

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction



Département de Génie Mécanique

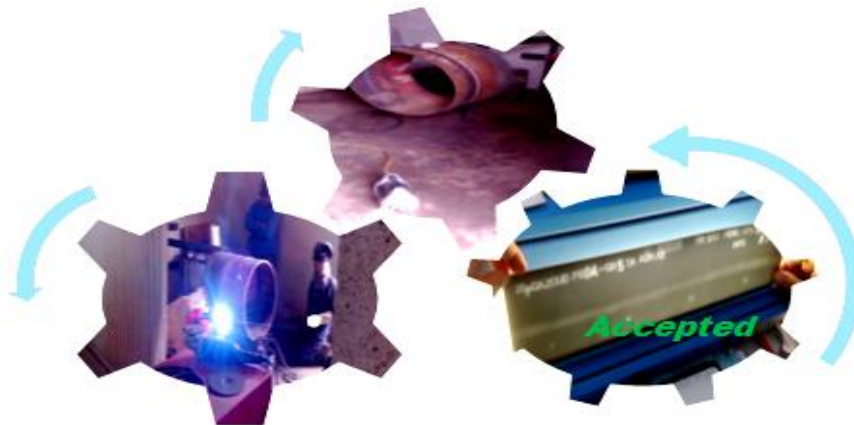
Mémoire de Fin d'Etudes

En vue d'obtention du Diplôme de Master Académique en Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Thème:

***Caractérisation des défauts de soudures métalliques par
contrôle non destructif : Gammagraphie***



Proposé et dirigé par :

Dr : FILALI. Said

Présenté par:

Mr: BELMIHOUB. Khellaf

Encadré par:

Mr: ABTOUCHE. Youcef

Promotion : 2017/2018

République Algérienne Démocratique et Populaire

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR**

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la Construction

Département de génie mécanique



MINISTÈRE DE L'ENERGIE

**Entreprise Nationale de Réalisation de
Canalisation, KANAGHAZ**

Département des Travaux complexes :

Mécano-Soudage

Servisse des Contrôles Non Destructifs



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en génie mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productive

Thème:

**Caractérisation des défauts des soudures métalliques par
contrôle non destructif : Gammagraphie**



Proposé et dirigé par :

Dr : FILLALI. Said

Présenté par:

Mr: BELMIHOUB. Khellaf

Encadré par:

Mr: ABTOUCHE. Youcef

Promotion : 2017/2018

Remerciements

Je remercie, premièrement, monsieur FILALI Said, mon promoteur et dirigeant durant la réalisation de ce présent travail pour son soutien permanent et efficace.

Je tien à remercier monsieur ABTOUCHE Youcef, mon encadreur, pour ses conseils pratiques et orientations très serviables.

Je remercie également à l'Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou (BASTOS) : Mes professeurs pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont offert au cours de mes années en formation supérieur; les fonctionnaires, de la bibliothèque centrale et ceux de la bibliothèque de notre département, le staff de sécurité, ainsi que le recteur monsieur TESSA Ahmed pour la qualité de serviabilité envers les étudiant et le savoir.

Je souhaiterais remercier l'équipe KANAGHAZ pour l'accueil qu'elle m'a réservé, le temps que chacun de ses membres m'a accordé, et plus globalement, pour toutes les informations, références bibliographiques, réflexions, corrections... que chacun m'a apporté et qui ont nourrit ce travail. Je remercie également cette entreprise de m'avoir fait découvrir et approché le monde de l'engineering et l'inspection pipeline, en m'ouvrant les portes des réseaux auxquels elle collabore.

Mes remerciement son aussi au :

- *Monsieur BELKADI Mestour et monsieur MERGHIT Nabil et toute l'équipe de travail de service inspection SONATRACH-TRC.*
- *Ingénieurs chargés de suivi des projets gazoduc en ministère de l'énergie.*
- *Ingénieurs et techniciens de l'atelier mécanique de l'ENAG.*
- *Ingénieurs et techniciens de l'unité de production des tubes pipeline, de l'entreprise ANABIBE, Z.I. Righaia.*
- *Ingénieurs de laboratoire des essais mécanique de l'entreprise GTP, Z.I. Righaia.*
- *Formateurs et administrateurs à l'école CTMC-Spa groupe BATIMETAL, B.A. Boumerdes.*

A tous ce qui ont contribué de prés ou de loin à l'accomplissement de ce travail, un grand merci.

Prenez soin de vous, de ce qui vous aimez et gardez le sourire !

B. Khellaf

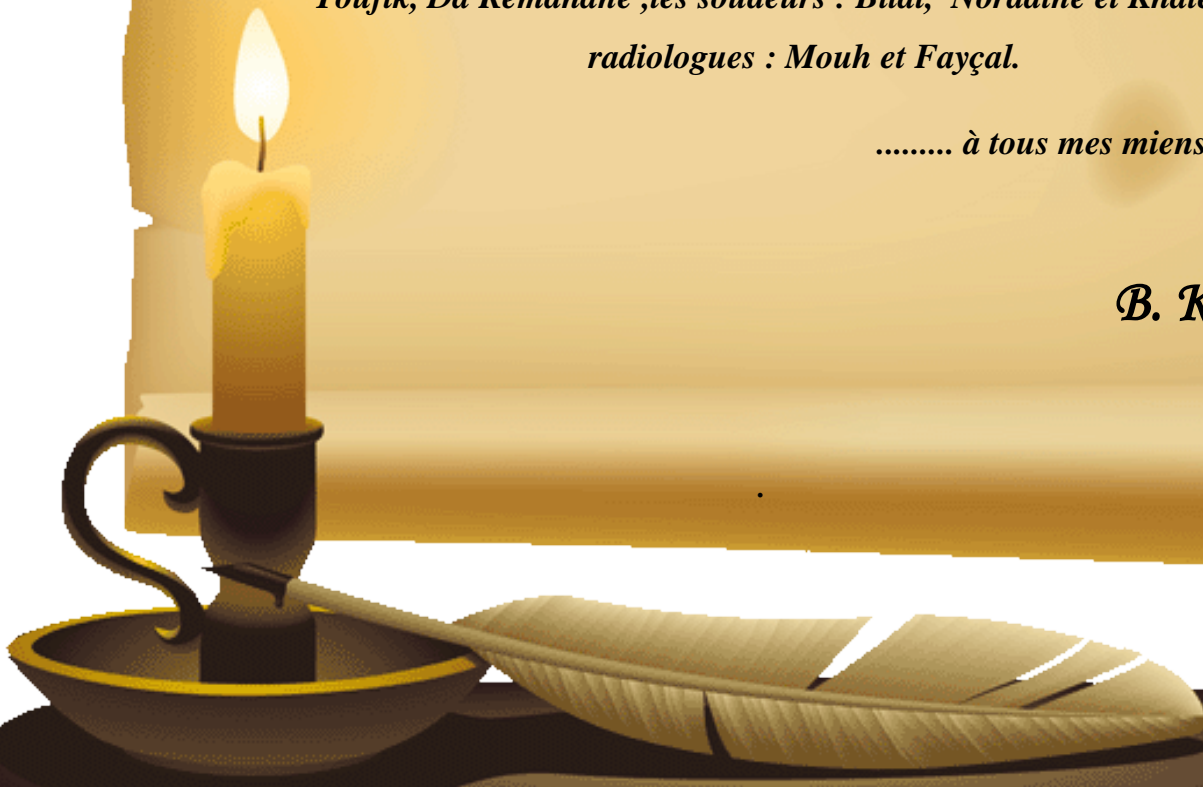
Dédicace

Il m'est agréable de saisir cette occasion pour dédier ce travail à :

- ✓ *Mon cher père et ma chère mère ;*
- ✓ *Mon frère : Da Farid ;*
- ✓ *Mes sœurs : Maître Hadjira et Maître Chahira ;*
- ✓ *La mémoire de mon frère, l'inoubliable « Chef Hachemi » et toutes âmes perdues en service national ;*
- ✓ *Mes amis(es) : Younes Leyus, Nadir, Jésus, Younes You et Sabrina ;*
 - ✓ *Tous mes collègues ;*
 - ✓ *Toute la commentée des mécaniciens ;*
 - ✓ *Tout un chacun qui ma appris un bien ;*
 - ✓ *Tout un chacun serviteur de bien et de savoir ;*
 - ✓ *Tous ceux qui mon aidé de près ou de loin ;*
- ✓ *L'équipe « GLOBOS » : Claude, Jésus, Nassim, Hakim, Said, Aissa, Faiz, Idir, Oalid, Maruane, Azeddine, Foudil, Yacine, Bilal, Sabrina et Melissa ;*
- ✓ *Ce qui mon permis l'accès au professionnalisme en engineering des pipelines : Mr ABTOUCHE Youcef, Mr MERAHI Boualem, ROUAINIA Tarek, BOUDALI Med Salim, KEMOUCHE Rachid, Ami Zouhir, IGOUNANE Med, MERGHIT Nabil, BELKADI Mestour, Ami Khaled, Ami Toufik, Da Remdhane ,les soudeurs : Bilal, Norddine et Khaled , les radiologues : Mouh et Fayçal.*

..... à tous mes miens !!!

B. Khellaf



Le sommaire :

Introduction générale.....	01
Présentation de l'entreprise :	
Historique	03
Domaines d'intervention	04
Organisation	05
Chapitre I : Métallurgie et soudabilité des métaux et leurs alliages.	
I .Introduction.....	07
I.1. Définition	07
I.2.Propriétés des métaux	07
I.2.1.Fragilité	07
I.2.2.Ductilité	08
I.2.3.Ténacité.....	08
I.2.4.Malléabilité	09
I.2.5.Élasticité.....	09
I.2.6.Dureté.....	10
I.2.7.Résistance à l'abrasion	10
I.2.8.Résistance à la corrosion.....	11
I.2.9.Magnétisme.....	11
I.2.10.Caractéristiques thermiques et électriques.....	11
A. Dilatation et contraction (ou retrait) thermique	12
B. Point de fusion	12
C. Les conductivités.....	12
II. Facteurs qui font varier la structure des matériaux.....	13
II.1. Rôle de la métallurgie du soudage.....	14
II.2. Comportement métallurgique en soudage	15
III. Métaux ferreux	16
III.1. Aciers au carbone	16
III.1.1. Caractéristiques et propriétés	17
A. Acier doux	17
B. Acier semi-dur	17
C. Acier dur	17
III.1.2. Structure et traitements des aciers.....	18
A. Trempe.....	18
B. Revenu	18
C. Recuit.....	19
D. Normalisation	19
III.1.3. Diagramme de transformation en refroidissement continu (TRC	20
III.2. Aciers alliés	21

III.3. Aciers inoxydables	21
III.4. Fontes	21
IV. Métaux non ferreux	22
V. Soudabilité des métaux	22
V.1. Etapes importantes lors de l'application de la majorité de procédé de soudage .	23
V.2. Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage.....	23
V.3. Énergie de soudage	24
V.4. Coefficient de dilatation	25
V.5. Soudabilité des aciers au carbone et aciers faiblement alliés	25
V.6. Soudabilité des aciers inoxydables	27
V.7. Soudabilité des fontes	28
V.8. Soudabilité des métaux non ferreux	28
V.9. Récapitulatif	30
VI. Conclusion	31

Chapitre II : Procédés de soudage.

I. Introduction.....	33
I.1. Définition	33
I.2. Classification des procédés de soudage	33
I.3. Les divers procédés de soudage	34
II. Soudage à l'arc et ses caractéristiques	35
II.1. Arc de soudage.....	35
II.1.1. Arc de pulvérisation.....	35
II.1.2. Arc cour	35
II.1.3. Phénomène de soufflage magnétique	35
II.1.4. Alimentation	36
II.1.5. Caractéristiques statique d'un bloc d'alimentation.....	36
A. Caractéristique horizontale (à tension constante).....	37
B. Caractéristiques dynamique.....	37
II.1.6. Réglage de l'intensité et de la tension	37
II.1.7. Soudage avec source à courant alternatif.....	37
III. procédés de soudage à l'arc électrique	38
III.1. Soudage TIG (GTAW)	38
III.1.1. Matériel.....	38
III.1.2. Amorçage de l'arc	39
III.1.3. Alimentation	39
III.1.4. Gaz de protection.....	39
III.1.5. Consommables	40
III.1.6. Méthode.....	40
III.2. Soudage plasma (PAW)	40
III.2.1. Méthode.....	40
III.2.2. Matériel.....	41
III.3. Soudage MIG/MAG (GMAW)	41
III.3.1. Matériel et méthode.....	42

III.4. Soudage à l'arc avec électrode enrobées(SMAW/MMA)	43
III.4.1. Méthode	43
III.4.2. Matériel	44
III.4.3. Les différents types d'électrode	44
III.5. Soudage à l'arc submergé (SAW)	45
III.5.1. Source d'alimentation	46
III.5.2. Matériel	46
IV. Procédés de soudage par pression	46
IV.1. Soudage par résistance	47
IV.2. Soudage par friction	48
IV.3. Soudage haut fréquence	48
V. Soudage par ultrasons	49
VI. Soudage par explosion (EXW)	50
VII. Soudage par diffusion (DBW)	50
VIII. Soudage au gaz	51
VIII.1. Matériel	52
VIII.2. Types de flammes	53
VIII.3. Quelques avantages de soudage à gaz	54
IX. Autre procédés de soudage	54
IX.1. Soudage vertical sous laitier (ESW)	54
IX.2. Soudage électrogaz (EGW)	55
IX.3. Soudage de goujons (SW)	56
IX.4. Soudage laser (LBW)	56
IX.5. Soudage par faisceau d'électrons (EBW)	57
IX.6. Soudage aluminothermique (TW)	58
X. Récapitulatif des procédés de soudage	59
XI .Conclusion	59

Chapitre III : Défauts de soudage métallique.

I. Introduction	61
I.1. Termes et définitions	61
II. Types de défauts	61
II.1. Défauts de pénétration	61
II.1.1. Manque de pénétration sans dénivellation	62
II.1.2. Manque de pénétration avec dénivellation	62
II.2. Défauts de fusion ou collage	63
II.3. Les inclusions	64
II.4. Soufflures ou inclusion de gaz	66
II.5. Soufflures dispersées	66
II.6. Nids de soufflures	66
II.7. Soufflures vermiculaires dans la première passe	67
II.8. Groupe de soufflures et soufflures alignés	67
II.9. Les fissurations	68
II.10. Retassures et criques de solidification	70

II.11. Morsures et caniveaux	70
II.12. Effondrement et trous	71
II.13. Défauts géométriques du cordon.....	72
A. Débordement de cordon.....	74
B. Les projections	74
III. Groupage des défauts de soudures	74
IV. Défauts de soudage en fonction de procédé utilisé	78
V. Qualité de soudage et contrôle qualité.....	79
VI. Conclusion	80

Chapitre IV : Contrôle non destructif des soudures.

I. Introduction	82
I.1. Termes et définitions.....	82
I.2. Rôle des contrôles non destructifs (CND)	82
I.3. L'objectif d'un contrôle non destructif	83
I.4. Principe des contrôles non destructifs.....	84
I.4.1. Le contrôle visuel	85
A. Principe du contrôle.....	85
B. Mise en œuvre du contrôle	86
I.4.2. Le ressuage	86
A. Les produits de ressuage.....	87
B. Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage	87
C. Avantages de ressuage	88
D. Inconvénients de ressuage	88
I.4.3. La magnétoscopie.....	88
A. Le principe de la magnétoscopie	88
B. Avantages de la magnétoscopie.....	89
C. Inconvénients la magnétoscopie.....	89
I.4.4. Le courant de Foucault	90
A. Avantages du contrôle par Courants de Foucault.....	91
B. Inconvénients du contrôle par Courants de Foucault	91
I.4.5. L'ultrason	91
A. Détection des défauts.....	92
B. Avantages de contrôle par l'ultrason.....	92
C. Inconvénients de contrôle par l'ultrason.....	93
I.4.6. L'émission acoustique	93
A. Principe du contrôle.....	93
B. Avantages de contrôle par L'émission acoustique	94
C. Inconvénients de contrôle par L'émission acoustique.....	94
I.4.7. La thermographie infrarouge	94
A. Le principe de contrôle.....	95
B. Avantages de contrôle par la thermographie infrarouge.....	96
B. Inconvénients de contrôle par la thermographie infrarouge.....	96
I.4.8. La radiographie.....	96

A. La propagation des rayonnements ionisants.....	96
B. Nature et propriétés principales.....	97
C. Avantages de contrôle radiographique.....	97
D. Inconvénients de contrôle radiographique.....	97
II. Normalisation des contrôles non destructifs des soudures.....	97
III. Récapitulatif des intérêts des principaux contrôles non destructifs en soudure.....	99
IV .Conclusion.....	100

Chapitre V : Caractérisation des défauts de soudure par la gammagraphie.

I .Introduction.....	102
I.1. Mots clés avec définitions.....	102
I.2. Principe du contrôle par gammagraphie.....	103
I.3. Généralités.....	104
I.3.1. Rayons électromagnétiques.....	104
I.3.2. Obtention des rayons gamma (γ).....	105
I.3.3. Lois de propagation des rayonnements ionisants.....	105
I.3.4. Nature et propriétés principales.....	106
I.3.5. Phénomène d'absorption.....	106
I.4. Annexe.....	106
I.4.1. La structure atomique.....	106
I.4.2. L'ionisation en radiographie.....	107
I.4.3. Les unités.....	108
A. Exposition.....	108
B. Débit d'exposition (vitesse d'exposition).....	108
C. Dose absorbée.....	108
D. Débit de dose.....	109
I.4.4. Les Sources gamma.....	109
A. Activité d'une source radioactive.....	109
B. Activité d'une source radioactive après un temps déterminé.....	110
C. Activité spécifique.....	110
D. Désintégration radioactive et la durée demi-vie (période).....	110
E. Constante spécifique d'une substance radioactive (facteur C).....	110
F. Spectre de rayonnement.....	112
G. Porte-source.....	112
G.1. Container de transport et de travail pour les sources gamma.....	112
I.4.5. Différentes types d'appareilles de la gammagraphie.....	113
A. Appareils pour lesquels la source radioactive reste dans le container pendant l'irradiation.....	113
A.1. La source de radiation immobile.....	113
A.2. La source de radiation mobile.....	114
B. Appareils pour lesquels la source est sortie du container pour l'irradiation.....	114
C. Collimateur.....	115
I.5. Interaction du rayonnement et de la matière.....	115

I.5.1. Diffusion Rayleigh	115
I.5.2. Effet photo-électrique.....	115
I.5.3. L'effet Compton	116
I.5.4. Formation de paire	116
II. Les étapes basiques en contrôle radiographique.....	117
II.1. La radioprotection	117
II.1.1. Matériel	117
II.2. Production de radiogramme	118
II.2.1. Matériel	118
A. Prise de clichés et technique de tire	119
A.1. Technique plan sur plan.....	119
A.2. Technique en contact	119
A.3. Technique en ellipse	120
A.4. Technique panoramique	120
II.3. Développement des clichés	121
II.3.1. Laboratoire de développement des films	121
A. Matériels	121
B. Laboratoire mobile de développement des films	122
C. Méthode	122
II.4. Détermination de la qualité d'image de radiogramme	123
A. Matériel	124
II.5. Interprétation des indications	124
A. Matériels	124
II.6. Evaluation de contrôle et de ces résultats	124
II.7. Enregistrement et communication des résultats	125
III. Partie pratique	126
III.1. Protocole de qualification d'un procédé de soudage conformément à l'API 1104	126
III.1.1. L'éprouvette de ligne	127
III.1.2. L'éprouvette de réparation	127
III.1.3. Emplacement des prélèvements des barreaux	127
III.1.4. Machines de manipulation	128
III.2. Préparation des éprouvettes	128
III.2.1. Débitage des échantillons	128
III.2.2. Préparation des cordons de soudure.....	128
III.3. L'éprouvette de ligne	130
III.3.1. Soudage	130
III.3.2. Nettoyage par brossage et repérage de cordon de soudure.....	131
III.3.3. Contrôles.....	131
A. Le contrôle visuel	131
B. Le contrôle par gammagraphie (par tire en contacte)	131
1. La manipulation	132
2. Développement des films	133
C. Contrôles destructifs	133
III.4. L'éprouvette de réparation	135

III.4.1. Le soudage	135
III.4.3. Contrôles	136
A. Contrôle visuel	136
B. Le contrôle par gammagraphie.....	136
C. Le contrôle destructif	136
IV. Résultat et discussion	137
IV.1. l'éprouvette de ligne	137
IV.2. L'éprouvette de réparation.....	140
V. Synthèses et conclusion	143
Conclusion générale	145

Introduction générale

Introduction générale

A nos jours l'un des procédés d'assemblage des matériaux le plus usité est le soudage autogène. Il prend une place très importante dans le domaine de la construction avec ses diverses branches. Cette opération consiste à établir une continuité métallique entre les parties à assembler, sachant que cette liaison est non démontable. Le cordon de soudure est parfois sujet à des défauts divers, résultant d'un mauvais choix de paramètres de soudage et du couple métal de base/ métal d'apport.

A fin de garantir une bonne qualité des soudures, une variété de méthodes de contrôle non destructif ont été développées pour bien caractériser les défauts. Parmi ces procédés on citera la gammagraphie.

Le but de ce mémoire de fin d'études est la caractérisation des défauts de soudure métalliques par gammagraphie et de se familiariser avec tout le matériel s'y afférent.

Le présent manuscrit est compartimenté en cinq chapitres, précédés d'une présentation de l'entreprise national de réalisation de canalisation KANAGHAZ, au sein de laquelle on a effectuée une formation en engineering de réalisation et inspection des canalisations pipelines, en plus un stage pratique :

Le premier est consacré exclusivement à la métallurgie de soudage des métaux et leurs alliages ;

Le deuxième présente succinctement les procédés de soudage ;

Le troisième est une description relative des défauts de soudage métallique ;

Le quatrième présente les contrôles non destructifs des soudures ;

Le dernier chapitre est orienté sur la théorie relevant sur la gammagraphie, plus une partie expérimentale sur la caractérisation des défauts de soudure métallique et du comportement mécanique (essai de traction, pliage, dureté HV) et le tout est clôturé par des interprétations des résultats et par une conclusion générale.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure 1.1: Matériau fragile (fonte) avec un défaut de soufflure.

Figure 1.2 : Déformation facile d'un alliage métallique

Figure 1.3 : Résistance aux chocs.

Figure 1.4 : feuille en plomb facile à façonner.

Figure 1.5 : Ressorts avec déformations réversible.

Figure 1.6 : Résistance à la pénétration de la pièce à percer, l'effet de dureté.

Figure 1.7 : Usure d'un disque abrasif sous l'effet de la résistance à l'abrasion.

Figure 1.8 : Chaîne en métal ferreux, en corrosion et un autre inoxydable

Figure 1.9 : Des vis sous l'effet d'un aimant.

Figure 1.10 : Propagation de chaleur.

Figure 1.11 : Bombardement par électrons ; création de l'arc électrique.

Figure 2.1: Variation de la structure de l'acier soudé

Figure 2.2 : Comportement métallurgique des aciers en soudage

Figure 3.1: Diagramme fer-cémentite.

Figure 3.2: Variation de la couleur de l'acier en fonction de la température de revenu.

Figure 3.3: Diagramme de transformation en refroidissement continu.

Figure 5.1: Différentes zones affecté thermiquement.

Chapitre II :

Figure 1.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus

Figure 3.1 : Principe de soudage TIG.

Figure 3.2 : Bouteille de gaz de protection (Argon-Co₂).

Figure 3.3 : Soudage plasma.

Figure 3.4 : Principe de soudage MIG/MAG.

Figure 3.5 : Soudage MIG/MAG.

Figure 3.6 : Principe de soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.

Figure 3.7 : l'électrode enrobée.

Figure 3.8 : Principe de soudage à l'arc submergé.

Figure 4.1 : Principe de soudage par pression.

Figure 4.2 : Soudage par résistance.

Figure 4.3 : Le soudage par friction.

Figure 4.4 : Principe de soudage haut fréquence.

Figure 5.1. : Principe de soudage ultrasons des polymères thermoplastiques.

Figure 6.1 : Principe de soudage par explosion.

Figure 8.1 : Equipement de soudage au gaz.

Figure 8.2 : Manomètres-détendeurs/régulateurs de débit.

Figure 9.1 : Principe de soudage vertical sous laitier.

Figure 9.2 : Soudage électrogaz.

Figure 9.3 : Soudage des goujons.

Figure 9.4 : Principe de soudage laser.

Figure 9.5 : Soudage par faisceau d'électrons.

Figure 9.6 : Soudage aluminothermique.

Chapitre III :

Figure 2.1 : Manque de pénétration sans dénivèlement

Figure 2.2 : Manque de pénétration due à un dénivèlement

Figure 2.3: Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint

Figure 2.4: Manque de fusion dû à un collage de point froid

Figure 2.5 : Nids de soufflure.

Figure 2.6 : Groupe de soufflures et soufflures alignés.

Figure 2.7 : Position des fissures à froid.

Figure 2.8 : Retassure à la racine (causé par une concavité interne)

Figure 2.9 : Défauts de caniveaux.

Figure 2.10 : Débordement de cordon de soudure.

Chapitre IV :

Figure 1.1 : Principe de contrôle non destructif.

Figure 1.2 : Les critères communs en contrôles non destructifs.

Figure 1.3 : Equipements de contrôle visuel.

Figure 1.4: Les produits de ressuage.

Figure 1.5 : Les phases successives du ressuage.

Figure 1.6 : Principe de la magnétoscopie.

Figure 1.7 : Principe de contrôle par le courant de Foucault.

Figure 1.8 : Principe de contrôle par ultrasons.

Figure 1.9 : Principe de contrôle par émission acoustique.

Figure 1.10: Principe de contrôle par thermographie infrarouge.

Figure 1.11 : Principe de radiographie.

Chapitre V :

Figure 1.1: Principe de contrôle par gammagraphie.

Figure 1.2: Le spectre électromagnétique.

Figure 1.3: Container de transport et celui de travail pour source IR-192.

Figure 1.4: Véhicule de transport de sources radioactives.

Figure 1.5 : Source de radiation ne bouge pas.

Figure 1.6 : Source de radiation bouge.

Figure 1.7 : Schémas de source qui sort du container pour l'irradiation.

Figure 1.8 : Différents types de collimateurs.

Figure 1.9 : Principe de l'effet photo-électrique.

Figure 1.10 : Principe de l'effet Compton.

Figure 1.11 : Principe de formation de paire

Figure 2.1 : Structure d'une cassette.

Figure 2.2: Structure d'un film radiographique.

Figure 2.3 : Principe de tire plan sur plan.

Figure 2.4: Principe de tire en contact.

Figure 2.5: Principe de projection elliptique.

Figure 2.6: Principe de tire panoramique.

Figure 2.7: Camion-laboratoire de développement des films.

Figure 2.8: Bac de développement manuel des films

Figure 2.9: Négatoscope pour interprétation des films.

Figure 3.1: Endroits de prélèvement des barreaux exigés par la norme API 1104

Figure 3.2 : Débitage des échantillons avec la chanfreineuse manuel à oxycoupage.

Figure 3.3: Finition des chanfreins et des talons par meulage manuel.

Figure 3.4: Schémas des chanfreins de 60° et des talons selon la norme API 1104 et WPS.

Figure 3.5: Poste de soudage à l'arc avec les électrodes enrobées cellulosiques utilisé dans qualification de procédé.

Figure 3.6 : Préchauffage de l'éprouvette jusqu'à 130 °C.

Figure 3.7: Soudage de l'éprouvette de ligne.

Figure 3.8: Nettoyage par brossage et repérage de cordon de soudure.

Figure 3.9: Bonne qualité visuel de cordon de soudure.

Figure 3.10: Résultat de temps de calcul avec la table programmé avec Office Excel.

Figure 3.11: Inspection par gammagraphie de l'éprouvette de ligne.

Figure 3.12: Bac de développement des films

Figure 3.13: Séchage des films en support à cadres de développement.

Figure 3.14: Barreaux pour test de traction.

Figure 3.15: Barreaux pour test de pliage.

Figure 3.16: Barreaux pour test de texture.

Figure 3.17: Préparation de l'éprouvette de réparation.

Figure 3.18: Défaut de dénivèlement tolérable et réparation.

Figure 3.19: Inspection par gammagraphie de l'éprouvette de réparation.

Figure 3.20: Barreaux de l'éprouvette de réparation.

Figure 4.1: Cliché de côté BB, paramètre 10-40.

Figure 4.2: Cliché de côté BB, paramètre 30-60.

Figure 4.3: Cliché de côté BB, paramètre 60-90.

Figure 4.4: Cliché de côté BN, paramètre 100-130.

Figure 4.5: Cliché de côté BN, paramètre 130-160.

Figure 4.6: Cliché des côté BN, paramètre 170-200.

Figure 4.7: Résultat test de traction pour l'éprouvette de ligne (rupture hors soudure).

Figure 4.8: Courbes de traction nominale et la courbe vraie.

Figure 4.9: Résultat de test pliage de coté.

Figure 4.10 : Résultat de test de texture.

Figure 4.11: Cliché sain de coté BB, paramètre 90-110.

Figure 4.12: Cliché sain de paramètre 200-00.

Figure 4.13: Résultat test de traction de l'éprouvette de réparation.

Figure 4.13: Résultat test de traction de l'éprouvette de réparation.

Figure 4.15: Résultat de test de pliage de coté de l'éprouvette de réparation.

Figure 4.16: Courbe Force-Déplacement pour test de pliage à cinq pas.

Figure4.17 : Positionnement des indentations en essais de dureté selon la norme API.

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau 5.1: Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier.

Tableau 5.2: Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables

Tableau 5.3: les principaux facteurs influant sur la soudabilité des métaux non ferreux

Chapitre II :

Tableau 3.1: Gaz de protection selon les matériaux des pièces à soudé.

Tableau 10.1 : Récapitulatif des procédés de soudage

Chapitre III :

Tableau 2.1 : Les causes des fissures et les moyens des préventions.

Tableau 2.2 : Critères d'acceptation pour le contrôle visuel des morsures

Tableau 2.3 : Les causes de défauts d'un cordon de soudure et les moyens de les prévenir.

Tableau 3.1: Symboles et numérotation utilisés pour les fissures.

Tableau 3.2: Symboles et numérotation utilisés pour les cavités

Tableau 3.3 : Symboles et numérotation utilisés pour les inclusions solide.

Tableau 3.4 : Symboles et numérotation utilisés pour manque de fusion et de pénétration.

Tableau 3.5 : Symboles et numérotation utilisés pour les défauts de forme.

Tableau 3.6 : Symboles et numérotation utilisés pour les défauts de film

Tableau 4.1 : les défauts les plus fréquemment rencontrés en fonctions du procédé utilisé.

Chapitre IV :

Tableau 1.1 : Principes des contrôles non destructifs.

Tableau 2.1 : Les normes européennes en CND des soudures.

Tableau 3.1 : Avantages et limites des contrôles non destructifs des soudures.

Chapitre V :

Tableau 1.1: Durée de demi-vie de quelques isotopes radioactifs.

Tableau 1.2 : Constante spécifique de quelques isotopes radioactifs

Tableau 1.3 : Energie moyenne de quelques isotopes.

Tableau 3.1 : Composition chimique de l'acier grade API X70

Tableau 3.2: Exigence de la composition chimique pour analyses nuance X70 selon norme API

Tableau 3.3: Paramètre de soudage éprouvette de ligne

Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques de l'acier grade API X 70

Tableau 3.5 : Paramètre de soudage éprouvette de réparation

Tableau 4.1: Résultat de test de traction

Tableau 4.2 : Résultats de test dureté Vickers (dureté en Kg/mm^2)

Présentation de l'entreprise

Historique : [01]

En 1970, une société mixte Algéro-Espagnole, dénommée << SERIG>> (Société d'Etudes et de Réalisation des Industrie du Gaz), est créée entre SONELGAZ (51%) et le bureau d'études Espagnole HEYMO (49 % des actions).

En 1976, et après achat des parts de HEYMO, est intégrée SONALGAZ, comme unité chargée de la réalisation de l'ensemble des infrastructures de transports et de distribution de gaz.

Suit à la restructuration des entreprises publiques, cette unité fut érigée en 1983 en Entreprise Nationale de Réalisation de Canalisation, par abréviation << KANAGHAZ >>.

Le mois de janvier 2006, KANAGHAZ a été rattachée à SONELGAZ en tant que filiale de travaux de gaz. Elle acquiert dès lors, le statut de société filiale de SONELGAZ.

Enfin, dans le cadre du passage à l'autonomie, elle fut transformée en entreprise publique économique Société Par Actions (spa).

Adresse :

Société de Réalisation de Canalisation-KANAGHAZ-SPA ;
Route Nationale N°24 BP 115-BOUMERDAS/ALGERIE.

Domaines d'intervention :

Construction pipelines : [01]

- Réalisation de canalisations de transport du gaz et autres fluides.
- Réalisation de canalisations de transport d'eau potable et industrielle.
- Préfabrication et nettoyage de tuyauteries et d'équipements électromécaniques.
- Tous travaux de soudage de canalisations en toutes positions avec différents procédés de soudage :
 - manuel avec électrodes enrobée.
 - semi-automatique sous flux solides ou gazeux.
 - automatique sous flux solides.
- Contrôles destructifs et non destructifs des soudures.
- Forage horizontal pour traversées de routes, voies ferrées etc.
- Essais hydrostatiques et séchage des canalisations.
- Installation de système de protection cathodique des canalisations.
- Pose de câble de télécommunication.
- Formation et perfectionnement des soudeurs.
- Réhabilitation des canalisations de transport de fluides.

Réseaux de distribution.

Montage industriel.

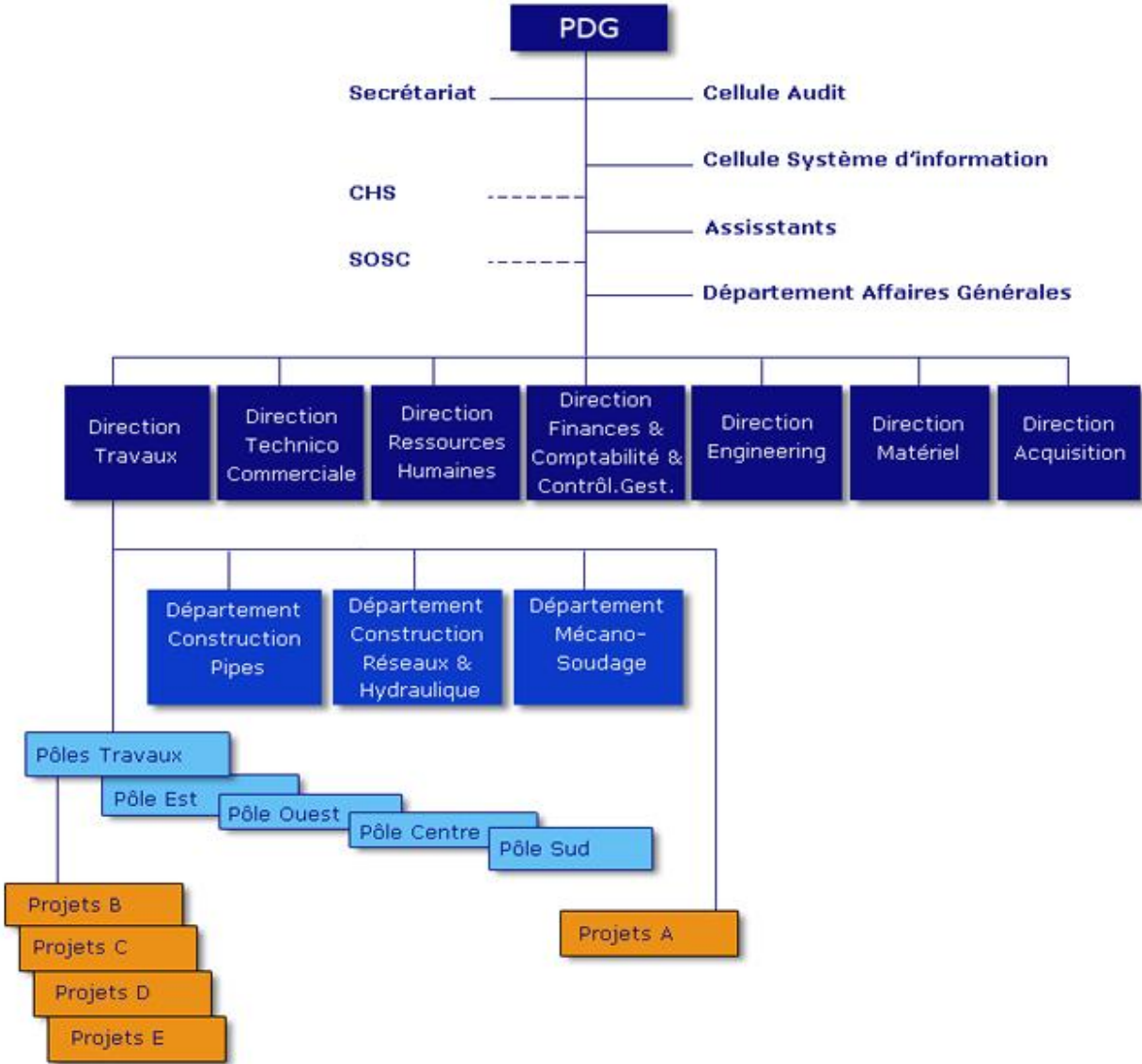
Engineering.

La formation :

KANAGHAZ, vu son expertise dans son domaine, et aussi une école de formation.

Organisation :

Organigramme de l'entreprise, KANAGHAZ : [01]



CHAPITRE I :

Métallurgie et soudabilité des métaux et leurs alliages

I. Introduction :

Une opération de soudage engendre des transformations locales des matériaux à base métallique du fait d'apport de chaleur sur les éléments de l'assemblage soudé, pour comprendre ce phénomène, ce chapitre vise à étudier le comportement métallurgique d'un métal dans les zones soudées et sa qualification en termes de soudabilité. En vue de maîtriser ses propriétés et d'optimiser les défauts de soudages.

I.1.Définition :

Le soudage, selon la norme ISO/R 857 (1958) et le Vocabulaire Electronique International (terme n°40 -15-005), est une opération qui consiste à établir la continuité de matière entre les parties à assembler.

Ajoutant que, l'institut de soudure britannique la définit comme continuité de matière dans un assemblage et comme liaison non démontable, s'appuie du latin « eduobus unum » c'est-à-dire : « de deux ils ne font qu'un ». [02]

I.2.Propriétés des métaux :

Les métaux se distinguent en fonction de différentes caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques. Celles-ci déterminent non seulement leur soudabilité, mais aussi la fonction du métal dans un assemblage. [03]

I.2.1.Fragilité :

La fragilité désigne la caractéristique d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement (rupture facile sans flexion).



Figure 1.1: Matériau fragile (fonte) avec un défaut de soufflure.

I.2.2.Ductilité :

À l'opposé, la ductilité représente la capacité d'un métal à se déformer sans se rompre. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation se propagent difficilement du fait d'existence d'éléments tels que : Ni, Mo, V,...etc, favorisant la formation de bainite en soudage.



Figure 1.2 : Déformation facile d'un alliage métallique.

I.2.3.Ténacité :

La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser et s'écailler. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont constitués de matériaux de haute ténacité.



Figure 1.3 : Résistance aux chocs.

I.2.4. Malléabilité :

La malléabilité est une caractéristique qui permet au métal de se laisser façonner. Elle réfère à la résistance relative du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Un exemple de matériel extrêmement malléable, quoique non soudable, est la pâte à modeler.



Figure 1.4 : feuille en plomb facile à façonner.

Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température. En soudage, on travaille généralement avec des matériaux ductiles et malléables.

I.2.5. Élasticité :

L'élasticité désigne la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche : métaux riche en Si).



Figure 1.5 : Ressorts avec déformations réversible.

Remarque :

La plupart des métaux sont élastiques jusqu'à un certain niveau de déformation. Dépassé cette limite, les métaux demeurent déformés en permanence même en enlevant la force exercée ; on parle dans ce cas d'une déformation plastique ou irréversible. À la suite d'une déformation encore plus importante, les métaux peuvent subir des ruptures.

I.2.6.Dureté :

La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle se caractérise aussi par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, et l'aluminium est de faible dureté. On se sert des procédés : HR, HV, ..., pour évaluer la dureté des matériaux métalliques.



Figure 1.6 : Résistance à la pénétration de la pièce à percer, l'effet de dureté.

I.2.7.Résistance à l'abrasion :

Les matériaux durs présentent aussi une bonne résistance à l'abrasion, c'est-à-dire qu'ils ne s'usent pas facilement par frottement. En termes pratiques, ils sont plus difficiles à meuler.



Figure 1.7 : Usure d'un disque abrasif sous l'effet de la résistance à l'abrasion.

I.2.8. Résistance à la corrosion :

La résistance à la corrosion désigne la capacité d'un matériau à ne pas se dégrader sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène et du métal. Un métal ferreux résistant à la corrosion ne rouille pas ; c'est le cas des aciers inoxydables et de certains autres aciers d'alliage.



Figure 1.8 : Chaîne en métal ferreux, en corrosion et un autre inoxydable

I.2.9. Magnétisme :

Le magnétisme est une propriété caractéristique des métaux ferreux, qui les rend sensibles aux aimants (effet de polarisation).



Figure 1.9 : Des vis sous l'effet d'un aimant.

I.2.10. Caractéristiques thermiques et électriques :

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur.

A. Dilatation et contraction (ou retrait) thermique :

Lorsqu'un matériau est chauffé, il s'étire un peu ; c'est ce qu'on appelle la dilatation. À l'opposé, il subit un raccourcissement sous l'effet du froid ; c'est la contraction ou le retrait. Le niveau de dilatation et de retrait d'un métal influe sur sa soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque d'apparition des fissures ou des déformations est élevé. On définit la capacité de dilatation/retrait des métaux par un coefficient thermique. Ainsi, le coefficient thermique de l'aluminium, par exemple, est plus élevé que celui de l'acier. Pour une même variation de température, l'aluminium se dilate presque deux fois plus.

En soudage, le retrait empêché provoque des contraintes résiduelles (dangereuses) dans le cordon notamment dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

B. Point de fusion :

Le point de fusion indique la température à laquelle un métal passe de l'état solide à l'état liquide. Le point de fusion est un facteur important pour déterminer la soudabilité d'un métal. Ainsi, plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.

C. Les conductivités :**a) –La conductivité thermique :**

Est la capacité d'un matériau à conduire ou à transférer la chaleur. La conductivité thermique est importante parce qu'elle permet de déterminer le niveau de préchauffage nécessaire et la quantité de chaleur requise pour le soudage. Le cuivre est un très bon conducteur thermique. L'aluminium possède environ la moitié de la conductivité thermique du cuivre, alors que l'acier, seulement un dixième.

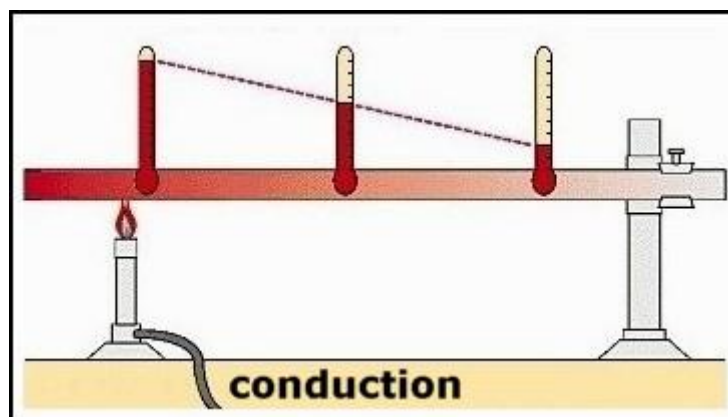


Figure 1.10 : Propagation de chaleur.

b) –La conductivité électrique :

Elle est définie par la capacité d'un matériau à transmettre l'électricité, d'où son importance lorsqu'on a affaire à des procédés de soudage électriques. En général, la conductivité électrique des matériaux métalliques diminue avec la température, exceptés les semi-conducteurs.



Figure 1.11 : Bombardement par électrons ; création de l'arc électrique.

II. Facteurs influant la structure des matériaux :

La structure métallurgique (donc les propriétés) des matériaux évolue principalement avec :

- La composition chimique (nature et quantité des éléments présents dans le matériau) ;
- Le traitement thermique (thermomécanique) que le matériau reçoit lors de sa fabrication, c'est-à-dire de la façon précise avec laquelle il est chauffé puis refroidi au cours de sa mise en forme, ou après (p.ex. le traitement thermique de trempe et de revenu) ;

- La façon dont il est mis en forme, on distinguera notamment les produit moulés (fabriqué par fusion/solidification) et les produits mis en forme par déformation à chaud (p.ex. laminage, forgeage...). [04]

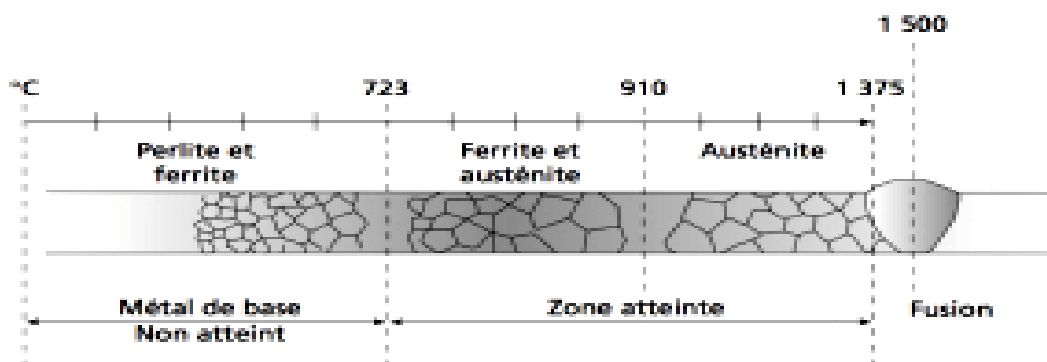


Figure 2.1: Variation de la structure de l'acier soudé [03]

II.1. Rôle de la métallurgie du soudage :

Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question ; les structures des pièces au voisinage de cordon tendent à évoluer lors du soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique local.

De plus il s'agit de soudage par fusion :

- D'une part, les matériaux assemblés peuvent changer leurs compositions chimiques s'ils sont mélangés à une nouvelle composition différente (métal d'apport) ;
- D'autre part, ils quittent la structure du métal de base pour passer (ou moins dans un premier temps) par une structure brute de solidification, de type produit moulé (dans la zone où ils sont fondus puis à nouveau solidifiés),

Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les zones où elle est modifiée par le soudage (région soudées), et ce dans le but de maîtriser les propriétés d'une soudure, par l'optimisation de l'effet thermique. [04]

II.2. Comportement métallurgique en soudage :

Pour comprendre le comportement métallurgique d'un métal de base au soudage, il faut connaître et étudier ce qui suit :

- Avant tout chose, le fonctionnement métallurgique du métal de base (MB) qui va être soudé ;
- La façon dont une soudure se chauffe et se refroidit dans le temps et dans l'espace (traitement thermique au soudage), ainsi que les facteurs d'influence (énergie, épaisseur soudée...) ; on parle d'aspect thermique de l'opération de soudage ;
- Les modifications subies par le métal de base (MB) dans les régions où il a été chauffé et refroidit sans fondre ; cette région est appelée : zone affectée thermiquement (ZAT).
- Et s'il s'agit de soudage par fusion locale ;
- Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé, fondu et refroidi (après solidification) et éventuellement modifié chimiquement (s'il y a eu utilisation de métal d'apport) ; cette région est appelée ; zone fondue (ZF).
- Les modifications particulières qui peuvent s'opérer à la frontière de la ZF et de la ZAT ; cette région est appelée : la zone de liaison (ZL) [04].

Le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Easterling (**Voir la figure 2.2**), il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. A titre d'exemple, on se placera dans le cadre des aciers de construction métallique à 0,15 %C, qui constituent la plus large gamme d'applications du soudage, en examinant le diagramme (Fe-C) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé. [06].

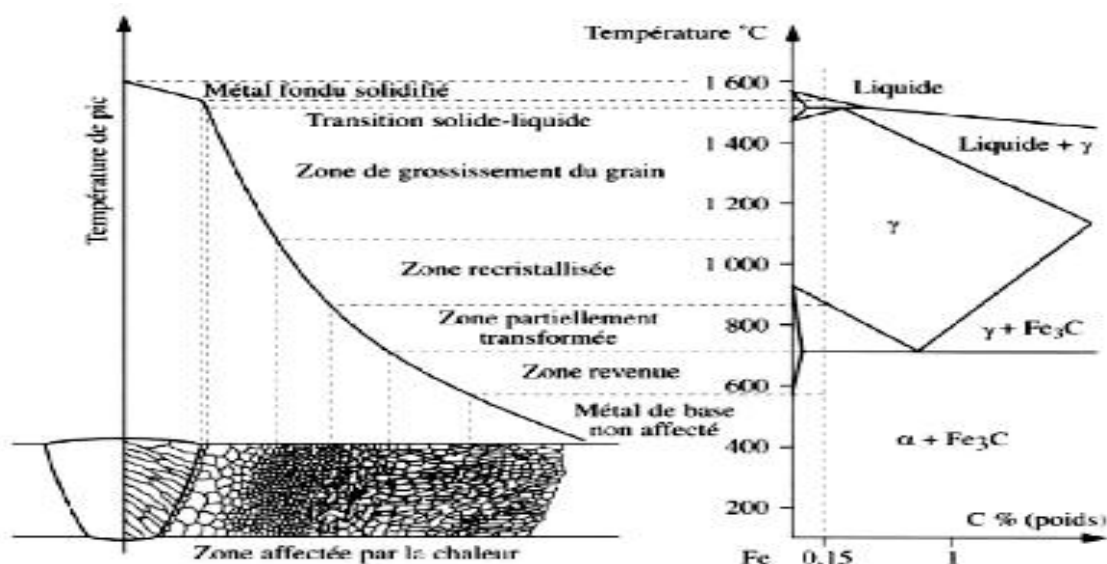


Figure 2.2 : Comportement métallurgique des aciers en soudage [07].

Cependant, pour évaluer efficacement l'effet thermique sur les microstructures des zones de la soudure, il est préférable d'utiliser les diagrammes de TRC de soudage, qu'on détaillera par la suite.

III. Métaux ferreux :

Les métaux ferreux contiennent du fer ; la plupart sont magnétiques. En soudage, l'intérêt pour les métaux ferreux est grand, car cette catégorie contient tous les aciers. En effet, l'acier est essentiellement composé de fer auquel on a ajouté un faible pourcentage d'impuretés (C, Mn, Si,...). Pour former les aciers alliés, on ajoute aussi d'autres éléments (Ni, Cr, Ti, V,...) qui confèrent à l'alliage des propriétés particulières.

III.1. Aciers au carbone :

Les aciers au carbone (**non alliés**) contiennent entre 0,06 et 2,11 % de carbone. S'il contient moins de 0,06 % de carbone, le métal est considéré comme étant du fer pur.

Remarque :

Les aciers non alliés dont la teneur en carbone dépasse 0,5 % ont généralement une soudabilité très faible ou nulle ; ils permettent cependant de fabriquer de très bons outils d'usinage.

III.1.1. Caractéristiques et propriétés :

A. Acier doux :

- Est le plus largement utilisé dans l'industrie.
- Sert à fabriquer des boulons, des écrous, des articles en tôle, etc.
- Constitue près de 85 % de la production totale d'acier.
- Est malléable, même à froid.

B. Acier semi-dur :

Est plus résistant à la traction que l'acier doux.

- Est plus difficile à souder que l'acier doux.
- Constitue un acier d'usage général pour la fabrication d'outils (p.ex. : marteaux, tournevis, ressorts, etc.), d'éléments préfabriqués, de pièces forgées, etc.

C. Acier dur :

- S'usine moins bien et se soude difficilement ; on l'appelle aussi acier à outils, car il sert à la fabrication d'une grande gamme d'outils divers.
- Sa teneur élevée en carbone lui procure une grande dureté, mais le rend fragile.
- L'assemblage de l'acier dur peut se faire par boulonnage, vissage ou rivetage.
- On peut le souder avec des pièces dont le point de fusion est plus bas, par exemple en fondant de l'aluminium directement sur l'acier dur (brasage).

En règle générale, plus un acier est dur, moins il est ductile et difficile à souder.

Remarque :

On ajoute souvent aux aciers doux et semi-durs quelques additifs (p.ex. du silicium, mais en quantité inférieure à 0,06 %, ou du manganèse, en quantité inférieure à 1,2 %) qui servent à stabiliser la structure du métal et à augmenter sa soudabilité. Par ailleurs, on y

retrouve quelquefois des résidus du processus de fonte (comme le soufre ou le phosphore), mais la quantité de ces éléments ne dépasse pas 0,06 %.

III.1.2. Structure et traitements des aciers :

Les traitements thermiques de l'acier modifient la forme des composés fer-carbone à l'intérieur de sa structure et, par le fait même, ses propriétés.

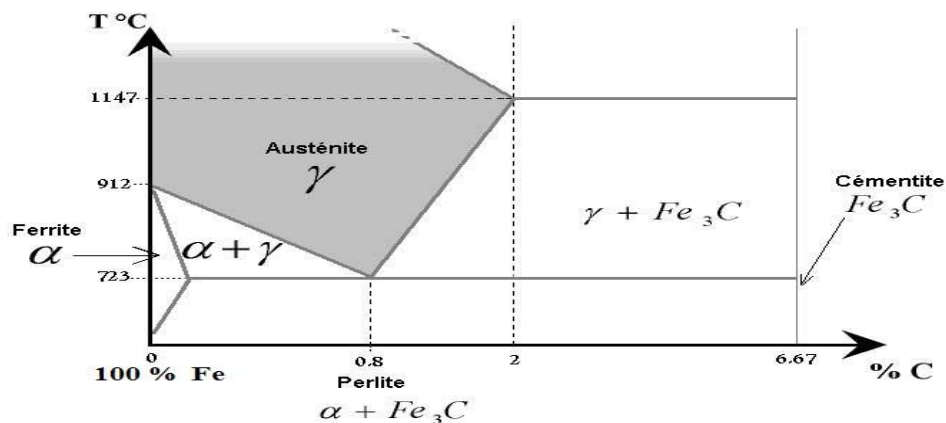


Figure 3.1: Diagramme fer-cémentite.

A. Trempe :

Les aciers peuvent être soumis à un traitement thermique, soit la trempe, qui augmente leur dureté. Lorsqu'on trempe un acier, on le chauffe d'abord à une température assez élevée pour changer sa structure interne, puis on le refroidit rapidement (généralement dans un bain de trempe constitué d'huile). C'est au moment du refroidissement que le durcissement se produit. Un refroidissement rapide amène l'acier à se durcir d'avantage (formation de la martensite).

B. Revenu :

Le revenu est un traitement thermique qui est souvent associé à la trempe. On l'utilise pour augmenter la résistance aux chocs de l'acier trempé, tout en conservant sa dureté. Le revenu s'effectue en chauffant la pièce à des températures plus basses. À mesure que le métal est chauffé, sa couleur varie et on peut déterminer la température de chauffe idéale simplement à partir de la couleur de l'acier.

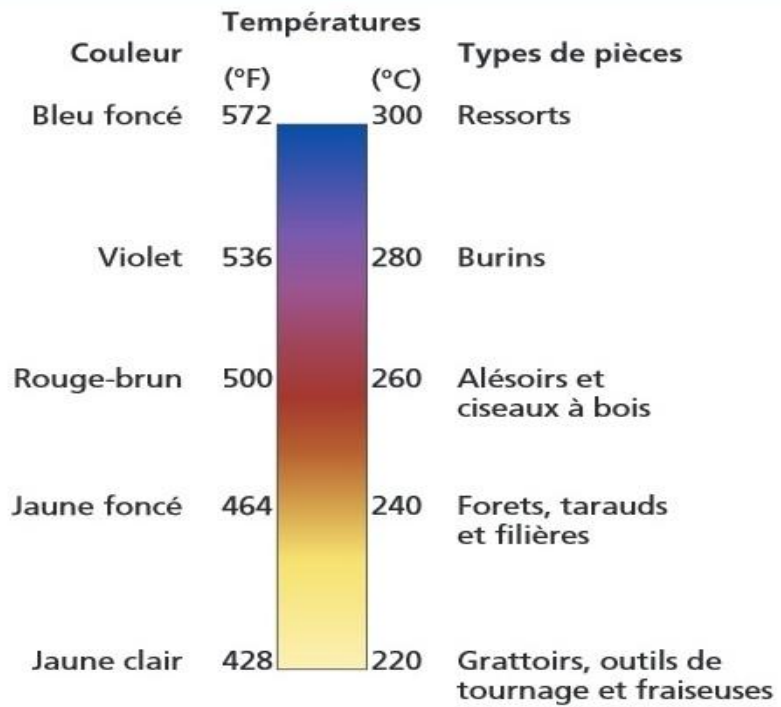


Figure 3.2: Variation de la couleur de l'acier en fonction de la température de revenu.



Figure 3.4 : Température et couleur d'un cordon de soudure après quelques secondes de fin de soudage.

C. Recuit :

Le recuit vise l'effet contraire de celui de la trempe. On chauffe l'acier à une température un peu moins élevée et on le refroidit lentement. Cela permet de retrouver la structure initiale. Le taux de refroidissement ne doit pas dépasser 50 °C/h et on doit prévoir au moins 24 heures pour refroidir la pièce.

D. Normalisation :

La normalisation vise à rendre la structure de l'acier plus homogène et est tout indiquée après un soudage ayant requis beaucoup de chaleur, et ce, dans le but d'éliminer les tensions internes et d'affiner les grains. Pour normaliser une pièce, on la chauffe à 40 ou 50 °C au-dessus de sa température de transformation et on conserve cette température une heure pour chaque 25 mm d'épaisseur de la pièce. Ensuite, on la laisse simplement refroidir à l'air libre.

En soudage, pour mieux comprendre les modifications métallurgiques qui surviennent, on se sert des **TRC** offrant une grande gamme d'informations s'y affèrent à la soudure.

III.1.3. Diagramme de transformation en refroidissement continu (TRC) :

Un diagramme de transformations en refroidissement continu, ou diagramme TRC, est un diagramme utilisé pour prévoir la structure cristallographique d'un solide soumis à des transformations thermomécaniques et le soudage. Les diagrammes sont généralement tracés par étude dilatométrique.

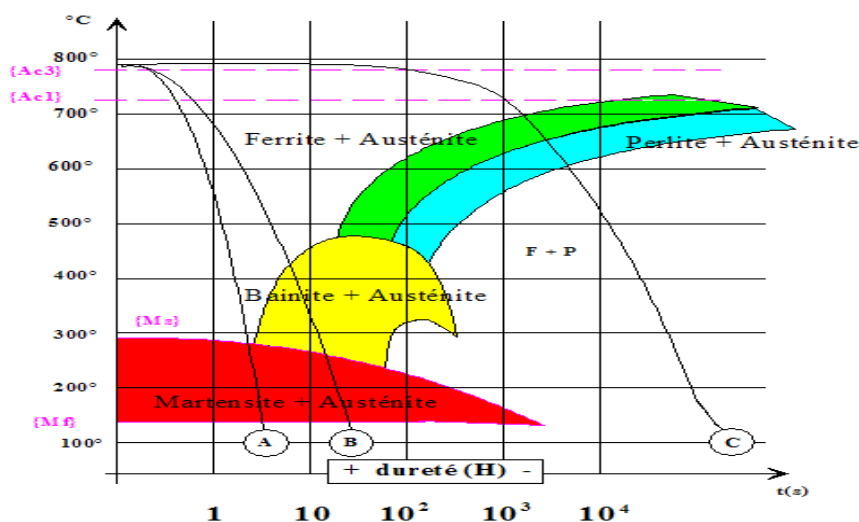


Figure 3.3: Diagramme de transformation en refroidissement continu.

Le diagramme TRC présente les différents domaines par lesquels peut passer une certaine nuance d'acier au cours d'un refroidissement. Ces domaines sont **l'austénite, la ferrite, la bainite, la martensite** ou **la perlite**. Différentes courbes tracées, représentent les trajets de refroidissements les plus courants. Les vitesses de refroidissement pouvant grandement varier, l'échelle de temps est logarithmique. A la frontière de chaque domaine, on donne généralement **la proportion** (en %) de la phase traversée en fonction de la vitesse de refroidissement. On indique aussi **la dureté (Rockwell ou Vickers)** de la zone à gros grains de la ZAT obtenu pour chaque vitesse de refroidissement caractéristique.

III.2. Aciers alliés :

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d'alliage supplémentaires qui permettent d'obtenir des propriétés supérieures : augmenter leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur élasticité, leur résistance à l'usure, ou encore obtenir une augmentation de leur température critique (il s'agit de la température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés).

On parle **d'aciers fortement** alliés si les éléments d'alliage comptent pour plus de 5 % de leur composition ; sinon, on les appelle **aciers faiblement alliés**.

Certains aciers alliés ont été élaborés spécifiquement afin d'augmenter leur soudabilité. Lors du processus de durcissement des aciers (la trempe), les aciers sont chauffés puis refroidis. Lorsque la pièce est mince, le refroidissement se produit également partout ; par contre, pour une pièce épaisse, le centre refroidit moins rapidement que la périphérie, ce qui crée des tensions internes. Des aciers alliés ont donc été développés pour remédier à ce problème.

III.3. Aciers inoxydables :

On trouve différents types d'aciers inoxydables qui possèdent tous la caractéristique d'être très résistants à la corrosion. Ce sont des aciers fortement alliés dont les éléments d'alliage (Ni, Cr,..) constituent plus de 35 % du contenu. On distingue généralement trois catégories d'aciers inoxydables : les aciers austénitiques, ferritiques et martensitiques.

III.4. Fontes :

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone, dont la quantité de carbone excède 2,11 %. Elles sont dures, mais fragiles, et sont plus faciles à mouler (par coulage) que l'acier, mais plus difficiles à souder.

La fonte grise, la fonte blanche, la fonte malléable, la fonte nodulaire (ou ductile) et la fonte alliée.

IV. Métaux non ferreux :

Les métaux non ferreux sont multiples, mais certains sont plus utilisés que d'autres. En règle générale, les métaux non ferreux ne sont pas magnétiques (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas attirés par un aimant) et ils résistent à la corrosion.

Il existe plusieurs et dans parmi : l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le nickel et le titane.

V. Soudabilité des métaux :

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement [06]. Comme on peut le remarquer, la soudabilité n'est pas mesurable et dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- a- La nuance de l'acier (notamment la composition chimique réelle).
- b- Les caractéristiques dimensionnelles (notamment l'épaisseur et les formes des pièces à souder).
- c- Le mode opératoire de soudage (notamment le procédé de soudage).
- d- Le traitement thermique éventuel du joint soudé.
- e- Les conditions de service.

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « la zone affectée thermiquement » ou ZAT.

V.1. Les étapes importantes lors de l'application de la majorité de procédé de soudage :

1- Le chauffage :

Le chauffage est un résultat direct des transferts d'énergie survenant entre l'arc électrique et le métal.

2- La fusion :

En le chauffant, le métal atteint la température de son point de fusion et fond, créant un bain de fusion dans lequel l'ajout du métal d'apport ou la réunion des bords formera la soudure proprement dite.

3- La solidification :

Par la suite, on assiste à la solidification de la zone qui reste cependant encore chaude.

4- Le refroidissement :

Finalement, on refroidit la pièce.

V.2. Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage :

On compte quatre principaux facteurs qui déterminent les effets des opérations de soudage et qui entrent en considération dans le choix d'un procédé :

A. Quantité de chaleur transférée :

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé.

B. Température initiale de la pièce :

La température initiale détermine la vitesse de refroidissement de la pièce et l'humidité qu'elle contient. Un préchauffage approprié permet de diminuer la vitesse de refroidissement et d'assécher les pièces, ce qui atténue les risques d'absorption d'hydrogène (élément parmi d'autres déclenchant la fissuration sous cordon).

C. Vitesse de refroidissement du métal :

La vitesse de refroidissement dépend de la différence de température entre la pièce et le milieu de refroidissement ; plus l'écart est élevé, plus le refroidissement sera rapide. Plus les zones de contact entre le cordon de soudure et le milieu de refroidissement sont étendues, plus le refroidissement sera rapide.

D. Température atteinte dans la ZAT :

La température atteinte dans la ZAT modifie la structure finale du métal dans cette zone.

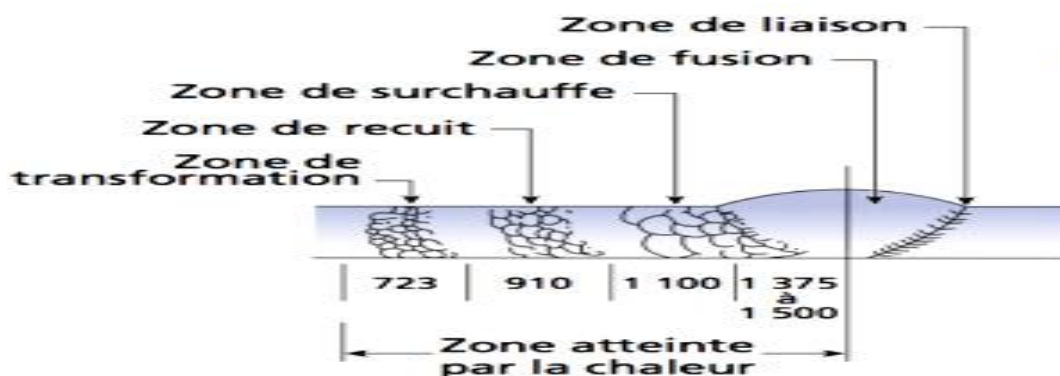


Figure 5.1: Différentes zones affecté thermiquement. [03]

La figure 5.1, illustre l'influence de la température atteinte dans la ZAT dans le cas de l'acier. On remarque que la grosseur des grains est proportionnelle à la chaleur atteinte dans la ZAT.

La conductivité thermique du métal détermine la vitesse à laquelle le métal transfère la chaleur depuis la ZAT, donc la taille des zones affecté thermiquement. L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire sont deux facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZAT.

V.3. Énergie de soudage :

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$E_s = 60 \cdot \frac{I_s \cdot U_s}{V_s} \cdot \eta_{\text{eff}} \quad (\text{V.1}).$$

Avec :

- E_s : l'énergie de soudage, en [J/Cm].
- I_s : l'intensité électrique de soudage, en [A].
- U_s : tension électrique de soudage, en [V].
- V_s : la vitesse d'avance de soudage, en [Cm/min].
- η_{eff} : coefficient de procédé (p.ex. en procédé manuel à l'arc avec électrode enrobé, varie de 0.80 à 0.85).

Le soudage se classe parfois par son énergie de soudage en deux catégories :

- Le soudage dit "**à faible énergie**" : $E_s < 30$ KJ/Cm.
- Le soudage dit "**à forte énergie**" : $E_s > 30$ KJ/Cm.

V.4. Coefficient de dilatation :

Les taux de dilatation et de contraction (retrait) de chaque métal ainsi que sa ductilité permettent de prévoir comment le métal réagira lors du soudage. Le coefficient de dilatation représente la valeur de l'augmentation de volume d'un métal sous l'effet de la chaleur en exprimant la valeur de la déformation linéaire.

Lorsqu'on connaît la température initiale et la température finale d'un métal, on peut ainsi calculer l'ampleur de sa dilatation (ou de sa contraction, s'il refroidit).

En soudage, on ajoute généralement un métal d'apport à la pièce soudée, ce qui provoque un retrait (contraction), généralement, plus grand que la dilatation qui a eu lieu avant l'ajout du métal d'apport. Par ailleurs, comme la pièce doit être maintenue en place, elle subit des contraintes dans l'espace et ne se dilate généralement pas dans tous les sens de manière égale. Tous ces facteurs peuvent être à l'origine de déformations dans la pièce soudée et parfois de rupture.

V.5. Soudabilité des aciers au carbone et aciers faiblement alliés :

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne proche à son état initial.

V.5.1. Principaux facteurs qui influent sur la soudabilité des aciers :

- ✓ **Trempabilité** : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- ✓ **Carbone équivalent** : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent (Ceq).

Les éléments suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent (Ceq) :

Le carbone (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Ceq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} \quad (\text{V.2}).$$

Dans cette formule, le symbole de l'élément indique son pourcentage de masse dans l'alliage (p.ex. si on a 0,5 % de carbone et 0,03 % de manganèse, alors C = 0,5 et Mn = 0,03).

Tableau 5.1: Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier. []

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	préchauffage
< 0.40	Excellent	Aucun
0.40 à 0.50	Bon	Aucun De 100 à 300°C
0.50 à 0.60	Moyen	De 100 à 400 °C
0.60 à 0.70	médiocre	De 300 à 400 °C
> 0.70	Mauvais	Non soudable

NB :

Plus la teneur en carbone est élevée, plus les aciers sont difficiles à souder.

V.6. Soudabilité des aciers inoxydables :

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité de ces aciers, comparativement aux aciers au carbone, sont les suivantes :

- ❖ Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée ; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
- ❖ Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique élevée indique que la chaleur sera plus dispersée dans le métal et qu'il y aura des pertes.
- ❖ Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer ; par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- ❖ En fait, pour toutes ces raisons, la taille de la ZAT d'un acier inoxydable sera d'environ 50 % plus grande que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions.

Tableau 5.2: Facteurs influant sur la soudabilité de différents types d'aciers inoxydables. []

Type d'acier inoxydable	Facteurs influant sur la soudabilité
Austénitique	<ul style="list-style-type: none"> • Coefficient de dilatation supérieur (environ 1,5 fois celui de l'acier au carbone), donc sensible aux déformations • Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux, donc une ZAT moins grande pour un même courant • Résistance électrique jusqu'à 6 fois plus élevée que celle de l'acier doux • Point de fusion inférieure à celui de l'acier doux, donc température nécessaire moindre

Martensitique	<ul style="list-style-type: none"> • Coefficient de dilatation inférieur (minimise les déformations lors du soudage) • Conductibilité thermique plus faible que celle de l'acier doux (intensité de courant plus basse) • Résistance électrique de 3 à 6 fois plus élevée que celle des aciers au carbone • Forte tendance à durcir au contact de l'air
Feritique	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun durcissement, même lorsque refroidi rapidement • Le grain grossit si la pièce est chauffée à plus de 870 °C, puis refroidie lentement, ce qui rend la pièce fragile.

V.7. Soudabilité des fontes :

Les fontes blanches ne se soudent pratiquement pas (taux de carbone très élevé). Les autres fontes (grises, malléables et nodulaires) peuvent être soudées sous certaines conditions. Ce sont les fontes nodulaires, plus ductiles, qui sont les plus faciles à souder. On ne soude généralement pas de fontes dans l'industrie de la fabrication, sauf dans le cas de certaines opérations de réparation.

V.8. Soudabilité des métaux non ferreux :

Le tableau suivant rappelle les principaux facteurs influant sur la soudabilité des métaux non ferreux :

Tableau 5.3: les principaux facteurs influant sur la soudabilité des métaux non ferreux

Métal	Facteurs influant sur la soudabilité
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Un coefficient de dilatation élevé, ce qui accroît les risques de déformation du métal lors du refroidissement • . Un point de fusion bas : le bain de fusion est rapidement créé et il est très fluide. • Conductibilité thermique élevée : il y a beaucoup de pertes de chaleur dans le métal, donc la température de soudage doit être plus élevée. • Il y a formation d'oxyde à la surface très dure dont le point de fusion est supérieur à celui de l'aluminium.
Nickel	<ul style="list-style-type: none"> • Il se soude bien même sans préchauffage. • Le métal doit être bien nettoyé pour éliminer la présence d'oxyde sur sa surface. • La pénétration dans le nickel est généralement inférieure à celle de l'acier.
Cuivre	<ul style="list-style-type: none"> • Une conductivité thermique élevée, jusqu'à 50 % plus grande que celle de l'acier (à l'exception de certains alliages de cuivre-nickel). • Un coefficient de dilatation élevé. • Un point de fusion relativement bas et un bain de fusion très fluide • La composition de chaque alliage peut modifier ses caractéristiques. • La soudabilité du laiton dépend en grande partie de sa teneur en zinc puisque celui-ci se volatilise lors du soudage. Cela peut

	causer des défauts ; les laitons à faible teneur en zinc ont une plus grande soudabilité.
Titane	<ul style="list-style-type: none"> • Presque pur, il possède une excellente soudabilité. • Les alliages alpha se soudent facilement. Ils peuvent être recuits, mais ne peuvent pas être durcis par traitement thermique. • La soudabilité des alliages alpha-bêta varie en fonction des éléments d'alliage qu'ils contiennent ; une grande quantité de chrome, par exemple, diminue beaucoup la soudabilité du métal.

V.9. Récapitulatif :

- Les principaux facteurs influant sur la soudabilité d'un métal sont :
 - la quantité de chaleur transférée au métal de base (selon le procédé de soudage utilisé).
 - la température atteinte dans la ZAT qui dépend, entre autres, de la conductivité thermique du métal et du procédé de soudage.
 - la température initiale de la pièce qui influe, notamment, sur sa vitesse de refroidissement.
 - la vitesse de refroidissement du métal, laquelle détermine la possibilité de modifications structurelles du métal pouvant altérer ses propriétés de base.
- L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire du procédé de soudage influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZAT.
- La soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés dépend fortement de leur teneur en carbone (ou carbone équivalent), de même que de leur trempabilité. Une teneur élevée en carbone équivalent de même qu'une tendance élevée à la trempe rendent le soudage difficile.
- Les aciers inoxydables requièrent une intensité de courant plus faible que les aciers au carbone pour être soudés. Leur point de fusion est plus bas, leur conductivité thermique plus faible et leur résistance électrique plus élevée que celle des aciers non alliés.
- Les fontes sont vulnérables aux déformations lorsque soudées, notamment à cause de leur fragilité.

- L'aluminium a un point de fusion assez bas et un bain de fusion très fluide. Par ailleurs, on trouve souvent des dépôts d'oxyde à sa surface. Ces éléments doivent être pris en considération lors du soudage de l'aluminium, afin d'éviter les déformations.
- Le cuivre et ses alliages présentent généralement une forte conductivité thermique et électrique. Il est important de les préchauffer.

VI. Conclusion :

Le soudage, dans ces divers procédés, implique le chauffage, la fusion, et le refroidissement du métal. Ces variations de température ont donc un impact direct sur la structure de la zone soudée. Cette structure qui est finalement derrière la détermination et la compréhension des propriétés mécaniques et chimiques d'un matériau, puis ces fonctions métallurgiques en plus sa qualification en soudabilité. A cet effet un choix judicieux des conditions de soudage notamment le choix d'énergie de soudage et très souhaitable. Et ce, pour optimiser le coût de la réalisation et en même temps réaliser des soudures saines (sans défauts).

CHAPITRE II :

Procédés de soudage

I. Introduction :

La soudure peut se réaliser avec différentes manières d'agir. Ces différentes manières sont appelées : **procédé de soudage**. Chaque procédé de soudage se spécifie avec son propre matériel et paramètres bien précises. Ce chapitre vise à faire connaître les procédés de soudage les plus répandus.

I.1. Définition :

Un procédé de soudage, selon la norme **ISO 857**, implique un ensemble de matériel et paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage à effectuer. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qu'il faudrait analyser avant d'opter au procédé de travail. [08]

La norme **ISO 4063** définit la nomenclature et donne la numérotation des procédés de soudage.

La norme **ISO/TR 25901-1 :2016 (fr)** est une banque riche en vocabulaire de base et des définitions des termes dans le thème « **soudage** ».

Le **WPS** (Welding Proceeding System), est un guide technique spécialisé qui contient les protocoles exigé pour réussir une opération de soudage.

I.2. Classification des procédés de soudage :

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre ;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [09].

I.3. Les divers procédés de soudage : ils existent plusieurs, l'organigramme suivant les résume :

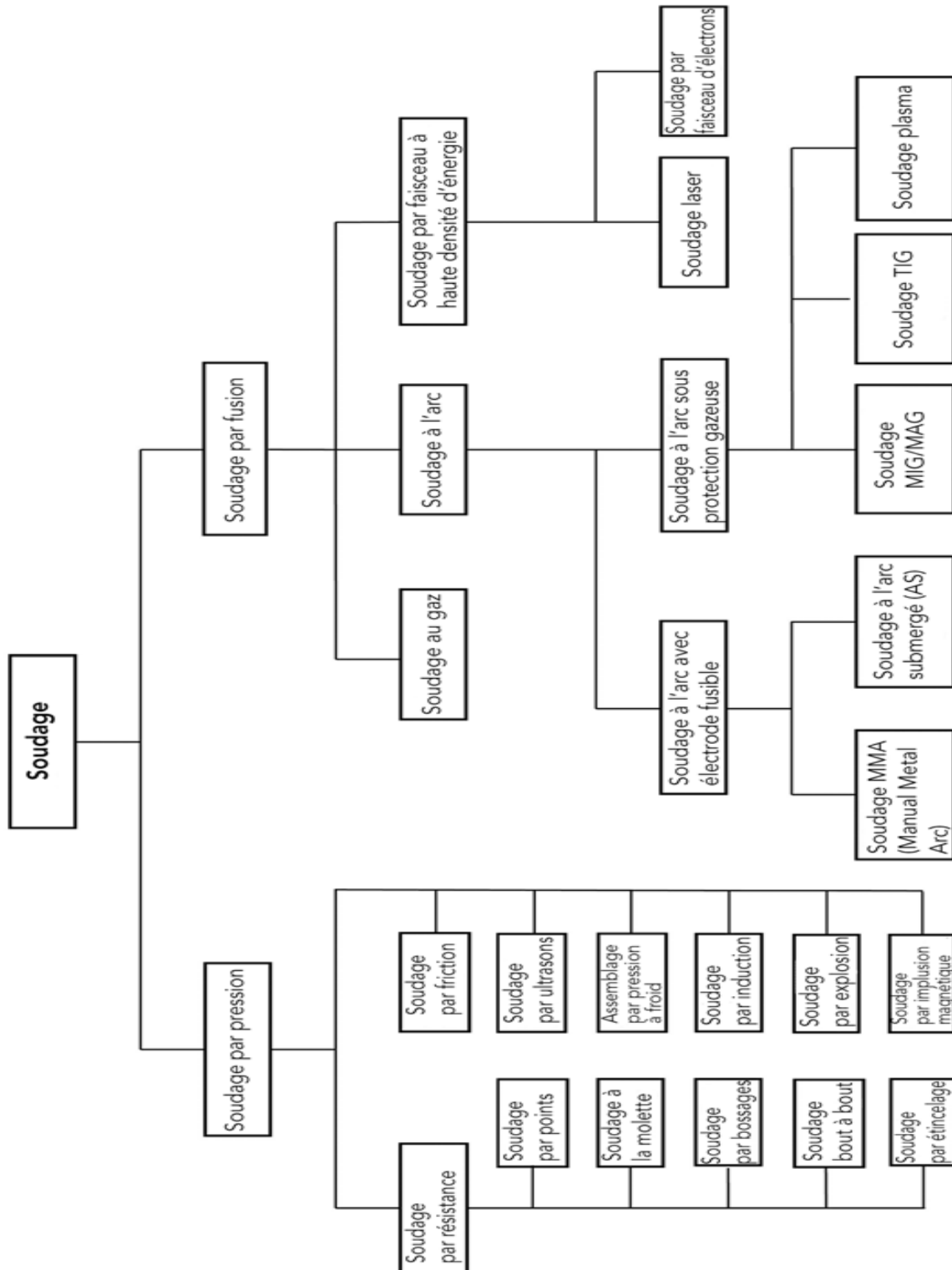


Figure 1.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [05].

II. Soudage à l'arc et ces caractéristiques :

II.1. Arc de soudage :

Un arc de soudage est un arc électrique amorcé par un court-circuit entre deux électrodes. Entre l'électrode et la pièce à souder, l'arc chauffe et ionise un gaz, qui prend le nom de plasma. Celui-ci assure le passage de courant électrique jusqu'à la pièce à souder. La chaleur émise permet la mise en œuvre du soudage en faisant fondre l'électrode et la pièce à souder. La quantité de chaleur dépend de la puissance de l'arc, qui dépend elle-même de la tension et de l'intensité (U, I). On distingue deux types d'arc :

II.1.1. Arc de pulvérisation :

Lorsque la tension d'arc est élevée, les forces magnétiques sont dirigées vers le bas et les gouttelettes se libèrent plus facilement des tensions de surface électrode. On obtient un arc de pulvérisation dans lequel le transfert de matière est assuré par une pluie de gouttelettes (microstructure fine de joint soudé).

II.1.2. Arc court :

Lorsque la tension d'arc est faible, les forces magnétiques, plus faibles, sont au contraire dirigées vers le haut. Le diamètre de la gouttelette sur l'électrode a tendance à augmenter, et ceci nuit à la stabilité du processus (court-circuit). Pour y remédier, il faut réduire la longueur d'arc (la distance entre l'électrode et la pièce soudée) de sorte que les gouttelettes touchent le bain de fusion avant d'avoir atteint une taille trop importante. Les effets de tension de surface entraînent le transfert du matériau fondu et la base de la gouttelette se contracte sous l'effet dit << de pincement >>.

La stabilité de transfert de matière en court-circuit dépend de celle du gaz de protection, de la composition chimique de l'électrode, des propriétés de la source d'alimentation et de système de dévidage de l'électrode.

II.1.3. Phénomène de soufflage magnétique :

Le soufflage magnétique ou déviation de l'arc résulte d'une dissymétrie du champ magnétique environnant l'arc. Ce phénomène classique, de soufflage, est d'autant plus marqué que les forces magnétiques importantes, et peut affecter la qualité de soudure.

Le soufflage d'arc peut provoquer :

- Une dissymétrie du bain de soudage et de cordon, entraînant un défaut de soudure ;
- Une déviation de l'arc dans l'axe du cordon de soudure, affectant la largeur du cordant et la pénétration ;
- Une altération de la protection assurée par le laitier ou le gaz, entraînant un risque de formation de pores dans la soudure ;

Le soufflage est causé soit par le retour de courant asymétrique, ou la pièce à souder n'est pas symétrique [05].

II.1.4. Alimentation :

Les blocs d'alimentation de soudage assurant une réduction de tension de l'alimentation de secteur. Ils permettent de contrôler l'intensité et la tension et produisant un courant aux caractéristiques statique et dynamique conformes aux exigences du procédé de soudage.

Dans le processus de soudage, la source d'alimentation est très importante pour sa qualité. L'amorçage de l'arc, la stabilité du transfert du matériau de l'électrode enrobée et la quantité de projections dépendent de la qualité de l'alimentation en énergie électrique. Il faut donc optimiser les caractéristiques statique et dynamique de la source d'alimentation.

II.1.5. Caractéristiques statique d'un bloc d'alimentation :

En l'alimentant par une charge résistive réglable. La caractéristique peut être **plongeante**, à **courant constant** ou **horizontal**.

On utilise une caractéristique, à **courant constant** lorsque le soudeur contrôle la longueur d'arc (p.ex. procédé TIG). En cas de changement intempestif de la longueur d'arc, la tension s'ajuste afin de maintenir une intensité constante.

En soudage manuel avec électrode, on choisira une caractéristique **plongeante**, afin d'empêcher que l'électrode colle à la pièce à souder au moment de l'amorçage de l'arc lorsque le courant de court-circuit dépasse l'intensité de charge normale. La caractéristique plongeante autorise également des tensions à vide plus élevées, utiles lorsque l'alimentation est en courant alternatif, car elles empêchent l'arc de s'évanouir.

Caractéristique horizontale (à tension constante) :

On parle de **Caractéristique horizontale** ou **plate** lorsque la tension de sortie ne varie que très peu pour une large gamme d'intensités. La chute de tension ne dépasse pas 2 à 5V pour 100 A. Une caractéristique horizontale permet de contrôler précisément la longueur d'arc lors des opérations de soudages avec fil d'apport à dévidage continu (soudage MIG et, parfois, soudage à l'arc submergé). Dans ce cas, la vitesse de dévidage du fil commande l'intensité du courant de soudage.

A. Caractéristiques dynamique :

Lorsque les variations de l'arc sont relativement lentes, on peut supposer que le point de fonctionnement correspond à la caractéristique statique du bloc d'alimentation. En cas de variations plus rapides, ce sont les caractéristiques dynamiques du bloc qui déterminent la vitesse à laquelle l'intensité de courant peut s'adapter en conséquence. Ceci est important dans le cas de soudage en courant à court-circuit.

II.1.6. Réglage de l'intensité et de la tension :

Dans le cas du soudage avec électrodes enrobées ou du soudage TIG, c'est l'**intensité** que l'on règle sur le bloc d'alimentation et la tension d'arc dépend de la longueur d'arc utilisé.

En revanche, avec un fil d'apport à dévidage continu, par exemple dans le soudage MIG/MAG, c'est la **tension** que l'on règle sur le générateur et la longueur d'arc s'autorégule en fonction de cette tension. Si le soudeur écarte la torche de soudage de pièce à souder, la longueur d'arc ne change pas : c'est la longueur libre de l'électrode qui s'adapte. L'intensité ne peut pas être réglée : elle s'adapte à la vitesse de dévidage du fil ainsi qu'au diamètre du fil (là, le réglage se base sur l'effet joule).

Dans le cas du soudage à l'arc submergé mais aussi dans d'autres procédés de soudage utilisant des électrodes plus épaisses, il est recommandé parfois l'utilisation de bloc d'alimentation à caractéristique plongeante.

II.1.7. Soudage avec source à courant alternatif :

L'emploi du courant alternatif est très répandu dans le soudage, en raison de facilité d'utilisation et de coût peu élevé des blocs d'alimentation à courant alternatif. Le courant alternatif entraîne certaines complications lors des opérations de soudage. En effet, l'arc s'éteint à chaque passage à zéro. La nécessité de réamorcer l'arc limite alors le choix de

l'électrode enrobée et requiert la tension à vide suffisamment élevée (50 V au moins). Des dispositions particulières s'appliquant aux endroits confinés et humides (respectant les normes de sécurité tel que : **ISO 21904-3 :2018, Hygiène et sécurité en soudage et techniques connexes**). Ce procédé est utilisé généralement pour le soudage d'aluminium et ses alliages.

.III. Procédé à l'arc électrique :

III.1. Soudage TIG (GTAW) :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de : Tungstène Inerte Gaz et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par : Gas Tungstène Arc Welding (G.T.A.W).

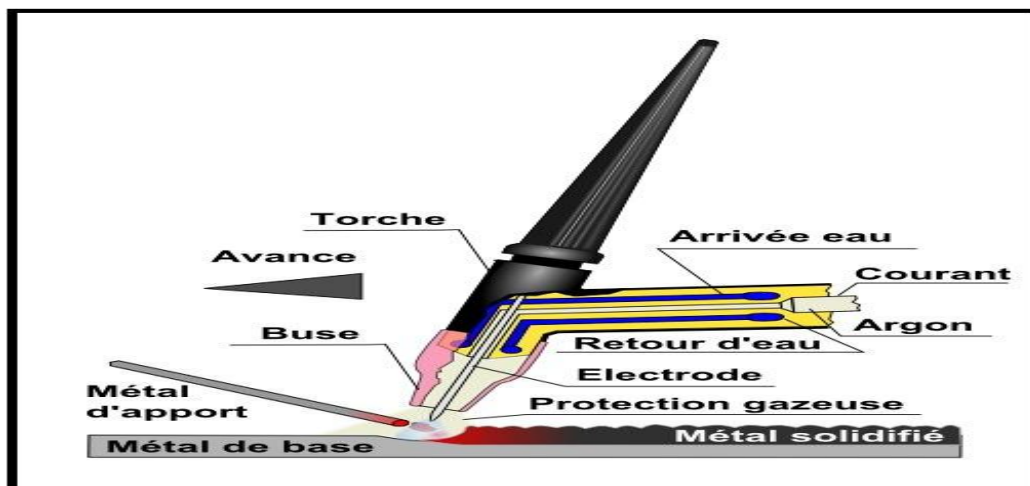


Figure 3.1 : Principe de soudage TIG.

III.1.1. Matériel :

Le matériel nécessaire au soudage TIG inclut :

- Un pistolet à souder.
- Un générateur HF (haut fréquence) pour l'amorçage de l'arc.
- Une alimentation électrique.
- Un gaz de protection.
- Un équipement de contrôle.
- Un flexible à double fonction bien séparé :
 - Alimentation électrique.
 - Canalisation de refroidissement par fluide, par l'eau.

III.1.2. Amorçage de l'arc :

L'arc est généralement amorcé par un générateur HF. Le générateur produit l'étincelle qui fournit le chemin conducteur pour le passage du courant de soudage à basse tension.

III.1.3. Alimentation :

Le soudage TIG se fait en courant continu(CC). L'électrode de soudage est reliée au pôle négatif du générateur de soudage CC et la chaleur est essentiellement générée dans la pièce à souder. Lorsque l'on soude de l'aluminium, la couche d'oxyde qui se forme ne peut être éliminée qu'en reliant l'électrode au pôle positif du générateur.

Dans ce procédé de soudage, l'alimentation est généralement contrôlée électroniquement au moyen d'un inverseur ou d'un montage redresseur à thyristor. La tension à vide doit se situer autour de 80 V avec une caractéristique à intensité constante.

En procédé TIG en courant alternatif (onde sinusoïdale), le générateur HF doit envoyer sans arrêt des impulsions afin d'éviter que l'arc s'éteigne lors du passage à zéro.

III.1.4. Gaz de protection :

Le choix des gaz de protection utiliser pour le procédé TIG se fait selon les matériaux des pièces à souder.

Tableau 3.1: Gaz de protection selon les matériaux des pièces à soudé.

Matériau	Gaz de protection
acier	Argon-azote Argon-hélium
Aluminium et ses alliages	Argon Argon-hélium
Cuivre et ses alliages	Argon
Titane	Hélium Argon



Figure 3.2 : Bouteille de gaz de protection (Argon-Co2).

III.1.5. Consommables :

Le matériau d'apport utilisé se présente sous la forme d'un fil amené manuellement ou mécaniquement.

III.1.6. Méthode :

A l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle de métal de base, on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce et le métal d'apport formant ainsi le joint soudé après refroidissement.

Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène.

III.2. Soudage plasma (PAW) :

III.2.1. Méthode :

Le procédé de soudage plasma utilise un gaz plasmagène (amené par la tuyère centrale) et un gaz de protection (amené par la buse de soudage). Le flux de gaz plasmagène s'écoule le long d'une électrode centrale rétractée généralement en tungstène. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère ambiante par un flux de gaz de protection, comme dans le soudage TIG.



Figure 3.3 : Soudage plasma.

III.2.2. Matériel :

Torche de soudage : comme pour le soudage TIG, la torche de soudage plasma est généralement refroidie par l'eau.

Source d'alimentation : le soudage plasma se fait, tout comme le soudage TIG, en courant continue à caractéristique plongeante avec une tension à vide de 80 V minimum.

Générateur haut fréquence : Même fonctionnement que dans le soudage TIG. Cependant dans le cas de soudage plasma, le générateur HF n'amorce pas l'arc principal ; il amorce l'arc pilote non transféré (le courant circulant entre l'électrode et la buse à gaz plasmagène). Quand l'arc approche la torche de la pièce à souder, l'arc principal est amorcé et l'arc pilot s'éteint.

Equipement de contrôle : il dépend du niveau de mécanisation du processus de soudage mais il est de règle que le pré-gaz, le post-gaz, le générateur HF, et l'arc pilote soient contrôlés automatiquement.

III.2.3. Avantages :

Le soudage plasma présente les avantages suivants :

- Fiabilité de la pénétration avec la méthode de jet débouchant.
- Très grande vitesse de soudage (plus que quatre fois de procédé TIG conventionnel).
- Possibilité de souder des matériaux épais (8 mm) bout à bout sans utiliser de matériau d'apport.
- Possibilité de souder des matériaux très minces (0.03 mm) par fusion.
- Faible convexité de la soudure et passe de racine.

III.3. Soudage MIG/MAG (GMAW) :

On parle de soudage à l'arc sous protection gazeuse inerte (MIG) lorsque le gaz de protection est un gaz inerte tel que l'argon, et de soudage à l'arc sous protection gazeuse active (MAG) lorsque le gaz de protection est un gaz actif tel que le CO₂.



Figure 3.4 : Principe de soudage MIG/MAG.

III.1.1. Matériel et méthode :

Dans le soudage MIG/MAG, un arc électrique est amorcé et entretenu entre le fil d'apport de l'électrode à dévidage continu et la pièce à souder. La bobine de fil d'apport est placée dans un dévidoir et le fil-électrode est entraîné par des galets de précision dans la gaine de guide-fil situé dans le jeu de flexibles de torche de soudage. L'énergie électrique de l'arc passe dans l'électrode à travers le tube de contact. La torche de soudage est reliée au pôle positif de générateur de courant et la pièce à souder au pôle négatif. L'arc ferme le circuit. La buse à gaz qui entoure le tube contact fournit le gaz de protection qui protège l'arc et le bain de fusion.

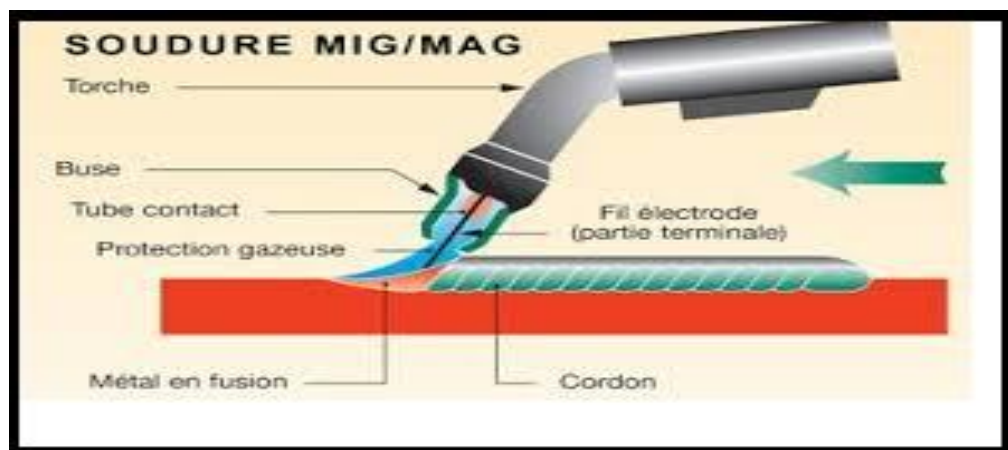


Figure 3.5 : Soudage MIG/MAG.

A. Dévidoir de fil d'apport : est placé sur un système à friction réglable, qui régule la vitesse du dévidage et l'interrompt au besoin. Le fil d'électrode est poussé par des galets

d'entraînement à l'intérieur du jeu de flexibles. Le système est prévu pour éviter les irrégularités de soudage en assurant un dévidage à vitesse constante malgré les inévitables frictions provoquées par le changement du rayon de courbure du flexible ou la présence d'impuretés dans celui-ci. Pour en améliorer l'efficacité, on peut équiper le moteur d'entraînement d'un système de commande à codeur et capteur d'impulsion.

B. Pistolet de soudage : ils alimentent l'arc en courant électrique, en fil d'apport et en gaz de protection. Il doit être particulièrement robuste et capable de résister à des conditions et des entérinements de fonctionnement particulièrement rudes tout en étant suffisamment petit et léger pour permettre le soudage dans les lieux confinés.

III.3.2. Alimentation : on utilise de préférence des sources d'alimentation en courant continu, avec des caractéristiques horizontales.

III.3.3. Dispositif de refroidissement : les torches de soudage refroidies par eau sont souvent alimentées à des intensités de 300 à 500 A. l'alimentation en eau peut se faire par un dispositif d'incorporé au module d'alimentation électrique ou autonome. L'eau refroidit le conducteur en cuivre dans la gaine d'amenée, dans la buse et dans le tube de contact. Le système comporte un réservoir à eau, une pompe et un radiateur ventilé. [05].

III.4. Soudage à l'arc avec électrode enrobées (SMAW/MMA) :

Jusqu'au début des années 1980, le soudage à l'arc avec électrode fusible (MMA, Manuel Métal Arc Welding), aussi appelé soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW, Shielded Métal Arc Welding) ou soudage à l'électrode enrobée, a été le procédé le plus dominant en soudage par fusion [05].

III.4.1. Méthode :

Les électrodes se composent d'une âme et d'un enrobage. Le diamètre de l'âme varie en fonction de l'intensité de courant de soudage pour laquelle l'électrode est prévue. Pour souder, il faut qu'un arc soit amorcé entre l'électrode et la pièce à souder ; la chaleur dégagée par l'arc fait alors fondre l'électrode (qui constitue le matériau d'apport) et l'enrobage (qui forme un laitier protecteur).

III.4.2. Matériel :

- Un générateur CA ou CC.
- Une soudeuse (ou poste à souder).
- Câble de masse reliée à une prise de masse.
- Electrodes.
- Porte-électrode.
- Câble de l'électrode. [05]

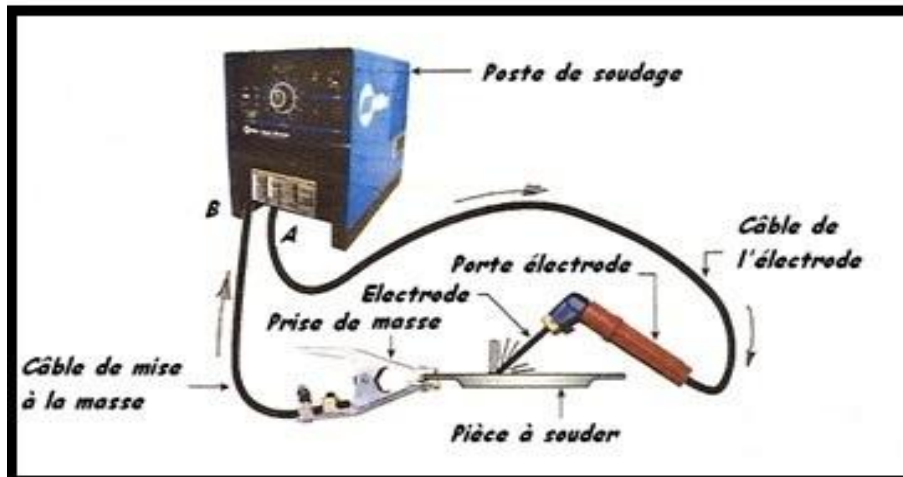


Figure 3.6 : Principe de soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.

III.4.3. Différents types d'électrode :

Une électrode enrobée est constituée par :

Une **âme métallique** de forme cylindrique et un **enrobage** ou **revêtement** de **composition chimique** très variée, qui sont :

- 1) **Acide** ou **A** (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- 2) **Basique** ou **B** (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium).
- 3) **Cellulosique** ou **C** (à base de cellulose).
- 4) **Oxydant** ou **O** (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- 5) **Rutile** ou **R** (à base d'oxyde de titane).
- 6) **Haut rendement** ou **RR** (à base de poudre métallique).
- 7) **Spécial** ou **S**.

Les électrodes enrobées utilisées couramment sont :

Rutiles pour les travaux courants ;

Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression) ;

Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position descendante.

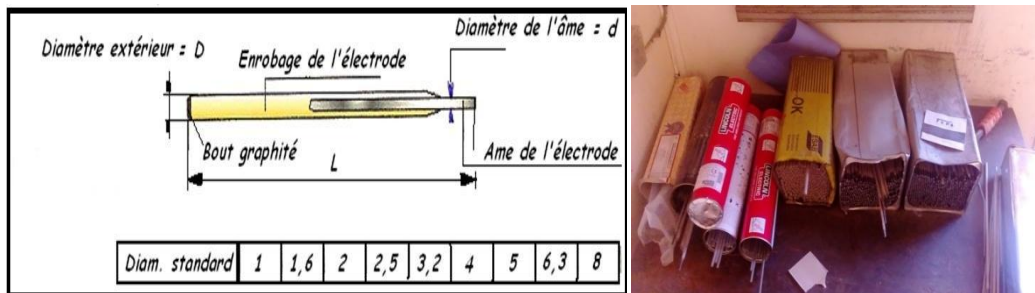


Figure 3.7 : l'électrode enrobée.

III.4.4. Rôle de l'enrobage :

L'enrobage remplit un grand nombre de **fonctions** qui peuvent en définitive se résumer à trois :

- **Rôle électrique** : l'enrobage facilite la stabilité de l'arc. L'ionisation qui se produit entre l'électrode et la pièce permet l'amorçage et le maintien de l'arc.
- **Rôle métallurgique** : l'enrobage forme, par sa fusion, un écran qui évite l'action néfaste des gaz de l'air (oxygène et azote). En outre, l'enrobage incorpore au métal fondu des éléments qui viennent remplacer ceux qui ont été volatilisés ou brûlés du fait de la haute température.
- **Rôle physique** : l'enrobage guide l'arc et lui assure une direction bien déterminée et constante. On note d'ailleurs la formation, à l'extrémité de l'électrode, d'un cratère (l'enrobage fondant moins vite que l'âme métallique) qui guide l'arc.

En outre, les corps contenus dans l'enrobage peuvent modifier la forme du dépôt.

Ainsi une électrode déterminée pourra fournir des cordons de soudure ayant la forme désirée : bombés, plats ou concaves. D'autre part, dans le soudage en position, le laitier soutient par action physique, le métal en fusion. Il retarde ainsi le refroidissement du dépôt.

III.5. Soudage à l'arc submergé (SAW) :

C'est un procédé de soudage à haut rendement. Il est surtout utilisé en mode automatique, il permet de mettre en œuvre une à trois électrodes continues consommables. Le soudage peut se faire en courant continu ou en courant alternatif.

Le soudage à l'arc submergé convient surtout au soudage de pièces importantes (soudage de plaques sur les chantiers navals, soudage longitudinal de canalisations ou de poutrelles, soudage de cuves cylindriques). Il s'utilise indifféremment pour soudage bout à bout et les soudures d'angle. Il convient aussi pour les soudures de placage (application d'une

couche d'acier inoxydable sur de l'acier au carbone ordinaire, ou d'un matériau résistant à l'usure). Ces procédés utilisant souvent des bandes des fil-électrodes (feuillard).

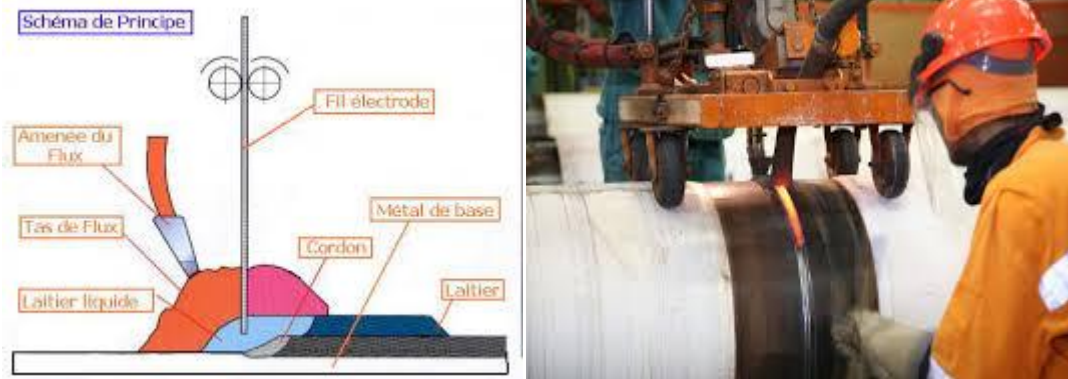


Figure 3.8 : Principe de soudage à l'arc submergé.

III.5.1. Source d'alimentation :

Les sources d'alimentation peuvent avoir une caractéristique horizontale ou une caractéristique plongeante. La caractéristique horizontale permet une bonne autorégulation de la longueur d'arc. Pour maintenir une longueur d'arc optimale, une autre solution consiste à ajuster la vitesse de dévidage de fil en fonction de la tension d'arc détectée. En utilisant des électrodes épaisses et des générateurs à caractéristique plongeante, on peut ainsi limiter la variation de courant de soudage. Il peut s'effectuer en courant alternatif ou en courant continu.

III.5.2. Matériel :

- Un générateur.
- Une soudeuse (ou poste à souder).
- Un dévidoir.
- Une goulotte achemine le flux depuis le bac à flux vers le point de soudage.
- Buse d'injection.
- Bobine de fil-électrode.

IV. Procédés de soudage par pression :

Dans toutes les variantes du soudage par pression, les pièces à souder sont pressées l'une contre l'autre. Le forgeage traditionnel peut être considéré comme une forme de soudage par pression consistant à chauffer au rouge le métal dans un feu de forge afin de l'assouplir et de pouvoir le forger. Dans certains cas (p.ex. le soudage par points), les pièces à assembler sont

chauffées jusqu'à leur point de fusion par effet joule alors que, dans d'autres, la soudure se fait sans apport de chaleur significatif.

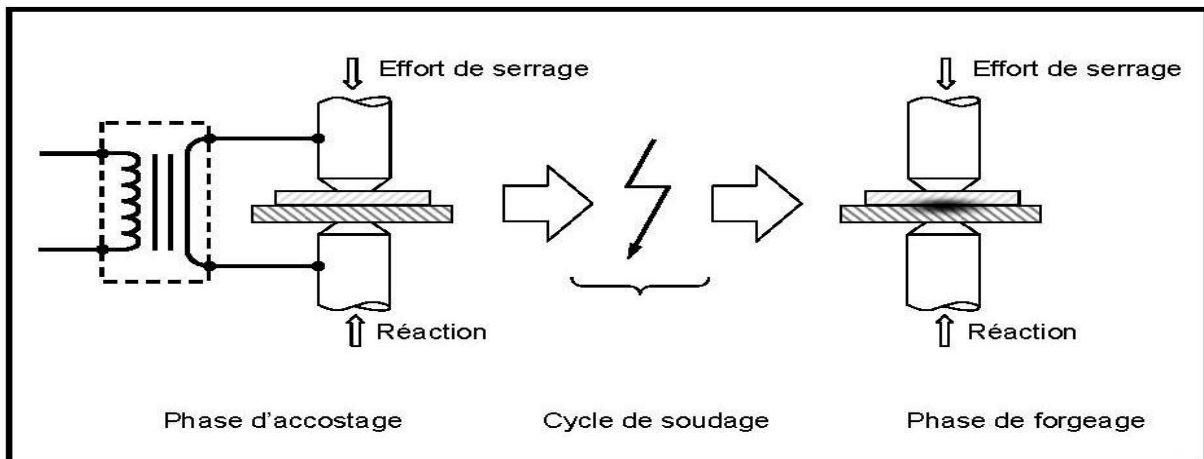


Figure 4.1 : Principe de soudage par pression.

IV.1. Soudage par résistance :

Le soudage par résistance est l'un des procédés les plus anciens. Il utilise comme source de chaleur les effets d'un courant électrique de forte intensité, entre 1000 et 100000 A, et d'une tension souvent comprise entre 1 et 30 V, traversant l'assemblage. L'intensité du courant est telle qu'un bain de métal en fusion se forme, en soudant les deux parties.

On distingue cinq types de soudage par résistance :

- Le soudage par point.
- Le soudage molette.
- Le soudage par bossage.
- Le soudage en bout par résistance.
- Le soudage par étincelage.



Figure 4.2 : Soudage par résistance.

IV.2. Soudage par friction :

Le soudage par friction, qui s'apparente au soudage par forgeage, n'implique pas la fusion complète des pièces assemblées. La pression et la friction exercées sur les pièces à souder entraînent un échauffement au point de contact. Ce procédé, convient parfaitement au soudage de pièce à symétrie cylindrique. Initialement, la friction était générée par un mouvement de rotation rapide des pièces à souder les unes par rapport aux autres tandis qu'un effort leur était appliqué, mais des récentes innovations technologique permettent de générer la friction nécessaire au moyen d'un outil externe.



Figure 4.3 : Le soudage par friction.

Types de soudage par friction :

Soudage par friction avec rotation d'une des pièces à souder, dépôt par friction, soudage par friction malaxage.

IV.3. Soudage à haut fréquence :

Ce procédé de soudage est considéré comme un type de soudage par résistance puisque la chaleur est fournie par le chauffage par résistance d'un courant traversant les pièces à souder. L'utilisation d'une très haute fréquence (p.ex. 400KHz) permet de concentrer le courant à proximité de la surface des pièces à souder (l'effet de peau) ou dans certaines parties des pièces à proximité d'un conducteur de courant (effet de proximité). Dans les deux cas, on peut circonscrire l'apport de chaleur aux parties à assembler.

La soudure finale est réalisé en pressant les deux pièces l'une contre l'autre.

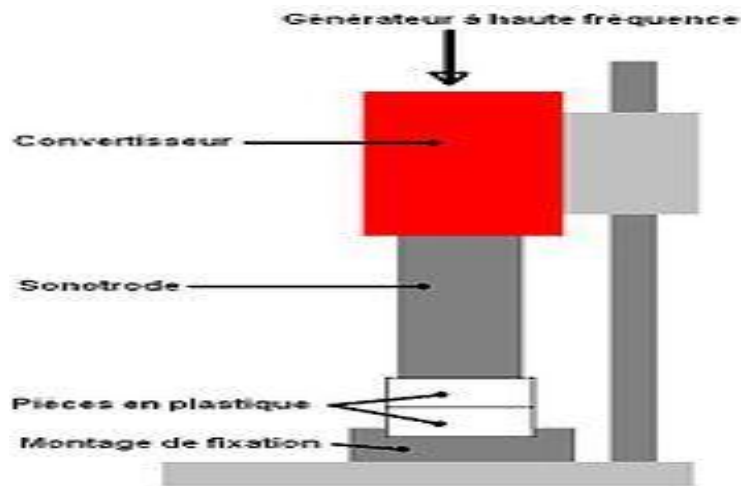


Figure 4.4 : Principe de soudage haut fréquence.

V. Soudage par ultrasons :

Le soudage par ultrasons permet d'assembler des pièces en les faisant vibrer l'une contre l'autre à haute fréquence et sous pression. L'équipement ressemble beaucoup à celui utilisé par le soudage par résistance, à ceci près que l'énergie est fournie par des vibrations et non pas par courant électrique.

Il est idéal pour assembler des tôles minces, des feuilles ou câbles. Les pièces à assembler doivent être relativement petites et l'une au moins (celle qui sera mise en vibration) ne doit pas dépasser quelques millimètres. Cette méthode est notamment utilisée pour souder des connexions électriques en aluminium ou en cuivre ou encore des conducteurs très fins.

Produisant peu de chaleur, elle est idéale pour souder des composants dans les équipements électroniques sensibles.

La présence d'une couche d'oxyde ou d'isolant n'empêche pas le contact entre les pièces, mais les surfaces doivent avoir été préalablement dégraissées car la graisse agit comme lubrifiant et altère la qualité.

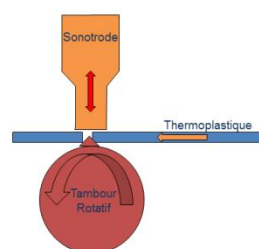


Figure 51. : Principe de soudage ultrasons des polymères thermoplastiques.

VI. Soudage par explosion (EXW) :

Il consiste à fournir une très haute pression pendant un court instant. Les pièces à souder sont mise en contact à haute vitesse de telle manière que l'énergie d'impact leur fait atteindre un état plastique et produit un joint de qualité.

Cette méthode est souvent utilisée pour assembler des matériaux métallurgiquement dissemblables. Il est par exemple possible d'assembler l'aluminium à l'acier, sur lequel on peut ensuite mettre en œuvre des procédés traditionnels de construction (p.ex. la superstructure en aluminium d'un bateau sur une coque d'acier.

Le soudage des grandes pièces par explosion doit être réalisé sur des sites spécifiques. Cette méthode est utilisée principalement pour préparer des flans ou des billettes, mais peut également être utilisée pour souder des tuyaux entre eux ou pour assembler des tubes sur des plaques tubulaires.

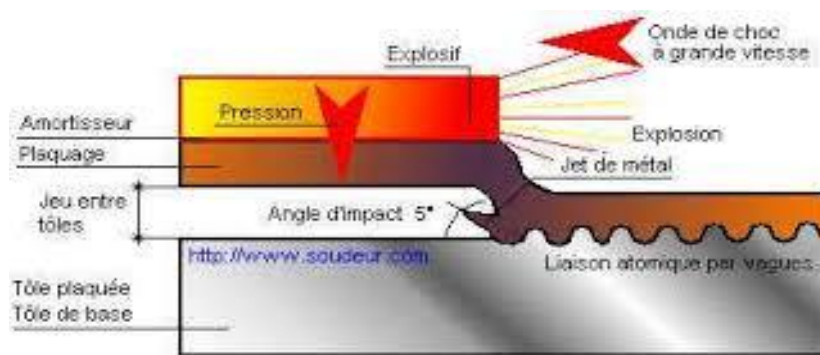


Figure 6.1 : Principe de soudage par explosion.

VII. Soudage par diffusion (DBW) :

Est un procédé de soudage sans fusion ni déformation. Réalisé sous vide ou sous atmosphère inerte, il consiste à appliquer une pression et une température élevée pendant une période relativement longue. De grandes pièces peuvent être assemblées ainsi à condition que les surfaces à assembler soient propres, planes et usinées avec précision. On peut ainsi, par exemple, produire un disque d'acier à outil comportant un circuit de refroidissement intégré en soudant un disque de couverture sur un disque comportant les rainures appropriées.

Le soudage par diffusion peut être utilisé pour assembler tous types de matériaux, différents métaux entre eux et des métaux avec des non-métaux. Cependant, quand il s'agit de

matériaux différents, on améliore souvent la qualité du soudage en incorporant une couche intermédiaire entre les deux couches externes différentes.

VIII. Soudage au gaz :

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) est l'un des procédés de soudage les plus anciens et a longtemps été le plus répandu. Beaucoup moins utilisé aujourd'hui, il a toujours le triple avantage de sa **polyvalence**, de sa **simplicité de mise en œuvre** et du **faible coût** du matériel nécessaire. Il convient parfaitement pour les travaux de réparation ou de construction ou encore pour le soudage de tubes et de structures faits de matériaux (comme la fonte) particulièrement sujets à la fissuration, avec des parois de 0,5 à 6 mm d'épaisseur. Il est également très utilisé pour la soudure de métaux non ferreux ainsi que pour le placage ou le rechargement dur, mais aussi pour le coupage, le chauffage et le redressage à la flamme.

L'apport de chaleur est fourni par la combustion d'acétylène dans l'oxygène. La température de la flamme atteint environ 3 100 °C. Cette température est inférieure à celle de l'arc et la chaleur est moins concentrée. Le soudeur dirige la flamme sur les surfaces du joint, qui fondent. Un métal d'apport peut alors être ajouté selon le besoin. Le bain de fusion est protégé de l'air par la zone réductrice et par la zone secondaire de la flamme. Il faut par conséquent retirer la flamme progressivement à la fin de l'opération de soudage.

La flamme étant moins concentrée, le refroidissement est plus lent, ce qui constitue un avantage certain lorsqu'on soude des aciers, qui ont tendance à durcir. Mais, en même temps, le processus étant relativement lent, l'apport de chaleur est plus important et les risques de tensions thermiques et de déformation augmentent.



Figure 8.1 : Equipement de soudage au gaz.

VIII.1. Matériel :

A. Bouteilles de gaz :

Les bouteilles de gaz inflammables doivent être stockées en extérieur ou dans des espaces bien ventilés. Une signalisation spécifique doit être prévue à l'extérieur de la zone de stockage. Les bouteilles d'acétylène (C_2H_2) doivent être soigneusement séparées.

B. Manomètres-détendeurs/régulateurs :

Le gaz est stocké dans une bouteille à haute pression (cette pression varie selon le remplissage). Le détendeur-régulateur débite le gaz à la pression d'utilisation et assure un débit constant en dépit des variations de contre-pression dues au réchauffement de la torche de soudage.



Figure 8.2 : Manomètres-détendeurs/régulateurs de débit.

C. Flexibles à gaz :

Les tuyaux à gaz (flexibles) sont de couleur rouge pour l'acétylène et bleue pour l'oxygène (O_2). Pour éviter les erreurs de branchement, le raccord d'acétylène est fileté à gauche, alors que le raccord d'oxygène est fileté à droite.

D. Dispositifs anti-retour de flamme :

Un dispositif anti-retour de flamme fixé sur le régulateur arrête le front de flamme et empêche la flamme d'atteindre la bouteille d'acétylène et de provoquer une explosion.

E. Torches de soudage :

Il existe deux types de torches de soudage : le chalumeau basse pression (BP), pour l'acétylène basse pression et le chalumeau haut pression (HP). Avec le chalumeau à basse pression, l'oxygène sortant d'un injecteur central à certaine vitesse entraîne l'acétylène amené par un manchon extérieur. Le mélange se fait dans le mélangeur.

Avec le chalumeau haut pression, l'acétylène et l'oxygène se mélangent dans le mélangeur du chalumeau où ils sont admis sous la pression fournie par les bouteilles de stockage.

VIII.2. Types de flammes :

Pour obtenir un soudage de qualité, il faut que la taille et le type de la flamme conviennent au travail à effectuer.

La longueur de la flamme dépend du diamètre du bec et de la pression du gaz (donc, du débit). La pression du gaz doit rester dans des limites bien définies. Si elle est trop élevée, le jet sera important et la flamme sera << dure >>. Si elle est trop basse, le jet sera réduit et la flamme sera trop << douce >>.

On distingue trois types de flamme en fonction de leur influence chimique sur le bain de fusion :

- **Flamme neutre :**

La flamme neutre (normale) est la plus couramment utilisée. Elle est facilement reconnaissable par ses trois zones de combustion bien distinctes : la zone dard (ou primaire),

la zone active (ou seconde), la zone panache (ou troisième) : $d = \frac{O_2}{C_2H_2} \approx 1 \dots 1,2$.

- **Flamme carburante :**

Si on augmente la proportion d'acétylène par rapport à une flamme normale, la quantité d'oxygène disponible ne suffit plus pour permettre la combustion de ce surplus dans le dard. L'acétylène atteint donc la deuxième zone, où sa combustion donne une flamme blanc jaunâtre éblouissante. D'une certaine manière, la longueur de cette zone donne la mesure de

l'excédent d'acétylène : $d = \frac{O_2}{C_2H_2} < 1$.

- **Flamme oxydante :**

Si, à l'inverse, on augmente la proportion d'oxygène par rapport à la flamme normale, on obtient une flamme oxydante. Le dard se raccourcit, ainsi que le panache, et la flamme devient bleuâtre et peu lumineuse : $d > 1$.

VIII.3. Quelques avantages de soudage à gaz :

- Réduction du risque de trempe grâce à la possibilité d'obtenir une température homogène dans le joint et donc un réchauffement et un refroidissement lent ;
- Possibilité de soudage bout à bout de métaux d'une épaisseur allant jusqu'à 6mm.
- Rapidité d'exécution : parfois une passe suffit ;
- Bonne maîtrise de mélange : l'opérateur peut assurer visuellement à tout moment que le bain de fusion présente la forme de goutte voulue ;
- Facilité de réduire la taille de la ZAT en entourant la zone de soudage d'un matériau humide (non inflammable) ;
- Facilité de transport de matériel.

IX. Autre procédés de soudage :

IX.1. Soudage vertical sous laitier (ESW) :

Le soudage vertical sous laitier est un procédé de soudage mécanisé qui permet de réaliser des soudures verticales ou quasi verticale avec un angle maximal de 15° par rapport à la verticale. On l'utilise pour souder des matériaux très épais, à partir de 40 mm, mais il peut également être mis en œuvre pour des matériaux moins épais.

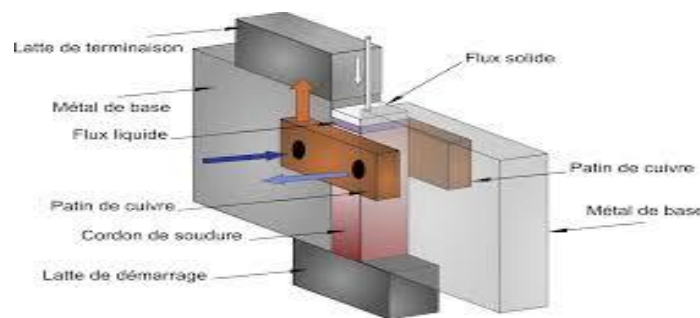


Figure 9.1 : Principe de soudage vertical sous laitier.

IX.1.1. Avantages de Soudage vertical sous laitier (ESW) :

- Productivité élevé ;
- Faible coût de préparation de joints ;
- Soudage en une seule passe, quelle que soit l'épaisseur de la plaque ;
- Absence de déformation angulaire pour les joints bout à bout ;
- Faible risque de fragilisation par l'hydrogène ;

Cette méthode présente un inconvénient :

- L'apport de chaleur étant très élevé, la soudure et la ZAT refroidissent lentement. La croissance de grain dans la ZAT est donc importante. Le matériau de base n'est pas suffisamment résistant dans la ZAT pour satisfaire aux exigences de résilience imposées pour les structures soudées.

IX.2. Soudage électrogaz (EGW) :

C'est un dérivé du soudage vertical sous laitier, auquel il ressemble dans sa conception et son utilisation, à ceci près que la soudure est protégée par un gaz (comme dans le procédé MIG/MAG) et non pas par un bain de laitier. D'autre part, pour faire fondre le fil d'apport, on utilise la chaleur dégagée par l'arc plutôt que celle du chauffage par résistance. Le soudage électrogaz est utilisé pour souder des pièces d'une épaisseur de 12 à 10 mm.

Pour les plaques plus épaisses, on imprime à la tête de soudage un mouvement d'oscillation. Les joints sont généralement préparés sous la forme de simples joints bout à bout, avec écartement des bords. Cependant les joints en V sont également possibles. Pour réaliser des joints verticaux sur des objets tels que de grosses cuves, ce procédé est bien plus économique que le soudage manuel MIG/MAG.



Figure 9.2 : Soudage électrogaz.

Les fils-électrodes utilisés peuvent être pleins ou tubulaires, comme pour les autres types de soudage à l'arc sous protection gazeuse, et les gaz de protection sont les mêmes.

La ZAT est plus réduite et la résilience plutôt meilleure. En augmentant la longueur libre du fil-électrode, on augmente la vitesse de soudage et on réduit la fusion du matériau de la pièce à souder et l'apport thermique globale.

IX.3. Soudage de goujons (SW) :

Le terme <<*soudage de goujons*>> désigne différentes méthodes permettant de fixer des boulons, des goujons, etc. sur une pièce support. Le soudage de goujons présente, par rapport au perçage et au taraudage, le double avantage de la rapidité et la facilité. La méthode la plus courante consiste à utiliser un arc pour apporter aux pièces à souder une chaleur brève mais intense, qui fait fondre la surface des pièces à assembler. Un pistolet à souder spécial permet de positionner le boulon ou le goujon. On peut ainsi souder des boulons ou des goujons en acier jusqu'à 25 mm de diamètre. Ce procédé est utilisable pour des pièces en acier inoxydable, en cuivre ou en laiton. Pour l'aluminium, on utilise la méthode de décharge de condensateur.



Figure 9.3 : Soudage des goujons.

IX.4. Soudage laser (LBW) :

La lumière laser possède plusieurs propriétés spécifiques : elle est notamment parallèle et fortement concentrée. Elle peut donc être transportée par un jeu de miroirs ou de fibre de verre, jusqu'à un site de soudage éloigné du bloc d'alimentation. Elle est également monochromatique, c'est-à-dire que chaque type de laser a une longueur d'onde fixe.

Le faisceau laser est focalisé, à l'aide d'une lentille ou de miroirs, en un point d'un diamètre de quelque dixième de millimètres, pour obtenir une haute densité d'énergie. La tache focale est positionnée sur la surface de la pièce à souder (ou légèrement en dessous). Le matériau fond immédiatement et se vaporise même en partie. Le métal vaporisé, situé dans le capillaire ou trou de serrure, forme un plasma capable d'absorber la lumière incidente et qui améliore ainsi l'absorption d'énergie et donc l'efficacité du procédé. On utilise un gaz de protection pour empêcher l'air de réagir avec le matériau et pour protéger la lentille contre les projections et les vapeurs.

Le passage de faisceau interrompe l'apport de chaleur, puisque la zone chauffée est réduite, le métal se solidifie rapidement. En conséquence, la taille de la ZAT est également réduite, et la distorsion est négligeable. La pénétration de la soudure dépend de la puissance de sortie du laser. Aucun matériau d'apport n'est nécessaire, excepté pour le soudage hybride.

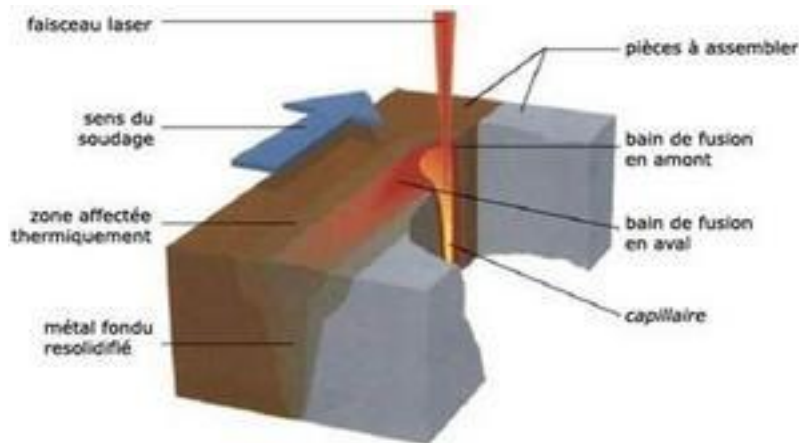


Figure 9.4 : Principe de soudage laser.

IX.5. Soudage par faisceau d'électrons (EBW) :

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé de soudage par fusion où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis et accélérés par un canon à électrons. L'émission, l'accélération et le trajet des électrons se fait sous vide.

La caractéristique essentielle d'un faisceau d'électrons réside dans la possibilité de concentrations extrêmes d'énergie, jusqu'à $2\,500\text{ kW} / \text{mm}^2$. Sous cette forme, un faisceau d'énergie peut pénétrer et souder presque instantanément plus de 200 mm d'épaisseur de métal.

Généré sous vide, le faisceau d'électrons porte à la fusion les matériaux et alliages à assembler et réalise la liaison sans apport de matière, de pièces finies ou semi-finies d'usinage.

Dans un contexte de raréfaction et de surenchérissement des matières premières, l'intérêt économique de ce procédé se démontre donc : il permet de réduire la quantité d'alliages coûteux utilisés pour la fabrication de certaines pièces.

L'environnement sous vide lors du soudage permet de plus une protection parfaite des pièces contre l'oxydation, ce qui est essentiel pour la haute qualité de la soudure.

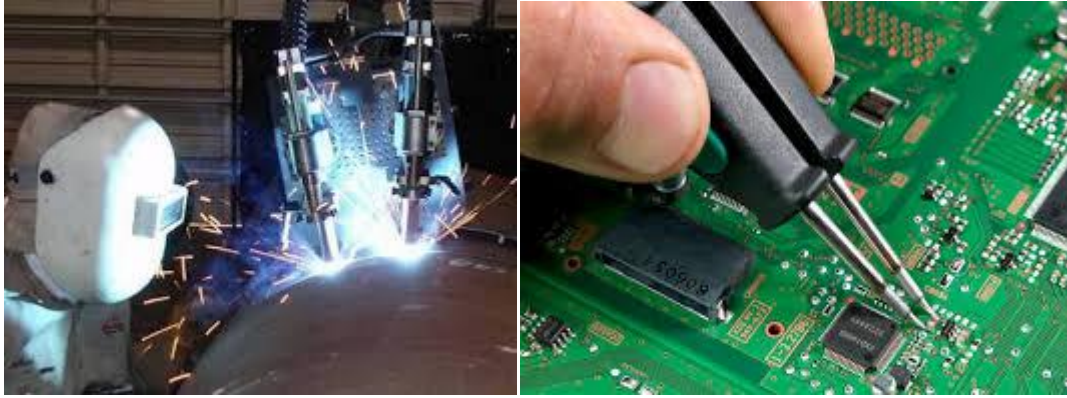


Figure 9.5 : Soudage par faisceau d'électrons.

IX.6. Soudage aluminothermique (TW) :

Une réaction exothermique est provoquée au sein d'un mélange approprié d'oxydes métalliques et d'agents réducteurs maintenu entre les bords de pièces à assembler. Une fois la réaction amorcée, le mélange exothermique et les bords des pièces entrent en fusion et forment le joint soudé, contenu généralement dans une coquille réfractaire.



Figure 9.6 : Soudage aluminothermique.

X. Récapitulatif des procédés de soudage :

La numérotation selon la norme **ISO 4063** :

Tableau 10.1 : Récapitulatif des procédés de soudage :

No	SIGLE	DÉSIGNATION FRANÇAISE	DÉSIGNATION ANGLAISE
111	ARC E.E. / SMAW / MMA	Soudage à l'arc avec électrodes enrobées	Shielding Metal Arc Welding or Metal Manual Arc
121	A.S.F/ SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec fil électrode	Submerged Arc Welding
131	MIG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec fil électrode fusible	Metal Inert gas or Gas Metal Arc Welding
135	MAG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fusible	Metal Active gas or Gas Metal Arc Welding
141	TIG / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène	Gaz Tungsten Arc Welding
15	PLASMA / PAW	Soudage à l'arc électrique au plasma	Plasma Arc Welding
45	POINT / RSW	Soudage par résistance par point	Resistance Spot Welding
71	ALUMINOTHERMIE / TW	Soudage aluminothermique	Alumino-Thermic Welding
72	VERTICAL SOUS LAITIER/ ESW	Soudage vertical sous laitier	Electroslag Welding
73	VERTICAL SOUS GAZ / EGW	Soudage vertical sous gaz de protection	Electrogas Welding
52	LASER / LBW	Soudage par faisceau laser	Laser Beam Welding
51	FAISCEAU ELECTRONS /EBW	Soudage par faisceau d'électrons	Electron Beam Welding
781	GOUJON / SW	Soudage à l'arc de goujons	Stud Arc Welding

XI .Conclusion :

En chantiers de construction (naval, aéronautique, pétrolier,...etc.), avant d'entamer le soudage, il est important et obligatoire de qualifier le procédé de soudage selon des normes spécialisées.

Connaître et maîtriser un procédé de soudage mène à bien exploiter ces avantages éviter ou optimiser ces inconvénients tel que réduire le temps d'exécution, le coût de l'exploitation et surtout éviter les défauts de soudage.

CHAPITRE III :

Défauts de soudage métallique

I. Introduction :

L'assemblage par soudage est souvent engendré par plusieurs types de défauts de soudure indésirables. Ce chapitre vise à décrire et faire connaître ces différents défauts, ainsi que quelques critères d'acceptabilité ou de refus lors d'inspection de cordon de soudure selon des normes spécialisées en soudure et radiographie de soudure tel que les standards : **API 1104** et **ASME IX**.

I.1. Termes et définitions :

I.1.1. Défaut de soudure :

Une imperfection d'une magnitude en soudage, suffisante pour justifier un rejet selon les stipulations des normes spécialisées en qualité de soudage et contrôle qualité. [12]

I.1.2. Indication :

Preuve obtenue au moyen d'essais non destructifs. [12]

(P.ex. par gammagraphie).

I.1.3. Réparation :

Toute réfection d'une soudure réalisée qui exige une correction d'un défaut découvert par contrôle non destructif ou examen visuel et sortant du cadre des limites d'acceptation de la norme spécialisé en qualité de soudage et contrôle qualité (p.ex. API 1104). [12]

II. Types de défauts :

II.1. Défauts de pénétration :

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multipasses, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé.

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure.

II.1.1. Manque de pénétration sans dénivellation :

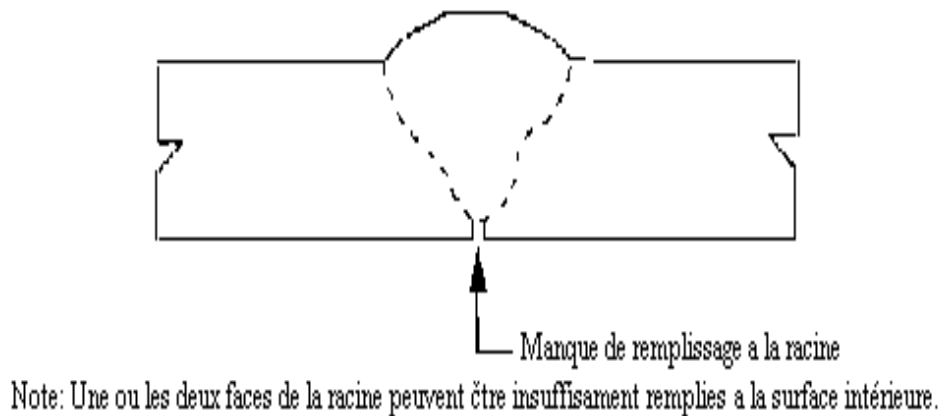


Figure 2.1 : Manque de pénétration sans dénivellation [11].

Inacceptable si :

- Sur une longueur de 305 mm (12"), la somme des longueurs individuelles dépasse :
 - 8% de la longueur de la soudure pour les soudures d'une longueur inférieur à 305 mm (12").
 - 25,4 mm (1") pour les autres soudures. [10]

II.1.2. Manque de pénétration avec dénivellation :

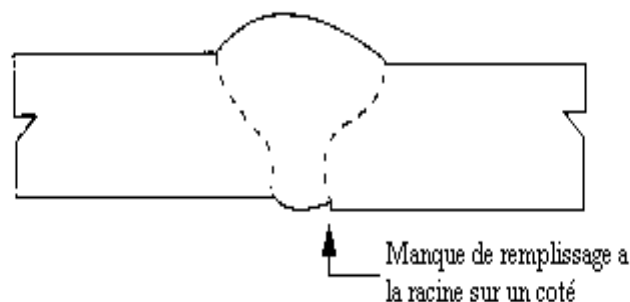


Figure 2.2 : Manque de pénétration due à un dénivellation [11].

Inacceptable si :

- La longueur d'une indication individuelle dépasse 50,8 mm (2").
- Sur une longueur de 305mm (12"), la somme des longueurs individuelles dépasse 76,2 mm (3"). [10]

II.2. Défauts de fusion ou collage :

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure. Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut. Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons gamma(γ) ou X puisqu'il n'a que deux dimensions. On le retrouve plus fréquemment avec le procédé MIG/MAG. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.

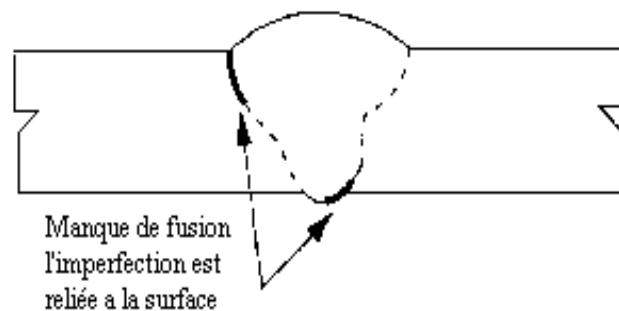


Figure 2.3: Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint [11].

II.2.1. Manque de fusion ouvert à la surface :

Inacceptable si :

- La longueur d'une indication individuelle dépasse 25,4 mm (1").
- Sur une longueur de 305 mm (12"), la somme des longueurs individuelles dépasse :
 - 8% de la longueur de la soudure pour les soudures d'une longueur inférieur à 305 mm (12").
 - 25,4 mm (1") pour les autres soudures. [10]

II.2.2. Manque de fusion interne :

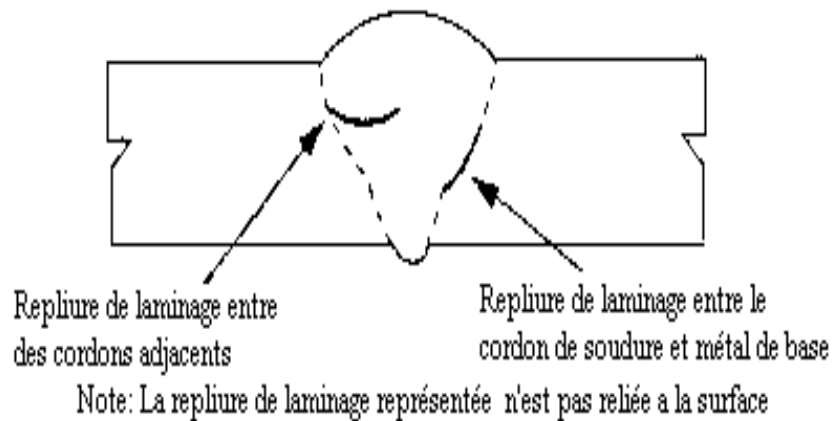


Figure 2.4: Manque de fusion dû à un collage de point froid [11].

Inacceptable si :

- La longueur d'une indication individuelle dépasse 50,8 mm (2").
 - Sur une longueur de 305mm (12"), la somme des longueurs individuelles dépasse 50,8 mm (2").
 - La somme des longueurs individuelles dépasse 8 % de la longueur de soudure.
- [10]

II.3. Les inclusions :

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger. On distingue différents types d'inclusions :

II.3.1. Inclusion solide :

Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (p.ex. : poussières).

II.3.2. Inclusion de laitier :

Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.

Des inclusions de laitier alignées parallèles, séparées par une distance égale à la largeur de la première passe seront considérées comme une seule indication, sauf si la largeur de l'inclusion dépasse quelque part 0,8 mm (dans ce cas elles sont considérées a part).

A. Tube avec diamètre extérieur supérieur ou égal à 60,3 (23/8 ") :❖ **Laitier allongé :****Inacceptable si :**

- La longueur totale, pour une longueur de soudage égale à 305 mm (12"), dépasse 50 mm (2").
- La largeur d'une indication dépasse 1,6 mm (1/6"). [10]

❖ **Laitier isolé :****Inacceptable si :**

- La longueur totale, pour une longueur de soudure égale à 305 mm (12"), dépasse 12,7 mm (1/2").
- La largeur d'une indication dépasse 3,2 mm (1/8").
- Plus de quatre (4) indications d'une largeur maximale de 3,2 mm (1/8"), pour une longueur de soudure égale à 305 mm (12"). [10]

B. Tube avec diamètre extérieur inférieur à 60,3 (23/8 ") :❖ **Laitier isolé :****Inacceptable si :**

- La longueur dépasse trois fois (3 x) l'épaisseur à nominale du tube le plus petit.
- La largeur dépasse 1 mm (1/6"). [10]

❖ **Laitier allongé :****Inacceptable si :**

- La longueur totale dépasse deux fois (2 x) l'épaisseur nominale du tube.
- La longueur dépasse le demi (1/2) l'épaisseur nominale du tube le plus petit. [10]

II.3.3. Inclusion de flux :

Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.

II.3.4. Inclusion d'oxyde :

Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification.

II.3.5. Inclusion métallique :

Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (p.ex. : le tungstène lors du soudage TIG, le cuivre et tout autre métal étranger).

II.4. Soufflures ou inclusion de gaz :

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface).

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

II.5. Inclusion de gaz, soufflures dispersées :

C'est des bulles d'air dispersées dans le cordant de soudure.

Inacceptable si :

- Leur dimension maximale dépasse 3,2 mm (1/6") ou un quart (1/4) de l'épaisseur nominale du tube le plus petit.
- Leur distribution en nombre ou en grandeur dépasse celle montrée dans les cartes de porosité. [10]

II.6. Nids de soufflures :

C'est des bulles d'air superficiel et parfois débouchantes.



Figure 2.5 : Nids de soufflure.

II.6.1. Dans la passe de finition :

Inacceptable si :

- Le diamètre du nid dépasse 12,7 mm (1/2").
- La longueur totale, pour une longueur de soudure 305 mm (12") dépasse 12,7 mm (1/2").
- Dans le nid, on trouve des porosités dont le diamètre dépasse 1,6 mm (1/16"). [10]

II.6.2. Dans les autres passes :

Même critères d'acceptation que l'inclusion de gaz, dispersées (voir paragraphe V.1).

II.7. Soufflures vermiculaires dans la première passe :

Inacceptable si :

- La longueur individuelle dépasse 12,7mm (1/2").
- La longueur totale, pour une longueur de soudure de 305 mm (12"), dépasse 50,8 mm (2").
- La distance entre deux vermiculaires plus longues que 6,35 mm (1/4"), est inférieure à 50,8 mm (2"). [10]

II.8. Groupe de soufflures et soufflure alignés :

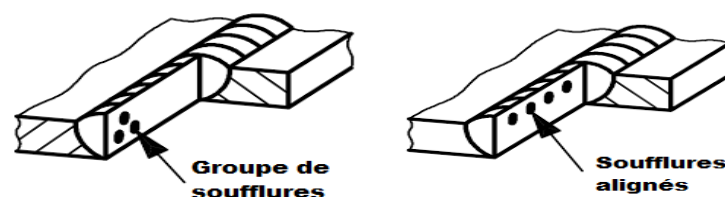


Figure 2.6 : Groupe de soufflures et soufflures alignés.

Non acceptable dans tous les cas.

II.9. Les fissurations :

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes dans le métal soudé.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison, ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : **la fissuration à chaud** et **la fissuration à froid**.

II.9.1. Fissuration à chaud :

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large (c'est des aciers austénitiques).

II.9.2. Fissuration à froid :

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

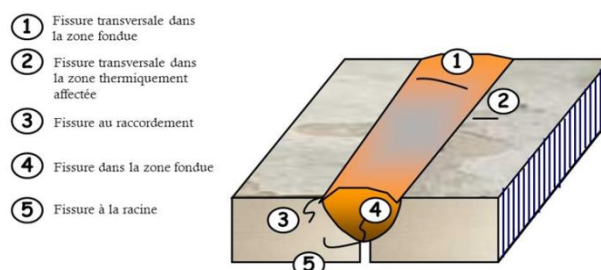


Figure 2.7 : Position des fissures à froid.

II.9.3. Les causes et moyens de préventions des fissures :**Tableau 2.1 : Les causes des fissures et les moyens des préventions.**

	Causes	Moyens de prévention
Fissuration à chaud	<ul style="list-style-type: none"> • Joints trop étroits • Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) • Métal d'apport incompatible avec le métal de base • Cordon trop petit • Trop de retrait durant ou après le soudage 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne mesure des angles des chanfreins • Préchauffage et chauffage en cours de soudure • Bon choix du métal d'apport • Refroidissement lent • Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) • Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin • En cas de retrait, léger retour en arrière et ajustement de la procédure de soudage
Fissuration à froid	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogène coincé dans la soudure • Tensions internes résiduelles importantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Préchauffage et chauffage en cours de soudure • Refroidissement lent • Utilisation d'électrodes basiques • Entreposage des électrodes dans un four, au chaud • Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) • Dessoudage (au besoin)

NB :

Uniquement les fissures de cratère, dont la longueur ne dépasse pas 4 mm (5/23") sont acceptables. Les autres fissures sont toujours inacceptables. [10]

II.10. Retassures et criques de solidification :

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une **retassure à la racine** apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une **retassure de cratère** est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

Si le noircissement mesuré sur la concavité ne dépasse pas le noircissement mesuré sur la tôle la plus mince, la concavité **est acceptable**.

Sinon, l'acceptabilité sera jugée sur base des critères "effondrement du bain à la passe de pénétration". [10]

II.11. Morsures et caniveaux :

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base. Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

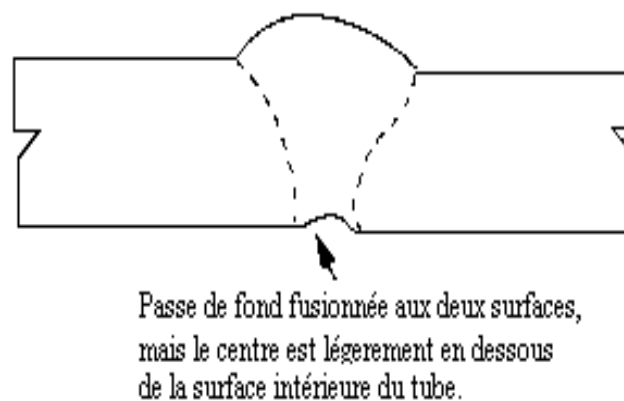


Figure 2.8 : Retassure à la racine (causé par une concavité interne) [11].

Les morsures sont **inacceptables** si :

- La somme de leurs longueurs dépasse 50,8 mm (2"), pour une longueur de soudure égale à 305 mm (12").

- La somme de leurs longueurs dépasse un sixième (1/6) de la longueur totale de la soudure [10]



Figure 2.9 : Défauts de caniveaux.

❖ Critères d'acceptation pour le contrôle visuel des morsures :

Tableau 2.2 : Critères d'acceptation pour le contrôle visuel des morsures [10].

Dimensions maximales des morsures	
Profondeur < 0,4 mm (1/64") ou < 6 % d'épaisseur du tube	Longueur toujours acceptable
> 0,4 mm (1/64") ou > 6 % à 12,5 % d'épaisseur de tube.	50,8 mm (2") par 305 mm (12") de la longueur de soudure ou 1/6 de la longueur de soudure totale est acceptable.
< 0,8 mm (1/32) ou < 12,5 % d'épaisseur de tube.	Inacceptable

II.12. Effondrements et trous :

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements :

Effondrement en corniche, effondrement à plat ou au plafond, effondrement d'angle de la soudure et effondrement d'arête.

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou. Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque

de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort.

Quant aux trous, c'est des défauts de perçage qui apparaissent parfois dans la racine de cordon de soudure.

II.12.1. Critères d'acceptation des perçages à la racine :

Si le noircissement de l'image radiographique associée au perçage dépasse celui du métal de base, de la tôle la plus mince, les critères suivants sont d'application. Si ce noircissement ne dépasse pas celui du métal de base, la discontinuité sera acceptable.

A. Diamètre extérieur du tube supérieur à 60,3 mm (23/8 ") :

Inacceptable si :

- La dimension maximale dépasse 6,35 mm (1/4") ou l'épaisseur de la paroi du tube le plus mince.
- La somme des dimensions maximales de plusieurs défauts dépasse 12,7 mm (1/2") pour toute longueur de soudure de 305 mm (12") au toute la soudure si celle-ci est plus petite que 305 mm.

B. Diamètre extérieur du tube inférieur à 60,3 mm (23/8 ") :

Inacceptable si :

- La dimension maximale d'une indication dépasse 6,35 mm (1/4") ou l'épaisseur de la paroi du tube le plus mince.
- Plus d'une indication de ce type est présente.

II.13. Défauts géométriques du cordon :

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave.

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées. Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé ou continu.

L'angle du raccordement du cordon, pour les cordons convexes, ne doit jamais excéder 30°. Un manque de mouillage du cordon peut entraîner un angle de raccordement trop élevé.

Le tableau suivant résume les causes associées aux défauts d'un cordon de soudure ainsi que les moyens de les prévenir.

Tableau 2.3 : Les causes de défauts d'un cordon de soudure et les moyens de les prévenir.

Aspect du cordon	Causes possibles	Moyens de prévention
Trop large	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avance trop lente • Mauvais angle de soudure • Arc trop long 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la vitesse • Corriger l'angle • Rapprocher la torche (ou l'électrode).
Trop étroit	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avance trop rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la vitesse.
Irrégulier	<ul style="list-style-type: none"> • Intensité du courant trop faible • Mauvais angle de soudure • Arc irrégulier • Mouvements du soudeur non stables 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter l'intensité. • Corriger l'angle. • Vérifier que le métal de base et l'électrode sont propres, que l'électrode est appropriée, que le courant est constant, que la haute fréquence fonctionne et qu'il n'y a pas de matériel magnétique près de l'arc. • S'assurer que la vitesse d'avance et la longueur d'arc sont stables et ne varient pas.

A. Débordement de cordon :

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier.

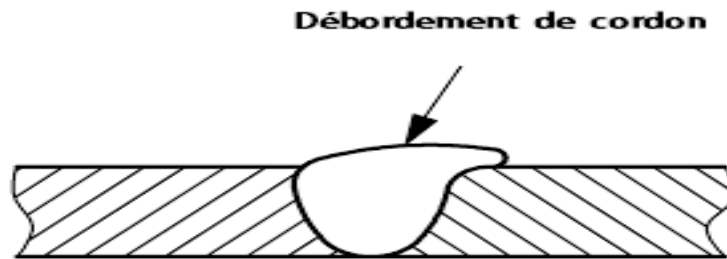


Figure 2.10 : Débordement de cordon de soudure.

B. Les projections :

Une projection est une éclaboussure de métal en fusion projeté pendant le soudage et qui adhère au métal de base ou au cordon déjà solidifié. Les projections peuvent être causées par un courant trop fort, un arc trop long ou le soufflage de l'arc. Un mauvais débit et certains gaz de protection peuvent aussi favoriser l'apparition de projections.

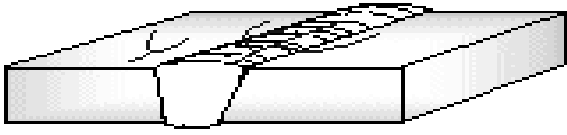
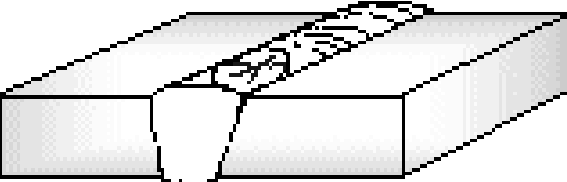
III. Groupage des défauts de soudures :

Les numéros réfèrent à l'ISO 6520-82 :

III.1. Groupe 1 : Les fissures :

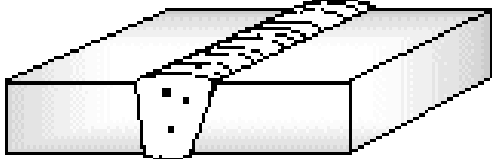
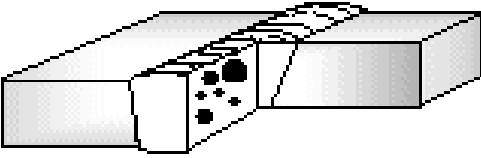
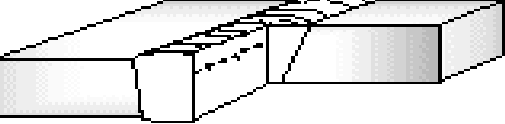
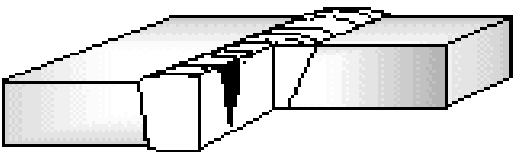
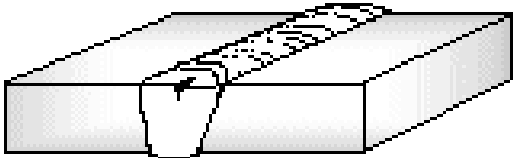
Tableau 3.1: Symboles et numérotation utilisés pour les fissures.

Symbole	Intitulé de défaut	Le schéma de défaut	Numéros de référence
Ea	Fissure longitudinale		101
Eb	Fissure transversale		102

Ed	Fissure en étoile de		103
Ec	Fissure de cratère		104

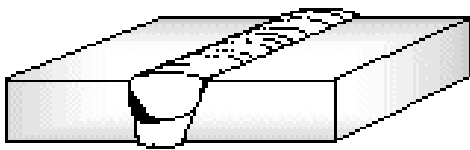
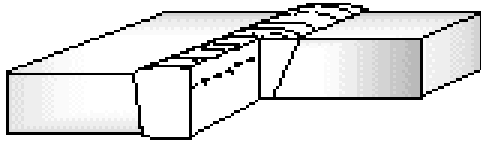
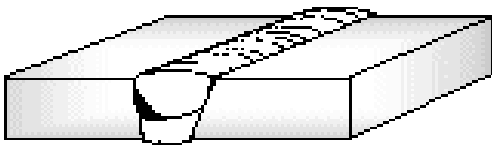
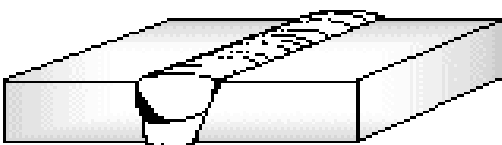
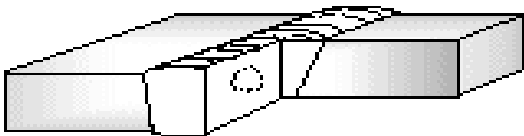
III.2. Groupe 2 : Les cavités :

Tableau 3.2: Symboles et numérotation utilisés pour les cavités.

Symbole	Intitulé de défaut	Le schéma de défaut	Numéros de référence
Aa	Soufflures Sphéroïdales		2011 2012
An	Groupe de soufflures		2013
Aa	Soufflures alignées		2014
Ab	Soufflure vermiculaire		2015 2016
K	Retassure de cratère		2024

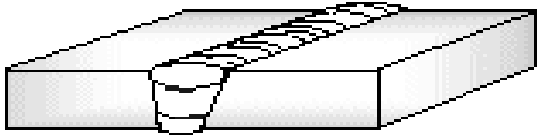
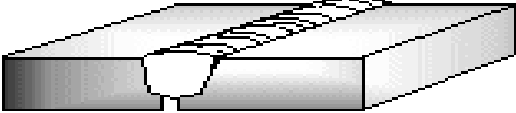
III.3. Groupe 3 : Inclusion solide :

Tableau 3.3 : Symboles et numérotation utilisés pour les inclusions solide.

Symbole	Intitulé de défaut	Le schéma de défaut	Numéros de référence
Ba	Inclusion de laitier		301
Bb	Inclusion de laitier aligné		3011
G	Inclusion de flux		302
J	Inclusion d'oxyde		303
H	Inclusion métallique		304


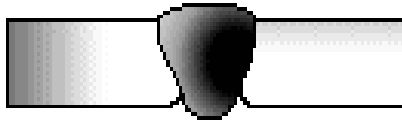
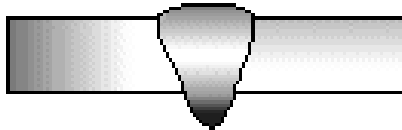
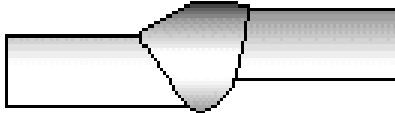

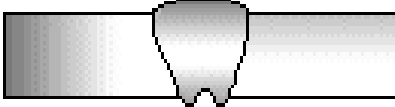
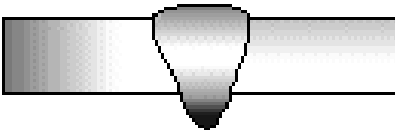

III.4. Groupe 4 : Manque de fusion et de pénétration :

Tableau 3.4 : Symboles et numérotation utilisés pour manque de fusion et de pénétration.

Symbole	Intitulé de défaut	Le schéma de défaut	Numéros de référence
C	Manque de fusion		401
D	Manque de pénétration		402

III.5. Groupe 5 : Défauts de forme :

Tableau 3.5 : Symboles et numérotation utilisés pour les défauts de forme.

Symbole	Intitulé de défaut	Le schéma de défaut	Numéros de référence
F	Caniveau		5011 5012
Fc	Retrait à la racine		5013 515
Fp	Excès de pénétration		504
Fm	Défaut d'alignement		507
Ff	Manque de matière		509
Fg	Perçage		510
Fn	Rochage		516
Fe	Mauvaise reprise		517

III.6. Groupe 6 : Défauts divers :**Tableau 3.6 : Symboles et numérotation utilisés pour les défauts de film.**

Symbole	Intitulé de défaut
Z	Défaut de film
X	Film manquant

IV. Les défauts de soudage en fonction de procédé utilisé :**Tableau 4.1 : les défauts les plus fréquemment rencontrés en fonctions du procédé utilisé.**

Procédé de soudage	Les défauts les plus rencontrés
Arc à électrode enrobée (SMAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect du cordon • Mauvaise reprise (cratère de reprise) • Défauts de pénétration (manque de pénétration surtout) • Inclusions de laitier
TIG (GTAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Fissures, cavités et Inclusions de tungstène • Manque de fusion ou de pénétration • Défauts de formes du cordon • Oxydation en surface
MIG/MAG (GMAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Soufflures et collage • Manque de pénétration • Projections et joints irréguliers • Convexité excessive
Fil fourré avec gaz de protection (FCAW)	<ul style="list-style-type: none"> • Soufflures • Projections • Caniveaux • Inclusions de laitier

V. Qualité de soudage et contrôle qualité :

Afin d'améliorer la qualité de soudage et optimiser les défauts de soudure il faut suivre un programme de soudage, selon les normes de soudage, comme planification de la production.

Ce programme de soudage inclut notamment :

- Les descriptifs de modes opératoires de soudage ;
- Les mesures à prendre pour éviter toute déformation pendant et après le soudage ;
- La séquence de soudage avec les restrictions éventuelles ou les emplacements acceptables pour les positions de départ et d'arrêt ;
- Les exigences concernant les vérifications intermédiaires ;
- Tout retournement d'éléments à effectuer au cours du processus de soudage, en relation avec la séquence de soudage ;
- L'équipement spécial concernant les produits consommables pour le soudage ;
- La forme du cordon et le fini des soudures pour les aciers inoxydables ;
- Les critères d'acceptation des soudures ;
- Les exigences de l'identification des soudures ;
- Les exigences des traitements de surface ;
- Etc.

(La norme EN 1090-2 propose la liste complète du programme). [12]

V.1. Quelques normes de référence en contrôle de qualité de soudage :

- La norme ISO/R 831 ;
- La norme EN 1090-2 ;
- La norme API 1104 ;
- La norme ASME/ANSI B31.3 ;
- La norme ASME IX.

VI. Conclusion :

Les défauts de soudure sont divers et presque inévitables, mais il reste donc à les optimiser en respectant les planifications tracées par les normes de qualité de soudage et de bien exploiter les moyens existant en contrôle non destructif pour la prévention et la bonne caractérisation de ces imperfections indésirables en cordon de soudure. Sur chantier de construction navale ou de pipeline, on se sert généralement de l'essai non destructif tel que la gammagraphie, qui prélève efficacement les défauts de soudure précités.

CHAPITRE IV :

Les contrôles non destructifs des soudages

(CND)

I. Introduction :

La qualité de soudure est garanti grâce aux exigences de normes de contrôle qualité de soudure avec ces différents procédés, et parmi ces derniers : **les contrôles non destructifs** qui jouent un rôle très important dans la prévention, la surveillance et la détection des défauts. Ce chapitre prend comme objectif de présenter les différents contrôles non destructifs (CND).

I.1. Termes et définitions :

❖ Le contrôle non destructif :

L'appellation **Contrôle Non Destructif** fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient : le même principe appliqué aux pièces mécaniques consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « **sans destruction** » l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à assurer la fonction pour laquelle elles sont destinées. Il s'agit de «**qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette** ». [15]

❖ Validation :

Acte consistant à démontrer en générale par un témoignage réel, une démonstration des essais sur le terrain ou en laboratoire ou des essais choisis, qu'une procédure vérifiée fonctionnera dans la pratique et remplira la fonction prévue. [08]

Remarque :

Les Contrôles Non Destructifs (CND) sont aussi appelés Essais Non Destructifs (END) ou même Examens Non Destructifs (END).

I.2. Rôle des contrôles non destructifs (CND) :

Les contrôles non destructifs permettent, en respectant l'intégrité des objets :

- L'examen direct des pièces et la détection des défauts internes ;
- Le suivi de l'évolution en service, des défauts détectés ;

La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables ;
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication) ;
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions,).
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé ;

Ces connaissances permettent de choisir :

- La méthode de contrôle la mieux adaptée ;
- La procédure permettant :
 - D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection ;
 - De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts.

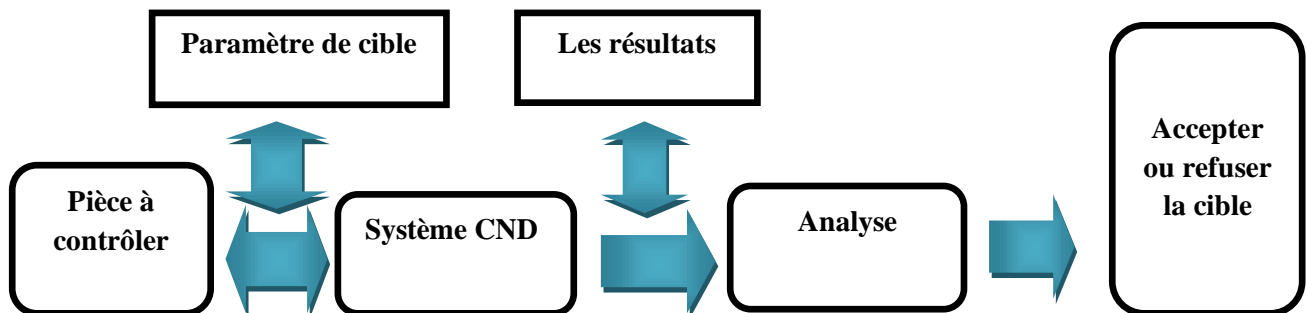


Figure 1.1 : Principe de contrôle non destructif.

I.3. L'objectif d'un contrôle non destructif :

Le but principal d'un contrôle non destructif dans ce domaine est de déterminer la qualité ou l'état de la soudure, avec l'intention de l'accepter ou de la rejeter en fonction de normes ou cahiers des charges. Les principaux défauts que les contrôles non destructifs doivent déceler appartiennent à l'une des classes suivantes :

- Défauts de continuité (fissures, soufflures,) ;
- Défauts de résistance mécanique ;
- Défauts d'étanchéité.

Dans tout contrôle non destructif, on peut détecter les cinq étapes suivantes :

1. La mise en œuvre d'un processus physique.
2. L'altération de ce processus par le défaut.
3. La révélation de cette variation par un détecteur approprié.
4. La conversion de cette variation en une forme adaptée au traitement de l'information.
5. L'interprétation de l'information obtenue.

Chaque contrôle non destructif comprend donc :

- Un émetteur de flux ;
- Un récepteur ou détecteur.

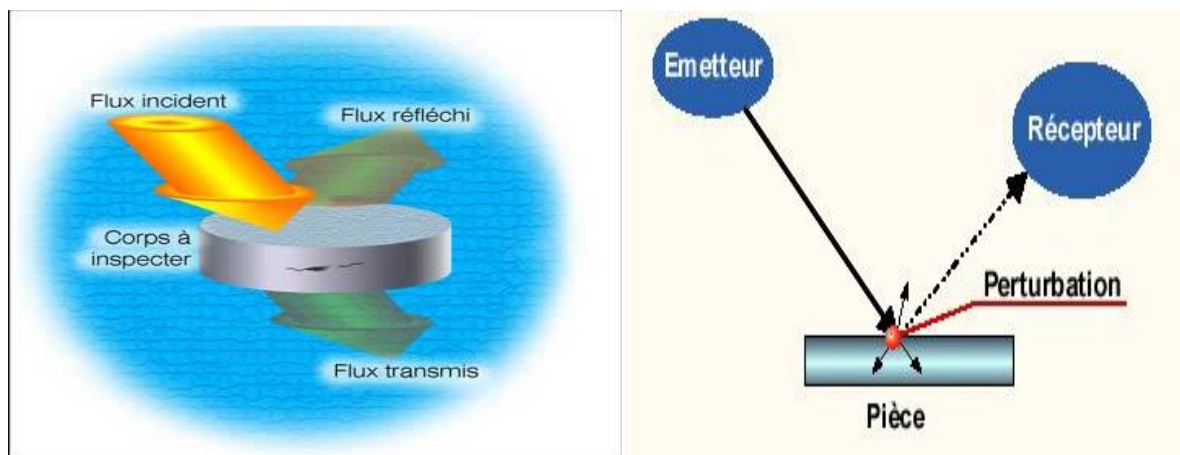


Figure 1.2 : Les critères communs en contrôles non destructifs.

I.4. Principe des contrôles non destructifs :

Dans certains cas, émetteur et détecteur sont inclus dans le même dispositif. Le tableau ci-dessous montre l'adaptation de ce principe aux principaux contrôles non destructifs.

Tableau 1.1 : Principes des contrôles non destructifs.

Le procédé	Emetteur	Récepteur
Examen visuel	Rayonnement visible. Source de lumière blanche ou monochromatique.	Œil et aides optiques : loupes binoculaire, endoscope, microscope.
Ressuage	Liquide d'imprégnation conjugué à un rayonnement visible ou ultraviolet.	Fines particules absorbant le liquide et œil avec aides optiques.
Magnétoscopie	Champ magnétique conjugué à un rayonnement ultraviolet.	Fines particules magnétiques piégées par le champ perturbé et œil avec aides optiques.
Courant de Foucault	Champ magnétique basse ou moyenne fréquence.	Bobine ou capteur dont l'impédance varie en fonction du champ perturbé.
Ultrasons	Vibrations mécaniques de moyenne fréquence engendrées	Transducteur convertissant l'énergie mécanique en signal électrique.

	par un transducteur.	
Rayonnements	Rayonnement électromagnétique.	Film ou système de conversion de rayonnement.
Thermographie	Rayonnement électromagnétique de type infrarouge ou source de chaleur.	Caméra infrarouge et moniteur ou laque thermosensible.
Emission acoustique	Contrainte mécanique ou bruit acoustique.	Traducteur convertissant l'énergie mécanique en signal électrique.
Analyse vibratoire	Des vibrations mécaniques	Capteur, accéléromètre et équipement informatique.

I.4.1. Le contrôle visuel :

L'examen visuel est le procédé de contrôle le plus ancien et le plus simple. Il s'effectue à l'œil nu. Il est aussi utilisé dans l'étape finale de plusieurs autres procédés de contrôle non destructifs.

L'utilisation de moyens d'aide optique à la vision tels qu'une loupe binoculaire, un microscope, un endoscope, un microscope, une caméra, une télévision..., donne au contrôle visuel une nouvelle dimension. Ces techniques, bénéficient actuellement des moyens numériques d'acquisition et de traitement d'images, qui leurs donnent beaucoup plus de rapidité, d'efficacité et de fiabilité. Ces techniques exploitent pleinement les moyens modernes de l'informatique et de l'intelligence artificielle.

En soudage le premier contrôle des soudures est visuel pendant et après l'exécution de chaque cordon. En général, c'est le soudeur lui-même qui l'effectue. [13], [14].

A. Principe du contrôle :

Ce contrôle porte essentiellement sur la forme générale des cordons, à savoir :

- Les dimensions géométriques (gorge dans le cas d'une soudure d'angle, surépaisseur) ;
- L'aspect du cordon (stries de solidification) ;
- Les défauts visibles (caniveaux, irrégularités de fusion,...).
- L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité, qui permet à un opérateur averti de se faire une opinion :
 - ❖ Sur la qualité du cordon ;

- ❖ Sur le choix de la procédure de soudage ;
- ❖ Sur la compétence du soudeur ;

Elle permet également de déclencher des contrôles plus approfondis mais en aucun cas, elle ne permet de connaître la qualité interne d'une soudure.

B. Mise en œuvre du contrôle :

Par définition, le contrôle s'effectue à l'œil nu, mais dans certains cas l'opérateur peut avoir recours à des moyens complémentaires :

- Jauges ou calibres pour mesurer les gorges, les surépaisseurs ;
- Loupes pour la recherche de défauts débouchant (fissures, manque de fusion, ...) ;
- Miroirs ou endoscopes pour observer des zones non accessibles à l'œil.

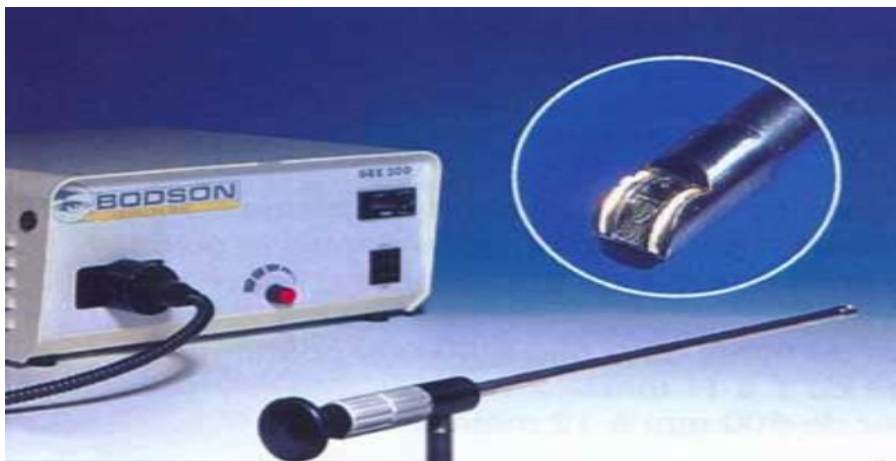


Figure 1.3 : Equipements de contrôle visuel.

I.4.2. Le ressuage :

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation.

L'imprégnation d'une fissure par un liquide, tirant profit de ses propriétés tensio-superficielles, conduit, par l'intermédiaire d'un ressuage avant l'observation visuelle, à un moyen de recherche de défauts de surface qui est parmi les plus anciens.

Comme l'examen visuel, le contrôle par ressuage est utilisé pour déceler les défauts qui débouchent à la surface d'une pièce ou d'un assemblage par soudage, brasage ou soudo-brasage. [13], [14]

A. Les produits de ressuage :

Les produits de ressuage sont constitués par les pénétrants, les émulsifiants et les révélateurs.

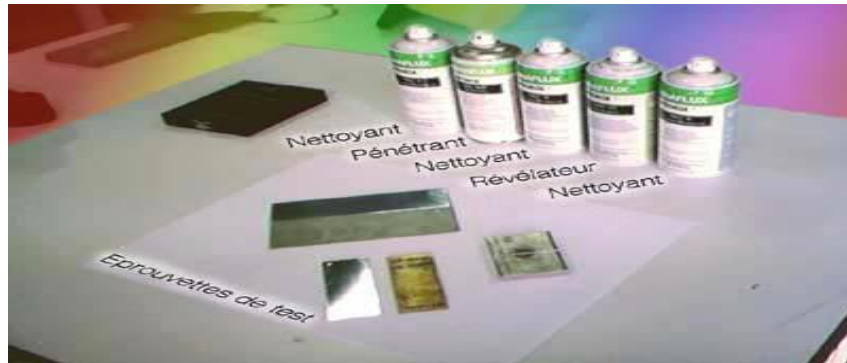


Figure 1.4: Les produits de ressuage.

B. Le mécanisme de révélation des défauts par ressuage :

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. A la suite de quoi, 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. [13]

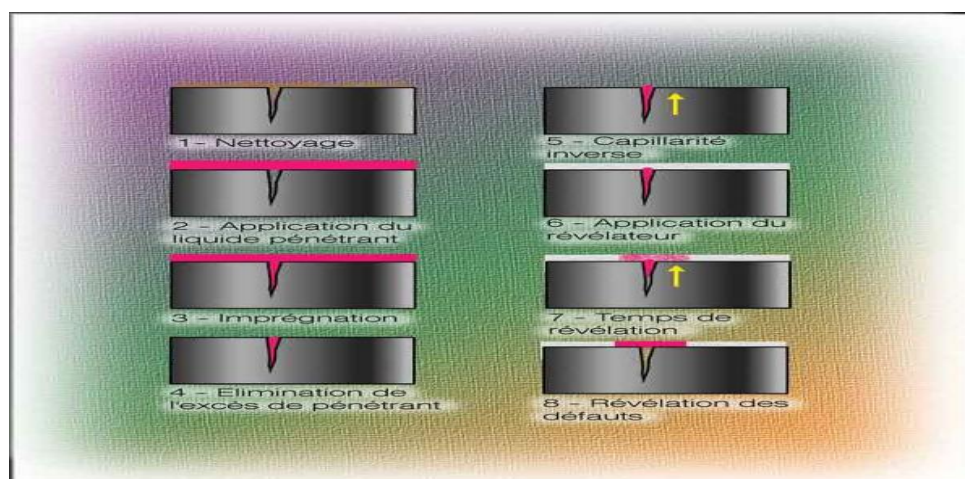


Figure 1.5 : Les phases successives du ressuage.

Remarque :

Il faut retenir que, dans tous les cas, les opérations sont relativement lentes, prenant chacune plusieurs minutes, de 3 à 30 minutes en ce qui concerne l'imprégnation des fissures

par le pénétrant. Ces différentes variantes sont codifiées dans les normes internationales et la norme NF A 09-120.

C. Avantages de ressuage :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Prix modique dans une application manuelle.
- Localisation des défauts de surface et appréciation de leur longueur.
- Possibilité d'automatisation. [14]

D. Inconvénients de ressuage :

- Pas de détection de défauts internes.
- Pas d'appréciation de la profondeur des défauts.
- Interprétation délicate.
- Non utilisable sur les matériaux poreux. [14]

I.3.4. La magnétoscopie :

Le contrôle par magnétisation utilise la perturbation créée par le défaut d'un champ magnétique circulant dans les pièces. La révélation de cette perturbation se fait par des particules magnétiques.

Ce type de contrôle permet la détection de défauts débouchant ou se situant près de la surface de la pièce.

A. Le principe de la magnétoscopie :

La pièce est aimantée partiellement ou totalement. Les particules magnétiques contenues dans le révélateur s'accumulent au droit du défaut par suite de la perturbation locale des lignes d'induction.

On observe le spectre résultant sous un éclairage adapté.

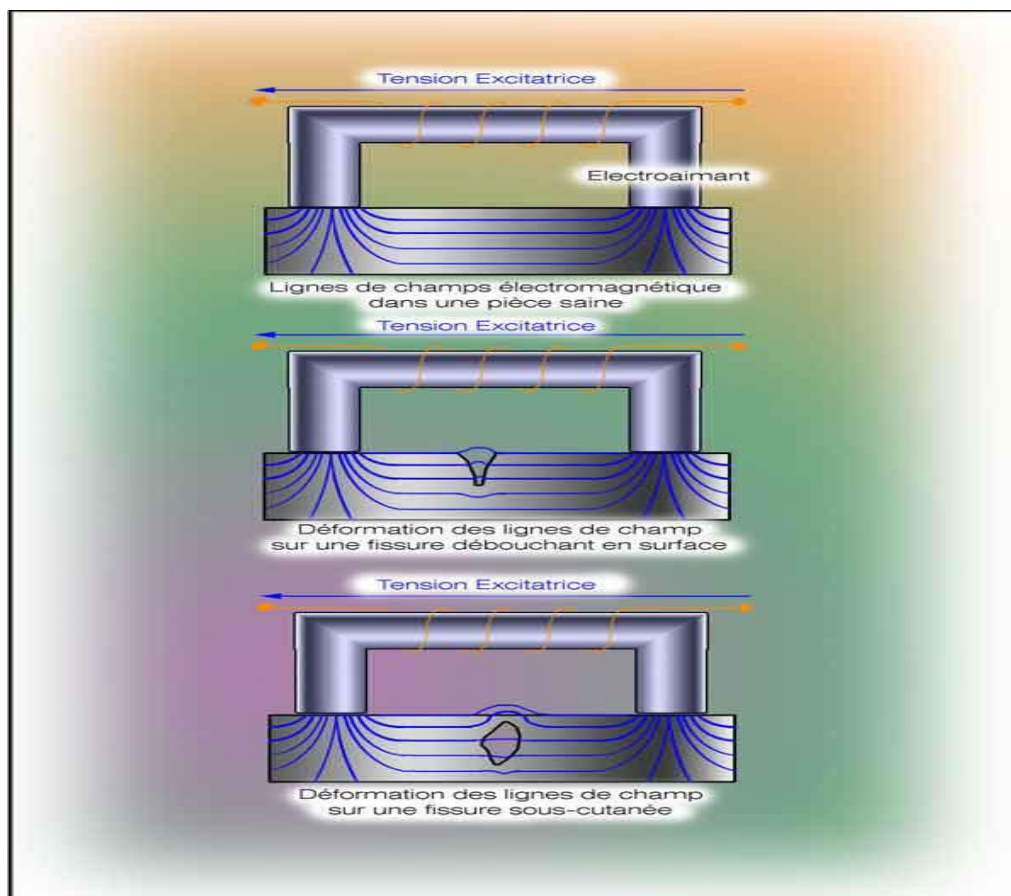


Figure 1.6 : Principe de la magnétoscopie.

B. Avantages de la magnétoscopie :

- Simplicité de mise en œuvre ;
- Localisation des défauts de surface ou légèrement sous-jacents et appréciation de leur longueur ;
- Possibilité d'automatisation.

C. Inconvénients la magnétoscopie :

- Pas de détection de défauts internes ;
- Pas d'appréciation de la profondeur des défauts ;
- Interprétation délicate ;
- Utilisables que sur les matériaux ferromagnétiques ;
- Sensibilité fonction de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction ;
- Nécessité de désaimantation des pièces après contrôle.

I.4.4. Le courant de Foucault :

Lorsque l'on place un corps conducteur dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace, des courants induits se développent en circuit fermé à l'intérieur de celui-ci, ce sont les courants de Foucault (physicien français 1819 - 1868). Ainsi, une bobine parcourue par un courant variable, alternatif par exemple, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s'oppose au flux générateur, modifie par la même l'impédance de cette bobine. C'est l'analyse de cette variation d'impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle, en effet, le trajet, la répartition et l'intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d'excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage).

On conçoit dès lors qu'un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation (ou de tout autre bobinage situé dans le champ).

Ce principe simple est surtout utilisé pour détecter des défauts superficiels, dans la mesure où les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). [13][14]

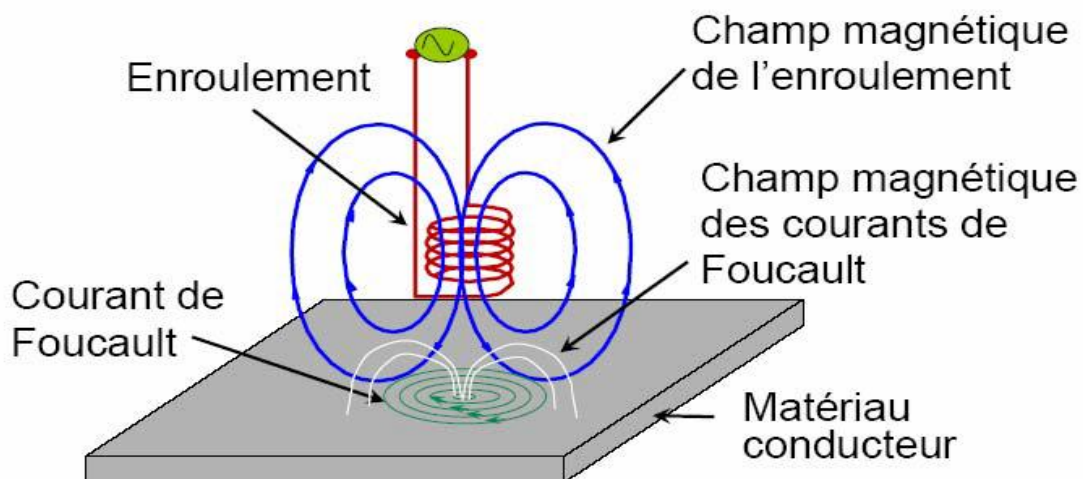


Figure 1.7 : Principe de contrôle par le courant de Foucault.

A. Avantages du contrôle par Courants de Foucault :

- Rapidité de palpage et de détection (3 fois plus rapide que la magnétoscopie) ;
- Détection possible à travers un revêtement surfacique ;
- Aucune préparation particulière de la surface à contrôler ;
- Qualité de détection indépendante de la vitesse de palpage ;
- Pas de nécessité d'étalonnage de l'appareil, une simple calibration est suffisante ;
- Traitement informatique avec stockage des données de modélisation ;
- Contrôle non polluant. Pas de traitement d'effluents.

B. Inconvénients du contrôle par Courants de Foucault :

- Investissement important ;
- Effet de bords des pièces produisant des signaux parasites ;
- Détection de défauts débouchant en surface ;
- Le revêtement de surface doit être non magnétique et isolant électrique ;
- Importance du positionnement de la sonde par rapport au défaut existant ;
- Formation théorique et pratique des utilisateurs et intervenants.

I.4.5. L'ultrason :

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau.

Une onde ultrasons est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

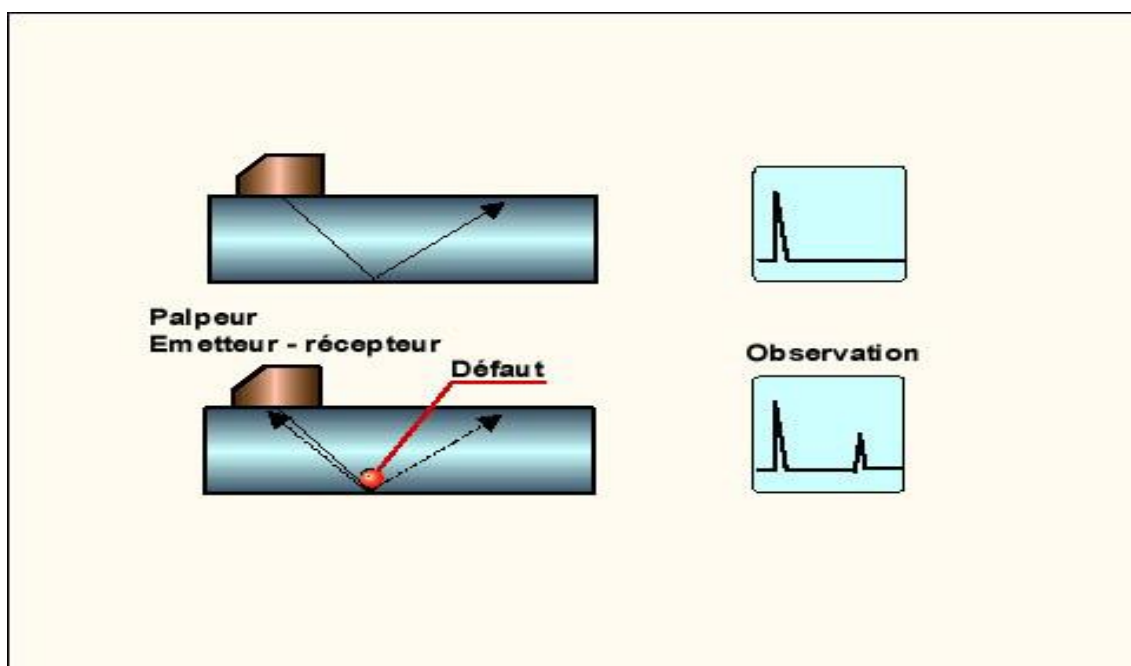


Figure 1.8 : Principe de contrôle par ultrasons.

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut. D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran.

A. Détection des défauts :

La détection des défauts internes par ultrasons est très pratiquée en contrôle de fabrication, en contrôle de soudage, en surveillance de structure en service ainsi qu'en maintenance.

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle original à cause de sa remarquable sensibilité de l'échographie ultrasonore à moindre discontinuité ou hétérogénéité interne dans les matériaux, en particulier métallique. Toutefois, en échographie ultrasonore, le choix des paramètres de sondage et l'interprétation des signaux recueillis ne sont pas toujours aisés et requièrent l'intervention d'un personnel spécialement qualifié.

B. Avantages de contrôle par l'ultrason :

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

C. Inconvénients de contrôle par l'ultrason :

- 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 principe du faisceau acoustique.

I.4.6. L'émission acoustique :

Le contrôle par émission acoustique utilise la propagation d'une onde acoustique dans les matériaux lors d'une libération d'énergie interne, comme la propagation d'une fissure. Ce type de contrôle permet une surveillance en fonctionnement.

A. Principe du contrôle :

Toute libération discontinue d'énergie au sein d'un matériau engendre des ondes élastiques qui se propagent dans celui-ci. Plusieurs mécanismes peuvent donner naissance à cette émission acoustique :

- Les évènements liés à la déformation plastique tels que les mouvements des dislocations, les glissements aux joints de grains, ...
- Les mécanismes de rupture tels que l'initiation d'une microfissure et sa propagation.

L'émission sonore est détectée par un capteur judicieusement placé.

La détection acoustique peut être utilisée pour l'étude de phénomènes physiques d'une part et pour le contrôle non destructif d'autre part.

L'émission acoustique est différente des autres techniques de contrôle non destructif : elle ne s'applique pas sur la pièce terminée, mais elle doit être utilisée en cours de fabrication ou encours d'utilisation.

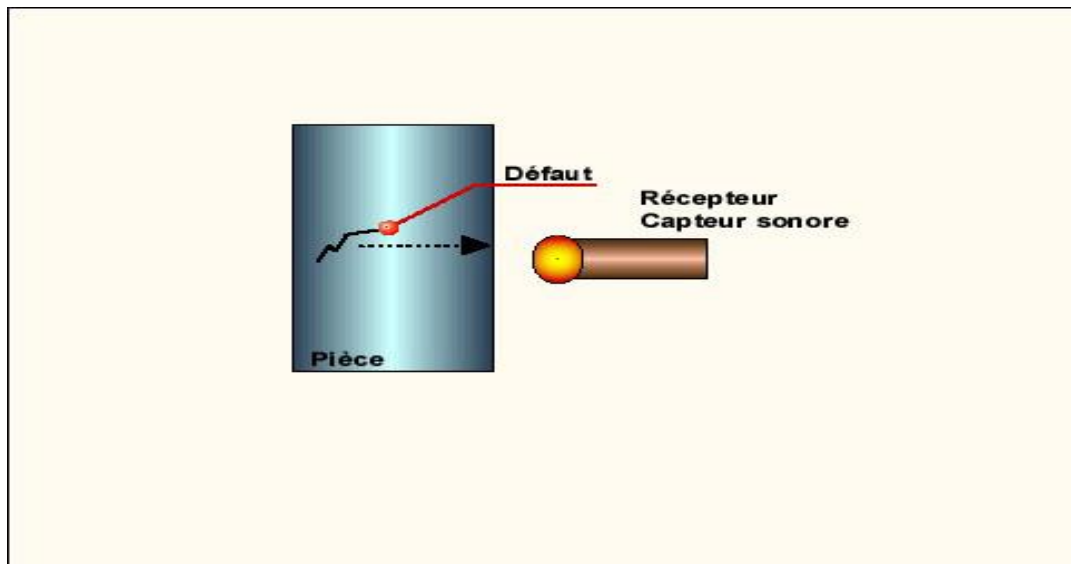


Figure 1.9 : Principe de contrôle par émission acoustique.

B. Avantages de contrôle par L'émission acoustique :

- Méthode bien adaptée à une surveillance en fonctionnement ;
- Ne nécessite pas de démontage de la pièce ;
- L'évolution de la fissure peut être quantifiée ;
- Excellente sensibilité.

C. Inconvénients de contrôle par L'émission acoustique :

- Instrumentation complexe ;
- Etalonnage délicat.

I.4.7. La thermographie infrarouge :

La thermographie est une technique de mesure sans contact des températures. Elle permet d'explorer la surface d'un corps émettant un rayonnement infrarouge. La présence de défauts dans un corps entraîne des modifications de la carte thermique de ce dernier.

La thermographie infrarouge est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un refroidissement anormal.

Seule la Thermographie Infrarouge qui permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout

type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'œil nu, la thermographie permet des actions correctives avant l'apparition de pannes ou problèmes coûteux.

A. Le principe de contrôle :

La structure est soumise à un flux thermique qui la traverse. Une interruption dans la propagation de la chaleur (par un défaut, par exemple) engendre un écart de température sur la surface opposée.

Une caméra infrarouge décèle l'anomalie au sein de l'image thermique de la surface.

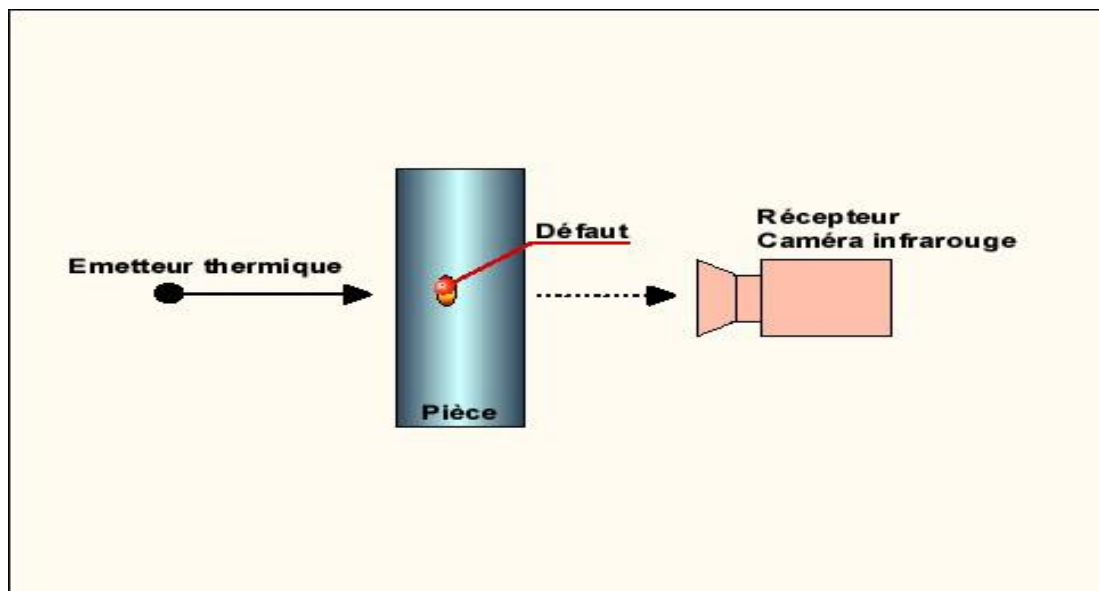


Figure 1.10: Principe de contrôle par thermographie infrarouge.

En CND, on utilise l'inhomogénéité de propagation ou de diffusion d'une impulsion thermique liée aux discontinuités de la structure de la pièce à examiner. Une part très importante du succès de la méthode est liée à la manière dont le flux de chaleur est transmis à la pièce.

L'importance de la discontinuité de la propagation de la chaleur est fonction de :

- La nature de la pièce ;
- La dimension, la nature et la position du défaut.

L'analyse se fait en régime transitoire, car à l'équilibre, les différences de rayonnement induites par les éventuels défauts sont souvent imperceptibles.

Pour de grandes pièces, il peut être difficile d'avoir un chauffage uniforme. Dans ce cas, on utilise une source à apport thermique local dont le déplacement sera lié à celui du système de détection.

B. Avantages de contrôle par la thermographie infrarouge :

- Grande sensibilité de l'analyse de l'image ;
- Image instantanée.

C. Inconvénients de contrôle par la thermographie infrarouge :

- Méthode coûteuse en investissement ;
- Méthode limitée dans ses applications ;
- Champ d'investigation limité.

I.4.8. La radiographie :

Le contrôle par radiographie (rayons ionisants) utilise la propagation de rayonnements électromagnétiques (X ou γ) de faible longueur d'onde dans les matériaux. L'absorption du rayonnement par la matière est fonction de la nature du matériau et de l'épaisseur. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement. Une image de ces variations peut être observée soit par l'intermédiaire d'un film, soit par une caméra. Ce type de contrôle permet la détection précise de défauts dans le volume de la pièce.

A. La propagation des rayonnements ionisants :

Ce mode de contrôle utilise des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (de l'ordre de grandeur de l'angström) pour traverser des matériaux opaques à la lumière.

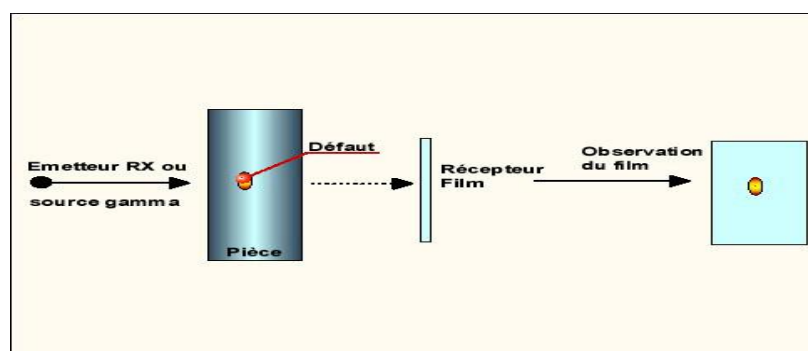


Figure 1.11 : Principe de radiographie.

B. Nature et propriétés principales :

Les rayons X ou γ qui sont employés en contrôle ont les propriétés suivantes :

- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière ;
- Ils sont invisibles ;
- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission ;
- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes ;
- Ils ionisent les milieux gazeux.

C. Avantages de contrôle radiographique :

- Détection des défauts dans le volume de la pièce ;
- Bonne définition des défauts avec détection de leur nature ;
- Archivage aisé des résultats.

D. Inconvénients de contrôle radiographique :

- Méthode coûteuse en investissement et développement des films ;
- Nécessite le respect de règles de sécurité importantes ;
- Pénétration des rayons limitée par l'épaisseur et la puissance de la source ;
- Localisation du défaut dans la section non garantie.

Remarque :

Vu que le contrôle radiographique (par la gammagraphie bien précisément et qui ressemble dans les détails au contrôle par rayons X), des défauts de soudures est l'objectif principal de ce travail de fin d'étude, de ce fait le chapitre qui suit est réservé pour détailler plus dans la caractérisation des défauts des soudures métalliques par la gammagraphie.

II. Normalisation des contrôles non destructifs des soudures

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter. Le contrôleur se référera aux normes de contrôle. Le tableau suivant présente quelques normes européennes en CND des soudures :

Tableau 2.1 : Les normes européennes en CND des soudures.

NORMALISATION EUROPEENNE DES CONTROLES ND DE SOUDURES		
Contrôle ou essais	Méthode de contrôle	Critères d'acceptation des défauts
Règles générales pour les C.N.D.	EN 12062	
Examen visuel	EN 970	EN 25817 / EN 30042 ISO 5817 / ISO 10042
Contrôle par ressuage	EN 571	EN 1289
Contrôle par magnétoscopie	EN 1290	EN 1291
Contrôle par courant de Foucault	EN 1711	
Contrôle par ultrasons	EN 1714	EN 1712 / EN 1713
Contrôle par radiographie	EN 444 / EN 1435 / EN 462 : 1-2-3 ISO 2437 EN 25580 / EN 473 EN 584	EN 25817 / EN 30042 ISO 5817 / ISO 10042

III. Récapitulatif des intérêts des principaux contrôles non destructifs en soudures :

Tableau 3.1 : Avantages et limites des contrôles non destructifs des soudures.

Procédé	Défauts détectables	Avantages	Limites
Examen visuel	*Défauts de surface (manque de pénétration, caniveaux). *Forme de cordon incorrect.	* Contrôle permanent pendant le soudage. * Peu coûteux.	*Défauts de surface. * Pas de documents.
Ressuage	* Défauts de surface invisible à l'œil (fissures débouchantes).	* Peu coûteux. * Simple d'emploi.	* Défauts de surface. * Pas de documents d'archive. * Interprétation délicate. * Non utilisable sur matériaux poreux.
Magnétoscopie	* Défauts de surface (fissures, manque de pénétration,...).	* Méthode sensible et simple. * Peu coûteux.	* Défauts de surface. * Interprétation délicate. * Utilisable que sur matériaux ferromagnétiques.
Courant de Foucault	* Tout défaut même minime sur une épaisseur en surface.	* Très sensible.	* Interprétation délicate. * Non utilisable sur matériaux isolants. * Profondeur d'investigation limitée.
Ultrasons	* Tout défaut même minime.	* Très sensible. * Détection de la position du défaut. * Utilisation sur chantier ou de façon automatique.	* Interprétation très délicate. * Opérateur qualifié. * Sensibilité fonction de l'orientation du défaut.
Rayonnements	* Défauts volumiques (porosité, inclusions, manque de pénétration,...).	* Détection de défauts internes. *	* Sensibilité fonction de l'orientation du défaut. * Matériel coûteux. * Opérateur qualifié.
Thermographie	* Défauts divers provoquant une discontinuité de transmission thermique.	* Très sensible.	* Matériel coûteux. * Méthode limitée.
Emission acoustique	* Fissures en formation ou se déplaçant.	* surveillance en fonctionnement. * Très sensible.	* Matériel complexe. * Etalonnage délicat.

IV .Conclusion :

Les contrôles non destructifs garantissent les fonctions de : surveillance, prévention, détection et même la caractérisation des différents défauts et des anomalies indésirables soit superficielles ou volumiques dans les pièces ou les assemblages soudés, chaque contrôle selon sa spécialité et son mode pour assuré la fiabilité et la sécurité de l'assemblage soudé.

CHAPITRE V:

Caractérisation des défauts de soudure par la gammagraphie

I .Introduction :

Les défauts des soudures métallique sont divers et leurs présence dans un assemblage est vraiment indésirable, vu qu'ils fragilisent le cordon de soudure ; des différentes méthodes en contrôle non destructif on étés développés pour les bien caractériser et parmi la radiographie industrielle la plus adaptable est : la gammagraphie.

Ce chapitre vise comme objectifs de définir et présenter ce procédé de contrôle puis donner son principe, sa méthode, ces moyennes de réalisation, et ces procédures d'élaboration matérialisés en stage pratique au niveau de l'entreprise nationale de réalisation de canalisation KANAGHAZ.

I.1. Mots clés avec définitions :

Gammagraphie :

Production de radiogrammes à partir d'une source de rayonnement gamma.

Rayonnement gamma :

Rayonnement électromagnétique ionisant émis par certaines substances radioactives.

Source de rayonnement gamma :

Substance radioactive scellée dans une capsule métallique.

Ionisation :

Phénomène de changement de charge des atomes ou des molécules qui est derrière la formation de l'émulsion photographique.

Exposition :

Procédé par lequel un rayonnement est enregistré par un système d'imagerie.

Film radiographique :

Film se composant d'un support transparent généralement revêtu sur les deux faces d'une émulsion sensible aux rayonnements.

Un radiologue :

Technicien qualifié, opérateur chargé de la production de radiogrammes.

Inspecteur (contrôleur) :

Technicien qualifié, chargé de préparation et transvasement des sources radioactives, d'évaluation de contrôle, d'interprétation et communication des radiogrammes.

I.2. Principe du contrôle par gammagraphie :

Vers 1930, les premières sources gamma ont été utilisées en radiographie industrielle (sources radioactives naturelles telles que le radium et le radon).

La gammagraphie fait appel aux propriétés de rayonnements électromagnétiques gamma (γ) de l'ordre de grandeur d'onde de l'angström, émis par une source radioactive, pour traverser l'objet à contrôler.

L'énergie et l'intensité du rayonnement sont choisies de façon à ce que l'objet soit suffisamment irradié. Si l'objet à contrôler présente des zones d'absorption différentes (p.ex. différentes épaisseurs, inclusions gazeuses dans l'acier), le faisceau d'irradiation sortant présentera des zones d'intensités de rayonnement différentes (c'est l'image radiante).

Ce faisceau d'irradiation sortant traverse le film radiographique (placé derrière l'objet à contrôler) et ionise une certaine quantité de cristaux d'halogénure d'argent dans l'émulsion (image latente).

Les zones du film ayant été fortement irradiées contiennent beaucoup de cristaux d'halogénures d'argent ionisés et présenteront, après avoir été développés, une plus grande noircissure que les zones ayant été moins irradiées. [16][14][17]

Le film radiographique transforme donc l'image radiante en une image visible (film).

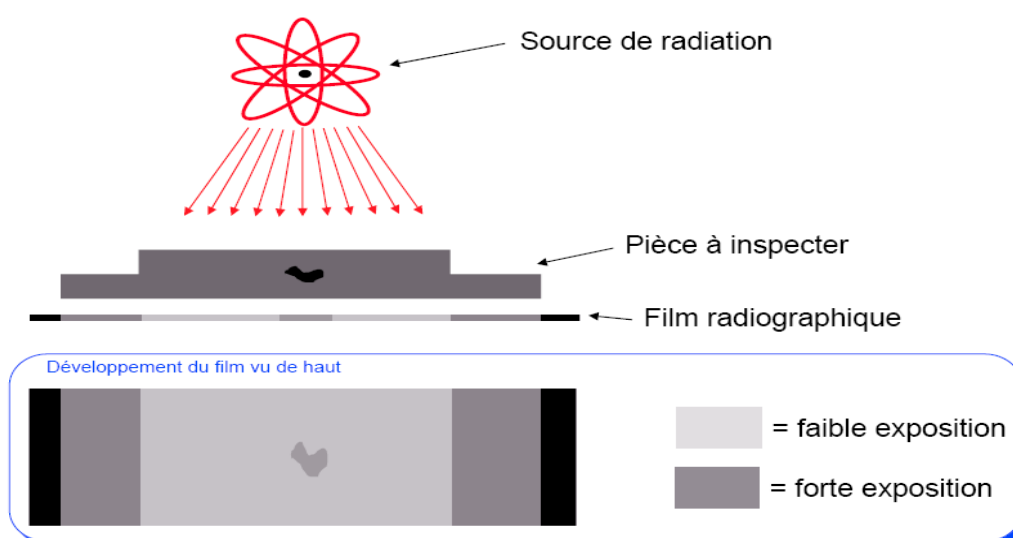


Figure 1.1: Principe de contrôle par gammagraphie.

I.3. Généralités :

I.3.1. Rayons électromagnétiques :

Les rayons gamma (γ) et les rayons X sont des rayons électromagnétiques au même titre que les rayons lumineux, les rayons thermiques, les ondes radar ou les ondes radio.

Le rayonnement électromagnétique est une énergie (sans masse) qui se propage sous la forme d'une onde.

Un rayonnement électromagnétique s'accompagne en effet d'un champ magnétique et électrique variable, dont l'intensité varie à une fréquence déterminable f (Hz).

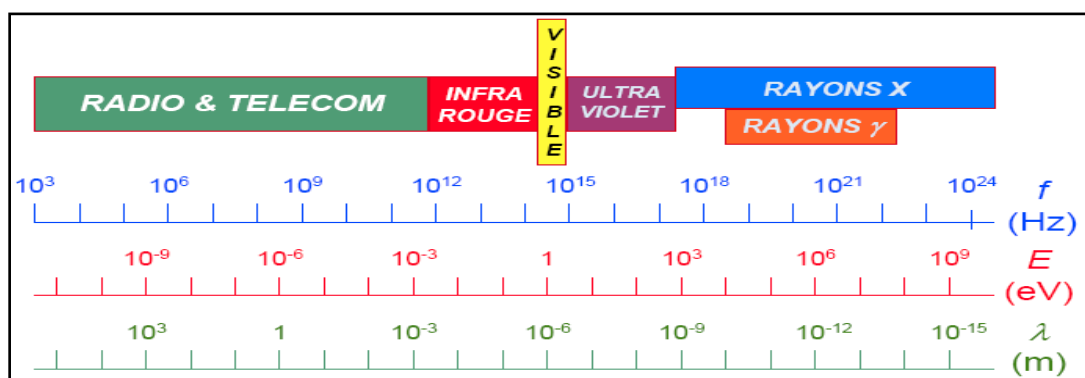


Figure 1.2: Le spectre électromagnétique.

On compare souvent le rayonnement électromagnétique à des petits paquets d'énergie (quanta ou photons) émis par la source de radiation.

Remarquons que dans certains cas (tels que les collisions avec des électrons), ces petits paquets d'énergie (sans masse) se comportant comme des particules.

Plus la fréquence des rayons électromagnétiques est élevée, plus leur longueur d'onde (λ) est basse et leur énergie est élevée.

Un rayonnement hautement énergétique possède un grand pouvoir de pénétration ; il s'agit d'un rayonnement "dur".

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{I.1})$$

Avec : **E** : énergie d'un photon.

h : constante de Planck (= $6,525 \cdot 10^{-34}$ J/s)

ν : fréquence (nombre de vibration par seconde).

I.3.2. Obtention des rayons gamma (γ) :

Le rayonnement gamma est issu de la désintégration des noyaux atomiques d'un élément radioactif.

Une fois l'acquisition faite d'une source radioactive, l'énergie et l'intensité du rayonnement émis ne peuvent plus être réglées. [16]

I.3.3. Lois de propagation des rayonnements ionisants :

Ce mode de contrôle utilise des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (de l'ordre de grandeur de l'angström) pour traverser des matériaux opaques à la lumière.

D'une façon schématique, on peut écrire (en rayonnement monochromatique) :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 e^{-\mu e} \quad (\mathbf{I.2}).$$

Avec :

I : intensité en sortie ($W \cdot sr^{-1}$, watt par stéradian)

I₀: intensité incidente ($W \cdot sr^{-1}$, watt par stéradian)

μ : coefficient d'absorption

e: épaisseur du matériau (mm)

Le coefficient d'absorption prenant la forme :

$$\mu = k l^3 Z^3 \quad (\mathbf{I.3}).$$

Avec :

k : Fonction de la masse volumique du matériau

l: Longueur d'onde du rayonnement (mm)

Z: Numéro atomique de l'élément traversé

L'absorption peut aussi s'exprimer par :

- l'épaisseur de demi-absorption $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 / 2 \quad (\mathbf{I.4}).$

- l'épaisseur de déci-transmission (en radioprotection) : $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 / 10 \quad (\mathbf{I.5}). \quad [14].$

I.3.4. Nature et propriétés principales :

Les rayons γ qui sont employés en contrôle ont les propriétés suivantes :

- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière ($\approx 300\,000\text{ Km/s}$) ;
- Ils sont invisibles ;
- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission ;
- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes ;
- Ils ionisent les milieux gazeux et quelques métaux comme l'argent ;
- Faible longueur d'onde, grande pénétration.

I.3.5. Phénomène d'absorption :

Lors de la traversée d'un matériau, le rayonnement électromagnétique subit un affaiblissement par :

- Effet photo-électrique ;
- Effet Compton ;
- Formation de paires d'ions.

I.4. Annexe :

L'énergie d'un rayonnement électromagnétique est exprimée en KeV ou en MeV.

Un eV est l'énergie ajoutée à un électron libre lors d'une accélération par une différence de potentiel de un volt : $E = q_e \cdot U_{ion}$.

La charge d'un électron = $1,6 \times 10^{-19}$ C (Colomb).

1 Colomb = l'unité de charge = 1C = 1 A.s

I.4.1. La structure atomique :

Toute matière (eau, air, fer,...etc.) est constituée de molécules, qui sont à leurs tours constituées des atomes. L'atome comporte un noyau chargé positivement, autour duquel gravitent, à grande vitesse et réparties sur différentes orbites (couches), des particules chargées négativement (électrons).

Les électrons sont reliés au noyau ; ce lien est le plus puissant pour les atomes situés sur la couche la plus proche du noyau (couche K), puis il s'affaiblit à mesure que les couches sont plus éloignées (couche L, M, N, ...). Si l'on veut faire passer un électron vers une orbite

plus éloignée (ou si l'on veut même éjecter un électron de l'atome), il faut un apport d'énergie (p.ex. sous la forme de rayons électromagnétiques).

Le noyau est constitué de proton (chargés positivement) et de neutrons (sans charge, donc électriquement neutres).

La masse totale d'un atome est presque entièrement concentrée à la masse du noyau.

Le nombre de protons (= nombre atomique) est caractéristique pour chaque éléments (p.ex. 1 pour l'hydrogène, 8 pour l'oxygène, 26 pour le fer,...).

Le nombre de neutrons, par contre, ne sera pas toujours le même pour un élément bien déterminé.

On appelle nombre de masse, la somme du nombre de neutrons et de nombre de protons dans un noyau atomique (pour un même élément, le nombre de masse peut donc varier).

On appelle nuclides les noyaux atomiques d'une composition bien déterminée et dont le nombre de protons et de neutrons est donc fixe.

On appelle isotopes les nuclides d'un même élément, mais de nombre de masse différent. Le noyau ne sera pas stable qu'à condition d'obtenir certains relations entre le nombre de protons et celui de neutrons, sans quoi le noyau sera instable.

Les noyaux instables vont libérer leur surplus d'énergie, notamment sous la forme de rayonnement gamma ou X.

Il existe des isotopes radioactifs naturels et artificiels. Les isotopes naturels sont dans la nature, les isotopes artificiels sont créés par l'intervention de l'homme.

I.4.2. L'ionisation en radiographie:

Les rayons gamma (et les rayons X) peuvent ioniser les atomes de la matière qu'ils traversent.

L'énergie du rayonnement (ou une partie de celle-ci) est utilisée pour éjecter un électron de l'atome et donner à cet électron une vitesse.

Un atome neutre (nombre identique de neutrons et de protons) est donc divisé en deux parties, un atome chargé positivement (ion positif) et un électron chargé négativement.

Par cet effet d'ionisation, la radiation peut être mesurée, une image latente est formée dans une émulsion photographique (film radiographique).

I.4.3. Les unités : [17]

A. Exposition :

L'exposition est la charge électrique (d'un signe déterminé) que des photons libèrent par unité de masse d'air sous l'effet d'ionisations.

La mesure repose donc sur l'action ionisante de ces rayons.

- Unité S.I : Colomb par kg d'air (C/kg).

On obtient une exposition de 1 C/kg si les rayons γ et/ou X dans 1 kg d'air libèrent une quantité d'électrons égale à 1 Coulomb (= 1 A/s).

- Ancienne unité : Röntgen (R) :

On obtient une exposition de 1 R si les rayons γ et/ou X dans 1 cm³ d'air libèrent une quantité d'électrons égale à 1 u.es (1 unité électrostatique).

L'exposition ne concerne que les rayons gamma et X dans l'air ; leur énergie doit être comprise entre 0.02 et 3 MeV.

(p.ex. 1 Rayon X = 2.58×10^{-4} C/kg).

B. Débit d'exposition (vitesse d'exposition):

Le débit d'exposition est l'exposition par unité de temps.

- unité S.I : C/ kg.s.
- ancienne unité : R/s.

Remarque :

1 C/kg.s peut se convertir en A/kg (ampère/kilogramme).

En effet : 1 C/s = 1 A (ampère).

C. Dose absorbée :

La dose absorbée du rayonnement ionisé est la quantité d'énergie transférée à l'unité de masse de matière.

- Unité S.I : 1 Gy (Gray) = 1 J/kg.
- Ancienne unité : 1 rad = 100 erg/gramme.

NB :

La dose absorbée peut être utilisée pour toutes les matières et tous types de rayonnement.

D. Débit de dose :

Le débit de dose est la dose absorbée par unité de temps.

- Unité S.I: Gy/s.
- Ancienne unité: rad/s.

I.4.4. Les Sources gamma :

Les sources radioactives les plus utilisées sont :

- L'iridium-192, dans plus de 90 % des applications (Ir : $Z=77$, $A=192,90$ et couche de valence $5d^7 5s^2$).
- Le cobalt-60, pour les épaisseurs supérieures à 80 mm.
- Le thulium-170, pour les épaisseurs inférieures à 5 mm.

A. Activité d'une source radioactive :

L'activité (A) d'une source radioactive permet de mesurer le nombre de mutation du noyau atomique (désintégrations) par unité de temps.

- Unité S.I : Becquerel (Bq).

1 Bq = 1 mutation de noyau atomique par seconde.

- Ancienne unité : Curie (Ci).

1 Ci = 37 G Bq (37 Giga Becquerel).

Un curie est l'activité d'une source radioactive au cours de laquelle se produisent 3.7×10^{10} (ou 37 milliards) mutations du noyau atomique par seconde (ce chiffre correspond à l'activité d'un gramme de radium-226).

B. Activité d'une source radioactive après un temps déterminé :

Elle est donnée par la formule : $A = A_0 \cdot e^{t/T^{1/2}}$ (I.5)

Avec : **A** : Activité après un temps (Ci);

A₀ : Activité initiale (Ci);

t : Intervalle de temps depuis le début d'intégration de noyau (Jours);

T^{1/2} : Durée demi-vie (Jours).

Exemple de l'iridium (192) :

Lorsque l'intervalle de temps (t) depuis le début d'intégration de noyau et l'activité initial sont connus, l'équation (I.5) peut s'écrire comme suite :

$$A = \frac{A_0}{2^{(\frac{t}{74})}} \quad (\text{I.6})$$

Avec : **A** : Activité après un temps ;

A₀ : Activité initiale ;

t : Intervalle de temps (en jour) depuis le début d'intégration de noyau ;

Le chiffre **74** est un coefficient relatif à la durée de demi-vie de l'iridium-192.

Vu que c'est un calcul opérationnel qui revient souvent il est conseillé d'utiliser une calculatrice programmable ou une table de calcul à programmer tel que l'**Office Excel**.

C. Activité spécifique :

L'activité spécifique = activité de source / poids de la source (Bq/g ou Ci).

Une grande activité spécifique donne un bon rapport qualité de l'image par rapport au temps d'exposition.

D. Désintégration radioactive et la durée demi-vie (période) :

Après chaque mutation de noyau atomique, le nombre de noyaux instables (radioactifs) diminue. Au fil du temps, l'activité d'un nucléide radioactif diminue donc constamment, on appelle ce phénomène **la désintégration radioactive**.

Il est tout à fait impossible de prévoir à quel moment se produira la désintégration d'un noyau déterminé, mais si l'on considère un très grand nombre de noyaux, l'on se basera sur le temps nécessaire pour que la moitié du nombre initial de noyaux radioactifs soit désintégrée. Ce temps est appelé durée demi-vie ($T^{1/2}$).

La durée de demi-vie est une caractéristique d'un nucléide radioactif déterminé, elle ne peut subir aucune influence.

Tableau 1.1: Durée de demi-vie de quelques isotopes radioactifs. [17]

Isotope radioactif	Durée de demi-vie
Iridium-192 (IR-192)	74 jours
Cobalt-60 (Co-60)	5.3 ans
Thulium-170 (Th-170)	127 jours
Ytterbium-170 (Yb-170)	31 jours
Caesium-137 (Cs-137)	30 ans
Potassium-40 (K-40)	14×10^9 ans
Oxygène-15 (O-15)	124 secondes

La durée de demi-vie revêt une grande importance du point de vue économique.

E. Constante spécifique d'une substance radioactive (facteur C) :

La constante spécifique est le débit d'exposition, mesuré à une distance de 1 mètre de l'isotope et avec une activité égale à l'unité.

Tableau 1.2 : Constante spécifique de quelques isotopes radioactifs [17]

isotope	Constante spécifique	
	R/h par Ci à 1 m	nA/kg par G Bq à 1m
Ir-192	0.5	0.97
Co-60	1.31	2.54
Tm-170	0.0025	0.0048
Yb-169	0.125	0.24
Cs-137	0.35	0.68

F. Spectre de rayonnement :

Les éléments de rayonnement gamma donnent un spectre de rayonnement discontinu. Chaque source de rayons gamma possède un spectre de rayonnement spécifique.

L'énergie (moyenne) joue un rôle déterminant pour l'épaisseur maximale pénétrable de matière et pour certains facteurs influençant la qualité de l'image.

Tableau 1.3 : Energie moyenne de quelques isotopes. [17]

isotope	Energie moyenne
IR-192	400 KeV
Co-60	1200 KeV
Th-170	80 KeV

G. Porte-source :

Les sources radioactives sont enfermées dans une capsule inoxydable et soudé au moyen d'un rayon électronique.

Son étanchéité fait l'objet d'un contrôle sévère (suivant des normes internationales), et ce afin d'éviter toute contamination.

Cette capsule est ensuite placée dans un porte-source adapté au conteneur de transport ou de travail. Dans certains cas, la capsule peut être placée directement (sans porte-source) dans le conteneur (p.ex. SAUERWEIN R10 et R30).

G.1. Container de transport et de travail pour les sources gamma :

Les sources radioactives sont placées dans un container construit de façon à permettre leur transport ou leur utilisation en toute sécurité.

La source radioactive est entourée d'une matière à forte absorption des radiations, telle que le plomb, le tungstène ou l'uranium appauvri (le plomb présente l'inconvénient d'avoir une température de fusion basse, ce qui peut poser des problèmes en cas d'incendie).

Les appareils doivent satisfaire aux normes (national et international), notamment en matière de rayonnement de fuite admis, de résistance mécanique, de protections, de signalisation, etc.



Figure 1.3: Container de transport et celui de travail pour source IR-192.

G.2. Véhicule de transport de source :

Véhicule homologué destiné au transport des sources radioactives, équipé de l'isolement de la cabine passager par coque blindée de plomb, conduite par un chauffeur certifié selon norme.



Figure 1.4: Véhicule de transport de sources radioactives.

I.4.5. Différentes types d'appareils de la gammagraphie [15]

A. Appareils pour lesquels la source radioactive reste dans le container pendant l'irradiation :

A.1. La source de radiation immobile :

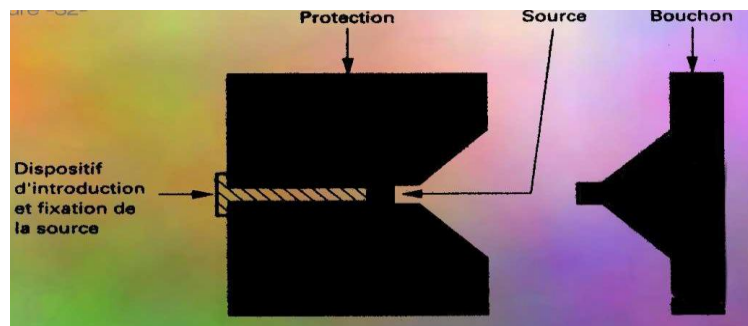


Figure 1.5 : Source de radiation ne bouge pas.

A.2. La source de radiation mobile :

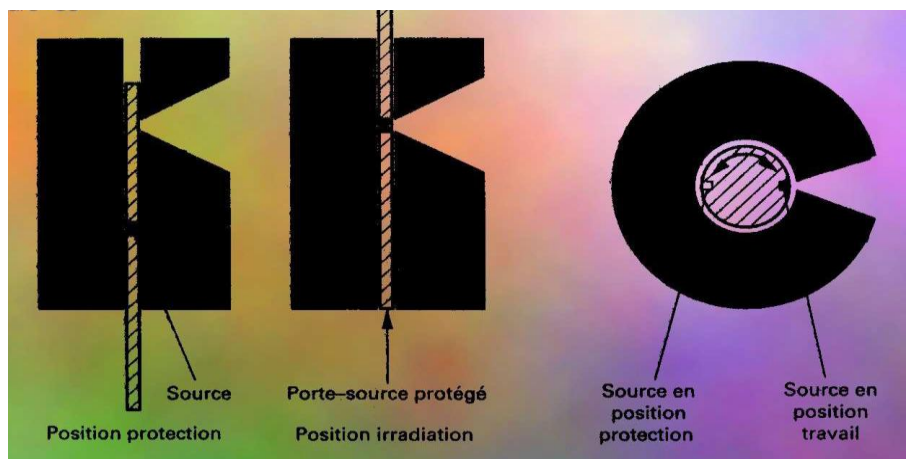


Figure 1.6 : Source de radiation bouge.

B. Appareils pour lesquels la source est sortie du container pour l'irradiation :

La commande se fait le plus souvent à distance (mécanique, électrique, pneumatique,...).

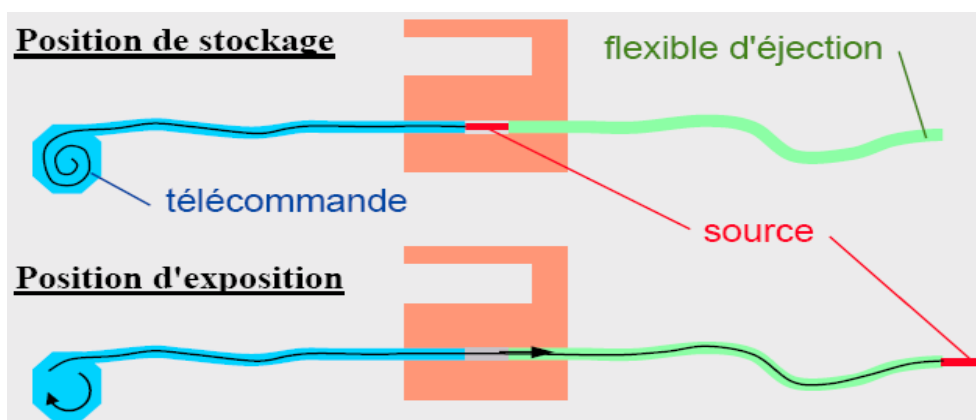


Figure 1.7 : Schémas de source qui sort du container pour l'irradiation.

C. Collimateur :

Les sources radioactives émettent des rayons dans toutes les directions.

Les collimateurs sont utilisés pour éliminer pratiquement tout rayonnement superflu. Ils sont faits en une matière possédant un coefficient d'absorption élevé (tungstène, plomb,...).

Leur forme varie en fonction de la technique de prise de vue appliquée (directionnelle, panoramique). Non seulement ils augmentent le degré de sécurité, mais ils permettent également d'obtenir une meilleure qualité de l'image (en réduisant le rayonnement diffus).



Figure 1.8 : Différents types de collimateurs.

I.5. Interaction du rayonnement et de la matière :

Lorsque des rayons ionisants traversent une matière, ils perdent progressivement leur énergie par interaction avec cette dernière. L'importance de cette perte d'énergie dépend du type d'interaction qui se produit. Ce dernier est fonction, surtout, de l'énergie du rayonnement et de la nature de la matière irradiée.

I.5.1. Diffusion Rayleigh :

Le photon heurte un électron lié. L'électron reste lié à l'atome ; le photon conserve presque toute son énergie et est dévié sur une autre trajectoire.

La baisse d'énergie est négligeable (pour les applications de radio contrôle).

I.5.2. Effet photo-électrique :

Lorsque des photons d'une énergie (relativement) faible traversent une matière, l'énergie totale de ces photons peut être utilisée pour éjecter hors de l'atome un électron situé sur l'une des couches électroniques intérieures, et pour donner à cet électron une énergie cinétique (accélération).

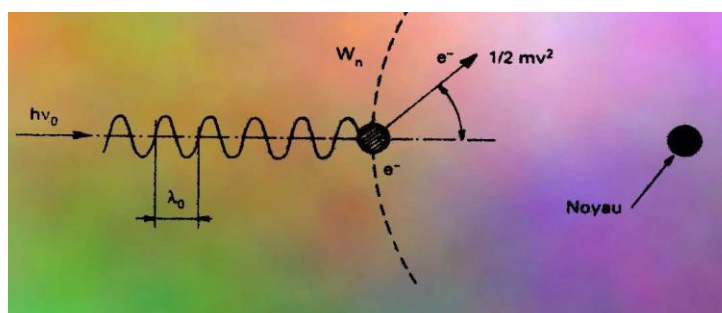


Figure 1.9 : Principe de l'effet photo-électrique.

I.5.3. L'effet Compton :

Lors de l'interaction de photons avec des électrons faiblement liés situés sur les couches électroniques extérieures, une partie de l'énergie est transmise à ces électrons, qui sont alors projetés en dehors du noyau.

Les photons sont ainsi déviés de leur trajectoire initiale de pénétration et ressortent de la collision moins riches en énergie ; il y a une diffusion et une réduction de l'énergie du rayonnement.

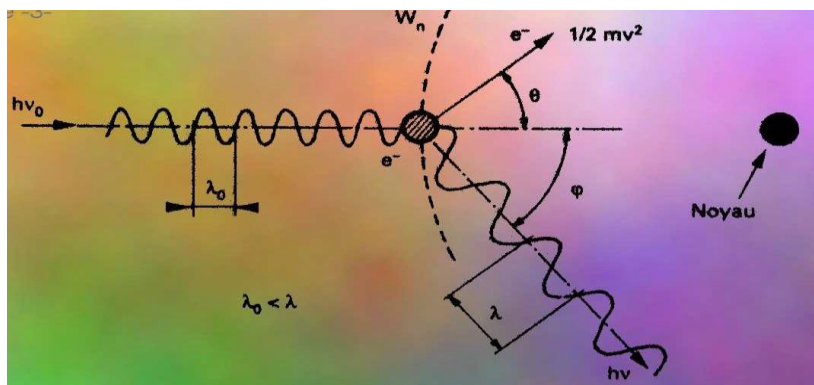


Figure 1.10 : Principe de l'effet Compton.

I.5.4. Formation de paire :

La formation de paire ne se produit que pour les énergies supérieures à 1.02 MeV.

L'énergie de photons est utilisée pour créer un électron (e^-) et un positron (e^+) et leur donner une énergie cinétique ($\frac{1}{2}mv^2$).

Le positron créé ne possède qu'une courte durée de vie et disparaît très rapidement à la suite d'une collision avec un électron ; le positron et l'électron disparaissent, et leur énergie est convertie en deux photons de 0.51 MeV.

Le processus de formation de paire joue surtout un rôle lorsque des photons riches en énergie traversent des matières possédant un nombre atomique élevé.

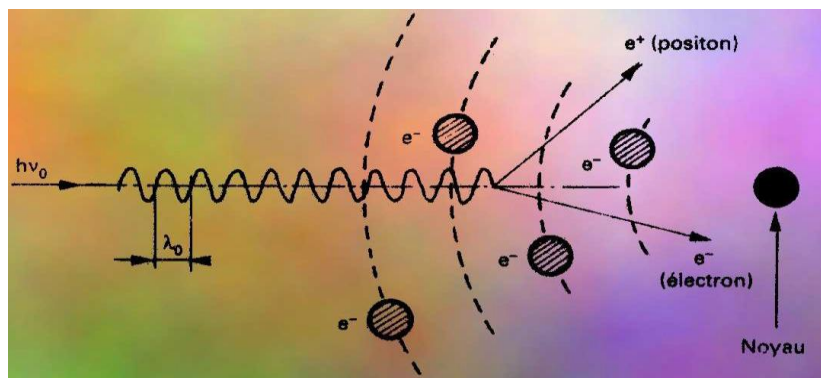


Figure 1.11 : Principe de formation de paire

II. Les étapes basiques en contrôle radiographique : [17]. [18]

II.1. La radioprotection :

Ensemble des méthodes et moyennes utilisés pour la protection des personnes contre les radiations.

II.1.1. Matériel :

Stylodosimètre ; Instrument, permettant de mesurer et d'enregistrer à chaque instant la dose accumulée absorbée. Dans l'enveloppe est située une chambre d'ionisation dans laquelle un électroscope sert de conducteur central.

Cet électroscope est connecté à un condensateur qui est chargé (la partie mobile de l'électroscope doit être mise à zéro sur l'échelle de lecture).

Le rayonnement produit des ionisations dans la chambre, ce qui provoque une décharge progressive du condensateur qui est fonction de l'intensité de radiation.

Radiamètre individuel télédétection ;

Détecteur alarme individuel ; signal sonore des radiations.

Pince de manipulation ; pour éviter le contact avec la source.

Plaques de signalisation ; contenant le trèfle modélisant la radioactivité.

Rectangles rétroréfléchissant ;

Rubans de balisage ; pour indiquer les frontière de la zone irradiier.

Balises de signalisation ;

Balises d'alarme ;

Chargeur pour détecteur ;

Chargeur pour stylodosimètre ;

II.2. Production de radiogramme :

II.2.1. Matériel :

La source radioactive ;

Adhésifs ; pour coller les caractères alphanumériques à la cassette porte écrans renforceurs contenant le film.

Aimants de fixation ; pour tenir les films à la pièce à inspecter.

Bandes chiffrées ; pour repérage (les chiffres sont en **plomb**).

Boîte de rangement des caractères en plomb (chiffres et lettres) ; pour les indications sur les films.

Cassettes (métalliques ou souples) ; sert de protège et port film.

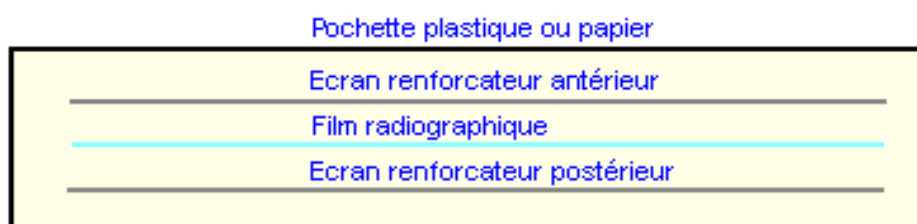


Figure 2.1 : Structure d'une cassette.

Chronomètre ; pour la prise de temps de l'exposition.

Ecrans renforceurs (en plomb doubles faces ou fluorescents) ; protèges film et améliorant qualité d'image.

Indicateurs de Qualité d'Image(I.Q.I) ; Appareil qui comporte une série d'éléments d'épaisseur graduée qui donne une mesure de la qualité d'image à obtenir. Les éléments des IQI sont généralement des fils ou des gradins percés.

Règles à calcules ;

Stylo tube marqueur ; pour marquage et repérage.

Films radioactives ; composé de :

- ✓ **a** : couche de gélatine durcie qui protège l'émulsion (p.ex. contre les rayures) ;
- ✓ **b**: couche d'émulsion constituée d'un mélange de gélatine et de microscopiques cristaux d'halogénure d'argent ;
- ✓ **c** : substratum, une couche assurant l'adhérence de la couche d'émulsion au support ;
- ✓ **d** : support, couche souple et transparente de polyester.

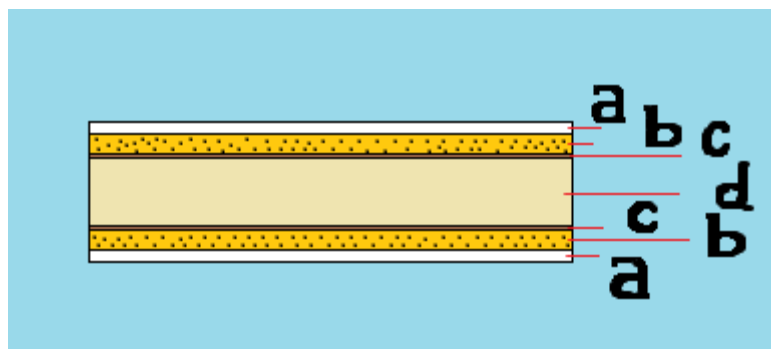


Figure 2.2: Structure d'un film radiographique.

A. Prise de clichés et technique de tire :

Un radiologue, technicien responsable de prise de clichés après avoir choisir une des techniques de tire selon quelques critères de la pièce à inspecter tel que sa forme (complexe de volume : plein, creuse ou tubulaire).

A.1. Technique plan sur plan :

La pièce à inspecter collé au film se positionne entre se dernier et la source radioactive qui est à une distance bien déterminée. C'est une technique pratique pour toutes formes de pièce.

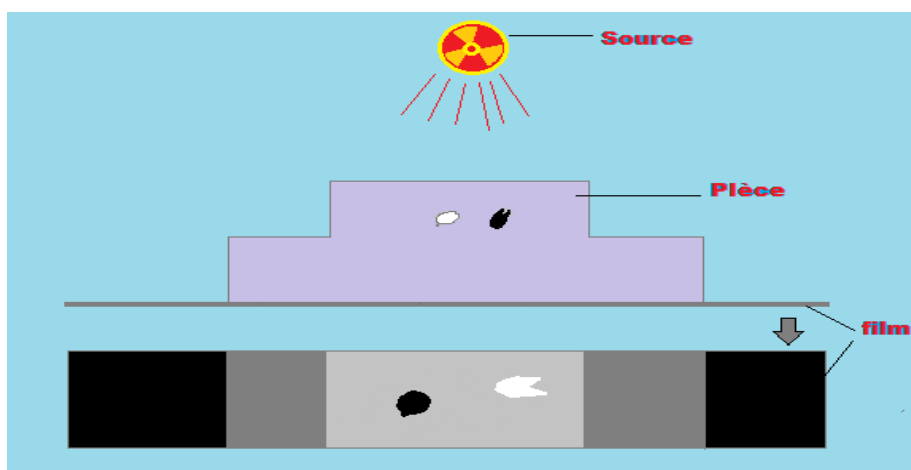


Figure 2.3 : Principe de tire plan sur plan.

A.2. Technique en contact :

La pièce à inspecter est en contact avec la source radioactive et entre cette dernière et le film. C'est une technique utilisé plus en inspection des soudures pipeline.

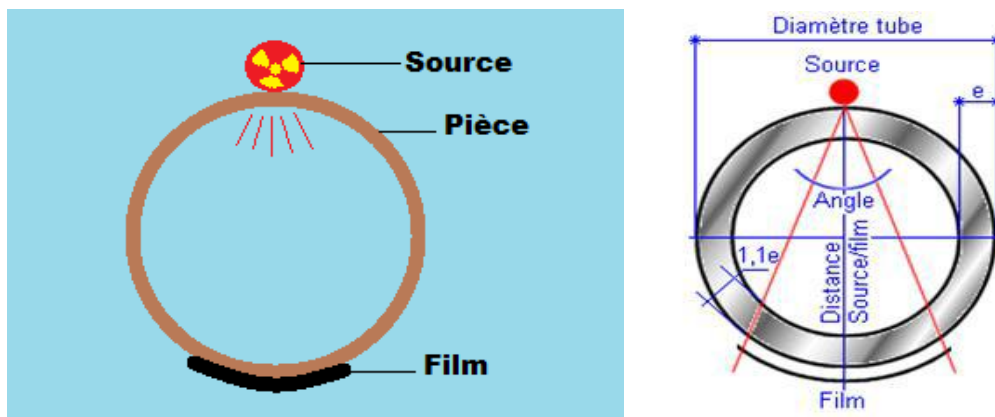


Figure 2.4: Principe de tire en contact.

A.3. Technique en ellipse :

Pour inspecter les pièces tubulaires uniquement, généralement de moyen ou petit diamètre. Le cordon à inspecter est entre un film positionné sur le plan tangent au premier et une source radioactive qui est en décalage tel que la projection de cordon de soudure sur le film est elliptique.

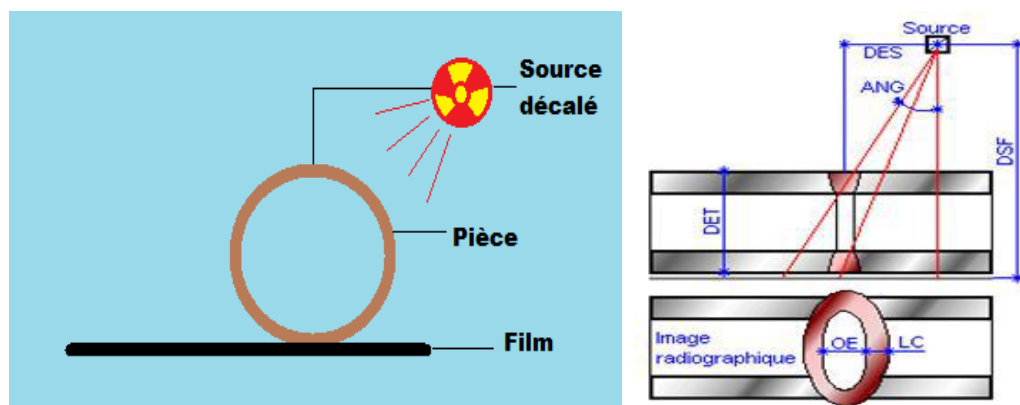


Figure 2.5: Principe de projection elliptique.

A.4. Technique panoramique :

Pour inspecter les pièces tubulaires à grand diamètre, tout le cordon de soudure est radiographier en une seul fois, la source est placée au centre de tube, les films sont adhésés à l'extérieur de se dernier.

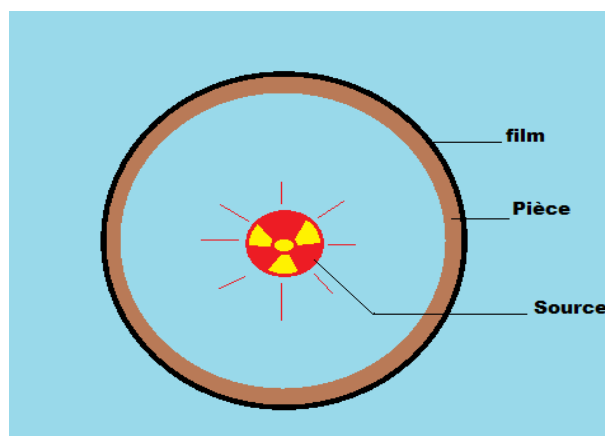


Figure 2.6: Principe de tire panoramique.

II.3. Développement des clichés :

Un technicien transforme l'image latente du film en une image visible permanente et qui consiste notamment à développer, fixer, laver et sécher les clichés.

II.3.1. Laboratoire de développement des films :

Le développement se fait dans la chambre noire ; un laboratoire de développement privé de tout type de rayonnement lumineux qui nuire à la qualité du film, sauf la lumière infra rouge qui est autorisé.

A. Matériels :

Aérateurs ; pour renouveler l'air de la chambre noire << **Black house** >>.

Bac de développement ; composé de cuve à révélateur, bain d'arrêt, fixage et lavage.

Couvercles cuves ;

Chargeur pour stylodosimètre ;

Cadres de développement à glissières ; sert de port films lors d'émergence dans les baigns et lors de séchage.

Chauffe-bain ; thermoplongeur.

Compte-minutes ; pour respecter le timing (minutage).

Diffuseurs polysodium ; source de lumière infra rouge.

Thermomètre flotteur ; pour vérifier la température adéquate.

Sécheuse ; armoire ou support à cadres de développement pour déshydrater les films.

B. Laboratoire mobile de développement des films :

Ce laboratoire de traitement de film radiographique est conçu sur le châssis arrière d'un camion, ce qui permet aux techniciens d'avoir le laboratoire au plus près du site de travail.



Figure 2.7: Camion-laboratoire de développement des films.

C. Méthode :

1. Révélateur :

Le révélateur (solution basique) réduit à l'état d'argent noir les cristaux d'halogénure d'argent ionisés.

Les cristaux non ionisés prennent une couleur laiteuse.

Durée de développement recommandée : 5 min à 20 °C.

La durée de développement exagérée aura pour effet que les cristaux non ionisés seront également développés (entraînant une baisse de la qualité de l'image).

Afin de détacher les bulles d'air qui pourraient adhérer à l'émulsion (susceptibles de causer des taches) et pour assurer une pénétration uniforme du révélateur dans toutes les parties du film, il est important d'agiter le film pendant quelques secondes.

2. Bain d'arrêt :

Le bain d'arrêt met fin à l'action du révélateur et évite une trop rapide neutralisation du fixateur par le restant de révélateur.

Le film est agité dans le bain d'arrêt pendant presque 1 minute.

Il est conseillé d'ajouter au bain d'arrêt 30 ml d'acide acétique glacial par litre d'eau.

3. Fixateur :

Lors de l'immersion dans le fixateur (un produit acide), les halogénures d'argent non réduits sont éliminés de l'émulsion.

La durée de fixage de film est environ le double du temps nécessaire pour obtenir sa transparence.

La durée normale de fixage est 5 minutes à 20 °C.

4. Lavage :

Pendant le lavage, les complexes argentiques solubles formés dans l'émulsion, sont éliminés de l'émulsion.

Un agent réduisant la tension superficielle (p.ex. Agepon) peut être ajouté pour un égouttage plus rapide et plus uniforme du film.

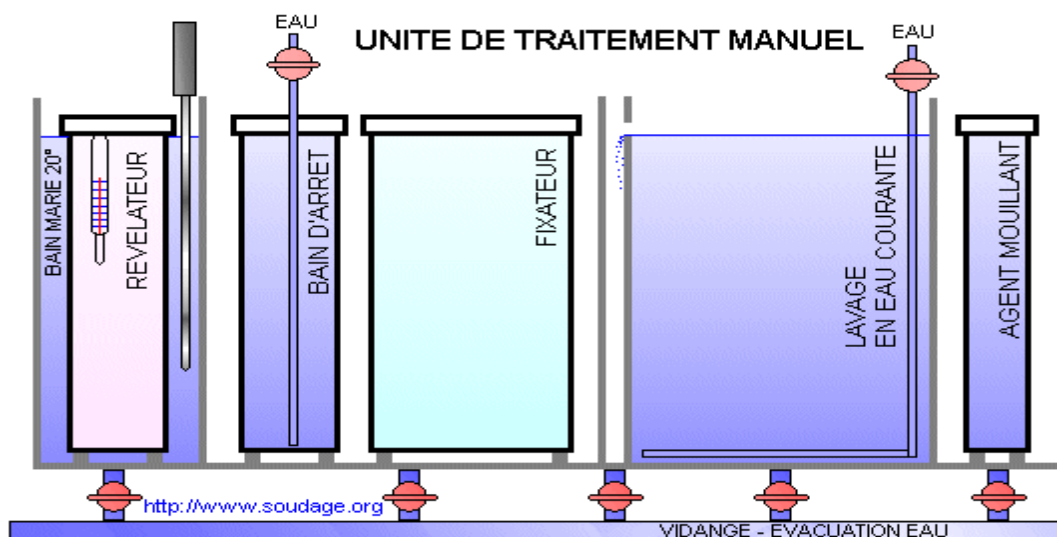


Figure 2.8: Bac de développement manuel des films

5. Séchage :

Il faut veiller à ce que le film sèche uniformément et pas trop vite (température maximale : 35 °C).

II.4. Détermination de la qualité d'image de radiogramme :

Un inspecteur en radiographie doit premièrement vérifier la qualité d'image de radiogramme selon des normes spécialisées (ASME IX, API 1104, ...etc.) :

- Le bon choix des films utilisés ;

- Les indications sur le radiogramme sont identifiables ;
- Le radiogramme est daté, numéroté et identifier les opérateurs qui ont participé lors de soudage plus le radiologue ;
- Le repérage avec marquage ;
- La bonne utilisation des indicateur qualité d'image (I.Q.I) : le choix, le positionnement ;
- Les différentes densités entre les I.Q.I sont bien définies et si la soudure est acceptable. [18]

A. Matériel :

Densitomètre ; Appareil mesurant la densité optique d'un film ou d'un papier.

Si la qualité d'image n'est pas acceptable on doit refaire le contrôle pour éviter d'autres problèmes.

II.5. Interprétation des indications :

A. Matériels :

Négatoscope ; Appareil composé d'une source lumineuse et d'un écran translucide, utilisé pour observer les radiogrammes.



Figure 2.9: Négatoscope pour interprétation des films.

L'inspecteur doit faire des interprétations pour toutes les indications enregistrées et déterminera leurs origines. Dans l'examen radiographique, l'inspecteur doit vérifier si les indications dans le film sont : discontinus, fausses indications ou d'autres types.

II.6. Evaluation de contrôle et des résultats :

L'inspecteur fait l'évaluation et vérifie le contrôle et ces résultats selon normes :

- Acceptabilité ou refus de contrôle et de film ;
- Evaluer les indications : positionnement, orientation, discontinuité, nature et influence sur le cordon de soudure ;
- Acceptabilité ou refus de soudure.

II.7. Enregistrement et communication des résultats :

C'est l'étape finale de contrôle par radiographie, l'inspecteur doit rédiger un rapport de contrôle, contenant toutes les informations de la prise de clichés, de la première étape jusqu'à l'évaluation de contrôle et ces résultats, quatrième et avant dernière étape, puis le communiqué avec le groupe de travail.

Dans le cas de refus à cause de qualité de film ou de défiance de technique de contrôle, l'inspecteur doit étudier les problèmes avec le radiologue, de but de porter une correction.

Les résultats de contrôle doivent se transformer en document rédigé et signé par l'inspecteur. Une bonne rédaction et une forme de rapport sont exigées par des normes spécialisées.

Le rapport devient une partie pièce-jointe de dossier du projet, qui va servir comme fichier d'identité à archiver pour chaque cordon de soudure, utilisable lors d'un besoin ou en cas d'une intervention lors de défiance.

III. Partie pratique :

Comme chaque naissance d'un nouveau projet de ligne gazoduc, tel que le nouveau projet de ligne de canalisation (16.5 Km) au niveau de wilaya d'Adrar dénommé: << **GAZODUC Ø 28" PS04-GR5 TA ADRAR** >>, à réaliser par l'entreprise de réalisation de canalisation **KANAGHAZ**. Le **ministère d'énergie** et l'entreprise national **SONATRACH** comme maître d'œuvre, exigent un protocole de qualification de procédé de soudage par électrodes enrobés (SMAW) avec lequel il sera réalisé et conformément à la norme **API 1104**. Et comme son nom l'indique, la ligne sera réalisée par soudage bout à bout du tube pipeline de diamètre de 28" (71,12 cm), de longueur de 9 à 12 mètres et d'épaisseur de 9.5 mm, qui est en acier **API 5L X70**, à base de carbone-manganèse ; pour usage en transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars.

Le tube, soudé en spiral, est produit par l'entreprise **ANABIBE**, par formage à froid d'une bobine d'acier conformément à la norme **API 5L**.

Tableau 3.1 : Composition chimique de l'acier grade API X70 [19]

% X70	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
	0.125	1.680	0.275	0.051	0.040	0.021
	S	Cu	Ti	Nb	Al	P
	0.005	0.045	0.003	0.033	0.038	0.012

Tableau 3.2: Exigence de la composition chimique pour analyses nuance X70 selon norme API [20]

	C	Mn	Si	V	Ni	Mo	S	Cu	P	Nb	Al
%Min	0.050	1	0.150	-	-	-	-	-	-	-	0.010
%Max	0.140	1.700	0.350	0.080	0.250	0.250	0.005	0.080	0.020	0.040	0.040

III.1. Protocole de qualification d'un procédé de soudage conformément à l'API 1104 :

Consiste à préparer deux éprouvettes, dont une dénommé **de ligne** pour la qualification procédé de soudage et l'autre **de réparation** ; destinées à subir des contrôles bien explicités par la norme **API 1104**, afin d'inspecter leur qualité de soudage et leur comportement face aux sollicitations comparables aux celles peuvent exister lors de réalisation des canalisations ou lors de fonctionnement en transport des hydrocarbures. [21]

III.1.1. L'éprouvette de ligne doit subir :

- Un contrôle visuel (intérieur et extérieur de cordon) ;
- Un contrôle par gammagraphie (par tire en contacte) ;
- Un contrôle destructif :
 - Test de traction (pour 04 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm)
 - Test de pliage de côté (pour 04 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm) ;
 - Test de texture (pour 08 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm). [21]

III.1.2. L'éprouvette de réparation :

- Un contrôle visuel (intérieur et extérieur de cordon) ;
- Un contrôle par gammagraphie (par tire en contacte) ;
- Un contrôle destructif :
 - Test de traction (pour 02 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm) ;
 - Test de texture (pour 02 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm) ;
 - Test de pliage de coté (pour 02 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm) ;
 - Test de dureté Vickers (pour 02 barreaux de 250 x 25 x 9,5 mm). [21]

Remarque :

Les démentions des barreaux sont exprimés en millimètres (longueur par largeur par épaisseur).

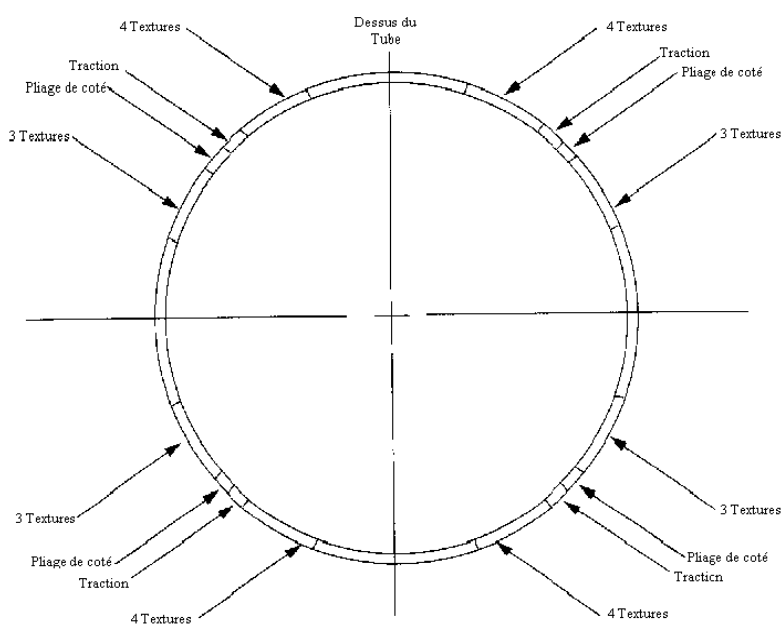
III.1.3. Emplacement des prélèvements des barreaux :

Figure 3.1: Endroits de prélèvement des barreaux exigés par la norme API 1104 [21]

III.1.4. Machines de manipulation :

- **La machine de Mohr** : pour test de traction, test texture et pliage.
- **Machine de dureté (type Vickers)** : pour test de dureté.

Remarque :

Les éprouvettes d'homologation une fois soudées, doivent être sanctionnées par un PV d'homologation signé contradictoirement attestant que les joints sont sains (sans aucun défaut), de même ce résultat est exigé par le laboratoire des essais mécaniques. Chaque soudeur participant à la réalisation d'un tel projet doit être homologué et chaque arrêt de travail de 40 jours nécessite un nouveau test d'homologation des soudeurs.

III.2. Préparation des éprouvettes :

III.2.1. Débitage des échantillons :

Chaque échantillon est de longueur presque 20 cm, de diamètre 28" (71.2 cm) et d'épaisseur de 9.5 mm ; l'éprouvette est réalisée par le soudage bout à bout de deux échantillons par deux soudeurs et un meleur.



Figure 3.2 : Débitage des échantillons avec la chanfreineuse manuel à oxycoupage.

III.2.2. Préparation des cordons de soudure :

Les préparations des chanfreins et le soudage des éprouvettes se font de la même façon pour toutes les éprouvettes précitées.

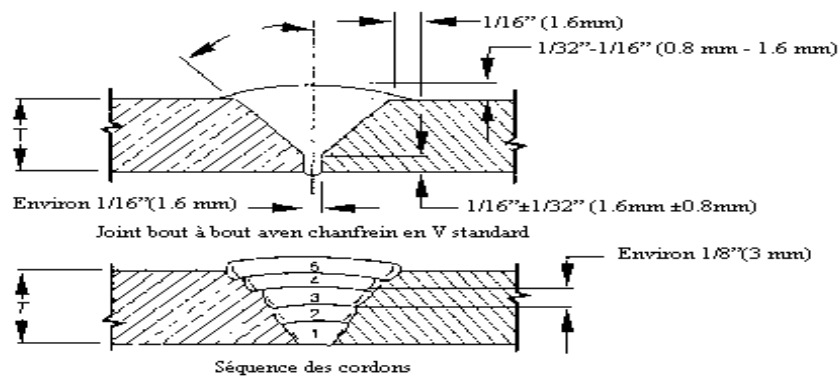
A. Limage des contours des éprouvettes et préparation des chanfreins :**Figure 3.3: Finition des chanfreins et des talons par meulage manuel.****B. Réglage de poste de soudage et choix des baguettes :****Figure 3.5: Poste de soudage à l'arc avec les électrodes enrobées cellulosiques utilisé dans qualification de procédé.**



Figure 3.6 : Préchauffage de l'éprouvette jusqu'à 130 °C.

Après réglage de poste, choix des électrodes et un préchauffage jusqu'à 130 °C l'opération de soudage commence et durant laquelle les paramètres de soudage sont enregistrés, dont les valeurs sont indiquées dans le **tableau 3.3** et le **tableau 3.5**.

III.3. L'éprouvette de ligne :

III.3.1. Soudage :



Figure 3.7: Soudage de l'éprouvette de ligne.

Tableau 3.3: Paramètre de soudage éprouvette de ligne [22]

Passe	Métal d'apport					Courant de soudage				Vitesse	Temps			Obs
	Dénomi	Ø	Long	N°Lot	Nbr	Nature	Polarité	I	V		Soud	Meul	Bros	TOTAL
	mm	mm						Amp	Vlt	Cm/min	min	min	min	
E6010	Lincoln	3.2	350	39659	22	CC	Négative	80	32	2	25	6		1h10min
E8010	Lincoln	4	350	35184	16	CC	Positive	110	30	2.5	14		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	22	CC	Positive	120	30	3	10		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	8	CC	Positive	120	30	2.5	6		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	14	CC	Positive	110	28	3	15		2	

III.3.2. Nettoyage par brossage et repérage de cordon de soudure.



Figure 3.8: Nettoyage par brossage et repérage de cordon de soudure.

III.3.3. Contrôles :

A. Contrôle visuel :

Le contrôle visuel a donné un résultat positif, le cordon de soudure est qualifié et accepté.



Figure 3.9: Bonne qualité visuel de cordon de soudure.

B. Contrôle par gammagraphie (par tire en contact) :

Préparation de la zone de contrôle et matériel de gammagraphie:

- Evacuation de champs d'exposition, que deux radiologues restent pour la manipulation, mais ils quittent la zone irradiée pendant le temps de pose (d'exposition) ;
- La liste de matériel de la radioprotection est citée dans le paragraphe II.1 ;
- La liste de matériel de prise de clichés est la même que celle citée en paragraphe II.2 ;
- Pour assurer l'imagerie de tout le cordon, il faut utiliser 06 films (qualité choisie : AGFA D5, de moyenne grain) ;
- La source est l'iridium (192), d'une activité de 46 Ci ;

- Calcul de temps de pose : avec la table de calcul programmé de l'Office Excel.

	A	B	C
1	Temps de Pose		
2	activité (Ci)	diamètre (ø")	épaisseur (mm)
3	46	28	20
4			
5			
6			
7			
8	D7en mn	D5en mn	D4 en mn
9	3,83	7,67	15,33
10	D7en sec	D5 en sec	D4 en sec
11	229,98	459,95	919,90

Figure 3.10: Résultat de temps de calcul avec la table programmé avec Office Excel.

Il faut insérer les trois données ; l'activité en curie, le diamètre de tube en pouce et l'épaisseur en millimètre, pour afficher le temps de pose en minutes et en secondes selon les qualités de films programmés : D7, D5 et D4.

La durée théorique de l'exposition résultante selon la qualité de film D5 choisie est 08 minutes et 07 secondes, donc la manipulation sera en trois tires de presque 08 minutes pour chaque tire.

1. La manipulation :



Figure 3.11: Inspection par gammagraphie de l'éprouvette de ligne.

2. Développement des films :

La liste de matériel de développement est la même que celle citée dans le paragraphe II.3.



Figure 3.12: Bac de développement des films



Figure 3.13: Séchage des films en support à cadres de développement.

C. Contrôles destructifs :

1. Test de traction (pour 04 barreaux) ;



Figure 3.14: Barreaux pour test de traction.

Tableau 3.4 : Propriétés mécaniques de l'acier grade API X 70 [20]

E (MPa)	ν	$\sigma_e 0.2$ (MPa)	σ_u (MPa)	A %	k	n
2,22.10⁵	0,3	483,03	625,14	40,55	855,70	0,094

Les propriétés mécaniques de résistance à la traction des barreaux (pour l'éprouvette de ligne et celle de réparation) seront conformes aux exigences du **tableau (3.4)**, sachant que **E** le module de Young, **ν** le coefficient de Poisson, **$\sigma_e 0.2$** la limite élastique selon la norme, **σ_u** la contrainte ultime, **A %** l'allongement à la rupture, et **k** et **n** étant les paramètres de Hollomon. Les rapports de la limite élastique à la charge de rupture pour chaque éprouvette d'essai ne devront pas dépasser **0.85**.

2. Test de pliage de coté (pour 04 barreaux) ;

**Figure 3.15: Barreaux pour test de pliage.**

3. Test de texture (pour 08 barreaux).

**Figure 3.16: Barreaux pour test de texture.**

III.4. L'éprouvette de réparation :

III.4.1. Le soudage :

Une fois l'éprouvette est soudée dont le joint contient un défaut localisé par des paramètres, en suite on procède à l'ouverture du joint par meulage de but de l'éliminer, puis un soudeur répare le joint remplissant cette ouverture.

Le but de cette réparation c'est de voir si les caractéristiques thermiques n'ont pas d'influence sur les caractéristiques mécaniques du métal d'apport.



Figure 3.17: Préparation de l'éprouvette de réparation.

Tableau 3.5 : Paramètre de soudage éprouvette de réparation [22]

Passe	Métal d'apport					Courant de soudage				Vitesse	Temps			Obs
	Dénomi	∅	Long	N°Lot	Nbr	Nature	Polarité	I	V		Soud	Meul	Bros	
		mm	mm					Amp	Vlt	Cm/min	min	min	min	
E6010	Lincoln	3.2	350	39659	22	CC	Négative	80	32	2	28	6		1h10min
E8010	Lincoln	4	350	35184	15	CC	Positive	110	30	2.5	16		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	22	CC	Positive	120	30	3	10		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	8	CC	Positive	120	30	2.5	6		2	
E8010	Lincoln	4	350	35184	14	CC	Positive	110	28	3	10		2	

III.4.3. Contrôles :

- A. Contrôle visuel :** Apparition d'un défaut de dénivèlement mais tolérable selon la norme API 1104 ; en paramètre 20-30.



Figure 3.18: Défaut de dénivèlement tolérable et réparation.

- B. Le contrôle par gammagraphie (par tire en contact) :**

Même conditions matériels et manipulation avec le contrôle par gammagraphie avec l'éprouvette de ligne.



Figure 3.19: Inspection par gammagraphie de l'éprouvette de réparation.

- C. Le contrôle destructif :**

Deux barreaux pour chaque test : Test de traction, texture, pliage de coté et de dureté Vickers (HV).



Figure 3.20: Barreaux de l'éprouvette de réparation.

IV. Résultat et discussion :

IV.1. l'éprouvette de ligne :

❖ Contrôle visuel :

- Cordon de soudure qualifié bon et accepté selon la norme API 1104.

❖ Contrôle par gammagraphie :

- Cordon sain, résultat positif ; car il n'y a aucune indication de défaut sur les clichés :



Figure 4.1: Cliché de côté BB, paramètre 10-40.



Figure 4.2: Cliché de côté BB, paramètre 30-60.



Figure 4.3: Cliché de côté BB, paramètre 60-90.



Figure 4.4: Cliché de côté BN, paramètre 100-130.



Figure 4.5: Cliché de côté BN, paramètre 130-160.



Figure 4.6: Cliché des côté BN, paramètre 170-200.

❖ **Contrôle destructif :**

- **Teste de traction :** rupture hors soudure pour les quatre barreaux de même façon (signe d'une bonne soudure).



Figure 4.7: Résultat test de traction pour l'éprouvette de ligne (rupture hors soudure).

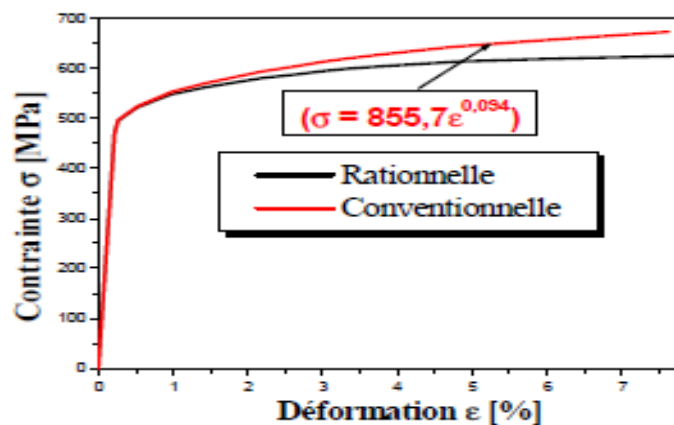


Figure 4.8: Courbes de traction nominale et la courbe vraie.

Tableau 4.1: Résultat de test de traction

$\sigma_{e0,2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	σ_{max} (MPa)	Résultat	Discussion
500	625,14	640	$\sigma_{max} > \sigma_u$	Condition vérifié

❖ **Teste de pliage de coté :** Sans rupture (soudure saine).



Figure 4.9: Résultat de test pliage de coté.

- ❖ **Test de texture :** Même mode de rupture pour tous les barreaux, en rayure usiné :



Figure 4.10 : Résultat de test de texture.

IV.2. L'éprouvette de réparation :

- ❖ **Contrôle visuel :**
 - cordon de soudure bien fait et qualifier.
- ❖ **Contrôle par gammagraphie :**
 - Cordon sain, les clichés ne portent aucune indication de défauts :



Figure 4.11: Cliché sain de côté BB, paramètre 90-110.



Figure 4.12: Cliché sain de paramètre 200-00.

❖ Contrôles destructifs :

- **Test de traction :** Rupture hors cordon de soudure pour l'un des deux barreaux, et rupture en cordon de soudure pour l'autre.



Figure 4.13: Résultat test de traction de l'éprouvette de réparation.

Rupture dans le cordon signifie que le cordon n'est pas conforme (existence d'un éventuel défaut, dénivellement concentrant de contraintes).

- **Test de texture :** Même mode de rupture pour les deux barreaux, en rayure usiné :



Figure 4.14: Résultat de test de texture.

- **Teste de pliage de coté :** Sans rupture :



Figure 4.15: Résultat de test de pliage de coté de l'éprouvette de réparation.

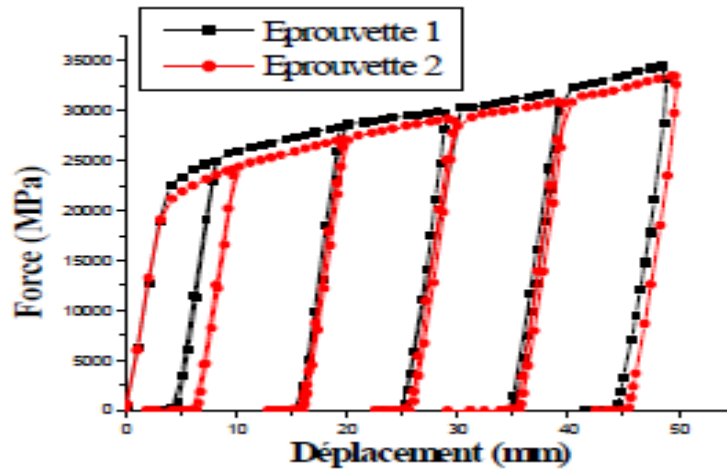


Figure 4.16: Courbe Force-Déplacement pour test de pliage à cinq pas.

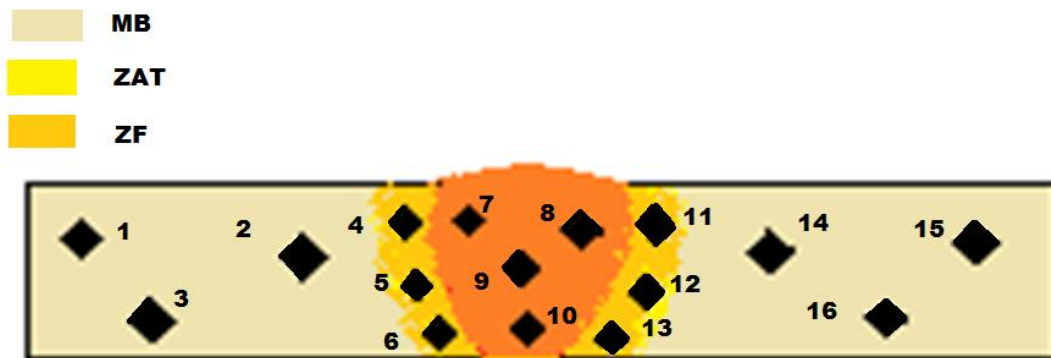


Figure 4.17 : Positionnement des indentations en essais de dureté selon la norme API.

➤ Test de dureté Vickers :

Tableau 4.2 : Résultats de test dureté Vickers (dureté en Kg/mm^2) :

Zone	Métal de base (MB)						Zone fondu (ZF)				Zone affecté thermiquement (ZAT)					
	1	2	3	14	15	16	7	8	9	10	4	5	6	11	12	13
Dureté Vickers	219	218	215	215	219	217	224	219	221	222	229	234	230	235	233	232
Moyenne	217,16						221,5				232,16					

Les valeurs de micro dureté (HV) de ce barreau sont acceptables et ne présentent aucune anomalie. Elles sont conformes aux exigences de la norme API. Les filiations de micro dureté ont montré une bonne alternance tout au long de l'assemblage soudé (MB, ZF et

la **ZAT**) pour les éprouvettes étudié. Les résultats de micro dureté des positions **7,8,9** et **10** relatives au cordon de soudure ont montré une uniformité de valeurs entre le métal de base et le cordon de soudure, signe d'un soudage correct. Nous avons remarqué que les zones **4, 5, 6, 11, 12 et 13** correspondant à la **ZAT** qui révèlent une dureté légèrement élevée. Ces zones sont les plus fragiles donc susceptibles à la fissuration à froid, dans le cas d'existence de contraintes résiduelles.

V. Synthèses et conclusion :

- La rupture de barreau prélevé de l'éprouvette de réparation en paramètre 20-30 (même endroit de caniveau) confirme la fragilisation des soudures par les défauts et la réparation comme second traitement thermique ;
- Les contraintes admissibles de matériau **API 5L X70** sont vérifiées même avec le soudage. Il n'y a pas de changement qui nuit la loi de comportement de ce matériau soudé (matériau ductile) ;
- Un bon soudage sert de renfort (dans certains cas), car il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau soudé ;
- Une bonne combinaison de contrôle par gammagraphie avec les contrôles destructifs mène à une étude complète des structures et garantie la fiabilité du projet.
- La gammagraphie donne une meilleure caractérisation des défauts de soudures métalliques ;
- Les caractérisations mécaniques de l'acier API 5L X70 après soudage sont réalisées selon l'exigence du ministère d'énergie et du SONATRACH. Les différents essais de comportement en traction, texture, la dureté et la résistance au pliage montrent que les propriétés mécaniques des soudures sont convenables et par extension le projet peut être mis en service.
- Les résultats expérimentaux, globalement, sont en conformité avec la norme internationale (**API-1104**).
- Intervention de la gammagraphie sur site de travail et facilité de manipulation.
- La gammagraphie joue un rôle important en inspection des soudures métalliques, dans l'industrie de construction mécanique et reste l'un des meilleurs contrôles non destructifs. Vu son rendement important en amélioration et sauvegarde de la fiabilité des ouvrages soudés, son rôle comme complément à côté des contrôles destructifs, malgré son coût excessif et la nocivité de ces rayonnements, il est pratiquement omniprésent dans le processus de contrôle et apporte une visibilité claire sur la tenue des cordons.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le soudage dans ses divers procédés variant implique : le chauffage, la fusion puis le refroidissement ; cela à un impact direct sur la zone soudée qui est derrière la détermination des propriétés mécaniques et chimiques du matériau soudé. Les fonctions métallurgiques en plus sa qualification en soudabilité sont préétablies après contrôle selon le cahier de charge.

Un choix judicieux des paramètres de soudage est exigé par des normes spécialisé, afin d'optimisé les défauts de soudure.

Les contrôles non destructifs garantissent, en fait, les fonctions de : surveillance, prévention, détection et même la caractérisation des différents défauts et anomalies indésirables, soit superficiels ou volumiques dans l'assemblage soudé. Ce procédé est usité dans divers domaine de construction : chantier naval, aéronautique, pétrolier et en charpente métallique. La gammagraphie est donc un moyen approuvé en inspection des soudures métalliques. Vu son rendement important en amélioration et sauvegarde de la fiabilité de l'assemblage et facilité de manipulation, malgré son coût excessif et la nocivité de ces rayonnements. Malgré son coût excessif et les risques de ces rayonnement, ce procédé est très usagé en pratique notamment dans les hydrocarbures.

Les investigations réalisées sur les cordons de soudures à savoir le contrôle non destructif (γ) et les essais mécaniques n'ont pas révélé des défauts ou anomalies majeurs. A cet effet, les soudures sont déclarées saines et conformes aux exigences techniques.

On aurait souhaité trouver un défaut bien identifié dans les cordons et ce pour mieux matérialiser ce dernier par les essais précités. Cet objectif n'était pas atteint malheureusement.

A cet effet, on suggère aux futures étudiants de reprendre cette étude en poussant l'investigation jusqu'à ce qu'un défaut substantiel soit décelé et faire en suite une comparaison effective avec les cordons exemptes de défauts. De là, on pourra mesurer l'importance du contrôle en phase de construction et la fiabilité de l'ouvrage.

Bibliographie

Bibliographie :

[01] WWW.KANAGHAZ.DZ/

[02] **H.GRANJON** : << **Bases métallurgiques du soudage** >> ; publication du soudage et de ces applications, ISBN : 2-85701-159-B.

[03] **Collectif** : << **Soudage et assemblage-soudage** >> Guide d'auto-apprentissage, le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (**CSMOFMI**), Québec, août 2010.

[04] **Laurent CARBONELL** : << **la métallurgie et la métallurgie du soudage** >> ; institut de soudure-France, CAIER IBS - métallerie 71 ; octobre 2004.

[05] **Klas WEMAN** : << **procédés de soudage** >> ; Aide-mémoire de l'ingénieur, l'usine nouvelle, DUNOD.

[06] **Régis BLONDEAU** : << **Métallurgie et mécanique de soudage** >> ; Mécanique et Ingénierie des Matériaux, LAVOISIER, 2001 : ISBN 2-7462-0317-0.

[07] **Easterling .K** << **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding** >>, Editions: Butterworths, 1983.

[08] <https://www.iso.org/obp/ui/> ; Platform de consultation en ligne (OBP) de l'ISO : termes et définitions.

[09] **R.BAUS, W.CHAPRAU** : << **Application de soudage aux constructions** >>, 1979.

[10] **R.CURCI** : << **Radiographie industrielle (codes)** >> ; CND complément niveau 2, AIB VINCOTTE International.

[11] **Collectif** : << **Soudage de canalisation et installations connexes** >> ; Segment canalisations, NORME API 1104, Institut Américain du Pétrole, dix-neuvième édition, septembre 1999.

[12] **Collectif** : << **Le soudage** >> ; Qualification et compétences exigées par la NORME EN 1090-2, FFB Métallerie, février 2016.

[13] **M.FRIJA** : << **Contrôle non destructif** >>, cours deuxième année maintenance industrielle, Institut Supérieur des Systèmes Industriels de Gabès.

[14] **C.PHILIP** : << **Contrôle non destructifs des soudures** >> ; Arts et Métiers Paris Tech, Bordeaux, juillet 2007.

[15] **M.RABHI** : << **Contrôle Non Destructif (CND)** >>, Cours CND, Institut supérieur des études technologique Gafsa, 2016-2017.

[16] **Collectif** : << **Contrôle non destructif du matériel tubulaire** >> ; Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, comité des techniciens commission exploitation sous-commission forage © 1975, Edition Technip – Paris ; ISBN 2-7108-02783.

[17] **R.CURCI** : << **Formation en CND : Radiographie industrielle** >> ; CND théorie niveau I et II, AIB VINCOTTE International.

[18] **Collectif**: << **Radiographic film interpretation of weldments** >>; Instructors manual, © by Quality Consulting Company Portland, Oregon, 1984.

[19] **Document ANABIBE** : << Fiches techniques des produits de tuberie à gazoduc selon API 5L >>.

[20] **Collectif**: << **Specification for Line Pipe** >>; Upstream Segment, API Specification 5L, American Petroleum Institute, FORTY-THYRD EDITION © March 2004.

[21] **Collectif** : <<**Welding of Pipelines and Related Facilities** >>; Pipeline segment, NORME API 1104, American Petroleum Institute, ©2013.

[22] **Document KANAGHAZ** : << Dossier technique : Qualification de procédé de soudage de projet : GAZODUC Ø 28" PS04-GR5 TA ADRAR >>, ©2018.

Résumé :

Le but de cette note est la caractérisation des défauts apparaissent pendant et après soudage métallique par la gammagraphie, s'appuyant de l'expérimental réalisé dans l'institution KANAGHAZ, en inspection des défauts de soudure des pipelines par le contrôle précité.

Abstract:

The purpose of this note is the characterization of defects appears during and after metallic welding by gammagraphic test, leaning on experimental realized in the institution KANAGHAZ, inspecting the defects of pipelines welding by the aforementioned test.