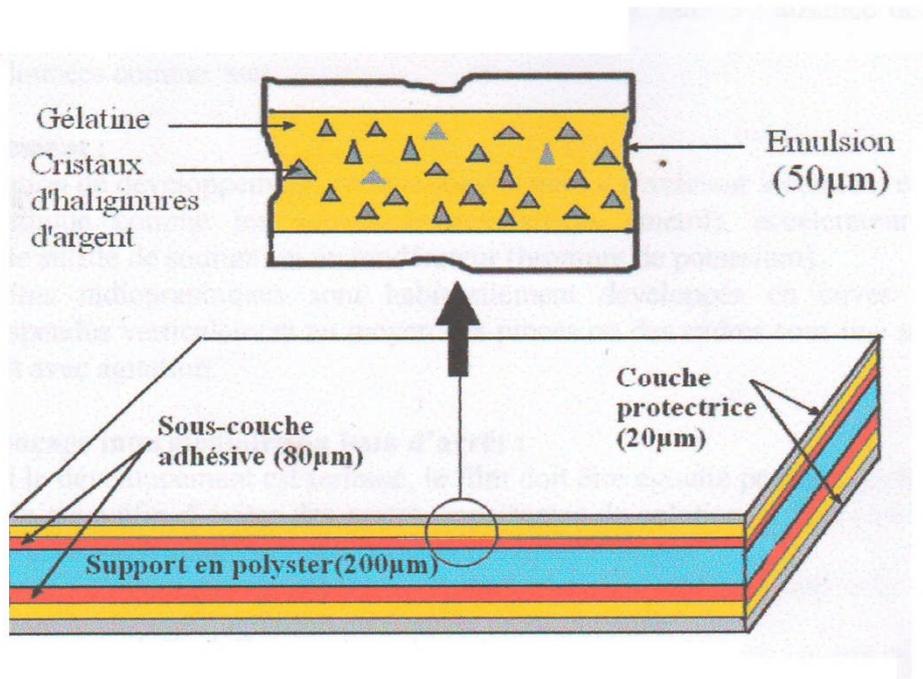


Figure III.2 : Structure de film radiographique.

III.7.1.1. Les écrans renforceurs:

En pratique, les films radiographiques sont exposés au rayonnement soit avec, soit sans écrans renforceurs, tout dépend de l'énergie rayonnante.

On utilise généralement des écrans métalliques qui constituent une mince feuille de métal, souvent de plomb, mais à haute énergie, il est souhaitable d'utiliser d'autres matériaux tels que le nickel, le cobalt ou le tungstène.

La feuille métallique est en contact direct avec le film, elle permet l'émission des électrons de son métal frappant les grains d'argent pour engendrer le noircissement du film et aussi le filtrage des rayonnements de faible énergie et ne laisse passer que les rayons efficaces.

III.7.1.2. Densité de film :

Le noircissement de l'image produite sur le film est appelé « densité photographique », il est relié au rayonnement transmis par la formule :

$$D = \log_{10} (L_0/L_x)$$

(III.2)

Avec:

L_o : est l'intensité de la lumière incidente

L_x : est l'intensité de la lumière transmise

Cette densité est déterminée par un densitomètre ainsi, un film ayant une densité de 1 transmet 1/10 du rayonnement incident.

III.7.2. Traitement des films radiographiques :

Après faire exposer le film aux rayonnements, l'image finale ne soit pas à l'interprétation qu'après le traitement chimique du film; ce traitement doit se faire à l'absence de la lumière blanche ou dans la chambre noire. Les traitements chimiques pénètrent le fixage de l'image sur le film; ils sont réalisés par des étapes ordonnées comme suit:

a) Développement :

La solution de développement, connue sous le nom « révélateur » contient en solution des éléments chimiques comme les substances révélatrices (métol), accélérateur (une base), stabilisateur (le sulfite de sodium) et un modérateur (bromure de potassium).

Les films radiographiques sont habituellement développés en cuves suffisamment profondes, suspendus verticalement au moyen des pinces ou des cadres sous une température de 20°C, ceci soit avec agitation.

b) Bain de rinçage intermédiaire ou bain d'arrêt :

Quand le développement est terminé, le film doit être égoutté pendant quelques secondes au-dessus de la cuve afin d'éviter des pertes importantes de solution, il faut ensuite le rincer à l'eau ou d'une solution d'acide acétique pendant quelques minutes. Le rinçage diminue le transfert de révélateur dans le fixateur et bloque son effet sur les grains d'argent, pendant le rinçage l'agitation du film est recommandée.

c) Bain de fixage :

Après le rinçage, les cristaux d'halogénure d'argent non réduits qui restent dans l'émulsion doivent être éliminés, sinon, dès l'exposition à la lumière, ils noirciraient et modifieraient la qualité d'image.

Le fixage s'obtient en immergeant le film dans une solution de thiosulfate pour éliminer les halogénures résiduels sans modifier l'image argentique du film.

d) Le lavage :

Après dissolution des sels d'argent non développés, le film est encore saturé de produits chimiques du bain fixateur, si ces produits n'étaient pas enlevés, ils se décomposent lentement, attaqueraient l'image et amènent sa détérioration. Pour éviter ces phénomènes, ces produits doivent être éliminés par un lavage complet. Le lavage est effectué dans un bain d'eau pendant 10 à 30 minutes à une température bien déterminée.

e) Le séchage:

Le séchage nécessite autant de soin de toutes les autres phases du traitement, il doit être uniforme sur toute l'aire du film sous une atmosphère progressivement chauffée et maintenu soigneusement à l'abri des poussières en évitant tous déplacements du film inutiles.

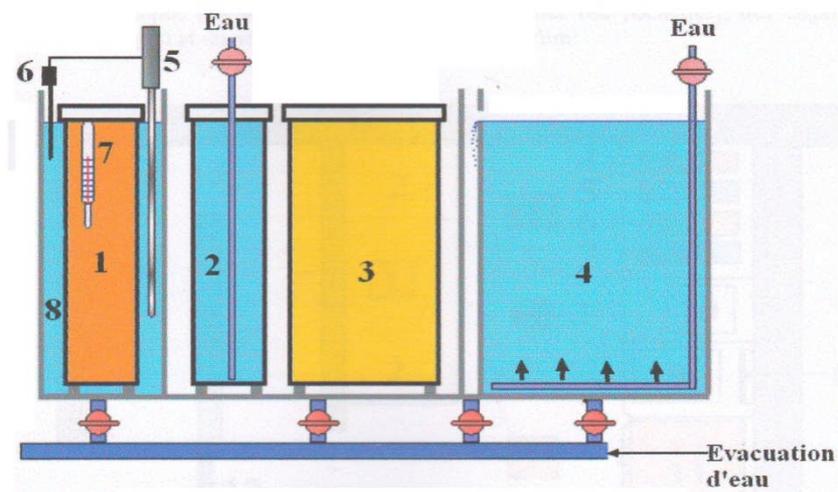


Figure III.3 : Table du traitement chimique.

Légende:

- 1 : révélateur.
- 2: rinçage ou bain d'arrêt.
- 3 : fixateur.
- 4: lavage.
- 5 : résistance chauffante.
- 6 : thermostat.
- 7 : thermomètre.
- 8 : eau (bain marie).

III.7.2.1. La chambre noire:

C'est la chambre du traitement des films qui contient tous les équipements et les outils nécessaires lors du traitement. La chambre noire est disposée de telle manière à assurer le maximum du rendement, de confort et de propreté dans le travail et :

- Elle est préférable de se trouver à proximité de l'endroit des prises de vues radiographiques.
- Elle doit être protégée des radiations pour la sécurité des opérations et la protection des films entreposés.
- Elle doit être sèche et à l'abri des vapeurs et des fumées.
- Elle doit être équipée par des appareils de chauffage et de ventilation.
- Il est souhaitable de la doter d'un accès libre de manière à la mettre à l'abri de la lumière.
- Elle comporte un éclairage spécial de type inactinique pendant la manipulation et le traitement des films jusqu'au fixage.
- Elle est équipée des accessoires comme les cassettes (ou pochettes), des dispositifs de fixation (cages) et un négatoscope pour visualiser le film.

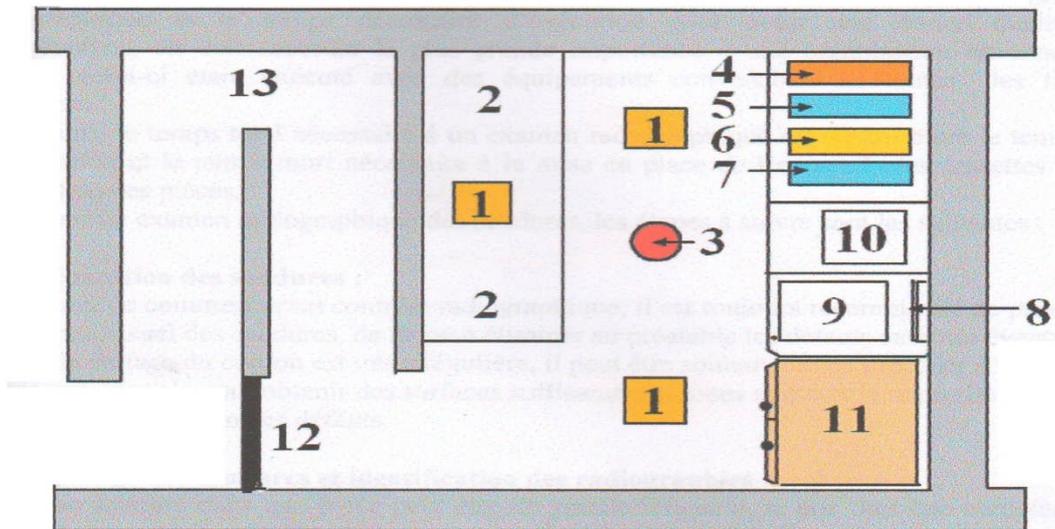


Figure III.4 : constitution d'une chambre noire.

Légende:

- | | |
|---|--|
| 1 : Eclairage inactinique. | 8 : Râtelier pour égouttage des films. |
| 2 : Paillasse sèche (avec tiroirs pour Films, écrans, cassettes et accessoires) | 9 : Sécheuse électrique. |
| 3 : Eclairage normal. | 10 : Négatoscope. |
| | 11 : Armoire d'archive. |

4 : Bain de révélateur.

12: Panneau léger amovible.

5 : Bain d'arrêt.

13 : Sortie libre.

6 : Bain de fixage.

7 : Bain de lavage.

III.8. Contrôle et mise au point des appareils :

Bien que l'industrie moderne atteint un haut degré de perfection dans la construction des appareils, il est utile que ces derniers soient soumis à quelques essais de contrôle et de mise au point pour permettre à l'opérateur de connaître initialement les caractéristiques de son matériel afin d'obtenir le maximum d'efficacité. Par ailleurs, les appareils seront soumis à des examens périodiques afin de vérifier si leurs caractéristiques ne varient pas avec le temps ou lorsque les conditions de travail sont modifiées.

Parmi les vérifications à appliquer sur un appareillage radiographique, on peut citer :

- Contrôle de l'étanchéité aux radiations des sources.
- Angle de divergence du cône de rayonnement et position du foyer d'émission.
- Contrôle des dimensions du foyer des radiations.
- Contrôle de l'homogénéité du faisceau de radiation.
- Contrôle de la haute tension pour les sources des rayons X.
- Détermination des temps d'exposition.

III.8.1. Exécution du contrôle:

De manière à obtenir un bon équilibre entre l'aspect économique du contrôle radiographique et le temps nécessaire d'exécution pour avoir une bonne qualité des radiographies, on doit accorder la plus grande importance à une organisation rationnelle du travail; celle-ci étant exécutée avec des équipements convenables de toutes les facilités possibles. Ainsi, le temps total nécessaire à un examen radiographique est réparti entre le temps réel d'exposition et le temps mort nécessaire à la mise en place de l'appareil, des cassettes et à la préparation des pièces.

Pour un examen radiographique des soudures, les étapes à suivre sont les suivantes [26].

III.8.2. Préparation des surfaces à contrôler:

Avant de commencer un contrôle radiographique, il est toujours recommandé de procéder à un examen visuel des soudures, de façon à éliminer au préalable les défauts extrêmes éventuels si la surface du cordon est très irrégulière, il peut être souhaitable de procéder à un meulage de ces

irrégularités pour obtenir des surfaces suffisamment lisses et éviter le risque de donner des difficultés de détection des défauts.

III.8.3. Repérage des soudures et identification des radiographies :

Une soudure dans une pièce peut être de grande longueur, si elle doit être complètement examinée, on divise sa longueur en parties égales ; ceci nécessite un repérage des parties examinées et leurs films correspondants. Après assurer la succession des films par un chevauchement suffisant, on fait un repérage des films en procédant à une numérotation selon la position du film et le marquage de la pièce à examiner. Le repérage du film se fait par des chiffres et des lettres de plomb aux extrémités des films vis-à-vis de l'indicateur de qualité d'image « IQI » [22].

III.8.4. Mise en place des films, écrans et cassette:

La radiographie est un enregistrement photographique des variations de l'intensité des radiations traversant la pièce à examiner ; c'est pour quoi le film doit être placé en contact avec la soudure du côté opposé de façon à couvrir la totalité de la zone irradiée intéressante. Il faut aussi prendre le soin de centrer soigneusement le film sur le cordon de soudure et quelque fois, il est utile de ne pas limiter l'examen au cordon de soudure seul, mais aussi au métal de base de la zone voisine de la soudure.

Pour assurer un contact uniforme entre le film et les écrans renforçateurs, il est préférable de les placer dans une cassette, cette dernière peut être rigide ou souple, placée près que possible de la soudure afin d'assurer une bonne définition. Il est de toute façon indispensable d'insister sur l'importance d'une fixation très stable des cassettes ; ces dernières ne doivent absolument pas se déplacer par rapport à la pièce durant tout le temps d'exposition, tout déplacement conduit à une perte de définition qui rend le film inacceptable. Une feuille de plomb d'épaisseur 02 mm appelée écran de blocage est toujours placée derrière la cassette pour protéger le film contre les rayonnements rétro diffusés.

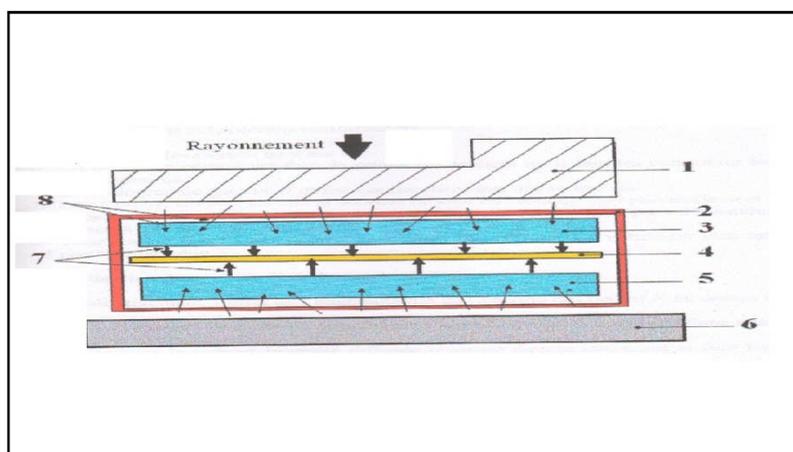


Figure III.5 : Positionnement de film, écrans et cassette.

Légende:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1 : Pièce. | 5 : Ecran renforçateur postérieur. |
| 2: Cassette | 6 : Ecran de blocage. |
| 3 : Ecran renforçateur antérieur. | 7: Rayonnements émis par l'écran (électrons et photons X ou gamma). |
| 4: Film. | 8 : Rayonnements parasites. |

III.8.5. Mise en place des équipements:

Pour un meilleur contrôle radiographique, il est nécessaire de disposer l'équipement de Contrôle dans une position qui assure le balayage maximum et le bon rendement; ceci est obtenu, en mettant la pièce à contrôler sur l'axe du faisceau de rayonnement qui est lui-même doit diriger vers le centre de la zone à examiner. En pratique, tout matériel de contrôle radiographique est équipé par des dispositifs permettant le réglage et le centrage des équipements. Ainsi, en fonction de la géométrie des pièces à contrôler et l'accessibilité des zones intéressantes pour le contrôle, le radiologue peut choisir la disposition des sources de radiation et les films radiographiques.

III.8.6. La technique radiographique:

Les variables qui influent sur la qualité des radiographies obtenues et sur lesquelles l'opérateur peut agir sont:

- La tension appliquée au tube à rayons X (et l'intensité de courant), et l'énergie des sources de rayons gamma.
- La distance foyer-film ou source-film.
- Les films et les écrans renforçateurs.

III.8.6.1. Utilisation des rayons gamma:

Il existe un certain nombre de points particuliers qu'il faut les considérer lors de l'usage des rayons gamma.

- ❖ La radiographie gamma n'utilise couramment que des sources de:
Ir-192, Cs-137, Co-60 ; les autres sources ne sont utilisées qu'exceptionnellement.
- ❖ Aucune de ces trois sources ne donne de résultats satisfaisants pour des soudures de faibles épaisseurs d'acier ou alliages légers.
- ❖ Pour les faibles épaisseurs, elle donne une qualité d'image nettement plus faible que celle d'une radiographie X.

III.8.6.2. Utilisation des rayons X de haute énergie:

Qualitativement, l'effet de l'augmentation de l'énergie des rayons X au dessus de 1 MV est:

- Augmenter l'intensité de la radiation transmise après la traversée d'une épaisseur donnée d'un matériau.
- Réduire le rapport intensité diffusée intensité directe atteignant le film pour une même épaisseur du matériau.
- Augmenter la probabilité que cette intensité diffusée soit dans une direction identique à celle de l'intensité directe.

C'est la combinaison de ces effets qui constitue l'intérêt de la radiographie à haute énergie et qui offre la possibilité de radiographier de fortes épaisseurs de matériau avec des valeurs satisfaisantes de la sensibilité de détection des défauts [25].

III.8.6.3. Interprétation des films:

Le contrôle radiographique ne s'arrête pas à l'obtention d'une image sur film ou éventuellement sur écran. Une interprétation doit encore être faite et se traduit par une estimation de l'objet observé, elle peut être très simple et consister à constater la présence ou l'absence d'un composant ou d'un corps étranger ou d'une irrégularité. L'interprétation est souvent plus complexe mais s'appuie toujours sur des critères précis laissant peu de place à l'initiative de l'inspecteur chargé de l'observation. Le travail consiste à comparer les films obtenus avec des images de référence établies pour le type de matériau examiné, la gamme d'épaisseur concernée et le rayonnement utilisé. Alors, une bonne interprétation demande une connaissance approfondie de la fabrication des pièces et les assemblages mis en œuvre [27].

III.8.6.4. Evaluation de la qualité d'image:

La détermination d'un défaut sur une radiographie est fonction de la définition et du contraste de ce défaut, qui dépendent à leur tour de la technique employée. Alors que le contraste de l'image est un facteur essentiel pour la qualité d'image, la luminance de l'interprétation est aussi importante qui est obtenue par un bon réglage du négatoscope. Dans la pratique industrielle, l'estimation de la qualité de l'image est réalisée à partir de l'observation de l'image d'un objet appelé IQI (indicateur de qualité d'image) placé sur la pièce à observer avant l'exposition. Or un « IQI » est un dispositif de caractéristiques normalisées utilisé pour déterminer la qualité conventionnelle d'une image radiographique [27].

III.9. Les types des IQI :

Les IQI utilisés pour les essais radiographiques se trouvent à des différents types fabriqués et normalisés par plusieurs sociétés de normalisation mais les plus utilisés sont:

- IQI AFNOR NF A 09205 (H3, HA et RB),
- IQI DIN 54 109 (1 IS07, 6 IS012 et 10 IS016), (Annexe A.2).
- IQI ASME SE 142.

III.9.1. Positionnement des IQI :

Quelque soit le type d'indicateur utilisé, celui-ci doit être placé sur la surface de l'échantillon directement exposée à la source de radiation et à l'extrémité de la zone examinée, ce qui constitue la position la moins avantageuse pour obtenir le chiffre de sensibilité.

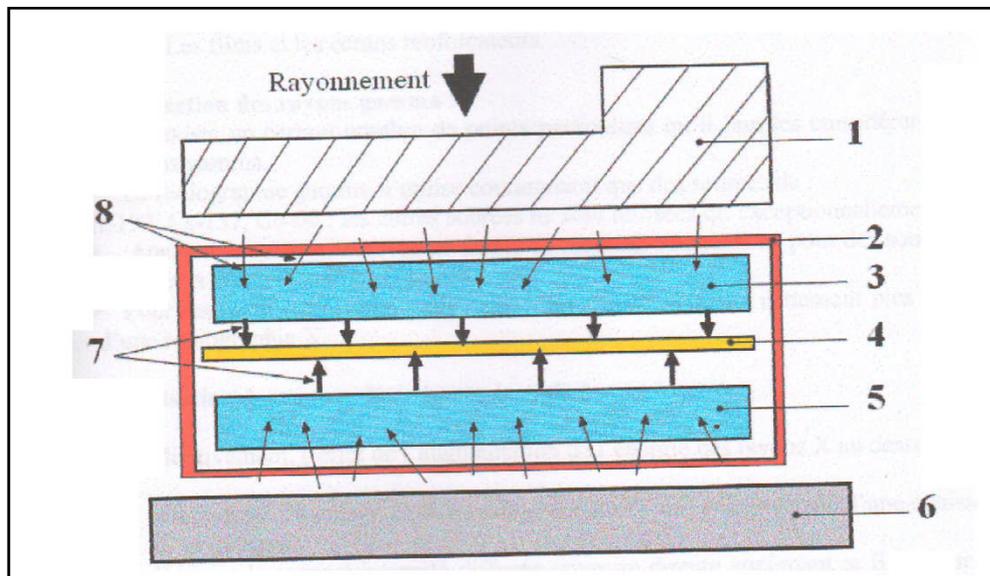


Figure III.6 : Positionnement des IQI. Annexe 2

III.9.2. Sensibilité des IQI :

La sensibilité de l'IQI indique l'aptitude de l'ensemble de la chaîne radiographique, y compris l'observateur, à détecter les plus faibles informations (dimension, forme, densité) sur le film.

La sensibilité d'un IQI est donnée par: **Annexe2**

$$S\% = 100 \frac{\text{Ø du plus petit trou visible (AFNOR)}}{\text{ou}} \frac{\text{Ø du plus petit fil visible (DIN)}}{\text{Epaisseur radiographiée}} \quad (\text{III.3})$$

Plus la sensibilité est petite, plus la qualité d'image est grande.

III.9.3. Note du film ou indice de visibilité :

La note ou l'indice de visibilité est donnée par

$$n = n_1 - n_0$$

(III.4)

Avec:

n₀: le numéro du film(DIN) ou du trou(AFNOR) de diamètre correspondant à 2 % (DIN) ou à 5% (AFNOR) de l'épaisseur à radiographier.

n₁ : Le numéro du plus petit fil ou trou visible au moment de la lecture.

- ✓ Si n'est positif ou égal à zéro, la qualité d'image est conforme.
- ✓ Si n'est négatif, la qualité d'image est insuffisante

III.9.4. Examen des films:

III.9.4.1. Recherche des défauts :

Après avoir vérifié que la qualité de la radiographie satisfait aux exigences des normes dirigeant la méthode, l'interprétation du film peut s'effectuer

Les anomalies observées sur le film peuvent indiquer la nature du défaut et son importance et quelque fois sa position

La nature du défaut est déterminée en comparant l'observation avec des films préétablis et normalisés ou si l'observateur a une expérience suffisante, il peut distinguer entre les défauts en connaissant les modes de fabrication et d'assemblage. En notant ici que chaque défaut est engendré par un procédé de fabrication ou d'assemblage bien défini, qui est lui-même ses défauts prévus.[27]

III.9.4.2. Localisation des défauts:

Après l'identification d'un défaut interne à partir de son image, il est nécessaire de déterminer sa position, soit en vue d'évaluer son importance par rapport au service commandé à la pièce, soit afin de savoir à partir de quelle face il convient d'effectuer la réparation, ceci pour réduire la quantité de métal à enlever.

Dans quelques cas, la localisation peut aussi être utile pour identifier la nature du défaut et dans d'autres cas, la nature du défaut lui-même peut indiquer sa position réelle dans la soudure [27].

III.10. Etablissement du rapport:

Quand les défauts sont identifiés à partir des images, le rapport doit être préparé, ce dernier devra être aussi bref que possible, tout en donnant au lecteur une idée claire des résultats obtenus, sans qu'il soit nécessaire pour lui de regarder les radiographies. Un rapport d'examen doit comporter au moins les informations suivantes [27].

- Le nom de la société chargée de l'examen.
- Le matériau (nuance).
- Le traitement thermique.
- La géométrie de la soudure.
- L'épaisseur du matériau,
- Le procédé de soudage.
- La spécification de l'examen y compris les prescriptions d'acceptation.
- La technique radiographique et la classe, la sensibilité de l'IQI conformément à la norme.
- Les dispositions d'examen (source- film).
- Le système de marquage utilisé.
- Le schéma du positionnement, le type et les dimensions du foyer et l'identification de l'équipement utilisé.
- Les systèmes films, écrans et filtres.
- La tension du tube et l'intensité ou l'activité de la source utilisée.
- le temps d'exposition et la distance source film.
- La technique de traitement : manuel ou automatique.
- Le type et la position de l'indicateur de qualité d'image.
- les résultats du contrôle,
- Les écarts éventuels par rapport à la norme utilisée.
- Le nom, la certification et la signature de la (ou des) personne(s) responsable(s).
- Les dates de l'exposition et du rapport d'examen

III.10.1. Normes d'acceptation :

Après avoir identifié les défauts et procédé à leurs classements suivant leur étendue, il reste à déterminer si ces défauts sont acceptables ou non, ceci dépend de la nature des défauts et des conditions de service de la construction soudée.

En ce qui concerne l'influence des défauts sur le comportement d'un assemblage soudé en service, il est presque impossible (sinon dangereux) de donner des idées fixes; car ce comportement dépend largement des conditions de contrainte, de la qualité de la soudure et du métal de base. Pour ceci le radiologue doit suivre une norme soit pour une qualification du procédé soit pour une qualification du

soudeur, cette nonne est exigée par le client ou choisi par l'entreprise du contrôle afin d'évaluer les défauts qui doivent inclure dans le rapport. Quelque soit la nonne utilisée, elle est destinée à différencier entre les défauts par leur nature et donner des dimensions limites d'acceptation.

III.11. Protection contre les rayonnements X et gamma:

Comme des troubles physiologiques peuvent résulter d'une exposition du corps humain aux rayons X ou gamma, la mise en place d'un dispositif de protection convenable contre les radiations est essentielle. Le but principal de tout dispositif de ce genre est d'absorber suffisamment la fois les radiations directes et les radiations diffusées pour n'engendrer aucun risque ni danger pour les personnes qui manipulent des sources d'émission ou qui se trouvent dans leur voisinage. En raison des difficultés pratiques que présente l'élimination totale de tout rayonnement et surtout du fait qu'on ne peut ni le sentir ni le voir, on admet qu'une quantité maximale de rayonnement (exposition) puisse être reçue pendant une certaine période. Les personnes professionnellement exposées ne peuvent recevoir une exposition excédant 5 rems pour l'année, ce qui équivaut à 0.1 rem pour une semaine, cette valeur sert de base pour les calculs de protection nécessaires. Pour les rayons X, la protection contre le rayonnement est dans la plus part des cas plus simple que contre le rayonnement gamma.

Les appareils a rayons X peuvent être laissés au repos à volonté et par conséquent des mesures de sécurité particulières ne sont pas nécessaires durant le transport. Pour les rayons gamma, le débit d'exposition dépend entièrement du type de la source radioactive utilisée et de son activité [curie]. L'intensité de la radiation varie de façon inversement proportionnelle au carré de la distance a la source, il en résulte que l'une des mesures simples est très efficaces de protection consiste à rester a une distance suffisante de la source d'ou la nécessité de déterminer des zones de balisage. Il y a lieu d'indiquer que la plus part des pays ont établi des règlements particuliers concernant le transport des isotopes radioactifs dans lesquels les doses maximales de rayonnements admissible sont précises. Il existe aussi des législations et règlements nationaux pour l'usage des équipements des rayons X et des rayons gamma destines a la radiographie.[29]

III.12. Conclusion:

Le principe du contrôlé radiographique est relativement simple, mais la difficulté se trouve au niveau de l'interprétation des films ce qui nécessite des connaissances et une expérience élevée ainsi la mise au point des appareils et les règles de sécurité à cause des risques des radiations sur l'être humain.

Ainsi le contrôlé par radiographie possède plusieurs techniques d'exposition dans le domaine des assemblages soudés (par contact, elliptique, panoramique ...) or le choix d'une technique convenable avec la géométrie de l'assemblage influe considérablement sur la qualité des résultats du contrôlé.

Le contrôlé par les sources à rayons X a l'avantage par rapport aux sources à rayons gamma par sa rapidité et les possibilités de commande afin d'une définition optimale mais leurs poids lourds et la nécessité d'une alimentation par une haute tension favorisent l'utilisation des sources à rayons gamma.

Chapitre IV
Etude expérimentale

IV.1. Contrôle par radiographie :

IV.2. Description de la technique utilisée :

Le contrôle radiographique de l'éprouvette soudée est réalisé sous une exposition d'une source radioactive à rayons gamma, l'exposition s'effectue par la technique de la source au contact extérieur à double paroi.

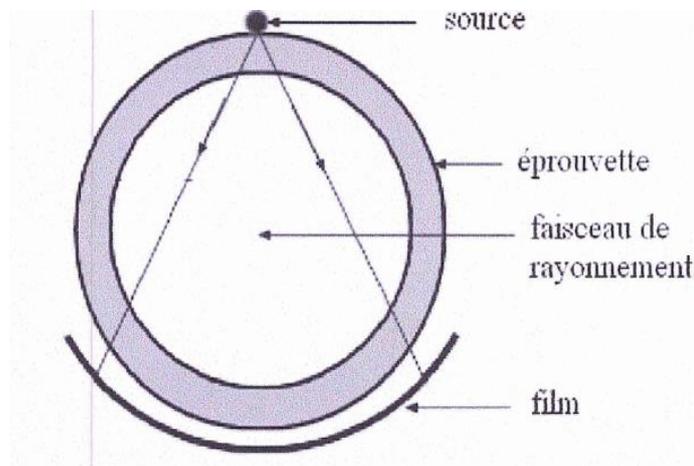


Figure IV.1 : Exposition par contact à double paroi.

- La source radioactive possède les caractéristiques suivantes :
 - ❖ Source à radiographie de rayonnement gamma
 - ❖ Élément radioactif : Ir192
 - ❖ Taille de l'élément actif : diamètre 2.0 mm 2.64 mm
 - ❖ Activité initial : 52.51 curies le 08/03/2016

IV.3. Préparation de l'éprouvette pour le contrôle :

Avant d'exécuter l'exposition radiographique, l'éprouvette doit être préparée et prés pour le contrôle. Pour assurer la bonne démarche du contrôle, on a réalisé les étapes suivantes avant l'exposition :

➤ Préparation de l'état de surface :

Les zones à contrôler doivent être exemptes des irrégularités qui peuvent gêner la disposition des films ou être visibles leurs de l'interprétation.

Les irrégularités trouvées sur l'éprouvette ont éliminées par une brosse métallique avec nettoyage.

➤ Repérage et dimensionnement de la soudure :

Premièrement, il faut choisir le point zéro comme origine du quel, on trace le sens de lecture qui nous oriente pour placer la bande chiffrée.

Cette bande est flexible dimensionnée par des chiffres en plomb, à unité de mesure de centimètre entourée sur l'éprouvette à côte de la soudure.

➤ **Détermination du nombre de films :**

Comme les dimensions d'un film radiographique sont limitées par rapport aux dimensions des soudures à contrôler, l'utilisation de plusieurs films est nécessaire.

Le nombre des films à utiliser pour l'exposition est déterminé en générale selon des règles prennent en considération la géométrie de l'éprouvette à examiner, ses dimensions et la technique de contrôle employée, mais en utilisant un collimateur qui est un limiteur de faisceau de rayonnement avec l'exposition au contact, le nombre de films dépend fortement par son angle qui dirige le faisceau.

Avec:

A : Demi-angle du collimateur.

B : Angle de la zone exposée.

L : longueur interprétable.

d : diamètre intérieur.

D : diamètre extérieur.

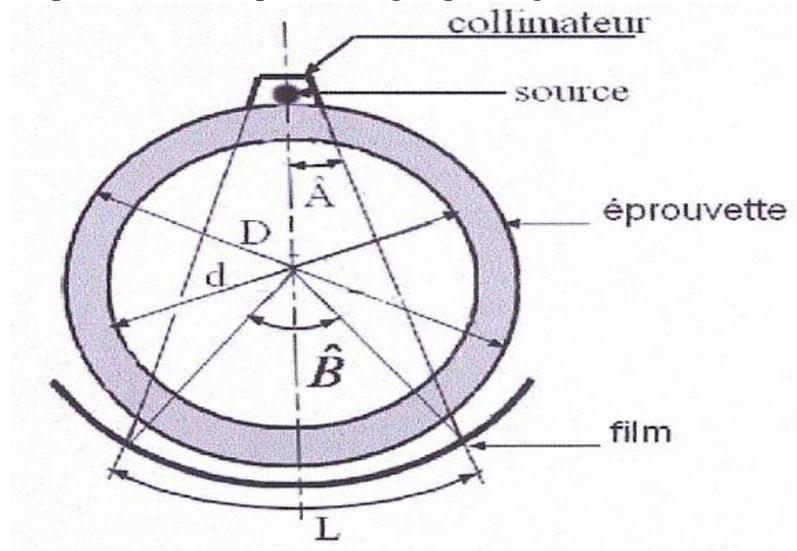


Figure IV.2 : Exposition en contact avec collimateur.

Pour l'exposition de l'éprouvette:

$$\hat{A} = 35^\circ$$

$$D=220 \text{ mm}$$

$$d=205\text{mm}$$

$$B=4 \hat{A} \implies B=140^\circ$$

$$\text{Nombre de vue} = \frac{360^\circ}{B}$$

$$\text{Nombre de vue} = 2.57$$

Le nombre de vues détermine le nombre d'exposition alors que le nombre trouvé (2.57) indique qu'on doit faire trois expositions disposées uniformément sur l'éprouvette.

➤ **La longueur interprétable:**

Elle détermine la longueur de la zone claire sur le film qui est facile pour l'interprétation, elle est déterminée par la relation.

➤ **Détermination de la longueur de la zone claire :**

$$L = \pi \frac{D}{2} \frac{B}{180^\circ} \quad (\text{IV.1})$$

$$L = \pi \frac{220}{2} \frac{140^\circ}{180^\circ} \implies L = 268.8 \text{ mm}$$

Les films utilisés sont de type D4 selon AGFA Gevaert, de dimension (40x10) cm avec écrans renforçateurs en plomb. En connaissant la longueur interprétable et la longueur du film (400mm), on peut déterminer le nombre de films nécessaire pour l'exposition, qui est dans ce cas trois films.

Avec trois expositions de longueur interprétable $L = 268.8$ mm sur trois films de longueur 400 mm, il nous reste une longueur de plus sur chaque film qui sera utilisée pour assurer le chevauchement entre les films.

Elle est égale à : $1 = 400 - 268.8$

$1 = 131.2$ mm de chaque film.

➤ **Choix de l'IQI :**

L'indicateur de qualité d'image utilisé pendant l'exposition est de type DIN 62 - 10 ISO 16 qui est utilisable quand l'épaisseur à radiographier est entre 5 et 20 mm. (Annexe A.2)

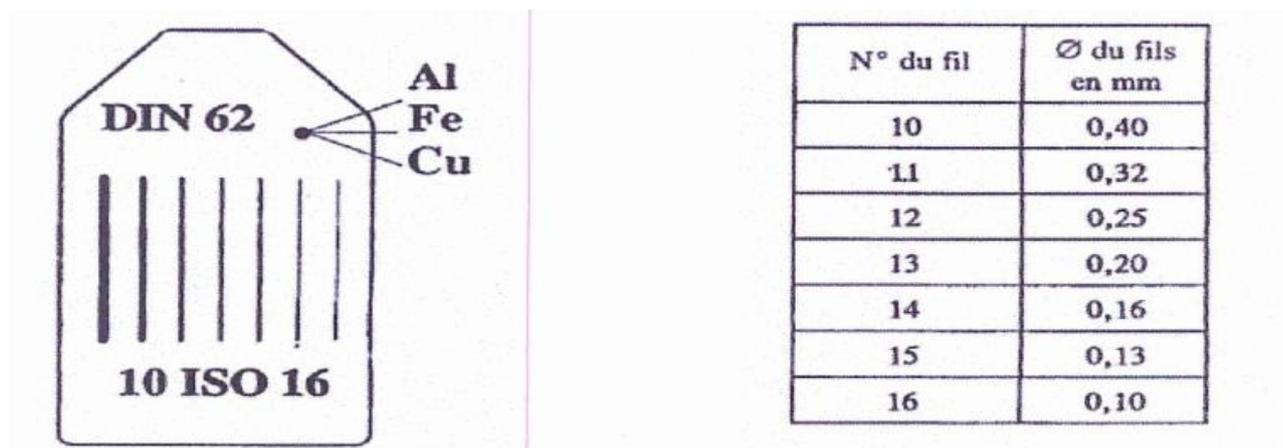


Figure IV.3 : L'IQI DIN62-10 ISO 16.

➤ **Préparation et mise en place de la cassette:**

Le conteneur souple des films doit être préparé en plaçant dedans l'IQI choisi, les chiffres en plomb définissent les films et la soudure et un film de façon à ne changer que le film exposé par le suivant et ainsi de suite.

Cette cassette doit être bien fixée sur l'éprouvette pendant l'exposition.

➤ **Réglage des paramètres avant le contrôle:**

Pour assurer une exposition optimale des films, il faut déterminer quelques paramètres avant d'exécuter l'exposition desquels on peut citer.

➤ **Détermination de l'activité de la source Ir 192 :**

Comme on a déjà cité, une source radioactive gamma possède une activité qui diminue avec le temps par une constante caractéristique qui est la demi-vie.

La source de l'isotope **Ir 192** à une demi-vie de 74 jours et d'une activité initiale de 52.51 curies le 08/03/2006 alors on peut calculer l'activité de la source du jour de l'examen (le 21/05/2016) par trois méthodes :

Méthode 1 : calcul numérique.

L'activité de la source donnée par :

$$A = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T}}} \quad (\text{IV.2})$$

Méthode 2 : calcul en connaissant le coefficient de décroissance Cd.

Le coefficient est donné par un tableau (A.3.3) qui caractérise chaque source :

Alors l'activité soit:

$$A = A_0 Cd \quad (\text{IV.3})$$

Méthode 3 : calcul en connaissant le coefficient d'affaiblissement Ca Le coefficient Ca est donné par un abaque (A.3.2) caractéristique de l'isotope:

L'activité est donnée par:

$$A = A_0 \frac{Cd}{100} \quad (\text{IV.4})$$

Avec:

A : Activité de la source le jour de l'exposition [Curie].

A_0 : Activité de référence (lue sur l'appareil) [Curie].

t : Temps séparant la date de référence au jour de l'exposition [Jour].

T : Période du radioélément considéré. [Curie]

Cd : Coefficient de décroissance

Ca : Coefficient d'affaiblissement.

Pour la source Ir 192 utilisée:

$$A_0 = 52.51 \text{ Curies}$$

$$T = 74 \text{ Jours}$$

$$t = 39 \text{ Jours du } 8/03/2006 \text{ au } 21/05/2016$$

$$Cd = 0.708 \text{ (Annexe A.3.3).}$$

$$Ca = 69. \text{ (Annexe A.3.2).}$$

Ce qui donne :

Méthode 1 :

$$A = \frac{52.51}{\frac{39}{2^{74}}} \rightarrow A = 36.44 \text{ curies}$$

Méthode 2 :

$$A = 52.51 \times 0.708 \rightarrow A = 37.18 \text{ curies}$$

Méthode 3 :

$$A = 52.51 \times \frac{69}{100} \rightarrow A = 36.23 \text{ curies}$$

IV.4. Calcul du temps d'exposition :

Le temps d'exposition est la durée que reste un film exposé sous le rayonnement.

Pour une source de radiation gamma, le temps d'exposition est donné par:

$$t = \frac{Q D^2 K N}{A} \quad \text{(IV.5)}$$

Avec : t: temps d'exposition en heures.

Q : facteur d'exposition en Ci.h à 1mètre (donné par l'abaque A.3.1).

D : distance source-film en mètres.

K : coefficient de rapidité des films.

N : facteur correctif de densité.

A : Activité de la source en Curie.

Pour la technique utilisée :

$D = 0.22$ m (Dst).

$Q = 6.9$ Ci.h

$K = 2.68$ pour un film D4

$N = 1$ pour la densité du film $d = 2$

$A = 36.44$ Curies (de la méthode 1). x

Ceci donne :

$$t = \frac{6.9 \times 0.22^2 \times 2.68 \times 1}{3 \ 644}$$

$$t = 0.0245 \text{ h} \quad \Longrightarrow \quad t = 88.42 \text{ s}$$

Pour donner aux contrôles radiographiques un rendement et une productibilité élevés, les radiologues utilisent une règle de calcul pour déterminer le temps d'exposition.

IV.4.1. Exécution de l'exposition et règles de sécurité :

Après la préparation de l'éprouvette et réglage des paramètres nécessaires, l'exposition est réalisée par la mise en place de l'éprouvette et l'appareil contenant la source radioactive dans une chambre spéciale pour l'exposition, en donnant l'importance aux règles de sécurité qui sont :

- **La zone de balisage** : C'est la zone de travail sous rayonnement qui inclue trois zones de diamètres croissants comme suit : La zone des personnels directement affectés aux contrôles, la zone des personnels de l'entreprise et la zone des publics ; elle donne la limite de présence de chaque personne par rapport à la source dont dépend la possibilité d'emporter des radiations.
- **Le collimateur** : Il est fixé sur le joint de soudure en face du film, son rôle est de diriger le faisceau de rayonnement et de limiter sa propagation dans l'espace de travail.
- **Les murs en béton** : La chambre d'exposition est constituée par des murs en béton d'épaisseur 1 m, ceci diminue fortement l'effet des rayonnements sur les radiologues or ces derniers doivent être hors cette chambre pendant l'exposition.
- **La télécommande de l'appareil** : Ce dispositif permet la commande à distance de l'appareil, elle est constituée d'un câble de 15 m de longueur qui assure le déplacement de l'isotope du cage de l'appareil au collimateur ; et commandée par une manette rotative. L'arrêt de l'exposition doit être après 90 secondes qui est le temps d'exposition, dont on a fait trois expositions

- **Utilisation du radiomètre** : Cet appareil est utilisé pour contrôler l'étanchéité de la source et la présence des fuites de rayonnement.

IV.5. Développement des films :

Le développement des films est fait manuellement dans la chambre noire sous un éclairage inactinique sur 5 étapes.

- **Bain du révélateur** : Après le fixage des films sur une cage, on les met dans un bain de 20 litres contenant un révélateur mélangé avec l'eau à une température de 19° C pendant 5 min.
- **Bain d'arrêt** : Après 5 min de révélation, on met les films dans un bain d'eau pour arrêter l'effet du révélateur pendant 2 min avec agitation (l'égouttage des films du révélateur est souhaitable).
- **Bain de fixage** : Pour éliminer les particules d'argent non exposées et fixer l'image sur les films, on plonge les films dans le bain de fixage pendant 10 min.
- **Nettoyage** : Le nettoyage est fait par l'eau courante pour éliminer les éléments chimiques de bain de fixage sur les films.



Figure IV.4 : Développement des films

- **Séchage** : Après le nettoyage, les films sont humides, alors on les sèche par une sécheuse électrique. Ceci nous donne des films prêts à l'interprétation.



Figure IV.5 : séchage

IV.6. Estimation de la qualité d'image :

La qualité d'image radiographique est un facteur très important pour l'interprétation, elle donne la définition des films pour laquelle les irrégularités engendrées par les défauts sont visibles, pour ceci, on utilise les caractéristiques des IQI.

IV.6.1. Calcul de la sensibilité de l'IQI

Comme on a utilisé un IQI de type DIN 62 - 10 ISO 16 à 7 fils dont le quatrième fil soit visible après l'exposition, sa sensibilité soit:

$$S\% = 100 \frac{\begin{matrix} \text{\textcircled{O}} \text{ du plus petit trou visible (AFNOR)} \\ \text{ou} \\ \text{\textcircled{O}} \text{ du plus petit fil visible (DIN)} \end{matrix}}{\text{Epaisseur radiographiée}} \quad (\text{IV.6})$$

$$S\% = \frac{0.20 \times 100}{15} \quad S = 1.33 \%$$

La sensibilité est petite, ce qui indique que la qualité d'image est grande.

IV.6.2. Calcul de l'indice de visibilité :

L'indice de visibilité du film est donné par :

$$n = n_1 - n_0 \quad (\text{IV.7})$$

n_1 : correspond au numéro du plus petit fil visible sur le film, or le plus petit fil visible de l'IQI est le quatrième $\Rightarrow n_1 = 13$ (Annexe A.4.1)

n_0 : correspond au numéro du fil de diamètre de 2% de l'épaisseur à radiographier

L'épaisseur radiographier : $e = 15 \text{ mm}$ (double paroi).

2% de $e = 0.30 \text{ mm}$ qui correspond au fil de numéro 11. (A.2).

$$\Rightarrow n = 13 - 11 \quad \Rightarrow n = 2$$

Comme n est positif, on peut dire que la qualité d'image est conforme.

IV.7. Résultats du contrôle :

Les irrégularités ou les défauts qui présentent dans le joint soudé contrôlé par radiographie sont révélés visuellement à partir des films préparés, ces films sont lus sur un négatoscope qui donne la luminosité nécessaire pour différencier entre les zones saines et les zones défectueuses.

La visualisation des trois films qui représentent la longueur du joint soudé, nous permet de déceler 6 types de défauts : Inclusion de laitier, soufflures, excès de pénétration, manque de fusion, manque de pénétration et des caniveaux.

Selon la norme API 1104 de l'institut américain du pétrole (septembre 1999), les défauts de soudure à évaluer sont estimés à des types de défauts qui sont présentés sur le tableau ci-dessous :

N° de défaut	Position [cm]	Type du défaut	Apparence radiographique
1	1-5	Inclusion de laitier	Taches sombres à contour irrégulier moins claires que les soufflures
2	8-10	soufflures	Taches sombres nettement définies à contour circulaire ou arrondi
3	11-12	Excès de pénétration Figure IV.7 et IV.8	Zone claire à contour irrégulier
4	14-17	Nid de soufflures Figure IV.7 et IV.8	Zone sombre d'un rassemblement de soufflures
5	21-24	Manque de fusion Figure IV.8	Mince ligne sombre avec des bords nettement définis
6	30-33	Inclusion de laitier Figure IV.10	
7	38-41	Manque de pénétration Figure IV.11	
8	41-44	Caniveaux Figure IV.11	Ligne ou taches sombres le long du bord de la soudure
9	47-52	Manque de pénétration Figure IV.12 et Figure IV.13	
10	84-50	Caniveaux	
11	62-64	Excès de pénétration Figure IV.14	

Tableau IV.1 : Résultat du contrôle radiographique.

IV.8. Enregistrement et classification des résultats d'essai :

Préparation de l'interprétation : avant la mise en pochette des films – le niv1 doit procéder à:

- vérifier les défauts film
- vérifier les repérages film
- vérifier les densités film
- vérifier qualité d'image (N° de fil la Position IQI)



Figure IV.6 : Contrôle de films.

IV.9. Relèves des indications :

- N° de défaut
- Type défaut
- Dimension de défaut (diam – long)
- Position de défaut

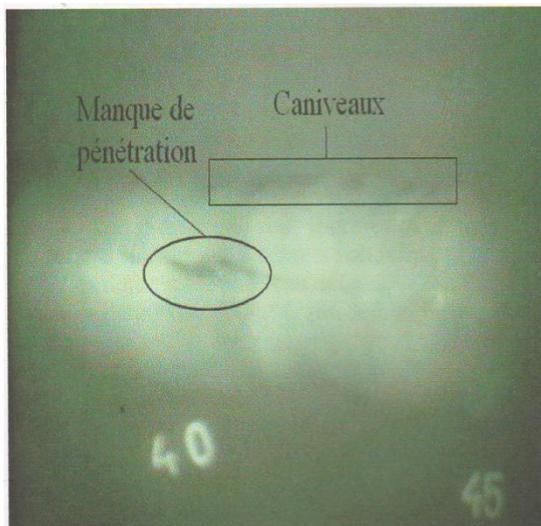


Figure IV.7

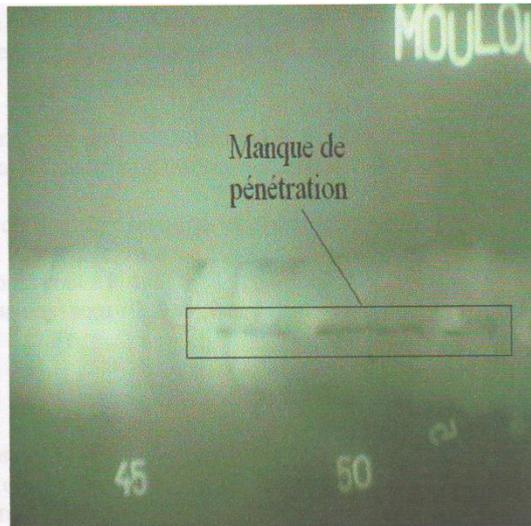


Figure IV.8

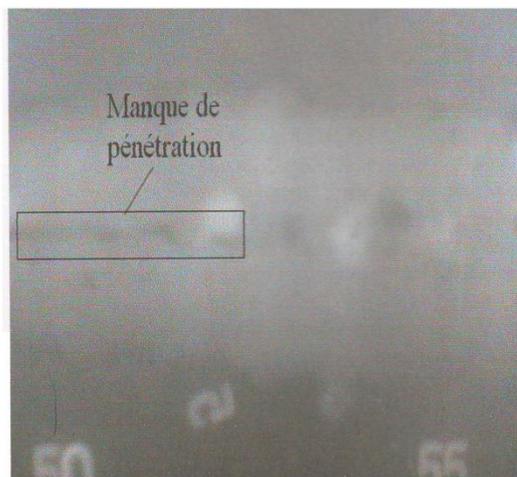


Figure IV.9

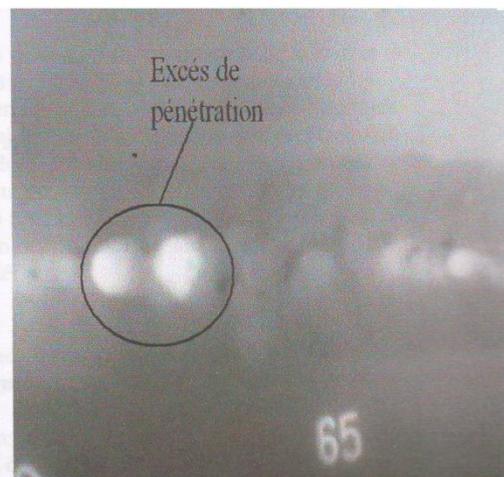


Figure IV.10

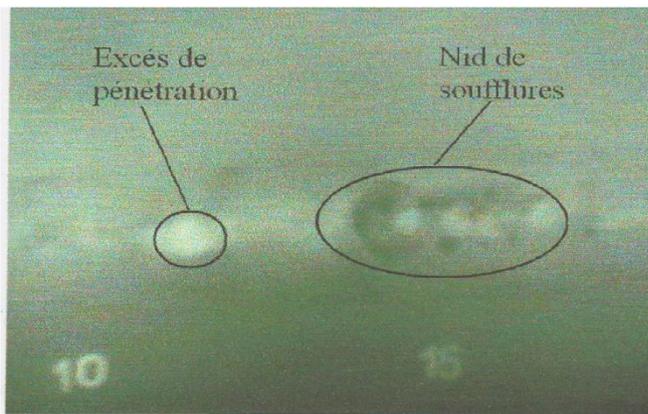


Figure IV.11

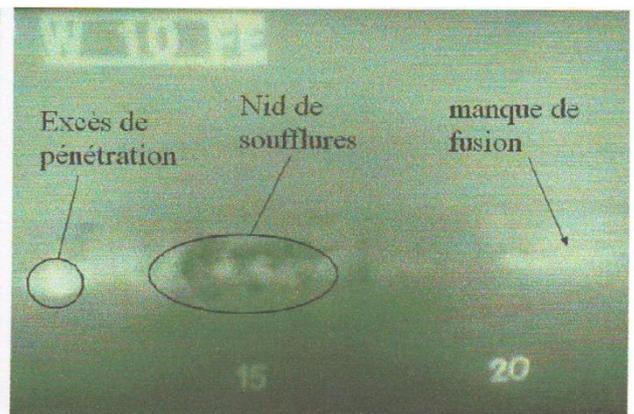


Figure IV.12

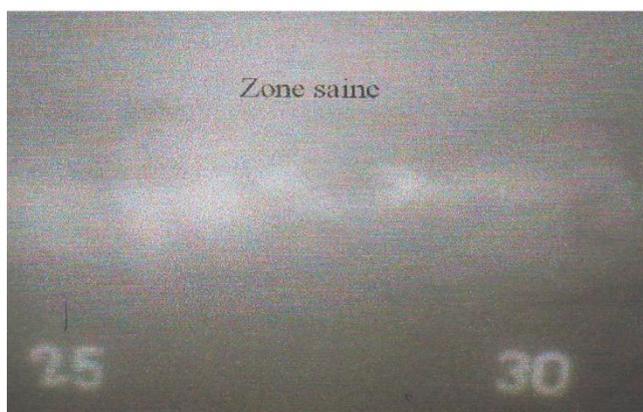


Figure IV.13

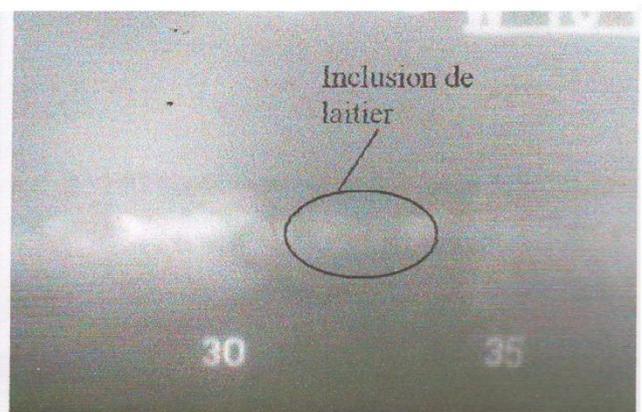


Figure IV.14

IV.10. Analyse et discussion des résultats :

Le contrôle radiographique nous permet de détecter et de localiser un nombre importants des défauts de différentes natures, or la géométrie de la différence de noircissement indique le type du défaut et sa position par rapport à la bande chiffrée, nous permet de d'extraire ses dimensions.

Les défauts présentés sur les films peuvent se diviser en deux catégories :

- les défauts de formes linéaires où on trouve les manques de pénétration, le manque de fusion et les caniveaux qui ont des longueurs de 30 à 50 mm pour les manques de pénétration, de 20 à 30 mm pour les caniveaux et 30 mm pour le manque de fusion
- Les défauts de formes volumiques où on trouve les soufflures (sur des longueurs de 20 à 30 mm), les excès de pénétration ou des gouttes (de longueurs de 10 à 20 mm) et les inclusions de laitier (sur des longueurs de 30 à 40 mm).
- Tous ces défauts peuvent engendrer un risque sur l'assemblage soudé, dont ses dimensions et son abondance qui estiment sa nocivité.

Les défauts linéaires sont toujours inacceptables quelles que soient leurs positions, alors si on classe les défauts selon leur nocivité sur le joint soudé, on doit mettre en premier degré de risque les manques de pénétration qui sont les défauts 7 et 9 (de longueurs entre 30 et 50 mm), le manque de fusion qui est le défaut 5 (de 30 mm de longueur) et les caniveaux qui sont les défauts 8 et 10 (de longueurs de 20 à 30 mm), dans un deuxième degré, on peut trouver les défauts volumiques comme les soufflures (les défauts 2 et 4) et les inclusions de laitier (défauts 1 et 6) où on remarque l'abondance des soufflures pour le défaut 4 (nid de soufflures) dans une zone importante, ainsi les défauts de forme ou les excès de pénétration (défauts 3 et 11) sont classés en troisième degré d'importance puisqu'ils n'influencent pas directement sur les caractéristiques du joint soudé.

Malgré la nécessité de réparation des défauts importants (selon la norme suivie), elle peut être simple à réaliser grâce à la définition de la position, dimensions et la nature du défaut à réparer obtenue par ce contrôle. La réparation est réalisée par meulage de la zone du défaut suivi d'un remplissage ; un autre contrôle de la zone réparée est nécessaire pour assurer l'élimination du défaut.

Le contrôle radiographique a fourni des résultats permettant une qualification réelle des joints soudés, il donne au contrôleur la possibilité de visualiser les différents défauts existés,

IV.11. Conclusion :

Sur le niveau industriel, la relation entre les contrôles non destructifs et les assemblages soudés est une relation d'échange réciproque puisque les carences évidentes des soudures qui engendrent les défauts sont détectées par les contrôles non destructifs ainsi la multiplicité des procédés de soudage et des types d'assemblage impose les personnels de contrôle à développer leurs techniques, en efficacité et en rendement.

Le soudage manuel à l'arc n'est pas conseillé pour les assemblages tubulaires surtout pour les canalisations d'importance économique puisqu'il n'assure pas une qualité suffisante et il consomme beaucoup de temps et de main d'œuvre, or ces derniers doivent être en haute qualification. Il est préférable d'utiliser le soudage semi-automatique (MIG) ou le soudage par (TIG).

Avant d'exécuter le contrôle par radiographique, on doit assurer le bon état de surface, vérifier les caractéristiques des appareils de contrôle et choisir une norme d'acceptation et d'évaluation.

Pour le contrôle radiographique par une source à rayons gamma, le choix de la meilleure technique d'exposition et de la qualité des films ainsi le calcul avec soin du temps d'exposition rendent facile l'exécution de contrôle si on respecte les règles de sécurité. On n'oublie pas l'influence d'un bon traitement chimique des films dans des conditions de température et d'éclairage respectées avec une visualisation lors de l'interprétation faite à une luminance suffisante ; ceci nous assure une révélation de maximum des défauts en haute définition.

- Le contrôle radiographique donne une meilleure définition des défauts volumiques qui sont traduits par une différence de noircissement facile à visualiser mais la révélation des défauts linéaires est difficile à cause de leurs faibles épaisseurs surtout si leur orientation n'est pas favorable aux rayonnements.
- orientation n'est pas favorable aux rayonnements. leurs causes et nous permet de qualifier le procédé de soudage ou le soudeur
- Le contrôle radiographique assure un archivage permanent des résultats de contrôle qui peut être révisé et discuté dans le temps voulu.
- Le contrôle radiographique est préférable pour le contrôle des longues canalisations grâce à sa productibilité dans un court temps or le contrôle par ultrasons est préférable pour les contrôles locaux.

NOMENCLATURE

- a : épaisseur traversée [mm]
- A : Activité de la source en [Curie].
- \hat{A} : Demi-angle du collimateur [degré]
- A₀ : Activité de référence [Curie].
- B : Angle de la zone exposée [degré].
- Curies : Unité d'activité initial
- Co⁶⁰ Cobalt 60
- Cs¹³⁷ Cesium 137
- Cs¹³⁴ Cesium 134
- Cu : cuiver
- d** : diamètre intérieur [mm].
- D : distance source-film en mètres.
- D** : diamètre extérieur [mm].
- D : Densité de film
- Ir¹⁹² Iridium 192
- K : coefficient de rapidité des films.
- L** : longueur interprétable [mm].
- L_c : La longueur calibrée[mm].
- L_o : est l'intensité de la lumière incidente
- L_x : est l'intensité de la lumière transmise
- m : mètre
- N : facteur correctif de densité.
- no: le numéro du film(DIN)
- n1 : le numéro du plus petit fil
- Q : facteur d'exposition en Ci.h à 1mètre
- S% : Sensibilité des IQI

t : temps d'exposition[S]

Tm^{170} Thulium 170

K : Coefficient de rapidité des films

μ : Coefficient d'absorption

α : Coefficient d'atténuation

\emptyset :diamètre de fil

Introduction générale :

Fabriquer, augmenter la production et immerger le marché est une stratégie économique mais ceci indique le bas niveau technologique de ce type d'entreprises ; par contre une entreprise qui met la qualité de la production dans un premier lieu sur sa stratégie, est une entreprise qui utilise ou qui développe un haut niveau de technologie. Alors la possession d'une technologie qui assure une qualité au produit est un facteur important pour la progression de l'entreprise or cette technologie est concernée par le développement des techniques et des outils qui rendent les produits plus compétitifs. Ces techniques développées seront introduites soit directement au processus de production soit aux services de maintenance, de contrôle de qualité et de sécurité. Comme la fonction maintenance est responsable pour suivre le produit et la chaîne de production dans toutes ses étapes, elle utilise dans son programme de maintenance la majorité des techniques de contrôle et d'inspection. Ainsi l'utilité de ces techniques est très remarquable pour la maintenance préventive en ce qui concerne la fiabilité du système de production, la durée de vie des équipements et la limitation des interventions de la maintenance. Pour augmenter l'efficacité de la maintenance préventive des équipements, les personnels de maintenance programment et appliquent des inspections périodiques en service ou pendant les arrêts en utilisant les différentes techniques du contrôle non destructif pour examiner l'état des biens de production. Donc, on regroupe sous le terme contrôles non destructifs, l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. En ce sens le contrôle non destructif apparaît comme un élément majeur de contrôle de la qualité des produits; ainsi le domaine des contrôles non destructifs constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent les industriels fabricants ou distributeurs spécialisés, des organismes d'étude et de formation, des sociétés de services ainsi que des départements spécialisés d'un certain nombre de grosses entreprises industrielles fortement utilisatrices de ces techniques. A travers son objectif, le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures. Un des grands champs d'application des contrôles non destructifs qui est très répandu à l'industrie, c'est le contrôle des assemblages soudés or il est connu que l'obtention des joints soudés parfaits n'est pas évident quel que soit le procédé de soudage utilisé. Alors il reste de localiser les défauts dans le volume du joint et estimer leur nocivité sur l'assemblage soudé, après la réalisation du joint ou pendant l'utilisation ; d'où il vient l'utilité d'un contrôle non destructif. Le domaine des assemblages soudés est très vaste par ces méthodes de réalisation et par la multiplicité des pièces concernées en vue de leurs caractéristiques géométriques, métallurgiques et mécaniques. Dans ce vaste domaine, on a distingué

un type des assemblages soudés lequel les contrôles non destructifs sont très familiarisés avec lui, c'est l'assemblage de tuyauterie. L'application de la majorité des techniques de contrôle non destructif sur les assemblages soudés est possible, et chaque procédé peut donner des résultats de contrôle suffisants pour la qualification d'une structure dans son propre champ d'application (examen de surface ou de compacité). Mais deux techniques de ces contrôles (utilisées pour le contrôle du volume des joints soudés) ont une importance particulière dans ce domaine surtout pour les grandes installations, sur chantiers et pour les installations de sécurité, ce sont le contrôle par ultrasons et le contrôle par radiographie ainsi elles sont restées toujours dans le thème de recherche, de développement et d'amélioration des méthodes et des équipements. Comme l'ingénieur de mécanique est toujours appelé à connaître, comprendre et suivre les développements atteints des contrôles non destructifs, on est intéressé par les contrôles ultrasonores et radiographiques ainsi leurs applications sur les assemblages soudés. Alors on a développé l'étude théorique de ces deux techniques par un stage pratique dans le laboratoire des essais destructifs et non destructifs de l'ENGTP Réghaia au sein d'un milieu professionnel dans le but de développer nos connaissances sur ces techniques, les appliquer réellement sur un assemblage soudé industriellement très rencontré, au même temps, on fait l'étude sur leur utilité, efficacité et leurs limites de contrôle ainsi les spécifications d'application et de types de résultats de chaque méthode.

Le développement du sujet est disposé sur quatre chapitres organisés comme suit:

Chapitre I: Technologie des soudages des pipes.

Dans ce chapitre, on donne un aperçu sur les soudages des pipes, exemples de quelques procédés de soudage les plus utilisés, les techniques de réalisation des joints soudés avec une description de quelques défauts de soudure.

Chapitre II: Généralités sur les contrôles destructifs et non destructifs.

Ce chapitre donne un positionnement des contrôles destructifs et non destructifs, les types et les principes de quelques essais destructifs suivi d'une description des examens non destructifs, leurs avantages et leurs domaines d'application.

Chapitre III : Contrôle non destructif des pipes par radiographie.

Ce chapitre concerne l'étude théorique du contrôle radiographique et son application industrielle.

Chapitre IV: Etude expérimentale.

On terminera le sujet par une conclusion générale.