

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
DEPARTEMENT TRANSPORT ET EQUIPEMENTS
DES HYDROCARBURES**



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Domaine : Sciences et technologies.

Filière : Hydrocarbures.

Spécialité : Génie mécanique : Transport et Distribution des Hydrocarbures.

Thème

Etude technologique de soudage manuel et semi-automatique et inspection des soudures des pipelines

Présenté par :

- ✓ BELARBI Mohamed Ramadane
- ✓ BENALA Imen

Encadré par :

- ✓ Pr BOUALI Elhamoune

Remerciement

En préambule à ce modeste travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères tout d'abord au « Bon Dieu » le plus puissant de nous avoir guidé vers le chemin du savoir et de nous avoir donné le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de nos parcours, et aux êtres les plus chers au monde « nos Parents » pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir. Nous les remercions pour l'éducation qu'ils nous ont prodigué.

Nos remerciements vont particulièrement à notre promoteur Pr BOUALI Elhamoune. Pour son aide, ses conseils et sa contribution à l'accomplissement de ce travail, et nous remercions aussi tous les enseignants de département transport et équipements des hydrocarbures.

Nous ne remercierons jamais assez tout le personnel de RTO plus particulièrement notre encadreur Mr BADRANI SALLAH EDDINE qui a accepté de nous encadrer pour mener bien à terme ce projet.

Nous voudrions remercier en particulier Mr TOUAIBIA Djillali pour son aide.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, pour avoir accepté de juger ce travail.

Et enfin à toutes les personnes qui nous ont apporté leurs appuis, leurs conseils et encouragements.

Merci

Imen et Med Ramadane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents pour leur soutien indéfectible

A Mon frère et à ma sœur

Ainsi qu'à toute la famille

A ma collègue et binôme Imen et sa famille

*A tous mes amis et surtout Dris, Nadir, Nounou,
Abderrahim , Oussama, Abderrezak, Amine, Nouredine.*

A tous mes amis de L'INH

Aux camarades et collègues du groupe MATH11

A toute la promotion 2011

A tous ceux que j'aime et je respecte

Ramadane

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce travail

A mes parents

A tous mes très chers frères Mohamed et Abd el Kader

A tous mes très chères sœurs Fatima, Fatiha et Amel

A mon très cher nouveau Dady

A toute ma famille

A mon collègue et binôme Mohamed Ramadane et son famille

A tous mes amis, avec lesquels

j'ai partagé mes meilleurs moments et souvenirs.

A tout le groupe MATH 11

A tous ceux que j'aime et je respecte.

Imen

تسعى هذه الدراسة لإعطاء وصف واضح لعملية تلحيم انابيب نقل المحروقات, وكذا التركيز على الاهمية التي يجب ان تمنح لهذه العملية الحساسة.

اول محور كان لتسليط الضوء على الخواص المعدنية للتلحيم (المنحنى الحراري, قابلية التلحيم).

من بين مختلف الطرق المستعملة للتلحيم, ركزنا بشكل خاص على الطريقة اليدوية و النصف اوتوماتيكية, ثم عددنا بعض الاخطاء و النتائج الغير مرغوب فيها بالإضافة الى كيفية الكشف عنها, وكل هذا لضمان الطريقة الامثل و الآمن لعملية النقل.

في الاخير تناولت الدراسة مختلف الحسابات العملية المتعلقة بالطريقة اليدوية و النصف اوتوماتيكية, دون نسيان جانب الحماية و الامن الصناعي خلال هذه العملية.

Abstract

This study tries to give a clear description to the process of steel tubes welding during the construction of an hydrocarbure system, it tries also to focus on the importance that should be given to this critical operation.

A first chapter was included to set the light on the metallurgical properties of welding (thermal cycle, weldability ...).

Among different ways of welding, we considered particularly the manual welding process, and the semi-automatic welding under flux process, then we identified sorts of irregularities that could affect a welded joint with different welded joints quality controls that should be executed to guarantee the ideal and safe progress of the pipeline.

After that, the study represents different calculations about manual and semi-automatic welding process, without forgetting the safety aspect during the welding operation.

Liste d'abréviation

CAP : Certificat d'aptitude professionnelle

ZAT : Zone affecté thermiquement

Tr : Température de refroidissement

Tm : Température moyenne

e_{cri} : Epaisseur critique

E_{eq} : Energie équivalent

E_{eff} : Energie efficace

K_f : Coefficient d'équivalence

SMAW : Shilded metal arc welding

GTAW : Gas tungsten arc welding

TIG : Tungsten inert gas

GMAW : Gas metal arc welding

MIG : Metal inert gas

MAG : Metal active gas

CC : Courant continue

CA : Courant alternatif

CCPN : Courant continue avec polarité normale

CCEN : Courant continue à électrode négative

CCPI : Courant continue avec polarité inversée

CCEP : Courant continue à électrode positive

CND : Contrôle non destructif

RT : Radiographie

UT : Ultrason

PT : Ressuage

MT : Magnétoscopie

DJ : Double jointing

CD : Contrôle destructif

GAM : Gammagraphies

HSE : Hygiène sécurité et environnement

API : American petroleum institute

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau (I-01) : teneur en carbone des aciers	06
Tableau (I-02) : facteur de soudabilité	08
Tableau (I-03) : coefficient d'équivalence K_f	13

Chapitre II :

Tableau (II-01) : Avantages des procédés de soudage manuel et semi-automatique	16
Tableau (II-02) : Principaux facteurs influent sur le choix d'un métal d'apport	19

Chapitre III :

Tableau (III-01) : Types d'inclusions	38
Tableau (III-02) : Défauts de soudage, causes et moyens de prévention	42
Tableau (III-03) : Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé	44

Chapitre IV :

Tableau (IV-01) : Les rayons γ	51
Tableau (IV-02) : Comparaison des rayonnements	52
Tableau (IV-03) : Apparences radiographiques des défauts	54
Tableau (IV-04) : Vitesses de propagations des ondes	56
Tableau (IV-05) : Comparaison de la radiographie et des ultrasons	57
Tableau (IV-06) : Avantages et inconvénients des techniques CND	58

Chapitre V :

Tableau (V-01) : Tableau indicateur de choix de l'électrode	60
Tableau (V-02) : Influence de carbone équivalent sur la soudabilité et la température de préchauffage de métal	62
Tableau (V-03) : Facteur de marche suivant la nature des travaux et lieu de travail	65

Chapitre VI :

Tableau (VI-01) : Paramètre de soudage à l'arc électrique	74
Tableau (VI-02) : Nombre d'électrodes déposés par joint de soudage. Résultats obtenus	79
Tableau (VI-03) : Vitesse de fusion et temps d'arc par joint. Résultats obtenus	80
Tableau (VI-04) : Paramètre de soudage sur les stations double jointing	82
Tableau (VI-05) : Poids de métal déposé par joint. Résultats obtenus	84

Liste des figures

Chapitre I :

Figure (I-01) : Section transversale d'un joint soudé	08
Figure (I-02) : Cycle thermique	09
Figure (I-03) : Influence de l'épaisseur	11
Figure (I-04) : Influence de la préparation	12
Figure (I-05) : Influence de la température initiale	14

Chapitre II :

Figure (II-01) : Organigramme des principaux procédés de soudure	16
Figure (II-02) : Circuit de soudage à l'arc	18
Figure (II-03) : Courant continu avec polarité normale et avec polarité inversé	18
Figure (II-04) : Comparaison des électrodes et des fils électrodes pour les procédés SMAW, GMAW	19
Figure (II-05) : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	20
Figure (II-06) : Principe de procédé GTAW	21
Figure (II-07) : Principe de fonctionnement de procédé GMAW	23
Figure (II-08) : Organigramme de différentes étapes d'inspection/contrôle	25
Figure (II-09) : Préchauffage des tubes	27
Figure (II-10) : Les clamps extérieurs	27
Figure (II-11) : Les clamps intérieurs	28
Figure (II-12) : Dénomination des positions de soudage pour les soudures bout à bout	29
Figure (II-13) : Schéma d'un poste de soudage (passe interne)	33

Chapitre III :

Figure (III-01) : Fissure de cratère	35
Figure (III-02) : Types de fissure à froids	36
Figure (III-03) : Localisation possible des manques de fusion	36
Figure (III-04) : Défauts de pénétration	37
Figure (III-05) : Inclusions	37
Figure (III-06) : Types de soufflures	38
Figure (III-07) : Types de retassures	39
Figure (III-08) : Morsures et caniveaux	39
Figure (III-09) : Types d'effondrements	40
Figure (III-10) : Convexité et concavité	40
Figure (III-11) : Surépaisseur	40
Figure (III-12) : Débordement de cordon	41
Figure (III-13) : Projections	41

Chapitre IV :

Figure (IV-01) : Principe de contrôle visuel	48
Figure (IV-02) : Principe de contrôle par ressuage	48
Figure (IV-03) : Principe de contrôle par magnétoscopie	49
Figure (IV-04) : Principe de contrôle par radiographie	49
Figure (IV-05) : Tube à rayons X	50
Figure (IV-06) : Principe de contrôle par ultrasons	51
Figure (IV-07) : Echelle des ondes élastiques	51

Chapitre V :

Figure (V-01) : Volume d'un joint	55
Figure (V-02) : Détermination du coefficient de fusion α en fonction de l'intensité (I) et du diamètre de fil électrode	55
Figure (V-03) : Calcul de moment de galet	62

Chapitre VI :

Figure (VI-01) : Dimensionnement de chanfrein	67
Figure (VI-02) : Rayon de la section de gorge en V	71

Table des matières

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

« Partie théorique »

Chapitre I : Métallurgie de soudage

I-1 Introduction	03
I-2 Histoire du soudage en quelques étapes clés	03
I-3 Métallurgie de soudage.....	04
I-3-1 Propriétés des métaux	04
I-3-2 Caractéristiques thermiques et électriques des métaux	05
I-3-3 Métaux ferreux.....	06
I-3-3-1 Acier au carbone.....	06
I-3-3-2 Acier alliés.....	06
I-3-3-3 Acier inoxydables.....	07
I-4 Notion de soudabilité.....	07
I-4-1 Définition de la soudabilité.....	07
I-4-2 Principes facteurs de la soudabilité.....	07
I-5 Objectifs de l'analyse thermique du soudage.....	08
I-5-1 Cycles thermiques de soudage.....	09
I-5-2 Paramètres du cycle thermique.....	10
I-5-2-1 Influence de la massivité	10
I-5-2-2 Influence de la préparation	11
I-5-2-3 Influence de la température initiale	13
I-5-2-4 Influence du matériau	14
I-6 Conclusion.....	14

Chapitre II : Procédé de soudage (manuel et semi-automatique)

II-1 Introduction	15
II-2 Les procédés de soudage pour techniques avancées	15
II-3 Classification des procédés de soudage	16
II-4 Etapes d'un procédé de soudage	17
II-5 Procédés de soudage à l'arc	17
II-5-1 Types de courant	18
II-5-2 Métaux d'apport	19
II-5-2-1 Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport.....	19
II-5-3 Soudage à l'arc électrique à l'électrode enrobée (SMAW)	20
II-5-4 Soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire (GTAW) ou (TIG)	21
II-5-5 Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	23
II-6 Inspection / Contrôle	25
II-6-1 Préparation avant soudage.....	26
II-6-2 Réalisation de la soudure.....	28

Table des matières

II-7 Soudage sur les stations double jointing (SDJ)	30
II-7-1 Rôle de la station double jointing	30
II-7-2 Description de la station.....	30
II-7-3 Fonctionnement de la station	33
II-8 Conclusion.....	34

Chapitre III : Les principaux défauts de soudure

III-1 Introduction.....	35
III-2 Défauts de soudure.....	35
III-2-1 Fissurations	35
III-2-1-1 Fissuration à chaud	35
III-2-1-2 Fissuration à froid	36
III-2-2 Manque de fusion.....	36
III-2-3 Défauts de pénétration	37
III-2-3-1 Localisation possibles des manques de pénétration.....	37
III-2-4 Inclusions	37
III-2-4-1 Types d'inclusions	38
III-2-5 Cavités.....	38
III-2-5-1 Soufflures.....	38
III-2-5-1 Retassures et criques de solidifications	39
III-2-6 Morsures et caniveaux	39
III-2-7 Effondrement et trous.....	39
III-2-8 Défauts géométriques du cordon.....	39
III-2-9 Débordement du cordon.....	41
III-2-10 Projection	41
III-3 Causes possibles et moyens de prévention liée aux défauts de soudure.....	42
III-4 Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé	45
III-5 Contrôle de la qualité de cordon de soudure.....	45
III-6 Conclusion	45

Chapitre IV : Contrôle des joints soudés et différentes techniques de C.N.D

IV-1 Introduction.....	46
IV-2 Contrôle avant le soudage.....	46
IV-3 Contrôle pendant le soudage.....	46
IV-4 Contrôle après le soudage	47
IV-5 Les différentes techniques de C.N.D utilisé pour le contrôle des joints soudés	47
IV-5-1 Contrôle Visuel (VT)	47
IV-5-2 Ressuage (PT)	48
IV-5-3 Magnétoscopie (MT)	49

Table des matières

IV-5-4 Radiographie (RT)	49
IV-5-4-1 Nature et propriétés principale des rayons	50
IV-5-4-2 Phénomène d'absorption	50
IV-5-4-3 Obtention des rayons X et γ	50
IV-5-4-4 Comparaison des rayons X et γ	52
IV-5-4-5 Le film Radiographique	52
IV-5-4-6 Visibilité des défauts	53
IV-5-4-7 La période	53
IV-5-4-8 L'activité de la source.....	53
IV-5-4-9 Qualité de contrôle.....	53
IV-5-4-10 Apparences radiographiques des défauts.....	54
IV-5-5 Ultrasons (UT)	55
IV-5-5-1 Nature des ultrasons.....	55
IV-5-5-2 Nature des ondes et vitesse de propagation	56
IV-5-6 Etude comparative entre les deux méthodes RT et UT	56
IV-6 Avantage--Inconvénients des méthodes C.N.D.....	58
IV-7 Conclusion	59

« Partie calcul »

Chapitre V : Calculs relatifs au soudage

V-1 Introduction.....	60
V-2 Soudage à l'arc électrique (manuel)	60
V-2-1 Nombre d'électrode par joints.....	60
V-2-2 Paramètre de soudage à l'arc électrique.....	60
V-2-3 Produit consommable.....	62
V-2-3-1 Métal déposé par joint	62
V-2-4 Production journalière	64
V-3 Soudage sur les stations double jointing	66
V-3-1 Paramètre de soudage double jointing	66
V-3-2 Production journalière	68
V-3-3 Vitesse de fusion d'un fil électrode et poids du métal d'apport	68
V-3-4 La puissance électrique de l'arc	69
V-3-5 Energie calorifique de l'arc.....	69
V-3-6 La puissance du moteur d'entraînement des galets.....	69
V-3-6-1 But de calcul de la puissance du moteur d'entraînement	69
V-3-6-2 L'entraxe a	70
V-3-6-3 La force N.....	70
V-3-6-4 Le moment du galet	71
V-3-6-5 La puissance de moteur	71
V-4 Nombre de films radiographiques nécessaire pour toute la conduite	72

Table des matières

Chapitre VI : Résultats et interprétations

VI-1 Introduction.....	73
VI-2-2 Caractéristiques de gazoduc RGZ3 42’’	73
VI-3 Calculs relatifs au soudage à l’arc électrique (manuel)	73
VI-3-1 Calcul le nombre d’électrode par joint	73
VI-3-2 Calcul des paramètres de soudage à l’arc électrique	74
VI-3-3 Calcul de produit consommable	75
VI-3-3-1 Calcul de métal déposé par joint	75
VI-3-4 Production journalière	79
VI-4 Calcul relatifs au soudage sur les stations double jointing	81
VI-4-1 Calcul des paramètres de soudage sur les stations double jointing	81
VI-4-2 Production journalière	82
VI-4-3 Calculs de la vitesse de fusion et poids du métal d’apport	83
VI-4-4 Calcul de la puissance électrique de l’arc	84
VI-4-5 Calcul de l’énergie calorifique de l’arc.....	85
VI-4-6 Calcul de la puissance du moteur d’entraînement	85
VI-4-7 Calcul le nombre de films radiographiques nécessaire pour toute la conduite.....	87
VI-5 Interprétation des résultats	88

Chapitre VII : Hygiène et sécurité lors du soudage et son contrôle

VII-1 Introduction sur la sécurité technique	89
VII-2 Analyse des risques	89
VII-3 Réduction des risques	89
VII-4 Risques liés à l’opération de soudage	90
VII-5 protections – préventions	91
VII-6 Les risques liés à la technique de contrôle par radiographie (RT)	92
VII-6-1 Les principaux risques des rayons Gamma.....	92
VII-6-2 La prévention des risques professionnels des rayons Gamma.....	92
VII-7 Conclusion.....	93
Conclusion générale	94

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

Le transport des hydrocarbures est un mode d'acheminement de ces derniers d'un endroit vers un autre séparés d'une distance plus ou moins grande. Afin d'aboutir aux différents modes utilisés à l'heure actuelle, il y a eu lieu bien des difficultés pour faire déplacer ce produit précieux vu son utilité.

Aujourd'hui, Le moyen le plus simple, le plus sûr et le plus écologique pour transporter ces hydrocarbures en permanence entre les zones d'extraction et les zones de consommation ou exportation est effectivement les pipelines (oléoducs ou gazoducs); ce sont des conduites soudées bout à bout, la plupart du temps souterraines et pourvues d'une protection contre la corrosion.

La pose de la canalisation représente 60% de l'investissement alloué à un projet de pipeline, et là encore la phase de soudage en représente 20% de l'investissement, d'où provient l'importance qu'il faudra donner au choix des modes et des techniques pour une exploitation rationnelle de ces investissements.

L'action de souder est une opération permettant de rapprocher puis de réunir « entre eux » deux ou plusieurs éléments d'un assemblage tout en assurant la continuité de la matière en ce qui concerne les métaux. La continuité de la matière est obtenue soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Souder des pipelines consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler, cette technique d'assemblage est différente du rivetage, de l'agrafage ou du collage, cette soudure doit être homogène, de sorte que les pipelines sont en l'état final à l'emploi.

En effet, pour assurer que la qualité des joints à soudés soit bien définie, il est important non seulement de vérifier que les pièces achevées sont conformes, mais encore de s'assurer qu'au cours des divers stades de la fabrication, les facteurs qui agissent sur la qualité finale sont maintenus dans les normes prévus, c'est pourquoi le contrôle de soudage est une opération indispensable.

Introduction générale

Dans le but d'obtenir une opération de soudage réussite et efficace, notre étude sera consacré à :

- Expliquer les différents procédés liés au soudage (manuel et semi-automatique) des tubes destinés au transport des hydrocarbures ;
- explorer les techniques de contrôle de pièce à soudé afin de déceler les anomalies de soudage.

Le manuscrit comporte :

- 1- Métallurgie de soudage.
- 2- Procédés de soudage (manuel et semi-automatique).
- 3- Les principaux défauts de soudure.
- 4- Contrôle des joints soudés et différents techniques de CND.
- 5- Calculs relatifs au soudage.
- 6- Résultats et interprétations.
- 7- Hygiène et sécurité lors du soudage et son contrôle.

Partie théorique

Chapitre I

Métallurgie de soudage

I-1 Introduction

Le soudage dans le processus de la construction des pipes représente une opération déterminante car sans celle-ci il n'existe pas de gazoducs, d'oléoducs ou encore de conduites pouvant transporter quelques liquides qu'il soit, et cette opération nécessite une étude métallurgique.

La métallurgie est la science qui étudie l'ensemble des procédés d'extraction, d'élaboration de traitement par déformation, traitement thermique des métaux et leurs alliages.

I-2 Histoire du soudage en quelques étapes clés⁽¹⁾

- L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux : - à l'âge de bronze on soudait à la poche,
- à l'âge de fer on soudait à la forge.
- Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850 on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.
- Fin 19^{ème} : mise en œuvre de nouveaux procédés : Le soudage oxyacétylénique, Le soudage aluminothermique.
- Début du 20^{ème} siècle : le soudage se répand dans tous les secteurs industriels.
Conséquence : une modification importante dans la conception et la réalisation des objets.
- Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit : construction navale, automobile, aéronautique.
Un nouveau métier est apparu : celui de soudeur. Il devient nécessaire de former les ouvriers et d'organiser des cours. Le CAP de soudeur est créé en 1931.
- Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique.
 - Industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultrasons.
 - Découverts involontaires : le soudage par explosion et par diffusion.
 - Introduction croissante de la microélectronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.
- Depuis ces dix dernières années, les innovations portent moins sur les procédés mêmes, que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport. Ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité. A l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100kW/cm².

I-3 Métallurgie de soudage

Le travail du soudeur s'effectue sur une vaste gamme de métaux. Afin d'être en mesure de choisir ou de justifier le choix d'un procédé de soudage et d'un métal d'apport approprié, on doit évidemment connaître les propriétés et la soudabilité de la pièce à souder. C'est là que des notions de métallurgie trouvent toute leur utilité.

I-3-1 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.

➤ 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.

➤ 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.

➤ Ténacité :

La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser ni 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.

➤ 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. Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température.

➤ 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.

➤ **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.

➤ **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.

➤ **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.

➤ **Magnétisme**

Le magnétisme est une propriété caractéristique des métaux ferreux, qui les rend sensibles aux aimants.

I-3-2 Caractéristiques thermiques et électriques des métaux

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. Voyons ici trois propriétés thermiques importantes des métaux.

➤ **Dilatation et contraction (ou retrait) thermiques**

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 que des fissures ou des déformations apparaissent 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.

➤ **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.

➤ Conductivité

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.

La conductivité électrique : quant à 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 diminue avec la température.

I-3-3 Métaux ferreux ⁽²⁾

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 de carbone.

I-3-3-1 Aciers au carbone

Les aciers au carbone (non alliés) contiennent entre 0,06 et 2,11 % de carbone (en deçà de 0,06 % de carbone, le métal est considéré comme étant du fer). Par ailleurs, sur le marché, on trouve rarement des aciers à teneur en carbone supérieure à 1,7 %.

On distingue quatre catégories d'aciers non alliés en fonction de leur teneur en carbone, comme le montre le tableau (I-01).

Type d'acier	Teneur en carbone (%)
Acier doux	De 0.06 à 0.2
Acier semi-dur	De 0.2 à 0.5
Acier dur	De 0.5 à 0.95
Acier extra-dur	De 0.95 à 2.11

Tableau (I-01) : Teneur en carbone des aciers

I-3-3-2 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.

I-3-3-3 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 constituent plus de 35 % du contenu. On distingue généralement trois catégories d'aciers inoxydables: les aciers austénitiques, ferritiques et martensitiques (voir annexe 1).

I-4 Notion de soudabilité

I-4-1 Définition de la soudabilité

La soudabilité est la propriété d'un matériau qui permet, lorsqu'on emploie un procédé de soudage donné pour un but donné, d'obtenir un joint continu en appliquant un mode opératoire convenable. La soudure ainsi obtenue doit satisfaire aux exigences imposées, quant aux propriétés locales de la soudure, et à leur influence sur la construction, dont la soudure fait partie.

La soudabilité n'est pas mesurable et dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- La nuance de l'acier (les caractéristiques mécaniques et la composition chimique);
- Les caractéristiques dimensionnelles (l'épaisseur, les formes et les masses des pièces);
- Le mode opératoire de soudage (le procédé de soudage);
- Le traitement thermique éventuel du joint soudé ;
- Les conditions de services.

I-4-2 Principes facteurs de la soudabilité

Comme déjà mentionné la soudabilité dépend non seulement du ou des matériaux, mais également le procédé de soudage avec son mode opératoire et la construction, Le tableau (II-02) présente un résumé des facteurs et conditions à prendre en compte.

Métal de base	<ul style="list-style-type: none"> - Composition chimique (carbone équivalent,...) ; - Degré de pureté (inclusions,...) ; - Etat structure initial (trempe, écroui,...) ; - Massivité (épaisseur,...) ; - Température (préchauffé,...).
Métal d'apport	<ul style="list-style-type: none"> - Composition chimique (fil, âme métallique,...) ; - Diamètre du fil.
Zone fondue	<ul style="list-style-type: none"> - Composition chimique (dilution,...) ; - Degré de pureté (inclusions de laitier,...) ; - Teneur en hydrogène ; - Propriétés mécanique.
Procédé de soudage et mode opératoire	<ul style="list-style-type: none"> - Type de procédé de soudage ; - Energie apportée ; - Concentration de flux thermique, et Taux de dilution ; - Type de protection (solide, gazeuse,...) ; - Nature de la protection (inerte, active) ; - Pureté de la protection (pureté de gaz, humidité d'un flux,...).

Tableau (I-02) : Facteur de la soudabilité

A ces facteurs il y a lieu d'intégrer le facteur humain, à savoir la formation (ou qualification) et la responsabilisation des opérateurs de soudage.

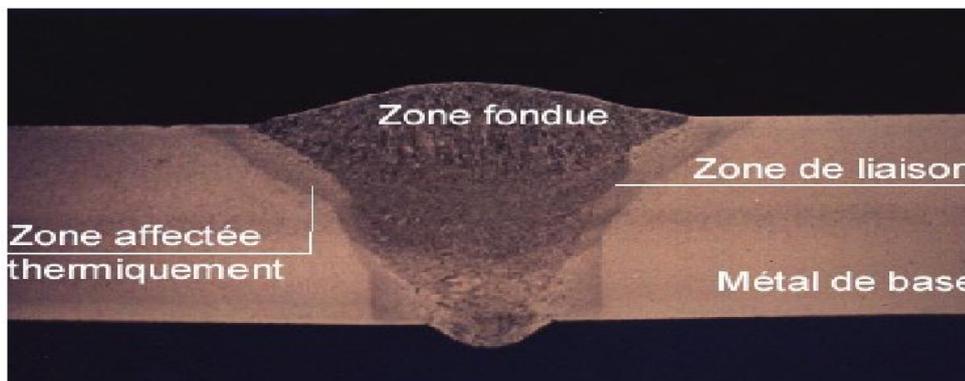


Figure (I-01) : Section transversale d'un joint soudé

I-5 Objectifs de l'analyse thermique du soudage

Les objectifs de l'analyse thermique du soudage peuvent être classés suivant les trois catégories suivantes :

- Etude de la formation du bain de fusion ;
- Prévion des cycles thermiques dans la ZAT ;
- Etude thermomécanique des assemblages soudés.

I-5-1 Cycles thermiques de soudage

Le cycle thermique dans les assemblages soudés joue un rôle prépondérant dans les performances atteintes par ces assemblages. En effet il conditionne :

- L'élaboration de la zone fondue ;
- les modifications de structures dans la zone thermiquement affectée ;
- l'apparition des déformations et des contraintes.

Il est donc important de maîtriser les composantes principales du soudage qui conduisent à un cycle thermique déterminé.

L'étude du cycle thermique peut se faire par :

- enregistrement in situ ;
- analyse expérimentale ;
- prévision analytique ;
- calcul numérique.

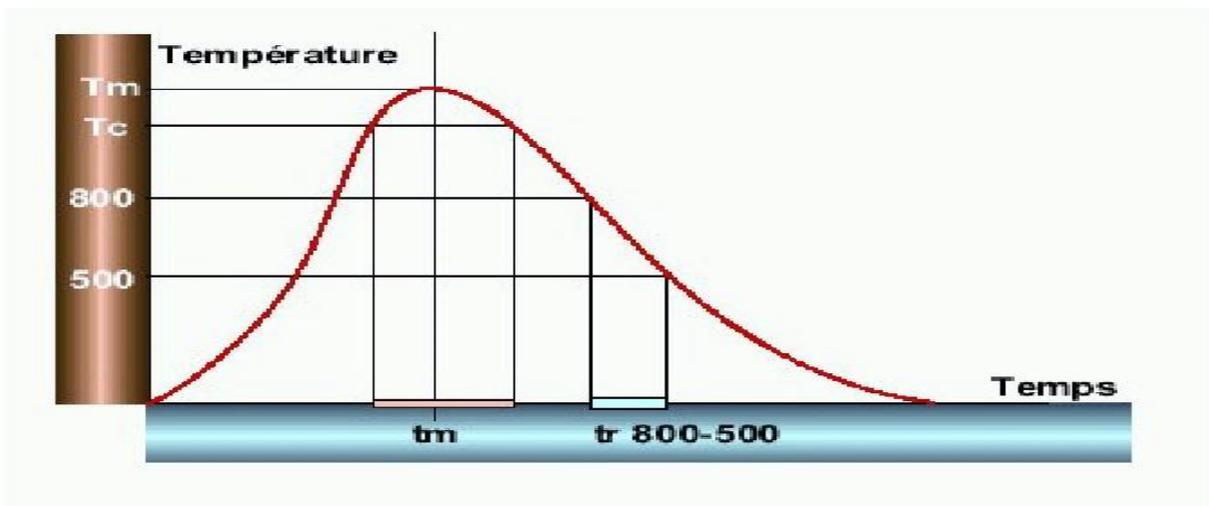


Figure (I-02) : Cycle thermique

Les études relatives à la métallurgie du soudage montrent que les transformations subies au refroidissement par le métal de base dépendent de l'état initial de sa structure avant refroidissement et de la vitesse à laquelle ce refroidissement s'effectue. L'étude du cycle thermique est donc une nécessité.

L'état initial de la structure du métal dépend de la température maximale atteinte au cours du soudage et de la durée de séjour au-dessus des différentes températures de transformations structurales.

Pour caractériser la vitesse de refroidissement, on utilise la durée de refroidissement entre 800 et 500°C. Ce paramètre est souvent le seul caractérisant l'ensemble du cycle thermique.

I-5-2 Paramètres du cycle thermique

Les cycles thermiques dans les assemblages soudés sont provoqués :

- pour le chauffage par un apport de chaleur à partir de la source de soudage. Il convient dans ce cas de distinguer les sources mobiles (soudage à l'arc) et les sources fixes (soudage par point). Dans ce qui suit nous consacrerons la majeure partie aux sources mobiles, mais il convient de noter que la démarche et l'analyse sont les mêmes pour les sources stationnaires.
- pour le refroidissement par une évacuation de la chaleur dégagée au niveau de la source par :
 - conduction dans les pièces ;
 - convection et rayonnement à la surface des pièces.

Dans ce qui suit, il faut considérer les pièces comme les parties froides d'un système dont la partie chaude est la soudure.

Pour un procédé de soudage donné, les paramètres exerçant une influence sur la durée de refroidissement sont :

- les propriétés thermiques du matériau ;
- la température initiale des pièces ;
- la massivité de la pièce ;
- l'énergie de soudage.

I-5-2-1 Influence de la massivité

La vitesse de refroidissement augmente bien évidemment avec celle de l'épaisseur, cependant il faut intégrer d'autres facteurs comme le matériau et surtout la source de chaleur (Energie et concentration).

On note l'existence d'une épaisseur critique e_{cri} au-dessus de laquelle le temps de refroidissement se stabilise (Figure I-03-a) :

- Pour des épaisseurs inférieures à e_{cri} (Figure I-03-b), l'écoulement thermique est bithermique, la répartition thermique et donc le temps de refroidissement $tr_{800-500}$ dépendent de l'épaisseur.
- Pour des épaisseurs supérieures à e_{cri} , l'écoulement thermique est tri-thermique, la répartition thermique et donc le temps de refroidissement $tr_{800-500}$ sont indépendants de l'épaisseur.
- Comme signaler plus haut, la valeur de l'épaisseur critique e_{cri} , dépend mais aussi de l'énergie de soudage. Une augmentation de l'énergie de soudage permet d'obtenir des pénétrations plus importantes et donc de considérer l'écoulement biaxial pour des épaisseurs plus importantes, d'où l'accroissement de e_{cri} , (Figure I-03-c).

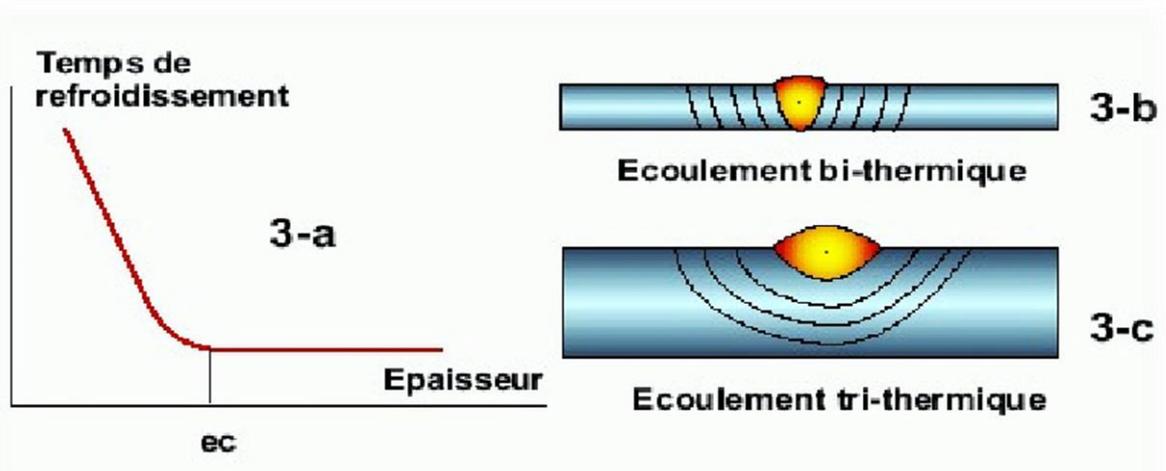


Figure (I-03) : Influence de l'épaisseur

I-5-2-2 Influence de la préparation

La géométrie de l'assemblage doit être également prise en compte. En effet tous les autres paramètres énergétiques et thermiques étant égaux l'écoulement thermique dans les pièces est influencé par ce paramètre. Ce phénomène peut être représenté par la notion d'indice de sévérité thermique ou de chemins de dispersion.

Par exemple (Figure I-04-a) :

- Pour un soudage à la surface d'une tôle, l'écoulement est bithermique ;
- Un assemblage en angle de tôles de même épaisseur, l'écoulement est tri-thermique, avec un refroidissement plus rapide.

De même dans les assemblages bout à bout chanfreinés la forme du chanfrein et la valeur de l'angle, modifie l'écoulement thermique dans l'assemblage.

Par exemple (Figure I-04-b) :

- Un chanfrein en V a tendance à freiner l'écoulement thermique, par un effet de concentration en bout de chanfrein ;
- Un chanfrein en Y a l'effet inverse.

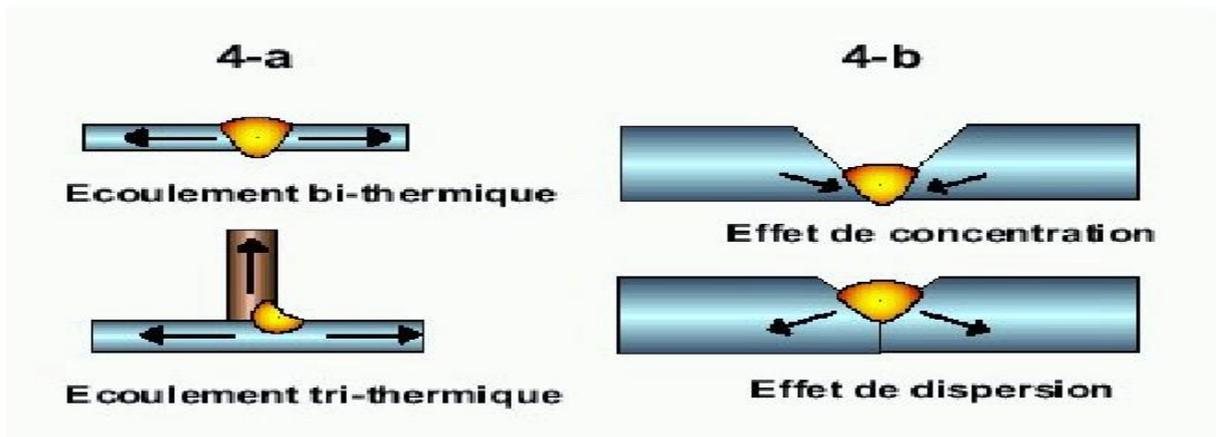


Figure (I-04) : Influence de la préparation

Les travaux de Rykaline ont permis de proposer une méthode simplifiée basée sur l'introduction du concept d'énergie équivalente, définie par un coefficient d'équivalence K_f qui tient compte du type de joint.

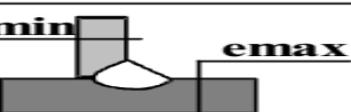
L'énergie équivalente E_{eq} est à partir de l'énergie efficace E_{eff} par :

$$E_{eq} = E_{eff} \cdot K_f \tag{I-01}$$

Les joints soudés peuvent être classés en deux catégories :

- Les joints bout à bout avec ou sans chanfrein ;
- Les assemblages à recouvrement ou en angle.

Le tableau 4 donne les valeurs du coefficient K_f .

	Soudage à plat K=1					
	$\frac{e_{min}}{e_{max}}$	0	0,25	0,5	0,75	1
	K	1	0,88	0,80	0,72	0,67

Forme	Facteur de forme K			
	45°	60°	75°	90°
 Chanfrein en Y	0,57	0,60	0,63	0,67
 Chanfrein en V	1,33	1,50	1,72	2
 Chanfrein en X	0,67	0,75	0,85	1

Tableau (I-03) : Coefficient d'équivalence K_f

I-5-2-3 Influence de la température initiale

La température initiale du métal de base joue un rôle important vis à vis du cycle thermique, ainsi que de la répartition thermique.

Une augmentation de la température initiale se traduit par une augmentation :

- De la température maximale atteinte ;
- Du temps de séjour à haute température ;
- Du temps de refroidissement ;
- De la zone thermiquement affectée.

L'augmentation de la température initiale peut-être :

- Provoquée dans le cas du préchauffage ;
- Inhérente au soudage dans le cas du soudage multipasses.

Une diminution de la température initiale se traduit par les effets inverses. D'où les précautions à prendre lors du soudage par temps froid (dégourdissement).

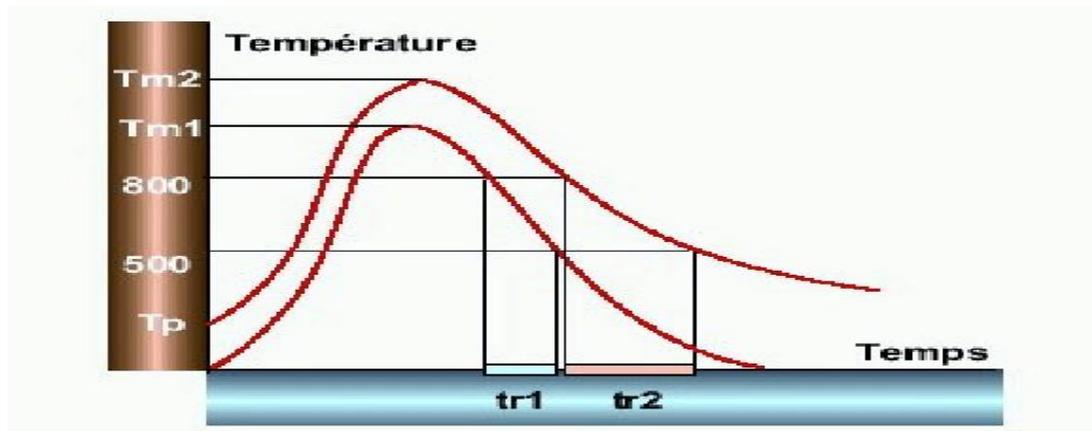


Figure (I-05) : Influence de la température initiale

I-5-2-4 Influence du matériau

Les propriétés thermiques (Chaleur massique, conductivité thermique) du matériau ont une influence sur l'écoulement de la chaleur dans les pièces.

Un matériau présentant une conductivité thermique élevée entraîne :

- une fusion plus difficile à cause des pertes par conduction (Nécessité de préchauffe, cas du cuivre par exemple) ;
- une augmentation de la zone thermiquement affectée ;
- une augmentation de la vitesse de refroidissement (les autres paramètres restant les mêmes).

Un matériau présentant une chaleur massique élevée entraîne la nécessité d'une puissance plus importante.

I-6 Conclusion

Le soudage relève de la métallurgie : il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace (choix de procédé de soudage). Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité et importants pour éviter les problèmes de soudage.

Chapitre II

Procédé de soudage (manuel et semi-automatique)

II-1 Introduction

Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné.

Les procédés de soudage sont multiples, ce chapitre présente les procédés de soudage à l'arc électrique (manuels et semi-automatiques).

II-2 Les procédés de soudage pour techniques avancées

Le choix d'un procédé de soudage se fait en prenant en compte un certain nombre de paramètres :

- Taille et épaisseur de la pièce ;
- Problèmes de soudabilité métallurgique ;
- Problèmes de soudabilité opératoire ;
- Problèmes d'oxydation à chaud de la liaison ;
- Problèmes de vitesse d'exécution ;
- Problèmes de contraintes et de déformations.

Lors du choix du procédé de soudage, on peut aussi considérer si l'on veut travailler avec un procédé manuel (SMAW, GTAW) ou semi-automatique (GMAW). Ce choix peut dépendre, par exemple, de la position de soudage, car les procédés semi-automatiques ne sont pas tout à fait aussi polyvalents à ce niveau. Par contre, ils procurent une qualité de soudure souvent supérieure.

Le tableau (II-01) expose les avantages de chacun des procédés.

	Manuels	Semi-automatique
Avantage	<p>SMAW :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plus polyvalents, s'exécutent dans tous les milieux ; - Équipement moins complexe et moins dispendieux ; - Équipement moins encombrant. <p>GTAW :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Soudage de précision ; - Soudage de presque tous les métaux (incluant les métaux de faible soudabilité) ; - Aspect et esthétique de la soudure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de dépôt élevé ; - Meilleures propriétés mécaniques et chimiques de la soudure ; - Fatigue moindre du soudeur ; - Temps de formation du soudeur réduit ; - Soudage de joints longs possible, - Soudage dans toutes les positions, - Économie de temps ; - Facteur de marche atteignant généralement 100 %.

Tableau (II-01) : Avantages des procédés de soudage manuels et semi-automatiques

II-3 Classification des procédés de soudage

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie.

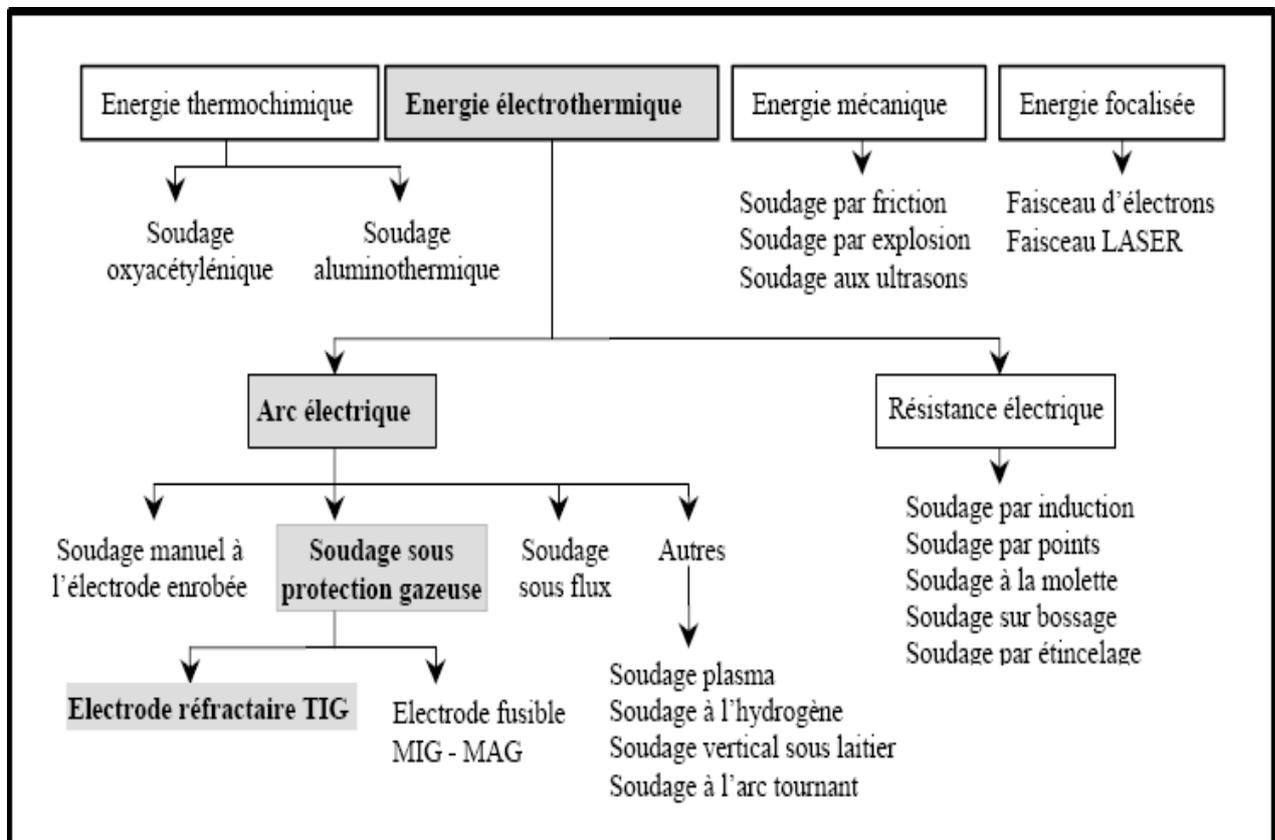


Figure (II-01) ⁽³⁾ : Organigramme des principaux procédés de soudure

Deux cas de soudure :**➤ La soudure Autogène :**

Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.

➤ La soudure Hétérogène :

Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

II-4 Etapes d'un procédé de soudage

La réalisation d'une soudure peut se décomposer en sept étapes.

- Identification du métal de base ;
- Détermination de l'épaisseur du métal, de la position de soudage et du niveau de qualité requis ;
- Sélection du procédé et préparation des pièces et de l'équipement ;
- Choix du gaz de protection, de l'électrode, du fil-électrode ou du métal d'apport et du mode de transfert (au besoin) ;
- Réglage des paramètres (tension, intensité, vitesse de dévidage, débit de gaz, etc.) ;
- Exécution de la soudure en maintenant la vitesse d'avance, l'angle et la longueur d'arc appropriés ;
- Évaluation de la soudure.

II-5 Procédés de soudage à l'arc électrique

Le terme «soudage à l'arc» définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3500 et 5550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion.

Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage.

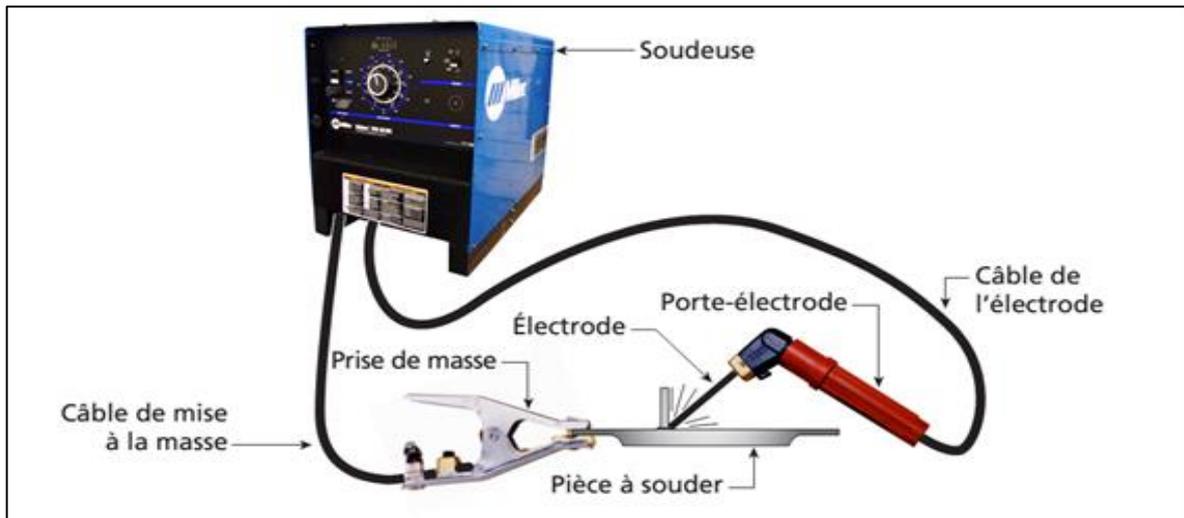


Figure (II-02) : Circuit de soudage à l'arc

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

II-5-1 Types de courant

En soudage, on peut utiliser un courant continu ou alternatif. Le courant continu est le plus répandu, car il assure une alimentation de courant constante, donc la stabilité de l'arc.

Lorsqu'une pièce est prête à être soudée, elle fait partie d'un circuit électrique incluant l'électrode. C'est ce circuit, comportant une borne négative et une borne positive, qui permet la création de l'arc électrique.

Avec le soudage en courant continu, lorsque la pièce est branchée au pôle positif et que le câble de l'électrode est branché au pôle négatif, on parle de polarité normale (CCPN) ou encore de courant continu à électrode négative (CCEN), à l'inverse, si le câble de l'électrode est relié au pôle positif et la pièce à souder au pôle négatif, on parle de polarité inversée (CCPI) ou encore de courant continu à électrode positive (CCEP).

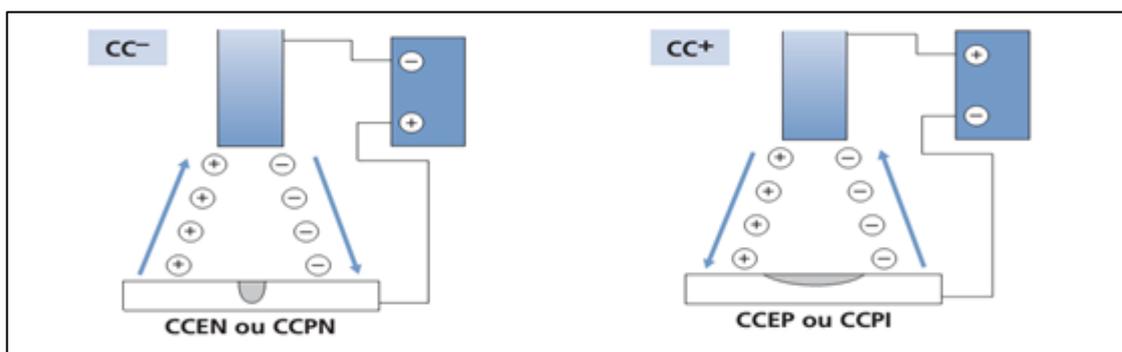


Figure (II-03) : Courant continu avec polarité normale et avec polarité inversée

II-5-2 Métaux d'apport

Le métal d'apport provient généralement d'une électrode enrobée (pour le procédé SMAW), d'un fil-électrode (dans le cas de procédé GMAW) ou d'une baguette (procédé GTAW). La classification des métaux d'apport permet de connaître leur résistance à la traction, leur composition chimique, la résilience du métal déposé et les positions de soudage possibles (voir annexe 2).

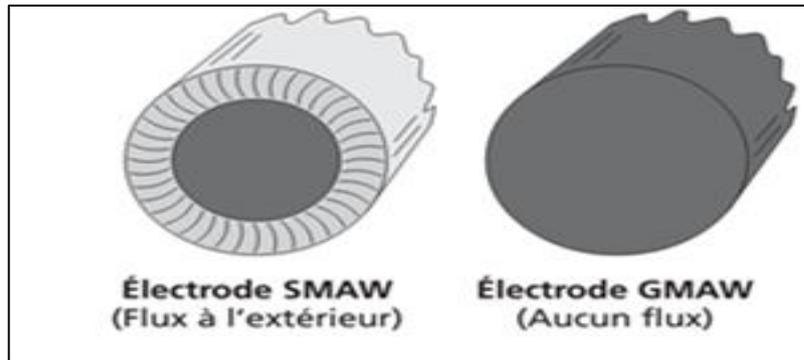


Figure (II-04) : Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW

II-5-2-1 Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport

Le tableau (II-02) présente certains des principaux facteurs à considérer lors du choix d'un métal d'apport.

Facteur	Impact sur le choix de métal d'apport
Composition du métal de base	- On recherche un métal d'apport de même nature.
Dimensions de l'assemblage	- Pour les très gros assemblages, les taux de dépôt doivent être élevés.
Genre de courant disponible	- Plusieurs électrodes sont conçues pour le courant continu.
Position du joint à souder	- En fonction de la fluidité du métal d'apport.
Propriétés requises pour le cordon de soudure	- Absence de fusion d'hydrogène (surtout pour l'acier) ; - On considère aussi le nombre de passes, le diamètre de l'électrode et l'intensité de courant.

Tableau (II-02) : Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport

II-5-3 Soudage à l'arc électrique à l'électrode enrobée (SMAW : Shielded Metal Arc Welding)

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Une soudeuse, généralement à courant constant, est connectée à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

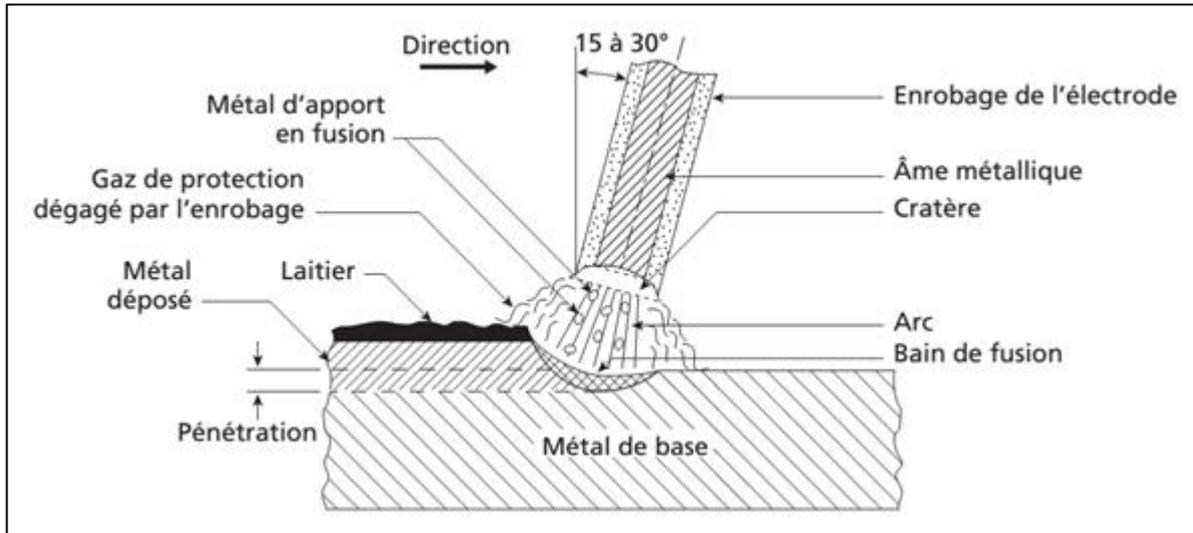


Figure (II-05) : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Ce type de soudage exige une vitesse et un angle de soudure constants, et la pointe de l'électrode doit demeurer à la même distance de la pièce.

➤ **Avantages et inconvénients**

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

➤ **Soudeuse et type de courant utilisés**

On emploie généralement une soudeuse à courant continu avec ce type de procédé. La polarité inversée permet une plus grande pénétration de la soudure parce que le métal en fusion de l'électrode atteint des températures plus élevées.

➤ Électrodes

Il existe trois types d'électrodes enrobées utilisées pour le soudage SMAW. On trouve des électrodes basiques, rutiles et cellulosiques.

Le type de métal de base, la position de soudage, l'aspect du cordon désiré, la pénétration de soudage nécessaire sont des facteurs à considérer lors du choix de l'électrode. Les enrobages ne sont pas tous de la même épaisseur et cela influence le cordon de soudure produit.

Les électrodes de soudage sont constituées par :

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant et dont la fusion forme le métal déposé,
- Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :
 - stabilité électrique de l'arc ;
 - Protection du métal en fusion ;
 - Apport d'éléments dans le métal déposé.

II-5-4 Soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous gaz inerte (GTAW : *Gas Tungsten Arc Welding* ou **TIG** : *Tungsten Inert Gas*)

Ce procédé de soudage s'effectue avec une torche. Celle-ci comprend l'électrode de tungstène, maintenue sur un porte-électrode et placée à l'intérieur de la buse qui canalise le gaz de protection. L'arc électrique se forme entre l'électrode de tungstène et le métal de base ⁽⁴⁾.

La torche permet de maintenir l'électrode en place, de canaliser le gaz de protection et d'assurer la continuité du courant pendant le soudage. Lorsqu'on travaille avec des courants élevés (150 A et plus), on utilise une torche refroidie par du liquide, et une torche refroidie au gaz pour des courants allant jusqu'à 150 A.

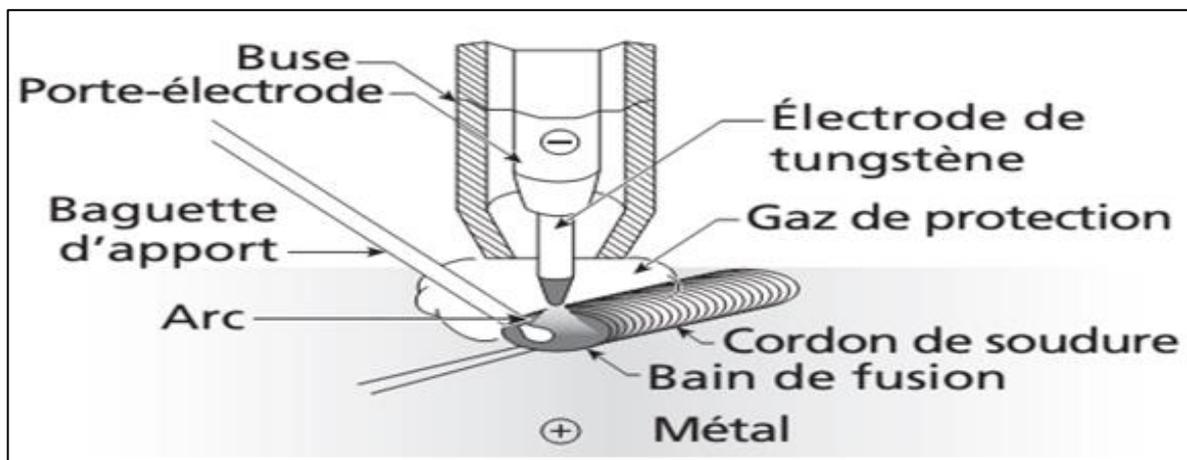


Figure (II-06) : Principe de procédé GTAW

➤ **Avantages et inconvénients**

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux.

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses.

On peut l'utiliser avec ou sans métal d'apport. Celui-ci, lorsque présent, prend la forme d'une baguette que l'on fait fondre au-dessus du bain de fusion.

➤ **Soudeuse et type de courant utilisés**

Avec ce type de procédé, on utilise une soudeuse à courant constant, comme pour le SMAW. Le type de courant (CA ou CC) utilisé et la polarité du courant CC affectent les caractéristiques de la soudure. On utilise généralement le courant CC avec polarité normale, car il permet un plus grand transfert de chaleur vers la pièce (les électrons bombardent la pièce, ce qui protège l'électrode); donc, une plus grande pénétration et une soudure plus étroite.

➤ **Électrodes**

On trouve neuf types d'électrodes qui, en fonction des autres métaux d'alliages, peuvent être ajoutés au tungstène. Le type et la taille des électrodes employées dépendent généralement du courant. Les électrodes utilisées avec le courant avec polarité inversée doivent avoir un plus grand diamètre, sinon elles fondent car la chaleur transférée est beaucoup plus grande.

II-5-5 Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW : *Gas Metal Arc Welding*)

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport.

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.

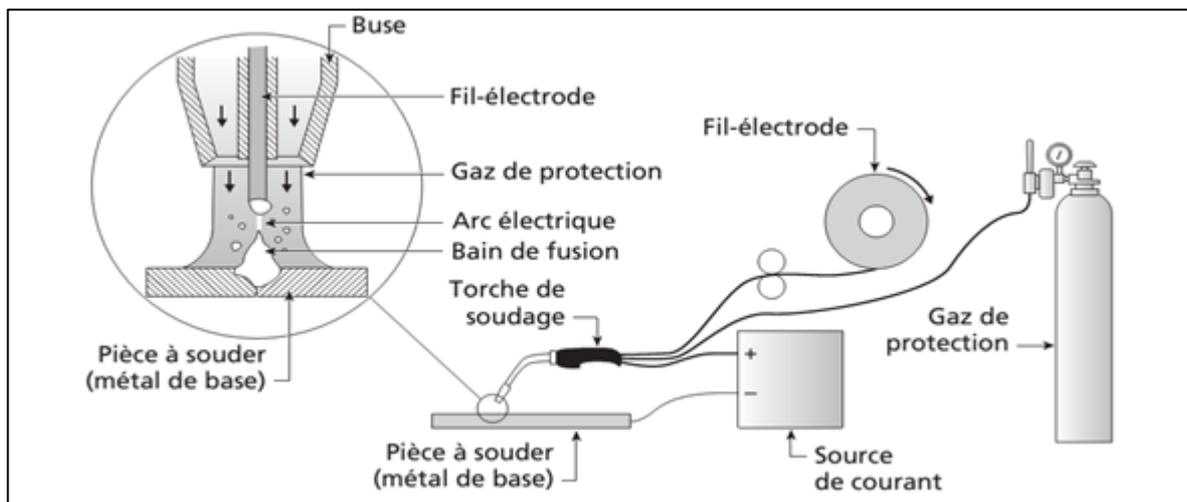


Figure (II-07) : Principe de fonctionnement du procédé GMAW

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

- Le procédé MIG (*Metal Inert Gas*) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;
- Le procédé MAG (*Metal Active Gas*) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

➤ **Avantages et inconvénients**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés. Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup. Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier.

La pénétration obtenue peut être profonde; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

➤ **Soudeuse et type de courant utilisés**

Ce type de procédé s'emploie le plus souvent avec une soudeuse à potentiel constant, qui convient bien à un fil-électrode dévidé à vitesse constante. Le courant continu avec polarité inversée est favorisé, notamment parce qu'il produit une meilleure pénétration.

➤ **Fil-électrode**

Pour le soudage de l'acier, certains fils-électrodes contiennent plus de désoxydants et permettent de souder des aciers difficilement soudables autrement, incluant des pièces recouvertes d'une certaine quantité de saleté ou de rouille.

II-6 Inspection / Contrôle

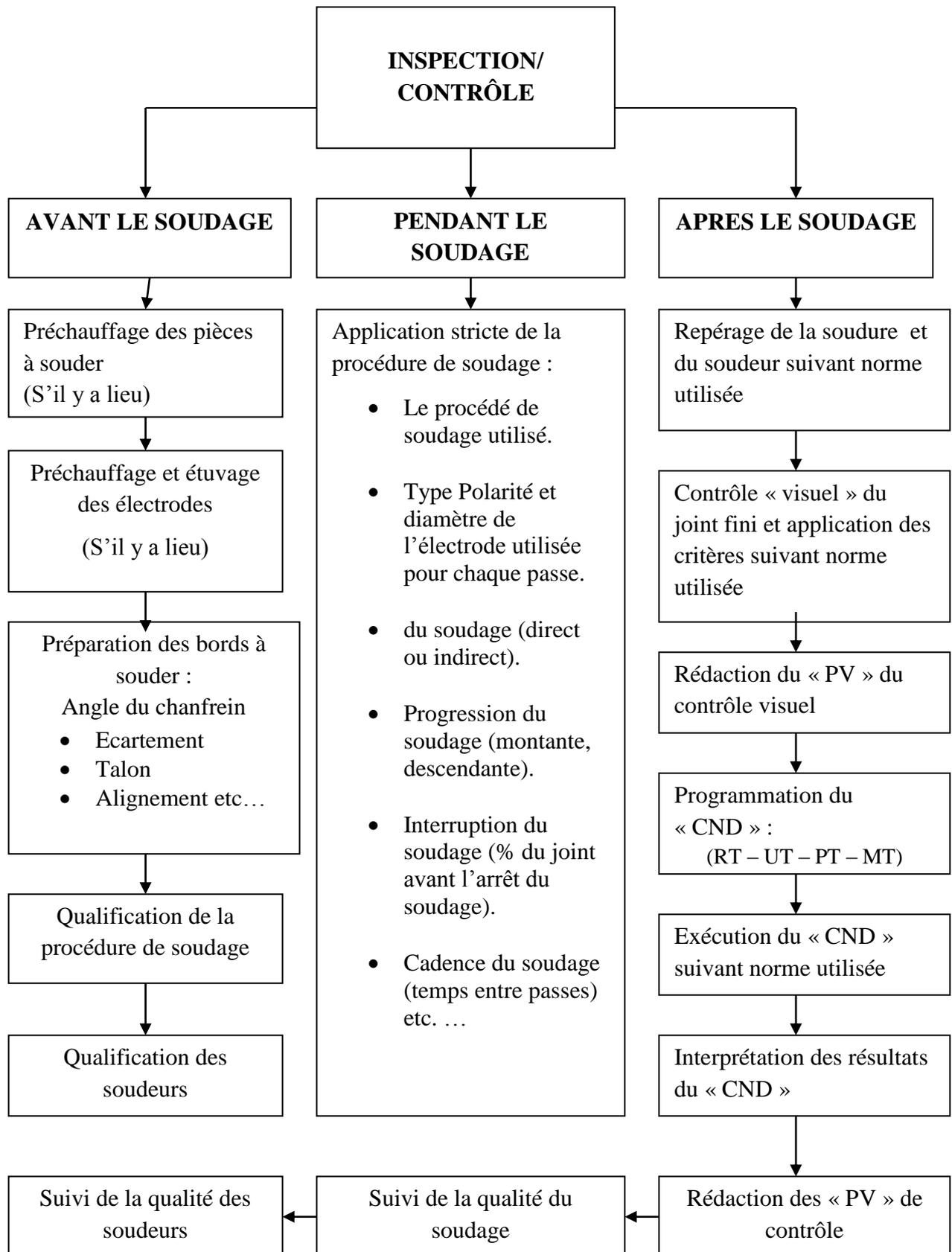


Figure (II-08) ⁽⁵⁾ : Organigramme de différentes étapes d'inspection/contrôle

II-6-1 Préparation avant soudage**➤ Vérification des tubes**

C'est une opération faite en bardage, chaque tube sera vérifié avant préparation, tout tube présentant des défauts tels que notamment flexion permanente, déformation d'extrémités, entaille, rainure, dédoublement de tôles, corrosion... etc. sera mis à part pour être soumis à un examen qui ordonnera s'il y a lieu, le rebut, la réparation à la coupe pour éliminer le défaut.

➤ Mise en cales

Cette opération consiste à déposer bout à bout les tubes bardés sur des cales en bois de 40 à 50 cm de hauteur, après les avoir distribuées.

L'enlèvement des tubes pour la mise en cales se fait à l'aide de side-boom.

➤ Vérification des chanfreins

D'après les exigences de soudage, les tubes à assembler doivent avoir les extrémités parfaitement rondes, planes et régulières. Donc on doit vérifier sur chantier l'état chanfreins qui peuvent être endommagés, dans ce cas il existe une équipe chargée de la réparation des chanfreins, (voir annexe 3).

➤ Nettoyage des extrémités des tubes

Avant tout assemblage, les tubes seront nettoyés intérieurement de façon à éviter l'introduction dans la canalisation de corps étrangers, le nettoyage sera effectué sur le chanfrein et le talon jusqu'à une largeur de 10 cm, il se fait généralement à l'aide des brosses métalliques mécanique ou bien par sablage.

➤ Préchauffage

On peut dire que c'est un nettoyage thermique, il est effectuée dans le but d'augmenter la durée de refroidissement afin d'obtenir une bonne structure métallique, selon la courbe de température de préchauffage en fonction du carbone équivalent, un préchauffage de 154°C sera envisagé afin d'éliminer complètement la moindre trace d'humidité et de permettre une fusion rapide du métal de base (tube) avec le métal d'apport (baguette) ainsi que leur collage.

Le soudage ne doit pas commencer jusqu'à ce que l'intérieur des tubes atteigne la température du préchauffage dont l'aire de ce dernier doit être de 2 à 4 cm de chaque côté du joint de soudure, le suivi de l'opération de chauffage s'effectue à l'aide d'un crayon thermo chrome qui indique la température du tube par virage de teinte.



Figure (II-09) : Préchauffage des tubes

➤ **Assemblage des tubes**

Cette opération se fait à l'aide des clamps, elle consiste à assurer le bout à bout des tubes, ou ces derniers devront avoir le même axe, il existe deux types de clamps :

• **Les clamps extérieurs**

Sont constitués par des branches doublées munies de rouleaux parallèles au tube et d'un vérin. Ces rouleaux viennent presser sur la surface des tubes grâce à l'action d'un vérin hydraulique ou mécanique. Ils sont utilisés pour positionner les tubes à souder, après la réalisation de 50% de la première passe peut être enlevé. Ce dispositif est très simple et très efficace.



Figure (II-10) : Les clamps extérieurs

• **Les clamps intérieurs**

C'est un mécanisme de fixation destiné à exercer une force radiale suffisante sur la surface interne des tubes à unir pour maintenir en position les extrémités des tubes pendant le soudage.

L'enlèvement des clamps intérieurs ne se fera qu'après l'exécution de la première passe à 100%.

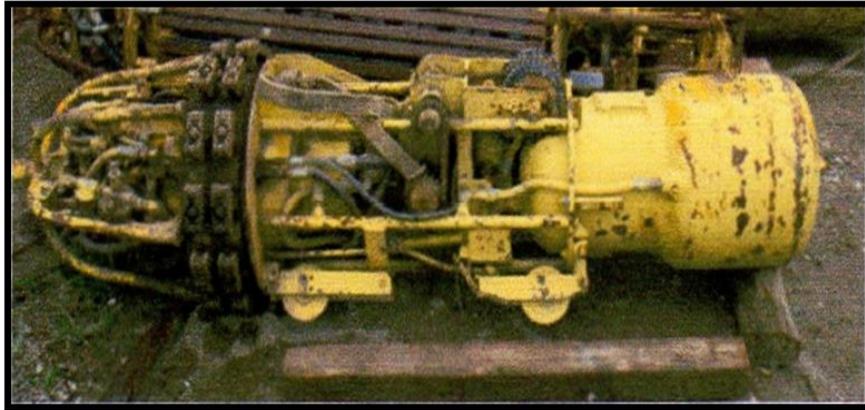


Figure (II-11) : Les clamps intérieurs

II-6-2 Réalisation de la soudure

➤ Homologation

Avant chaque ouverture de chantier de réalisation de pipeline, les soudeurs doivent passer un examen appelé HOMOLOGATION, elle consiste à souder des éprouvettes des tubes (de même nature que celui du chantier) qui seront testées au laboratoire par des essais mécaniques (voir annexe 4) qu'on effectue au niveau des soudures (essai de traction, flexion, texture.).

D'après les résultats de cette homologation (voir annexe 5), les soudeurs seront classés par catégorie et chaque soudeur doit avoir un repère qui l'identifie, comme il doit connaître la passe qu'il devra exécuter pendant le soudage.

➤ Technique de soudage

• Séquence

La soudure devra être exécutée par un, deux soudeurs ou plus, suivant le diamètre du tube de façon à réduire les déformations au minimum.

Le soudage ne doit pas être admis sur des bords mouillés.

• Position de soudage / des soudeurs

Le soudage peut se faire à plat (PA), en corniche (PC), au plafond (PE) ou en position verticale. Dans ce dernier cas, il peut se faire de bas en haut (en montant – PF) ou de haut en bas (en descendant – PG). Les soudures d'angle se font en corniche ou à plat, mais aussi dans les positions intermédiaires PB (d'angle en position horizontale) et PD (d'angle au plafond).

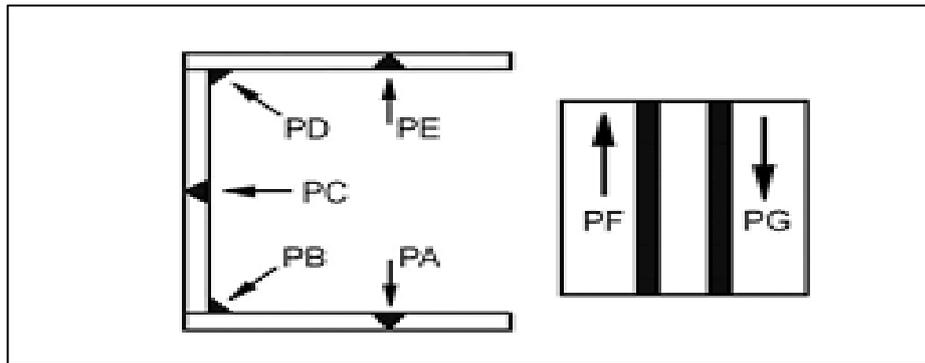


Figure (II-12) : Dénominations des positions de soudage pour les soudures bout à bout

➤ Exécution des différentes passes de soudage

Le nombre de passes dépend de l'épaisseur du tube, si l'épaisseur est ($> 4\text{mm}$), on doit faire au moins trois passes, chaque passe doit être complètement terminée avant de commencer la suivante.

• Première passe

Dite passe d'assemblage car c'est elle qui fixe les deux tubes, elle doit être réalisée par deux soudeurs qui travaillent au même temps et qui doivent assurer une pénétration correcte.

• Meulage de la première passe

Après avoir soudé la première passe, on extrait le clamp puis on procèdera au nettoyage de laitier à l'aide d'une meule électrique, il est nécessaire de surfacer par meulage superficiel le profil bombe du cordon avant d'entreprendre la passe suivante afin d'éviter le risque d'inclusion de laitier entre passes.

• Deuxième passe

Avant de commencer la deuxième passe, on doit vérifier l'absence des défauts sur la soudure au niveau de la première passe, l'exécution de la deuxième passe doit être le plus rapidement possible avant que la première passe ne soit refroidie, et c'est pour cela qu'on l'appelle la passe chaude.

Pour assurer une bonne liaison entre les passes, il faut toujours meuler la passe pour se débarrasser du laitier déposé et de toutes autres impuretés.

• Passe de remplissage

Le remplissage du joint doit être effectué immédiatement après avoir meulé la deuxième passe à moins que le tube soit maintenu à une température dans 100 °c , le nombre de passe de remplissage dépend de l'épaisseur du tube, du diamètre de la baguette, mais avant l'exécution de chaque passe de remplissage on prévoit un nettoyage dans le but de débarrasser toutes les traces de laitier et les grains de soudures.

- **Temps entre passes**

En règle générale, le soudage sera sans interruption jusqu'à l'achèvement total du cordon, il ne sera pas admis plus de cinq minutes entre la fin de la première passe et le début de la seconde.

- **Passe de finition**

Après avoir nettoyé la passe de remplissage par brossage, les soudeurs exécutent la passe de finition qui doit recouvrir les passes précédentes, ainsi que les extrémités aux chanfreins en formant un bourrelet extérieur dont la surépaisseur maximum admise est de 2mm.

A la fin du soudage, le joint doit être nettoyé soigneusement pour éviter l'éclaboussure des scories du métal.

II-7 Soudage sur les stations double jointing (DJ)

Dans l'industrie des hydrocarbures le soudage sur les stations double jointing occupent une place importante dans la construction des pipelines, elle est donc une machine installée près du tracé, destinée à effectuer l'assemblage de deux ou trois stations de tubes à l'aide du soudage semi-automatique ⁽⁶⁾.

II-7-1 Rôles de la station double jointing

La station double jointing a le rôle de :

- Augmenter considérablement la cadence du travail sur chantier ;
- Améliorer la qualité du joint ;
- Réduire les volumes des travaux de soudure sur chantier ;
- Augmenter la sécurité du personnel et de la conduite ;
- Protéger le personnel contre les effets climatiques tel que la chaleur, la pluie et les vents de sable qui empêchent le bon déroulement de la phase soudage sur chantier ⁽⁶⁾.

II-7-2 Description de la station

La station double jointing dispose trois surfaces utiles :

- Zone de stockage des tubes ;
- Zone de travail « machine » ;
- Zone de stockage de produite « tubes jointes ».

Dans la zone de travail, on se consacrera à étudier que les équipements utilisés pour la réalisation des joints depuis son stockage jusqu'à son contrôle.

- **Les rampes**

Elles sont composées par des poutres montées en parallèles avec une légère inclinaison afin que les tubes puissent se déplacer sous l'effet de leurs propre poids du poste de travail à un autre, pour envoyer les tubes vers les prochaines postes.

- **Poste de préparation**

La surface ou on applique la préparation (meulage et chanfreinage) est une plate-forme, sur laquelle sont montées deux chariots identique, mobile et réglable, sur l'une des supports sont fixées des brosses métalliques ayant la forme circulaire, servant, pour le brossage des extrémités et sur l'autre support sont montés des meules disques pour effectuer le meulage et le dressage, afin de chanfreiner le bord de tube suivant les dimensions du chanfrein désiré.

Ce poste est équipé aussi d'un système de galets d'entrainements qui assurent le mouvement de rotation des tubes, ainsi les bras d'éjecteur.

Plate-forme intermédiaire : cette plate-forme est utilisée pour le préchauffage des tubes, ceux-ci sont préchauffés à l'aide d'un système de torche bicyclette qui positionné aux extrémités intérieurs des tubes que l'on fait tourner pour répartir la chaleur uniformément sur toute l'extrémité du tube.

- **Poste de soudage N°1**

Le poste de soudage N°1 est une station du soudage de la première passe qui se compose de :

- Dispositif de soudage :

- Ce dispositif est composé essentiellement d'une tête de soudure, d'un châssis munit d'un vérin hydraulique, permettant la montée et la descente de la tête de soudure et de quatre roues fixées sur la partie inférieure de châssis pour que ce dernier puisse s'appuyer sur le tube.
- La tête de soudure se compose d'un bec à travers lequel passe le fil de soudage et le flux.
- Le déplacement du fil de soudage est assuré par des galets actionnés par un moteur électrique.
- Elle est équipée aussi d'un bac de flux et d'un aspirateur qui aspire le flux déjà utilisé pour l'envoyer de nouveau vers le bac.

- Mécanisme de fixation des extrémités des tubes :
 - Le mécanisme de maintien des tubes bout à bout pendant le soudage est appelé « clamps intérieur »,
 - Ce clamps est composé de deux mécanismes de forces indépendants, manipulés par deux cylindres pneumatiques à double action,
 - Le cylindre exerce une force radiale contre la paroi interne du tube, cette force est transmise à la paroi au moyen d'une série de pistons plongeurs,
 - Pour le soudage sur station double jointing, le clamps est commandé à distance par l'opérateur, qui le fait déplacer de sa gare jusqu'aux extrémités des tubes à assembler.

- **Poste de soudage N°2**
 - Au niveau de ce poste se réalise la deuxième passe de soudage qui en même temps, réalise le bourrage et la finition du joint externe.
 - Ce poste de soudage est muni d'une tête suspendue à l'aide d'une poutre parallèle à position des tubes.
 - La tête descendue pour venir se disposer au niveau du joint de soudure, il existe un vireur pour donner au tube la rotation nécessaire pour la réalisation du cordon de soudure.

- **Poste de soudage N°3**
 - Même procédé de soudage que ceux de deux postes précédents mais la manipulation de la tête de soudure est différente, car cette dernière est entraînée par un chariot qui se déplace à l'intérieur du tube par un système hydraulique.
 - Pour éviter la flexion du bras du poste tête de soudage et les frottements acier ce dernier repose sur un galet rotatif libre.
 - La mise en marche du poste s'effectue par l'opérateur qui est couché sur le bras juste avant la tête soudage.

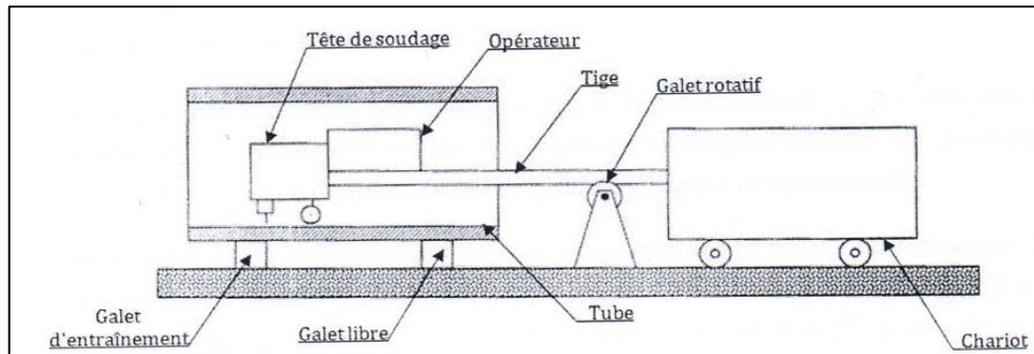


Figure (II-13) : Schéma d'un poste de soudage (passe interne)

- **Turbo générateur**

Le turbo générateur a pour rôle d'alimenter la station double jointing et toutes ces différentes équipements en courant continu, il est composé de quatre génératrices de soudage, il existe un groupe électrogène qui se met automatiquement en marche en cas de panne du turbo générateur.

VI-7-3 Fonctionnement de la station ⁽⁶⁾

Il existe au niveau de la station double jointing quatre stations principalement par lesquelles les tubes devront passer pour être jointé, elles sont :

- Station de meulage et de chanfreinage ;
- Station d'alignement : dans laquelle la première passe de soudage sera réalisée ;
- Station de remplissage : 2^{ème} passe de soudage et celle de finition seront réalisées;
- Station interne : réalisation de la 3^{ème} passe en soudage intérieur.

Dans une première étape les tubes sont stockés à l'entrée de la station double jointing par les pyloaders puis elles seront disposées sur les rampes grâce à l'inclinaison de ces derniers et sous l'effet de leur propre poids, les tubes arrivent à la première station où ils seront bloqués par des bras et déposés sur les galets pour la préparation des extrémités.

Dès qu'on termine cette opération les tubes sont dirigés vers la station d'alignement où la première passe de soudage sera réalisée, mais à l'intermédiaire il existe un préchauffage qui sera réalisé à l'aide d'un système de torche rotative à une température donnée en fonction de pourcentage de carbone équivalent continu dans le métal ou la nuance d'acier dans le tube.

Une fois cette température est obtenue les tubes seront positionnés l'un face à l'autre grâce à des systèmes des vérins d'un clamps intérieur qui viendra maintenir rigidement les deux tubes

pendant l'opération de soudage positionne la tête de soudure et règle les paramètres et amorce l'arc électrique.

Le flux utilisé pour le soudage est réchauffé ou étuvé pour diminuer l'humidité pouvant provoquer les défauts dans le cordon de soudure.

La première passe de soudage est terminée, on retire le clamps et les deux tubes jointés sont dirigés vers la troisième station où elle sera réalisée une passe de bourrage et finition qui déterminera la deuxième passe extérieur en lui donnant l'aspect et la surépaisseur des cordons désirés.

Une fois cette opération terminée les tubes sera dirigé vers la 4^{ème} station où s'exécutera la passe intérieur, cette passe est réalisée à l'aide d'un chariot muni d'un bras pourtant à son extrémité la tête de soudure, le sens de rotation du tube de cette passe sera différent de celui de la 2^{ème} passe pour permettre aux défauts superficielles ou cavités en surface d'être facilement remplis lors de la 3^{ème} passe.

Cette passe est réalisée à l'aide d'un opérateur couché sur le bras juste avant la tête de soudure, il procédera à la mise en marche de l'opération de soudage, il contrôlera la tête de soudage pendant la réalisation du cordon car celle-ci peut se déplacer et sortir de la gorge de cordon, ce contrôle sera effectué grâce à une lampe-guidé positionnée dans le même axe que la tête de soudage mise sur chanfrein.

Avant la réalisation de chaque passe intérieure l'opérateur devra nettoyer le cordon extrême mais de l'intérieur du tube, celui-ci lors du soudage de la première passe laisse des barrures dues à une mauvaise fusion ou à des gouttes de laitier mal fondues, le nettoyage sera réalisé à l'aide d'une meule et brosse métallique.

Une fois le tube est entièrement soudé, il sera dirigé vers des rampes où l'on effectuera le contrôle radiographique pour être enfin stocké, s'il n'existe aucun défaut dans le cas contraire le tube sera soit réparé soit coupé.

II-8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir les différents procédés de soudage ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le choix d'un meilleur procédé ce fait en tenant compte de plusieurs paramètres pour procurer une qualité de soudure supérieure sans aucun défaut.

Chapitre III

Les principaux défauts de soudure

III-1 Introduction

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les éliminer et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants et leurs moyens de prévention.

III-2 Défauts de soudure

III-2-1 Fissurations

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents, 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.

III-2-1-1 Fissuration à chaud

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique⁽⁷⁾.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure.

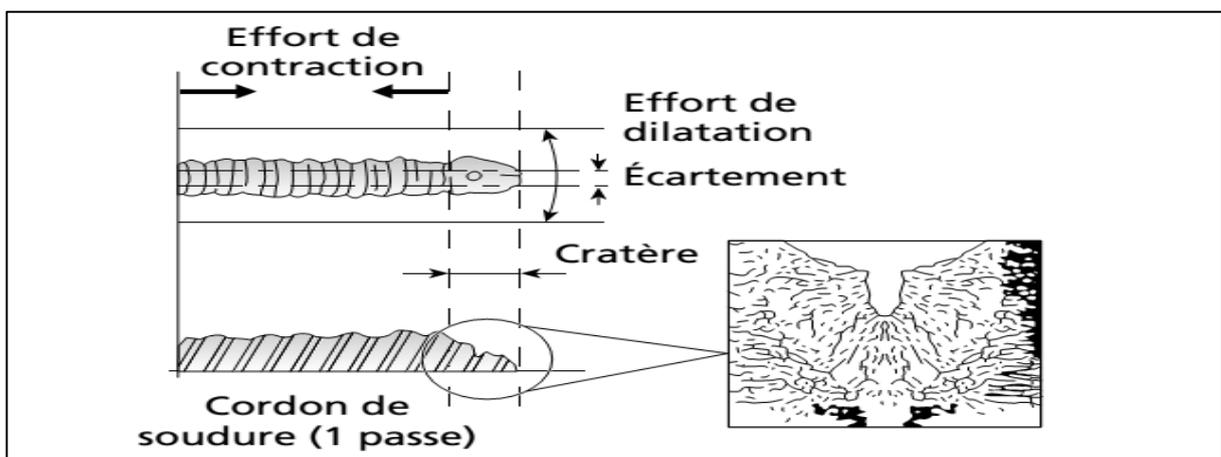


Figure (III-01) : Fissure de cratère

III-2-1-2 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 ZTA. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid⁽⁷⁾.

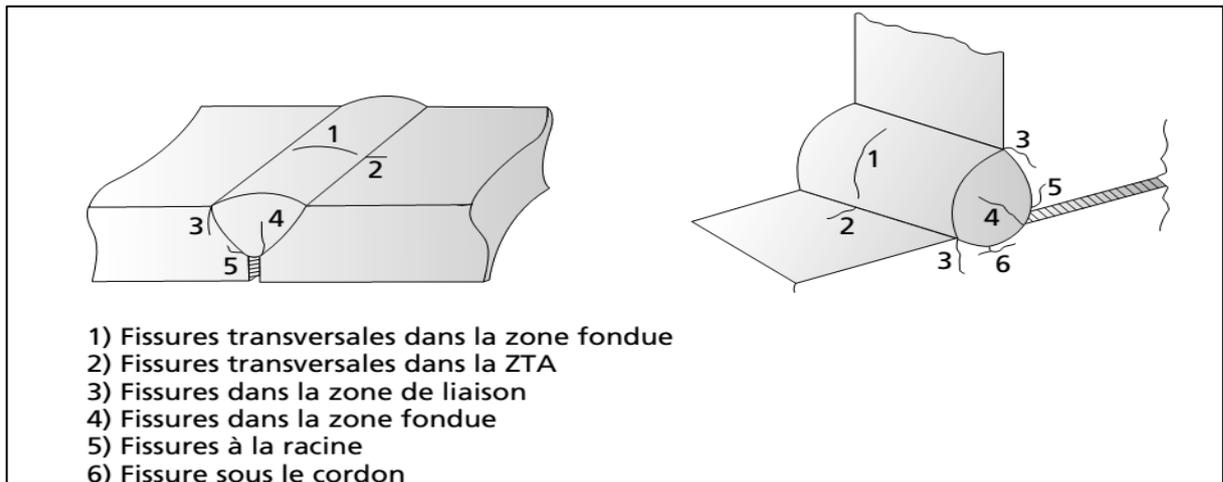


Figure (III-02) : Types de fissure à froids

III-2-2 Manque de fusion

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 (figure III-03).

Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions. On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.

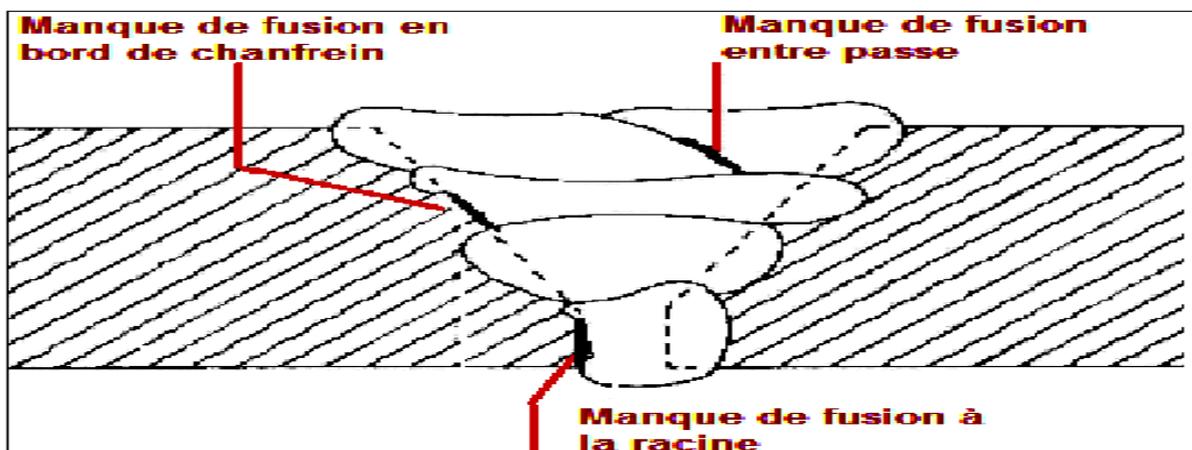


Figure (III-03) : Localisation possible des manques de fusion

III-2-3 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.

III-2-3-1 Localisations possibles des manques de pénétration

Le manque de pénétration peut être localisé :

- A la racine de la soudure (soudure en « V ») ;
- A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X »).

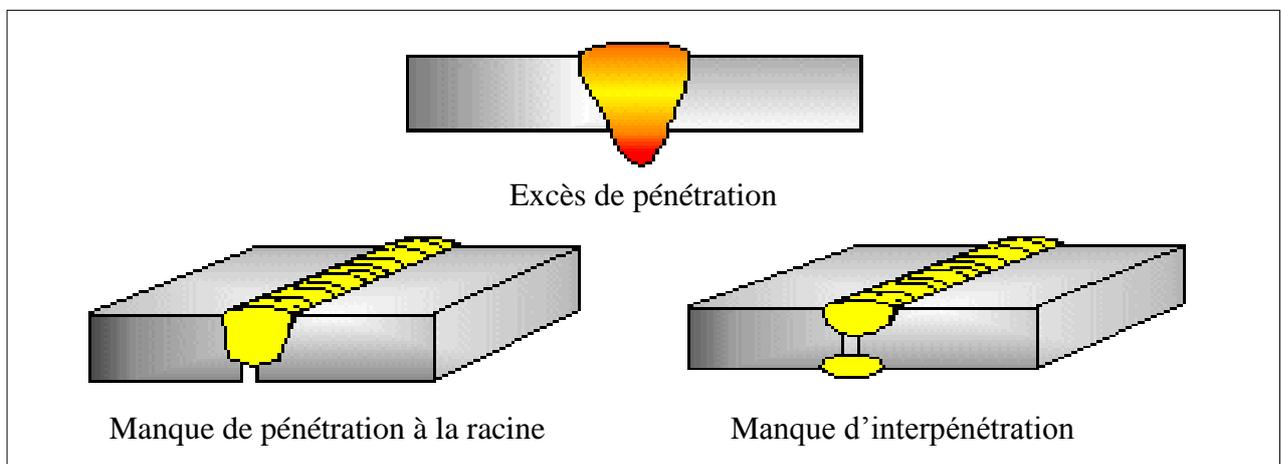


Figure (III-04) : Défauts de pénétration

III-2-4 Inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger.

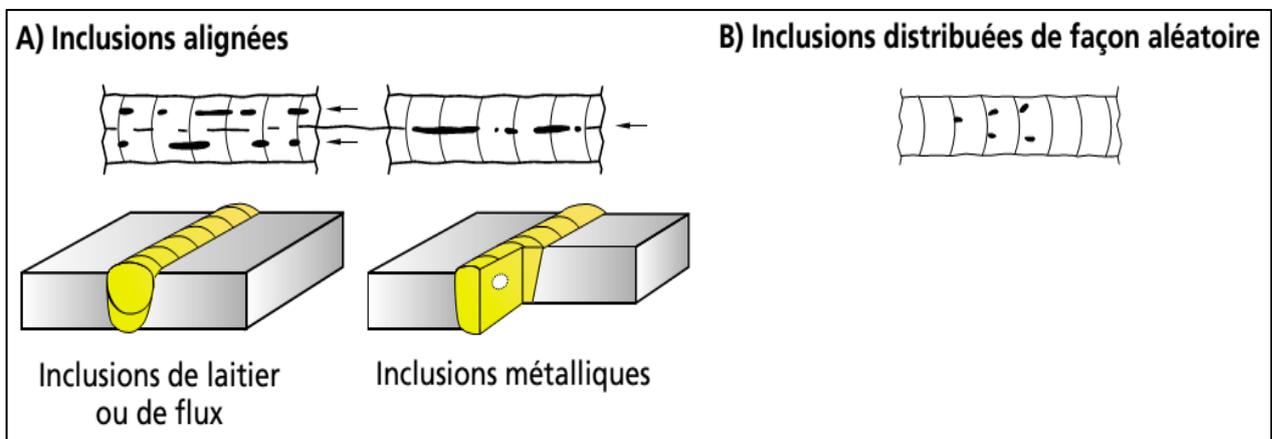


Figure (III-05) : Inclusions

III-2-4-1 Types d'inclusions

On distingue différents types d'inclusions :

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
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.
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.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification.
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

Tableau (III-01)⁽⁸⁾ : Types d'inclusions

III-2-5 Cavités

III-2-5-1 Soufflures

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).

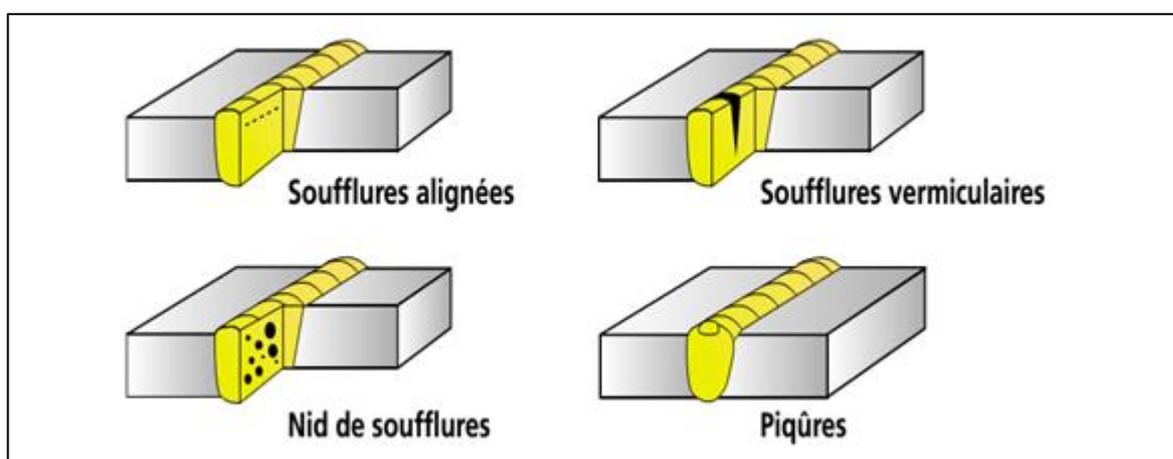


Figure (III-06) : Types de soufflures

III-2-5-2 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.

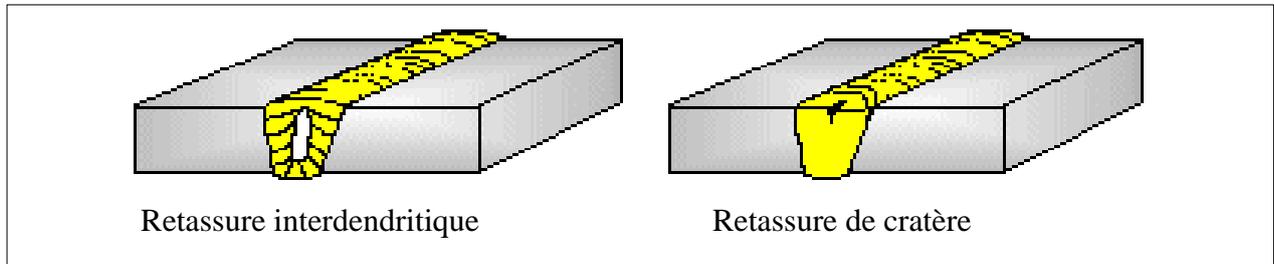


Figure (III-07) : Type de retassures

III-2-6 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.

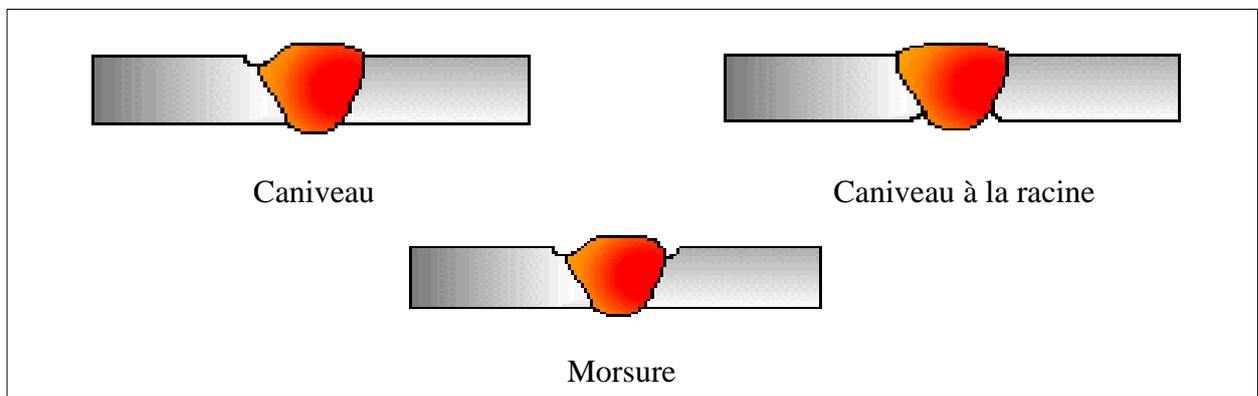


Figure (III-08) : Morsures et caniveaux

III-2-7 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

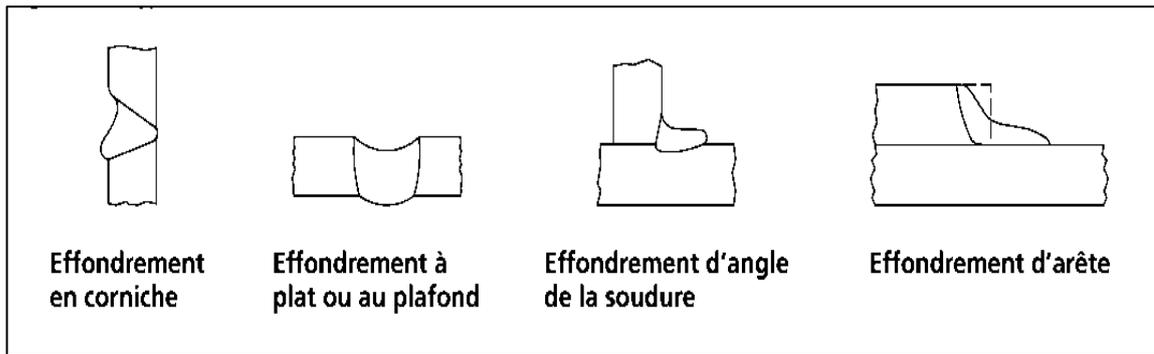


Figure (III-09) : Types d'effondrements

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou.

III-2-8 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.

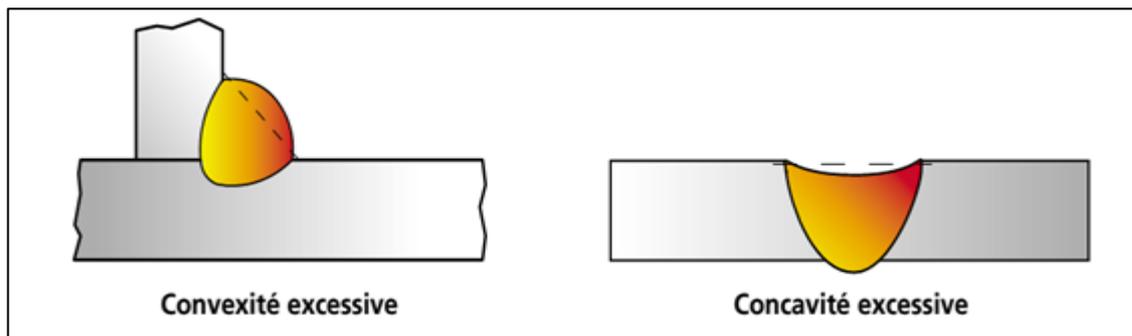


Figure (III-10) : Convexité et concavité

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 (partie A de la figure III-11). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

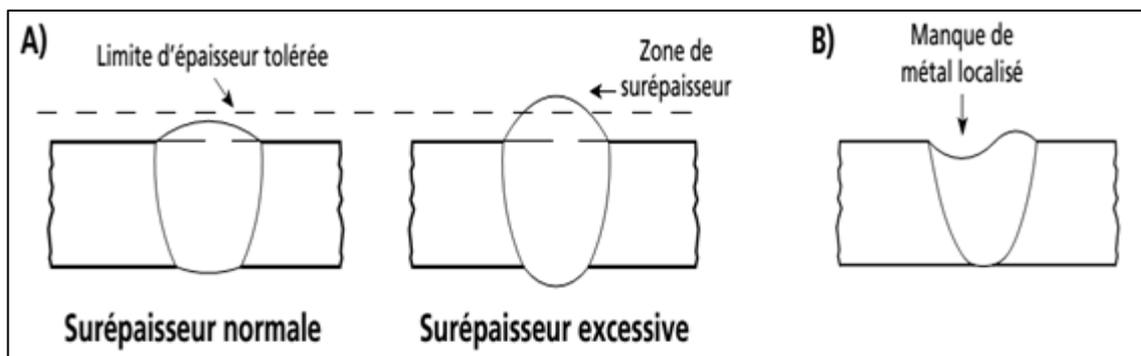


Figure (III-11) : Surépaisseur

III-2-9 Débordements du 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.

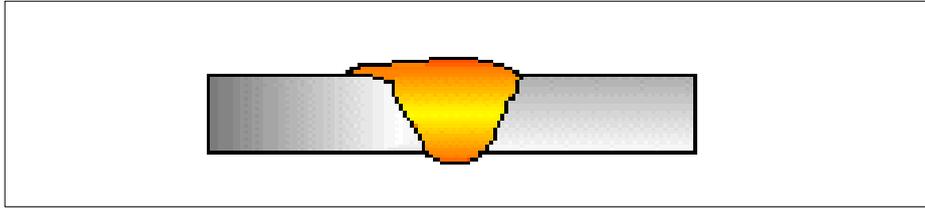


Figure (III-12) : Débordement de cordon

III-2-10 Projections

Une projection est une éclaboussure de métal en fusion projeté pendant le soudage et qui adhère au métal de base (figure 6.19) 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.

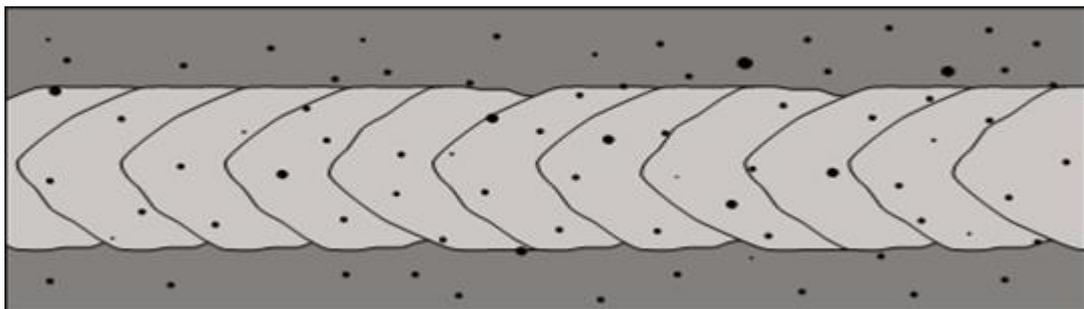


Figure (III-13) : Projections

III-3 Causes possibles et moyens de préventions liées aux défauts de soudure

Défauts de soudure	Causes possibles	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 froids	<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).
Mauvaise fusion des bords	<ul style="list-style-type: none"> - Courant de soudage trop faible, - Vitesse de soudage trop grande. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter l'intensité du courant, - Réduire la vitesse d'avance et préchauffer les pièces épaisses, - Effectuer un bon mouvement oscillatoire, - Bien disposer les cordons dans les soudures multipasses.
Excès de pénétration	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente, - Intensité du courant trop forte, - Mauvaise préparation des bords, - Trop de distance entre les pièces, - Arc trop court. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse, - Diminuer l'intensité, - Utiliser le joint approprié, - Rapprocher les pièces, - Éloigner la torche.

Défaut de soudure	Causes possibles	Moyens de prévention
Manque de pénétration	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop élevée - Intensité du courant trop faible - Chanfrein trop étroit ou absent - Métal de base trop épais et froid 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse. - Augmenter l'intensité. - Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces. - S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.
Inclusions solides, de flux ou de laitier	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais écartement à la racine, - Impuretés dans le bain de fusion. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien positionner les pièces, - Bien nettoyer le métal, surtout entre les cordons, - Avoir une bonne chaleur de soudage, - Effectuer un bon mouvement oscillatoire, - Bien disposer les cordons dans les soudures multipasses.
Inclusions de tungstène	<ul style="list-style-type: none"> - Fonte de l'électrode causée par une chaleur trop élevée, - Électrode en contact avec le bain de fusion. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire l'intensité de courant, - Bien choisir les paramètres de soudage (diamètre de l'électrode et polarité du courant), - Maintenir l'arc de soudage suffisamment long.
Soufflures	<ul style="list-style-type: none"> - Emprisonnement de gaz dans la soudure, - Présence d'huile à la surface du métal de base ou du métal d'apport, - Courant de soudage trop faible ou vitesse trop élevée, - Trop grand écartement à la racine. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien assécher le métal et protéger le bain de fusion, - Nettoyer le métal avec un solvant, - Augmenter l'intensité, réduire la vitesse d'avance ou préchauffer la zone de soudure, - Bien positionner les pièces.
Retassures	<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 retraits durant ou après le soudage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien mesurer les angles des chanfreins, - Préchauffer et chauffer en cours de soudure, - Bien choisir le métal d'apport, - Refroidir lentement, - Procéder à un traitement thermique après soudage (normalisation, recuit), - Effectuer un cordon suffisamment large, réduire la vitesse au besoin, - En cas de retraits, effectuer un léger retour en arrière et ajuster la procédure de soudage.

Défauts de soudure	Causes possibles	Moyens de prévention
Caniveaux	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais angle de la torche, - Courant trop élevé, - Longueur d'arc incorrecte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corriger l'angle, - Diminuer l'intensité du courant, - Corriger la longueur de l'arc.
Convexité excessive ou surépaisseur du cordon	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur trop faible, - Vitesse de dévidage trop élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter l'intensité du courant, - Réduire la vitesse de dévidage, - Effectuer un bon mouvement oscillatoire.
Effondrements ou concavité excessive	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de soudage trop lente, - Chaleur trop élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse, - Réduire l'intensité du courant, - Effectuer un bon mouvement oscillatoire.
Cordon 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"> - Vitesse d'avance trop lente, - Mauvais angle de soudure, - Arc trop long.
Cordon trop étroit	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop rapide. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop rapide.
Cordon 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.
Débordement du cordon	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente - Mauvais angle de soudage - Joints mal nettoyés 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse. - Modifier l'angle de soudage. - S'assurer que les joints sont propres.
Projections	<ul style="list-style-type: none"> - Instabilité de l'arc, - Mode de transfert inapproprié, - Courant trop intense, - Soufflage de l'arc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Changer le mélange de gaz de protection, - Changer la longueur de l'arc, - Changer le mode de transfert, - Réduire l'intensité du courant, - Choisir le courant approprié, - Changer la prise de masse.

Tableau (III-02) : Défauts de soudage, causes et moyens de prévention

III-4 Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé

Procédé	Défauts communs
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
GTAW	<ul style="list-style-type: none"> – Fissures – Cavités – Inclusions de tungstène – Manque de fusion ou de pénétration – Défauts de formes du cordon – Oxydation en surface
GMAW	<ul style="list-style-type: none"> – Soufflures – Collage – Manque de pénétration – Projections – Joints irréguliers – Convexité excessive

Tableau (III-03)⁽⁹⁾ : Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé**III-5 Contrôle de la qualité de cordon de soudure**

Un cordon de soudure de qualité est un cordon :

- régulier, c'est-à-dire dont la largeur et l'épaisseur sont constantes et conformes aux spécifications ;
- dont les stries sont rapprochées les unes des autres ;
- dont les côtés sont bien fusionnés au métal de base ;
- lisse et exempt d'inclusion.

III-6 Conclusion

Le choix de procédé de soudage et les conditions de travail influent sur le joint de soudure et créant des différents défauts cité précédemment qui nécessite un contrôle pour les éliminées.

Chapitre IV

Contrôle des joints soudés et différents techniques

de CND

IV-1 Introduction

Quel que soit le procédé de fabrication, pour obtenir des produits de qualité bien définie, il est important non seulement de vérifier que les pièces terminées sont conformes, mais encore de s'assurer qu'au cours des divers stades de la fabrication, les facteurs qui agissent sur la qualité finale sont maintenus dans les normes prévues, n'opérer aucun contrôle finale conduit, en effet à constater à qu'on produit des pièces non conformes, lorsqu'il est trop tard l'éviter.

Ceci est particulièrement vrai en soudage, où les facteurs qui agissent sur la qualité sont nombreux et complexes, c'est pour quoi on prévoit, en général trois types de contrôles :

- les contrôles avant soudure ;
- les contrôles en cours d'exécution ;
- les contrôles après soudure.

IV-2 Contrôle avant le soudage

Afin de s'assurer des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du métal déposé et de la zone affectée thermiquement, il est nécessaire de vérifier que l'ensemble des paramètres régissant le soudage conduit effectivement à la qualité attendue. A cette fin, un mode opératoire préliminaire rassemblant tous les paramètres de soudage est qualifié. Des essais destructifs permettent de vérifier les caractéristiques mécaniques ; de surcroît le métal d'apport doit aussi être qualifié à l'issue d'essais mécaniques réalisés sur des moules. Enfin, la compétence du soudeur est l'un des facteurs les plus importants. Cette compétence n'est pas universelle : un soudeur compétent pour mettre en œuvre un procédé dans des conditions opératoires données peut ne plus l'être pour le même procédé dans des conditions opératoires différentes : les soudeurs sont donc soumis à des essais de qualification pour un mode opératoire bien défini.

IV-3 Contrôle pendant le soudage

Lorsque les conditions opératoires ont été qualifiées, il importe de vérifier qu'elles sont observées, notamment :

- la préparation ;
- l'accostage, le calage des tubes ;
- les paramètres électriques (intensité ; tension...).

IV-4 Contrôle après le soudage

le contrôle non-destructif (CND) : est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances, On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

Ces méthodes connues et utilisées depuis longtemps...

- Radiographie (premières applications de contrôle RX dès 1900).
- Ultrasons (découverts en 1883 par Galton).
- Ressuage (pratiqué en 1930).
- Magnétoscopie (principe attribué au major W H Hoke en 1922).

IV-5 Les différentes techniques de C.N.D utilisé pour le contrôle des joints soudés

IV-5-1 Contrôle visuel VT⁽¹⁰⁾

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Un examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions assurant avant tout un éclairage suffisant. Le niveau d'éclairement minimum requis est de l'ordre de 350 Lux. L'accessibilité de la partie à examiner doit permettre d'approcher l'œil à au moins 60 cm, sous une incidence de 30°.

Lorsque la partie de la pièce à contrôler n'est pas accessible par un examen direct, on utilise un appareil appelé endoscope. Il s'agit d'un appareillage constitué de miroirs et lentilles. La méthode est appelée contrôle par endoscopie. Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

Les tests d'étanchéité, les tests pneumatiques et les épreuves hydrauliques comportent aussi un examen visuel pour mettre en évidence des fuites éventuelles.

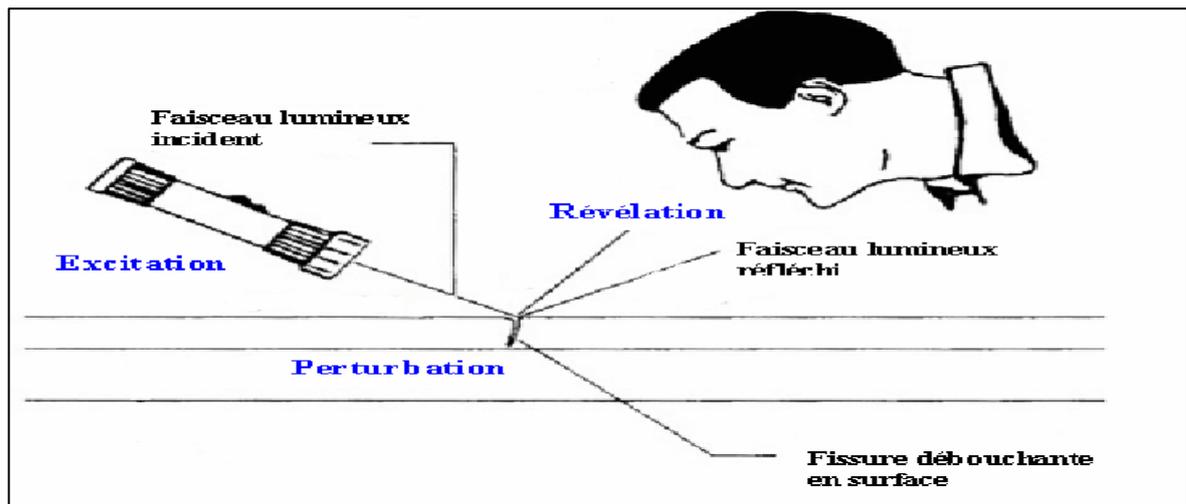


Figure (IV-01) : Principe de contrôle visuel

IV-5-2 Ressuage PT

Le procédé consiste à appliquer sur la surface à contrôler, préalablement nettoyée et séché, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre par capillarité dans les ouvertures des défauts. L'excès de liquide est enlevé par lavage, la surface est séchée. On applique alors sur l'échantillon un révélateur qui, attirant le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts, donne une indication renforcée de ceux-ci. L'examen est visuel, en lumière naturelle (liquide d'imprégnation coloré) ou en lumière noire (liquide d'imprégnation fluorescent).

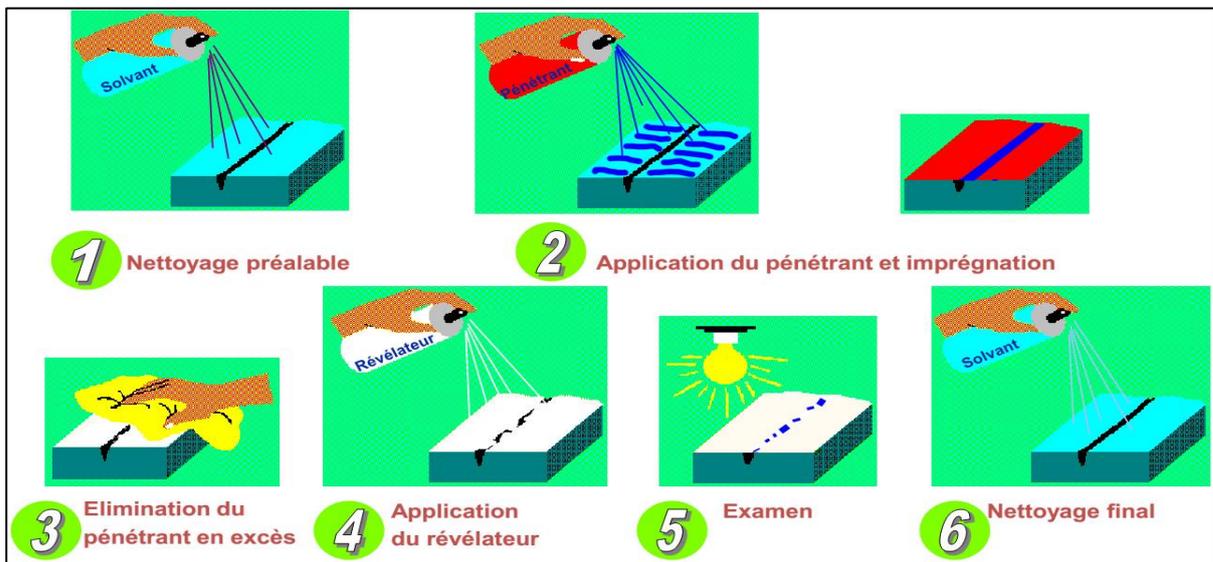


Figure (IV-02) : Principe de contrôle par ressuage

IV-5-3 Magnétoscopie MT

Le procédé consiste à soumettre l'échantillon à contrôler à champ magnétique, de manière à créer des fuites magnétique particulièrement intenses sur les défauts jouant le rôle d'entrefer.

La détection de ces fuites se fait au moyen d'une liqueur magnétique (oxyde de fer magnétique en suspension dans l'huile ou l'eau) en contact immédiate avec la surface de la pièce.

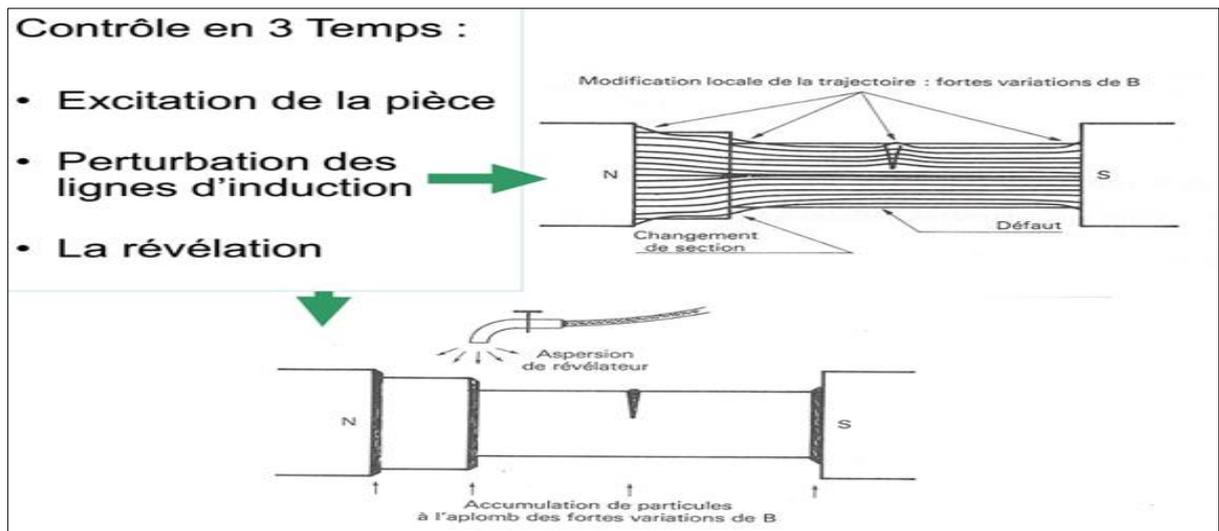


Figure (IV-03) : Principe de contrôle par magnétoscopie

IV-5-4 Radiographie (RT)

Ce moyen de contrôle est basé sur l'absorption différentielle des rayonnements électromagnétiques de très courte longueur d'onde dans la matière en fonction de la densité des milieux traversés. Le rayonnement sortant de la pièce en impressionnant, soit un film photographique, soit un écran fluorescent donne une image des hétérogénéités de la matière examinée. L'image des défauts est la projection de ces défauts sur le plan du film. Ce procédé donne peu d'informations sur la hauteur des défauts. De surcroît la densité de l'image du défaut dépend de son épaisseur et un défaut plan, perpendiculaire au rayonnement, risque de ne pas être décelé. Ce sont les principales limitations de ce type d'examen⁽¹¹⁾.

Les appareils de gammagraphie appelés gammagraphies (abrégé : GAM) fonctionnent à l'aide d'isotope radioactif stable (principalement iridium 192, cobalt 60 et sélénium 75). Ce sont des sources autonomes qui ne nécessitent aucune prise de courant contrairement au poste à rayon X.

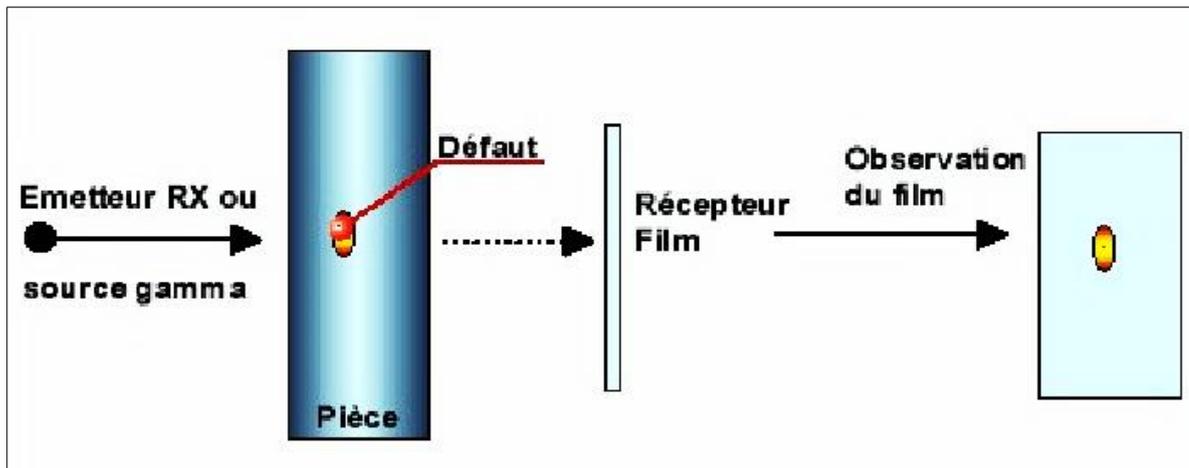


Figure (IV-04) : Principe de contrôle par la radiographie

IV-5-4-1 Nature et propriétés principales des rayons

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 ⁽¹⁾.

IV-5-4-3 Obtention des rayons X et γ

➤ Les rayons X

Ils sont produits par un tube radiogène qui est constitué d'une enceinte dans laquelle on a fait le vide et qui contient principalement deux électrodes :

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

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

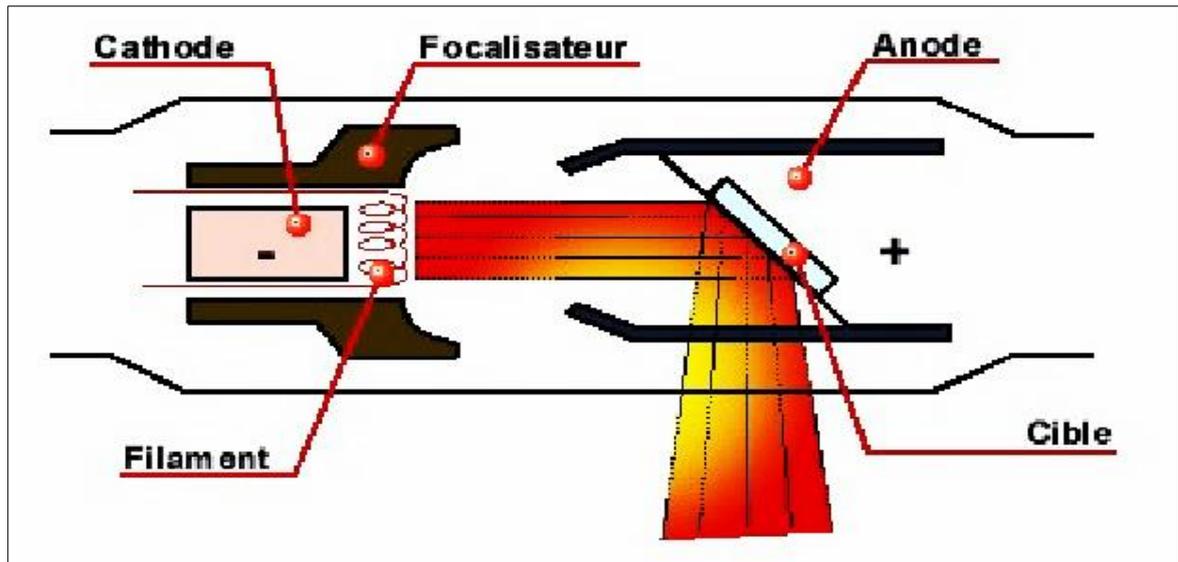


Figure (IV-05) : Tube à rayons X

➤ **Les rayons γ**

Ils sont obtenus à partir de sources radioactives. Le tableau IV-1 donne quelques sources utilisées.

Nature	Période	Épaisseur de déci-transmission
Césium 137	30 ans	8.4 mm de Pb
Cobalt 60	5.3 ans	13 mm de Pb
Iridium 192	74 jours	2.8 mm de Pb

Tableau (IV-01)⁽¹⁴⁾ : Les rayons γ

CHAPITRE IV Contrôle des joints soudés et différentes techniques de CND

IV-5-4-4 Comparaison des rayons X et γ

Le tableau IV-02 donne un état comparatif des deux types de rayonnements.

Caractéristiques	Rayons X	Rayons GAMMA
Alimentation	Alimentation électrique indispensable. Contrôle continu nécessaire.	Emission spontanée de radiations. Pas de contrôle.
Dimension	Equipement volumineux	Dimensions de la source très réduite.
manipulation	Mise en place parfois difficile.	Mise en place facile.
Transport	Délicat à cause de pièces fragiles	Facile, ne craint pas les chocs.
Protection	Nécessaire pendant utilisation uniquement.	Nécessaire en permanence. Emission des rayons continue.
Longueur d'onde	Fonction de la tension Pouvoir pénétrant plus faible que les rayons gamma.	Dépend du type de source Plus courte que les rayons X Pouvoir pénétrant plu fort
Emission des radiations	Limitée à un cône de faible ouverture Possibilité d'émission plus large	Toutes directions.
Intensité de rayonnement	Elevée	Faible
Temps d'exposition	Court	Long (parfois plusieurs heures)
Qualité des radiographies	Bon contraste suivant tension	Plus faible contraste

Tableau (IV-02)⁽¹²⁾ : Comparaison des rayonnements

IV-5-4-5 Le film radiographique

Les films sont constitués d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine.

Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins, mais la définition des images est plus faible.

IV-5-4-6 Visibilité des défauts

Cette visibilité des défauts est déterminée par les facteurs suivants :

- la nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut ;
- les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou) ;
- les propriétés du film (granulation, voile de base, présence d'écrans filtrants et (ou) de renforçateurs) ;
- la qualité du rayonnement utilisé.

IV-5-4-7 La période

C'est le temps au bout duquel l'intensité de la source est réduite de moitié. Elle peut varier de quelques secondes à plusieurs centaines d'années. Il est évident que, dans le premier cas, l'utilisation industrielle du radioélément n'est pas possible et qu'une valeur acceptable de la période est nécessaire pour son utilisation en gammagraphie⁽¹¹⁾.

IV-5-4-8 L'activité de la source⁽¹¹⁾

L'activité d'une source dont dépend le temps d'exposition s'est mesuré longtemps en curies. Le curie correspondait à l'activité d'un gramme de radium c'est-à-dire à $3,7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde.

$$A = \frac{A_0}{e^{T/T_0}} \quad (\text{IV-1})$$

IV-5-4-9 Qualité du contrôle

Pour apprécier la qualité de l'image radiographique, il faut la traduire sous forme numérique, pour cela, on utilise des indicateurs de qualité d'image (IQI). Ils sont placés au contact de la pièce face à la source de rayonnement. L'image de l'IQI sur le film traduira la qualité de l'image⁽¹¹⁾.

IV-5-4-10 Apparences radiographiques des défauts

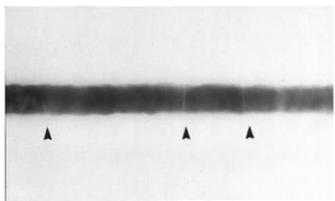
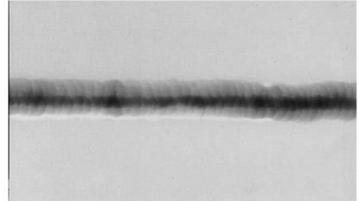
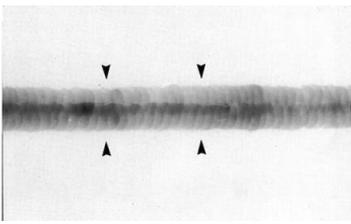
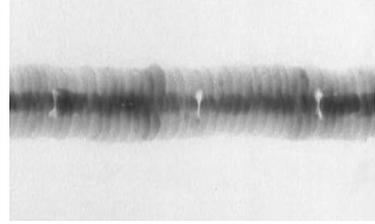
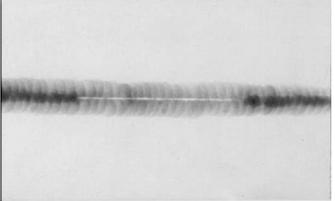
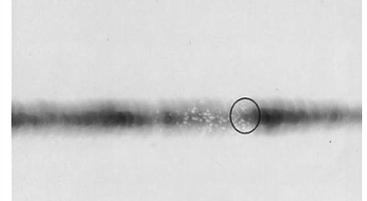
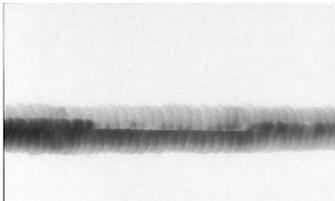
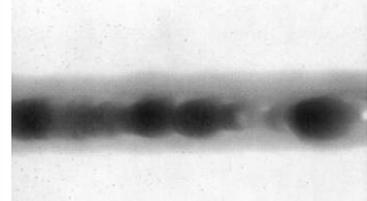
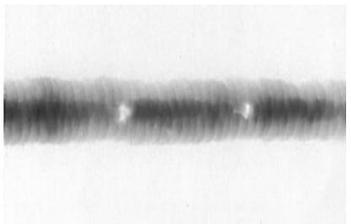
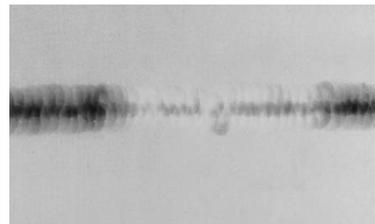
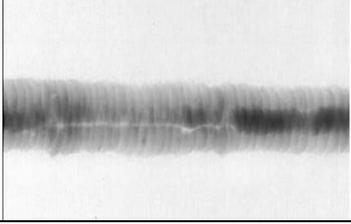
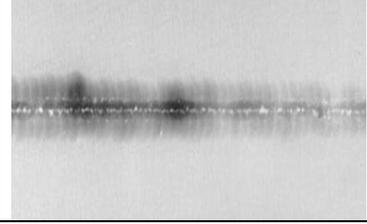
Défauts	Apparences radiographiques.	défauts	Apparences radiographiques.
Fissures transversales		Caniveau externe	
Fissures en racine		Inclusion de laitier	
Manque de pénétration		Nid de soufflure	
Manque de fusion		Mouvais profil	
perçage		Finition inachevé	
Caniveau en racine		Porosité alignée en racine	

Tableau (IV-03) : Apparences radiographiques des défauts

IV-5-5 Les ultrasons UT

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives⁽¹³⁾.

Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts aussi bien dans le volume de la matière qu'en surface. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples.

Cette méthode nécessite d'effectuer un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts.

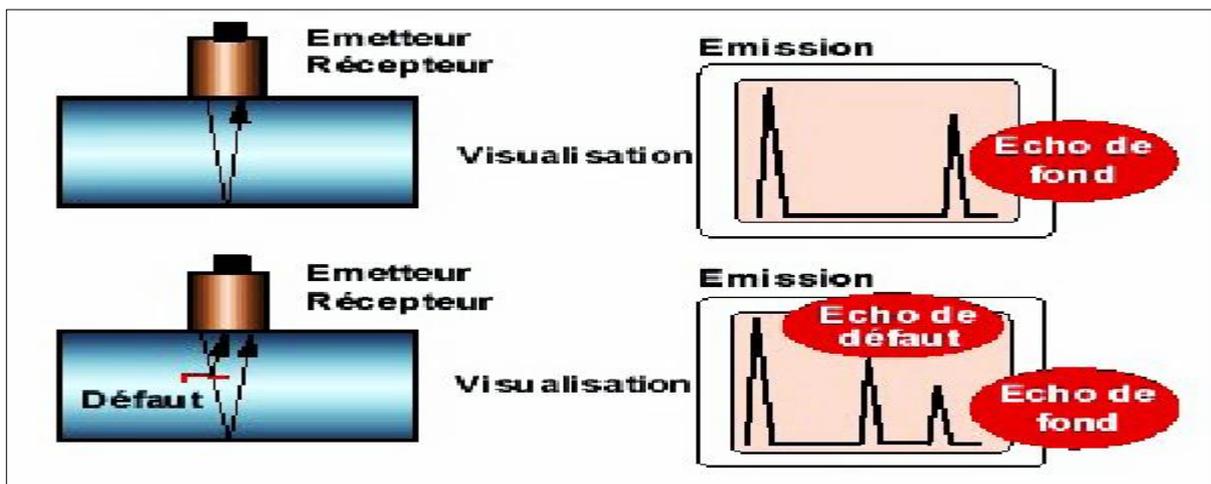


Figure (IV.06) : Principe de contrôle par ultrasons

IV-5-5-1 Nature des ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations élastiques d'origine mécanique qui se propagent dans les milieux matériels fluides ou solides, très difficilement dans certains gaz mais jamais dans le vide.

Les ultrasons sont de même nature que les sons mais de fréquence plus élevée.



Figure (IV-07)⁽¹¹⁾ : Echelle des ondes élastique

- 1 : Domaine des infrasons, (inaudibles). De 0 à 16 Hz.
- 2 : Domaine des sons, (audibles). De 16 à $16 \cdot 10^3$ Hz.
- 3 : Domaine des ultrasons, (inaudibles) .De $16 \cdot 10^3$ à 10^8 Hz.
- 4 : Domaine des hyper sons, (inaudibles). $> 10^8$.

IV-5-5-2 Nature des ondes et vitesse de propagation

Deux types d'ondes sont principalement utilisés en contrôle "classique" :

- Les ondes longitudinales (ou de compression) pour lesquelles la vibration mécanique des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde ;
- Les ondes transversales (ou de cisaillement) pour lesquelles la vibration mécanique des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (uniquement dans les solides ou matériaux très visqueux).

matériau	Vitesse des ondes longitudinales	Vitesse des ondes transversales
Eau (20°C)	1400	
Huile légère	1340	
Mercure	1450	
Acier (1%)	5940	3220
Aluminium	6300	3100

Tableau (IV-04)⁽¹⁴⁾ : Vitesse de propagation des ondes

IV-5-6 Comparaison entre les deux méthodes RT et UT

Pour des raisons de sûreté et des exigences de construction ainsi qu'opérationnelles toujours plus strictes, le contrôle automatisé par ultrasons remplace progressivement le contrôle radiographique pour l'inspection des soudures circulaires de pipelines.

Les performances obtenues sont satisfaisantes et répondent aux exigences les plus rigoureuses de l'industrie pétrolière et gazière.

Pour pouvoir détailler les causes pour lesquelles les nouvelles techniques de contrôles CND et en particulier les ultrasons automatisés (UT) qui peuvent remplacer le contrôle radiographique (RT) dans plusieurs cas sans aucun risque ni atteinte à l'être humain comme à l'environnement, on comparant entre les deux techniques UT et RT dans le tableau suivant.

CHAPITRE IV Contrôle des joints soudés et différentes techniques de CND

	Radiographie	Ultrasons
Interprétation du travail sur la pièce contrôlée	Longue ; le transfert de la pièce dans une enceinte spéciale peut demander jusqu'à 8h.	Courte
Détection des défauts volumique	Bonne	Bonne
Détection des défauts plans	Médiocre	Bonne
Obtention de documents permanents.	Oui	Oui
Reconnaissance des défauts (nature et dimensions)	Aisée	Possible
Localisation des défauts dans la pièce	Imparfaite	Complète
Evaluation de la finesse et de la fiabilité du contrôle	Aisée, à l'aide des I.Q.I. (indicateurs de qualité d'image)	On est forcé de faire confiance à l'opérateur.
Adaptation à tous les matériaux	Oui	Ne convient pas pour le laiton, l'inconel, les aciers austénitiques.
Contrôle des pièces aux formes complexes.	Possible avec des précautions.	Difficile
Contrôle des pièces présentant un mauvais état de surface	Possible	Difficile
Contrôle des pièces épaisses	Aisé	Très grosses difficultés en dessous de 10 mm. Des difficultés entre 10 et 20 mm.
Investissement	Elevé à très élevé	Faible
Risque	Très élevé	Négligeable

Tableau (IV-05)⁽¹¹⁾ : Comparaison de la radiographie et des ultrasons

IV-6 Avantages –Inconvénients des méthodes C.N.D

Le tableau ci-dessous reprend les avantages mais aussi les limites des quelques méthodes les plus couramment utilisées en contrôle non destructif.

METHODES	AVANTAGES	INCONVENINETS
Visuel	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité, • Coût, • Certification procédé VTGNV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisation difficile, • Influence de l'opérateur, • Traçabilité.
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité, • Possibilité de ressuage à chaud 240°, • Méthode bon marché. • Assez rapide, • Sensible (fines criques), • Toutes les matériaux sont justiciables de cet examen sauf si la surface est absorbante, • Système portables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uniquement sur défauts débouchant en surface, • Etat de surface et propreté de celle-ci sont importants, • Impossible à haute et surtout basse température, • Manipulations multiples, • Nettoyage et éventuellement application produit anticorrosif, • Produits toxique, • Temps d'opération, • Pas de dimensionnement précis des défauts en volume.
Magnétoscopie	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode sensible pour défauts de surface ou sous-jacents (épaisseur examinée <1cm), • Bon marché, • Facile d'emploi, • Pas de calibration nécessaire, • Insensible aux faibles épaisseurs de protection, • Système portables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exclusivement sur métaux ferromagnétiques, • pas d'information en profondeur, • Propreté échantillon avant et après examen, • Démagnétiser les pièces, • Possibilité de « bruler » les contacts sur la pièce, • Nécessite définir mode de magnétisation en fonction des défauts recherchés.

METHODES	AVANTAGES	INCONVENINETS
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur d'examen importante. • Haute sensibilité aux défauts à - différentes profondeurs, • Résultats instantanés, • Automatisable, • Echantillon accessible sur 1 face, • Utilisable sur chantier, • Donne taille et localisation défaut, • Détection des microfissures. 	<ul style="list-style-type: none"> • Personnel très entraîné, • Défaut en surface difficiles à voir, • Utilisation d'un couplant, • Orientation des défauts a un rôle important sur leur détectabilité.
Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> • défauts internes sur grande profondeur : 10cm en X et 20cm en γ courants. • Large gamme de matériaux. • Film : preuve. • Scopie : automatisation. • Tous défauts (porosités, fissures...). • Contrôle reproductible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Prix revient élevé (films traité) • Accès sur 2 faces. • Défauts linéaires non visibles si au \perp faisceau (laminages). • Microfissures non vues. • Protection due aux dangers des rayonnements ionisants. • Méthode film assez lentes (exposition au rayonnement, développement, séchage et interprétation).

Tableau (IV-06)⁽¹⁴⁾ : Avantages et inconvénients des techniques de C.N.D

IV-7 Conclusion

Les techniques cités dans ce chapitre sont généralement des méthodes de contrôle complémentaire utilisées souvent pour la détection des imperfections sans détériorer le produit à examiner, que ce soit sur les pièces forgées, moulées et soudées, selon les cas présentés, on note particulièrement la radiographie et les ultrasons les deux disciplines renommées dans le domaine de contrôle de qualité les plus utilisées dans la construction des pipelines (gazoducs et oléoducs).

La radiographie industrielle est l'une des méthodes C.N.D qui présente un risque pendant le transport de matériel, le transvasement et durant son utilisation, ce qui nous conduit à réfléchir à solliciter de préférence l'utilisation d'une autre méthode, comme l'ultrason, assurant le volet HSE et qui ne présente aucun danger ni impact sur l'être humain et l'environnement et efficace point de vue qualité.

Partie calcul

Chapitre V

Calculs relatifs au soudage

V-1 Introduction

Pour le choix du procédé de soudage (manuel ou semi-automatique) et l'efficacité du joint de soudure (sans défaut), plusieurs calculs sont effectués dans le but d'exécuter l'opération de soudage dans de meilleures conditions.

V-2 Soudage à l'arc électrique (manuel)

V-2-1 Nombre de passes par joint

Le choix des électrodes se fera selon les indicateurs du tableau suivant :

Epaisseur du tube (mm)	Nombre de passes	Diamètre des électrodes à utiliser		
		1 ^{ère} passe	2 ^{ème} passe	3 ^{ème} passe
4	1	3.25		
5	1	4		
5	2	3.25	3.25	
6	2	3.25	3.25	
7	2	3.25	4	
8	2	3.25	4	
9	3	3.25	4	4
9	4	2.5	3.25	4
10	3	3.25	3.25	4
10	4	3.25	3.25	4
12	3	3.25	4	4
12	4	3.25	4	4
14	5	3.25	4	4 et 5
16	6	4	4	4 et 5
18	6	4	4	4 et 5
20	6	4	4	5
22	9	4	4	5

Tableau (V-01) : Tableau indicateur de choix de l'électrode

V-2-2 Paramètres de soudage à l'arc électrique

➤ **Intensité de courant de soudage (I_s)**

L'intensité de courant de soudage est calculée par la formule suivante :

$$I_s = 50(d_e - 1) \quad \text{en A} \tag{V-1}$$

Avec: I_s : Intensité de soudage.
 d_e : Diamètre de l'électrode (mm).

➤ **Tension de soudage (U_s)**

La tension de soudage est en fonction de l'intensité de courant.

$$U_s = f(I_s)$$

$$U_s = 0.04 \cdot I_s + 20 \quad \text{en V} \quad (\text{V-2})$$

➤ **Diamètre de fil électrode**

La section de câble de soudage est déterminée par l'expression empirique suivante :

$$S_c = \frac{(0.0175 \times L_c \times I_{s_{\max}})}{U_{s_{\min}}} \quad (\text{V-3})$$

Avec :

L_c : Longueur de câble ($L_c = 30$ m).

$I_{s_{\max}}$: Intensité maximale de soudage ($I_{s_{\max}} = 400$ A).

$U_{s_{\min}}$: Tension minimale de soudage ($U_{s_{\min}} = 15$ V).

$$S_e = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \Rightarrow d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_e}{\pi}} \quad (\text{V-4})$$

➤ **Température de préchauffage T_p**

On fait le préchauffage dans les cas suivants :

- La température de préchauffage est de 100°C quand la température ambiante est inférieure à 5°C.
- La température de préchauffage est de 50 à 60°C lorsqu'une humidité s'est condensée sur le tube.
- Lorsque le carbone équivalent est supérieure à 0.46 c'est-à-dire (46%), on détermine la température de préchauffage par la formule suivante :

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(C_{eq} - 0.25)} \quad \text{en}^\circ\text{C} \quad (\text{V-5})$$

Avec : $C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6}$ (V-6)

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 300°C De 200 à 400°C
0.60 à 0.70	Médiocre	De 300 à 400°C
>0.70	Mauvais	Non soudable

Tableau (V-02)⁽²⁾ : Influence de carbone équivalent sur la soudabilité et la température de préchauffage de métal

V-2-3 Produit consommable

V-2-3-1 Métal déposé par joint

➤ Volume d'un joint (V_j)

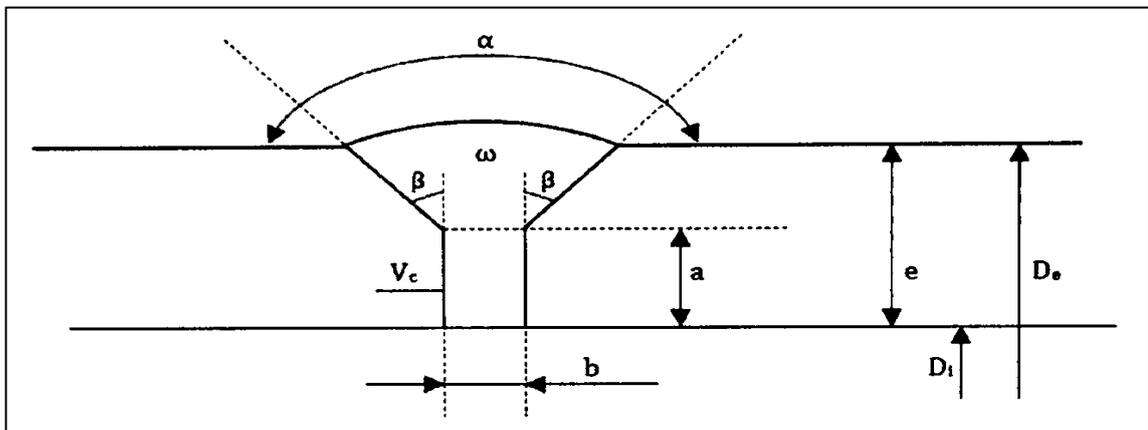


Figure (V-01) : Volume d'un joint

$$V_j = V_w + V_c \quad \text{en } mm^3 \quad (V-7)$$

Avec :

V_j : Volume total d'un joint.

V_w : Volume de la gorge en V.

V_c : Volume engendré par le petit rectangle $a \times b$.

$$\text{On a : } V_c = a \cdot b \cdot \pi \cdot [D_{\text{int}} + a] \quad \text{en } mm^3 \quad (\text{V-8})$$

$$\text{Et : } V_w = S_w \cdot \pi \cdot \left[D_{\text{int}} + 2a + 2 \cdot \left(\frac{e-a}{2} \right) \right] \quad \text{en } mm^3 \quad (\text{V-9})$$

$$\text{Avec : } S_w = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot R^2 \quad \text{en } mm^2 \quad (\text{V-10})$$

$$\text{Donc : } V_w = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot [D_{\text{int}} + a + e] \quad \text{en } mm^3 \quad (\text{V-11})$$

$$\text{Avec : } R = \frac{(e-a)}{\cos \beta}$$

$$\text{Alors : } V_j = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \left(\frac{e-a}{\cos \beta} \right)^2 [D_{\text{int}} + a + e] + a \cdot b \cdot \pi (D_{\text{int}} + a) \quad \text{en } mm^3 \quad (\text{V-12})$$

➤ **Poids d'un joint**

Est calculé par la relation suivant :

$$P_j = V_j \cdot \rho_a \quad \text{en g} \quad (\text{V-13})$$

Avec : P_j : Poids total d'un joint.

V_j : Volume total d'un joint.

ρ_a : Poids volumique de l'acier, $\rho_a = 7.856 \cdot 10^{-3} \text{ g} / mm^3$.

➤ **Volume de métal déposé par électrode**

Il calcul par la relation suivante :

$$V_{Ue} = \pi \cdot L_{Ue} \left(\frac{d_e}{2} \right)^2 \quad \text{en } mm^3 / \text{électrode} \quad (\text{V-14})$$

La longueur utile de l'électrode représente 75% de la longueur total (le rendement d'une électrode est $\eta = 0.75$).

$$L_{Ue} = \eta \cdot L_{Te} \quad (\text{V-15})$$

Avec : d_e : Diamètre d'électrode.

L_{Ue} : Longueur utile de l'électrode.

L_{Te} : Longueur total de l'électrode.

$$\text{Alors : } V_{Ue} = 0.75 \cdot \pi \cdot L_{Te} \left(\frac{d_e}{2} \right)^2 \quad (\text{V-16})$$

➤ **Volume du métal déposé par passe et nombre d'électrodes**

- **Calcul de rayon de la section de la gorge en V**

$$R = \frac{(e - a)}{\cos \beta} \quad (\text{V-17})$$

- **Volume du métal déposé par la 1^{ère} passe**

$$V_c = a \cdot b \cdot \pi \left(D_{\text{int}} + 2 \left(\frac{a}{2} \right) \right) \quad \text{en } mm^3 \quad (\text{V-18})$$

- **Volume de métal déposé par $i^{\text{ème}}$ passe**

$$V_i = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^i r_j \right)^2 \left(D_{\text{int}} + 2 \left(a + \sum_{j=1}^i r_{j-1} \right) + 2 \left(\frac{r_i}{2} \right) \right) - \sum_{j=1}^i V_{i-1} \quad (\text{V-19})$$

Avec : $i = 2, 3, 4, 5$.

$$r_1 = 0 \quad \text{et} \quad V_1 = 0$$

- **Nombre d'électrodes déposées par la $i^{\text{ème}}$ passe**

$$n_i = \frac{V_i}{V_{Ue}} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (\text{V-20})$$

V-2-4 Production journalière

➤ **Temps et vitesse de fusion**

- **Le temps de fusion**

Il varie en fonction de l'intensité de soudage et du diamètre d'électrode, selon le graphe $T_f = f(I_s, d_e)$.

- **La vitesse de fusion**

$$V_{fi} = \frac{0.75 L_{Te}}{T_{fi}} \quad \text{en cm/min} \quad (\text{V-21})$$

Avec : L_{Te} : longueur total d'électrode.

Le temps d'arc par passe :

$$\tau_{fi} = n_i \cdot T_{fi} \quad \text{en min} \quad (V-22)$$

Donc le temps d'arc par joint :

$$T_a = \sum_{i=1}^3 \tau_{fi} = \tau_{f1} + \tau_{f2} + \tau_{f3} \quad \text{en mm} \quad (V-23)$$

On peut calculer le rapport entre le temps de marche des postes et le temps nécessaire pour faire le soudage, ce temps mort est produit par :

- Changements d'électrodes.
- Nettoyages à faire après chaque passe.
- Déplacement des soudeurs.

Le facteur de marché est indiqué sur le tableau ci-dessous suivant la nature des travaux et le lieu de travail :

Nature des travaux		Facteur de marché (C_s)	
		En atelier	Sur chantier
Montage charpente	Soudures courtes	20	20
	Soudures longues	35	25
Tôlerie	Soudures courtes	27	20
	Soudures longues	92	25
chaudronnier	Soudures courtes	35	25
	Soudures longues	40	30
Soudures des tôles très épaisses		45 à 50	35
Travaux à la chaîne avec clamps		50 à 60	40
Travaux de rechargement		60 à 65	-

Tableau (V-03) : Facteur de marche suivant la nature des travaux et lieu de travail

➤ **Le temps de travail pour faire un joint**

Le soudage des tubes qui s'effectue sur chantier est un travail à la chaîne avec clamps :
 $C_s = 40\%$

Alors : $T_s = \frac{T_a}{C_s}$ en min (V-24)

➤ **Nombre de joints soudés par jour**

Calcul du temps t_s d'une soudure lorsque le joint est exécuté par dix soudeurs, (deux pour chaque passe).

$$t_s = \frac{T_s}{10} \quad \text{en min} \quad (V-25)$$

Sachant que la durée de travail est en moyenne 8 heures (8 h/j), alors le nombre de joints produits par jour :

$$N = \frac{t}{t_s} \quad (V-26)$$

Avec : t : Durée du travail par jour (8 heures = 480 min).

t_s : Temps du travail d'un soudeur pour réalisation d'un joint.

➤ **Longueur total des joints soudés par jour**

$$L_{ts} = N \cdot \pi \cdot D_{ext} \quad (V-27)$$

Où : N : nombre de joints soudés par jour.

D_{ext} : Diamètre extérieur du tube.

➤ **Longueur de la conduite soudée par jour**

$$L_c = N \cdot L_{tube} \quad (V-28)$$

V-3 Soudage sur les stations double jointing

V-3-1 Paramètres de soudage sur station double jointing

➤ **L'intensité I**

$$I = 110d_e + 10d_e^2 \quad \text{en A} \quad (V-29)$$

Avec : d_e : Diamètre du fil électrode.

➤ **La tension U**

$$U = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_e^{0.5}} \times I \pm 1 \quad \text{en V} \quad (V-30)$$

➤ La vitesse de soudage

$$v_s = \frac{I \cdot a}{\gamma \cdot S} \quad \text{en m/h} \quad (V-31)$$

Avec :

γ : poids spécifique de l'acier [t/m^3] ou [g/cm^3].

I : intensité de courant de soudage [A].

S : section du cordon [m^2].

a : Coefficient de fusion [$g/A.h$].

La méthode de détermination de a utilise un abaque qui est en fonction de l'intensité du courant de soudage et du diamètre de l'électrode.

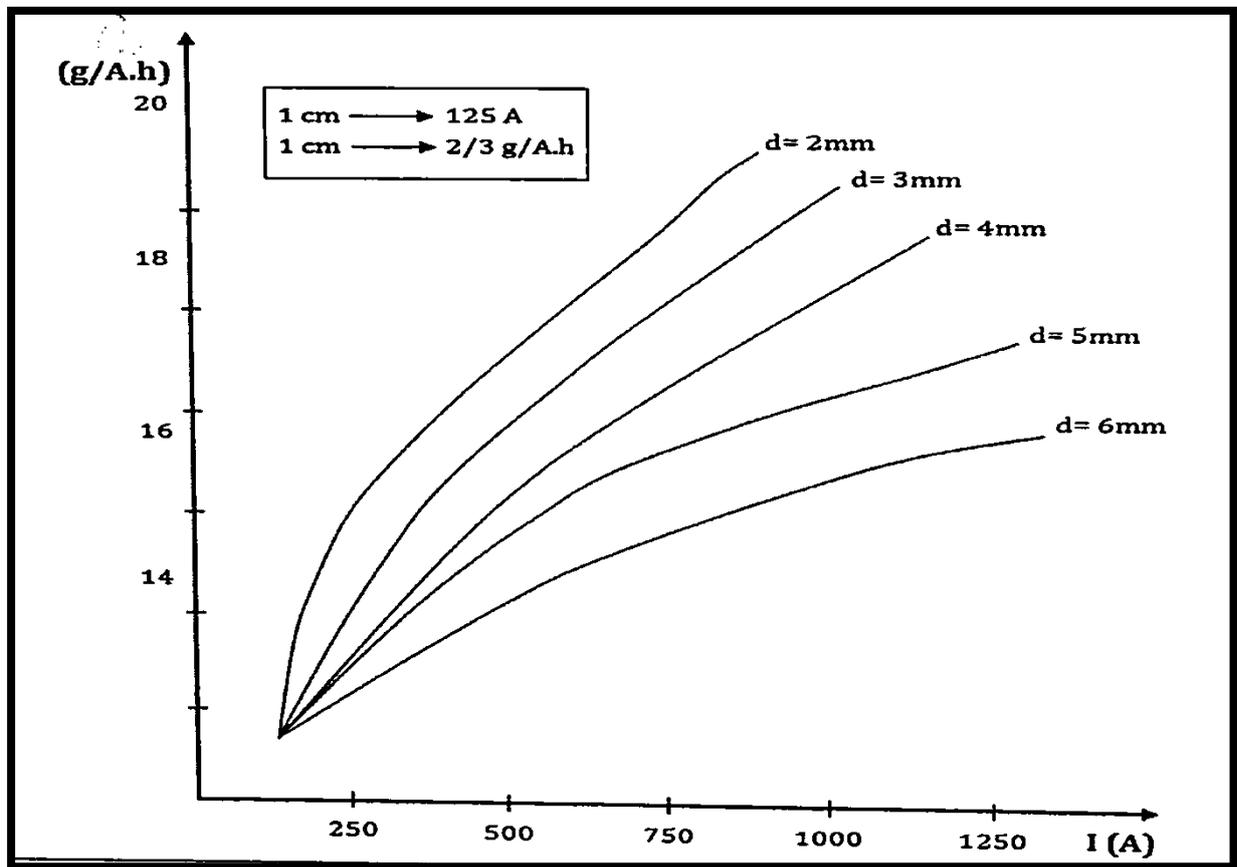


Figure (V-02) : Détermination du coefficient de fusion α en fonction de l'intensité (I) et du diamètre de fil électrode

• **La section du cordon S**

$$S_c = a \times b \quad \text{en } mm^2 \quad (V-32)$$

Et
$$S_w = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot R^2 \quad \text{en } mm^2 \quad (V-33)$$

$$S = S_c + S_w \quad (V-34)$$

V-3-2 Production journalière

➤ **Le temps total pour faire un joint**

Le temps de soudage d'un joint :

$$T_{s_i} = \frac{\pi D_{ext}}{V_s} \quad \text{en min} \quad (V-35)$$

Où : $\pi \cdot D_{ext}$: la circonférence de tube en (m).

V_s : vitesse de soudage (m/h).

Alors le temps total pour faire un joint est :

$$T_{s_{tot}} = \sum T_{s_i} \quad \text{en min} \quad (V-36)$$

➤ **Nombre de joints par jour**

$$t_s = \frac{T_{s_{tot}}}{C_s} \quad (V-37)$$

Alors :
$$N = \frac{t}{t_s} \quad (V-38)$$

Avec : C_s : Facteur de marche.

$$t = 8h = 480 \text{ min (durée de travail par jour).}$$

V-3-3 Vitesse de fusion d'un fil électrode et le poids du métal d'apport

➤ **Vitesse de fusion**

Pour calculer la vitesse de fusion, on utilise la formule suivant :

$$V_f = \frac{a \cdot I(1-\psi)}{\rho \cdot F} \quad \text{en m/s} \quad (V-39)$$

Avec : a : Coefficient de fusion.

Ψ : coefficient de perte de métal de l'électrode pendant le soudage ($\Psi = 1$ à 2 %).

ρ : densité de métal de base ($\rho=7.856 \text{ g/mm}^3$)

F : section du fil électrode en cm^2 .

$$F = \frac{\pi \cdot d_e}{4} \quad \text{en } cm^2 \quad (V-40)$$

➤ Poids de métal d'apport

Pour calculer le poids du métal d'apport déposé par joint on utilise la formule suivant :

$$P_i = a \cdot I \cdot t_{s_i} \quad \text{en g} \quad (V-41)$$

Avec : a : Coefficient de la fusion.

I : intensité de l'arc (A).

t_{s_i} : Temps de soudage (h).

Donc le poids total déposé par joint est :

$$P_{tot} = \sum P_i \quad (V-42)$$

V-3-4 La puissance électrique de l'arc

$$P = U \cdot I \quad \text{en W} \quad (V-43)$$

Où : U : tension de l'arc (V).

I : intensité de l'arc (A).

V-3-5 Energie calorifique de l'arc

L'énergie calorifique est calculée par la formule suivante :

$$E = \frac{P}{v_s} = \frac{U_s \cdot I_s}{v_s} \quad \text{en KJ/cm} \quad (V-44)$$

Où : U_s : Tension de soudage (V).

I_s : Intensité de soudage (A).

v_s : Vitesse de soudage (m/h).

V-3-6 La puissance du moteur d'entraînement des galets

V-3-6-1 But de calcul de la puissance du moteur d'entraînement

Le but du calcul de la puissance du moteur d'entraînement des galets pour la rotation des tubes pour l'opération de soudage, c'est de déterminer si cette puissance du moteur trouvée par calcul vérifie la puissance du moteur nécessaire à employer ainsi que la puissance est vérifiée par rapport aux caractéristiques réelles du moteur utilisé alors les calculs auront être dans de bonne marche.

➤ Puissance de moteur qui permet d'entraîner le tube : se détermine par la formule suivante :

$$P_m = \frac{M_t \cdot n}{\eta} \quad \text{en W} \quad (V-45)$$

Avec : M_t : Moment total des galets (N.m).

n : vitesse de rotation des galets.

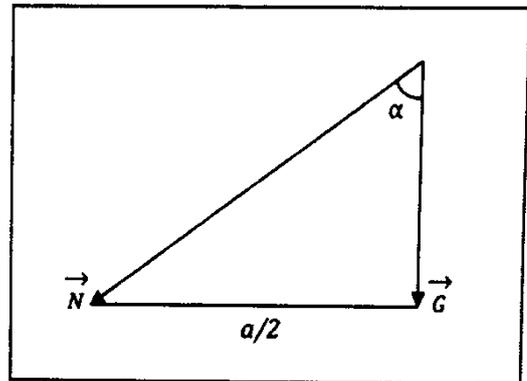
η : Rendement du moteur.

V-3-6-2 L'entraxe a

$$a = b + 2r \quad \text{en mm} \quad (V-46)$$

Avec : $b = (1 \text{ à } 1.2) \cdot R \quad \text{en mm} \quad (V-47)$

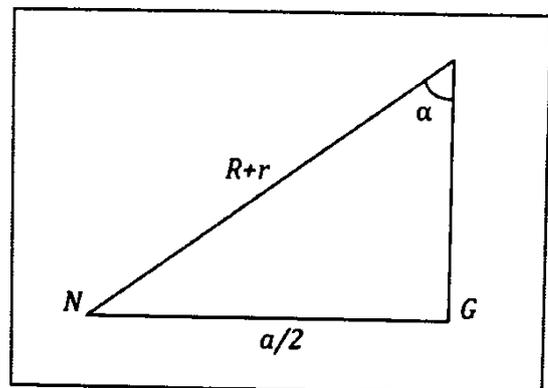
V-3-6-3 La force N



D'après le triangle des forces on a :

$$\cos \alpha = \frac{G}{N} \Rightarrow N = \frac{G}{\cos \alpha} \quad (V-48)$$

➤ Calcul de l'angle α



$$\sin \alpha = \frac{a/2}{R+r} \quad (V-49)$$

➤ Poids du tube jointé (G)

$$G = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot e \cdot L \cdot \gamma_a \cdot g \quad \text{en N} \quad (V-50)$$

Avec : L = 24 m et g = 9.81N/kg

V-2-6-4 Le moment du galet

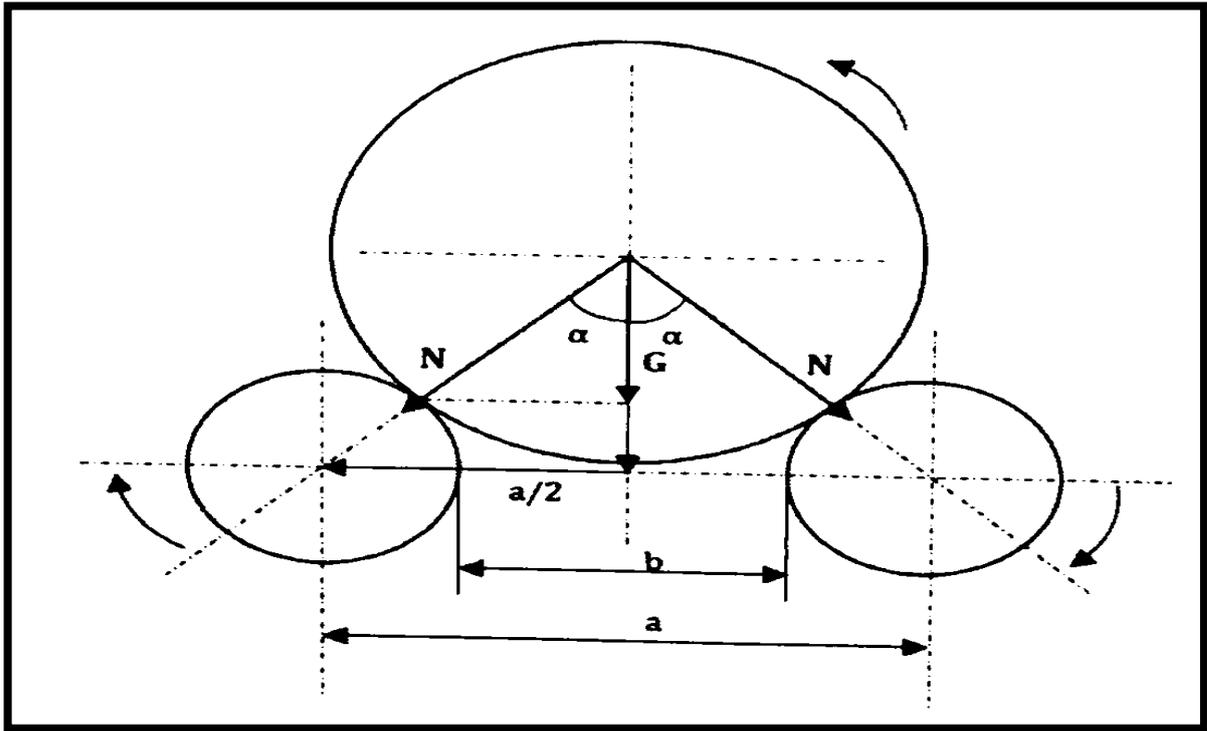


Figure (V-03) : Calcul de moment de galet

$$M = 2 \cdot N \cdot K \left(1 + \frac{R}{r} \right) \quad \text{en N.m} \quad (V-51)$$

➤ Le moment total des galets

$$M_{tot} = 2 \times M \quad \text{en N.m} \quad (V-52)$$

V-2-6-5 La puissance de moteur

➤ La vitesse de rotation

$$v_s = \omega \cdot R \Rightarrow \omega = \frac{v_s}{R}$$

Où : ω : vitesse angulaire du tube.

v_s : vitesse de soudage.

R : rayon du tube.

$$\begin{aligned} \text{Et} \quad \omega &= \frac{\pi \cdot n}{30} \\ \text{Donc :} \quad \frac{v_s}{R} &= \frac{\pi \cdot n}{30} \\ \Rightarrow n &= \frac{30 \cdot v_s}{\pi \cdot R} \quad \text{en tr/min} \end{aligned} \quad (\text{V-53})$$

➤ **Calcul de la vitesse de rotation du galet n_g**

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{R}{r} \cdot n \\ n_g &= \frac{30 \cdot v_s}{\pi \cdot r} \quad \text{en tr/min} \end{aligned} \quad (\text{V-54})$$

➤ **Calcul de la puissance du moteur**

$$P_m = \frac{M_t \cdot n_g}{\eta} \quad \text{en W} \quad (\text{V-55})$$

V-3 Nombre de films radiographiques nécessaire pour toute la conduite

➤ **Calcul du nombre de films nécessaire par joint**

On calcule d'abord le périmètre du tube :

$$P = \pi \cdot D_{ext} \quad \text{en cm} \quad (\text{V-56})$$

Le nombre de film utilisé par joint est :

$$n = \frac{P}{L_{ut}} \quad (\text{V-57})$$

➤ **Calcul du nombre de joints total**

$$n_{JT} = \frac{L_c}{24} \quad (\text{V-58})$$

Avec : L_c : Longueur de la conduite.

➤ **Le nombre de films pour toute la conduite est**

$$n'_f = n_{JT} \cdot n \quad (\text{V-59})$$

Chapitre VI

Résultats et interprétations

VI-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer les équations qui ont été mentionnées au chapitre précédent (calcul de paramètre de soudage manuel et semi-automatique, nombre de joints,...) sur la ligne RGZ3 42'' (Réhabilitation Gazoduc d'Arzew N°03 42'').

V-2 Caractéristiques de la ligne RGZ3 42''⁽¹⁵⁾

Les caractéristiques de RGZ3 existants sont :

- La norme de construction API 1104.
- La canalisation de diamètre 42'' sera constituée de tubes en acier API 5L X70 soudés bout à bout et posés dans une tranchée tout le long du tracé.
- La canalisation revêtue en polyéthylène tri-couches appliquée en usine et sera protégée contre la corrosion par le système de protection cathodique, les joints de soudure seront revêtus en joint thermo rétractable résistant à 90°C.
- La longueur estimée : 116 Km kenanda- Arzew.
- Diamètre extérieur en pouce : 42'' (1067 mm) (voir annexe 6).
- Pression maximal de service (PMS) : 70 bars
- Surépaisseur de corrosion : 0 mm
- Epaisseur commerciale : 20.62/14.27 mm
- Date de mise en service prévisionnelle : 1^{er} trimestre 2017.

VI-3 Calculs relatifs au soudage à l'arc électrique (manuel)

VI-3-1 Calcul le nombre d'électrode par joint

Selon le tableau (V-01), on a :

- L'épaisseur du tube : $e = 14.27$ mm.
- Nombre de passes : $n_{passe} = 5$ passes.
- Diamètre d'électrodes à utiliser :
 - Pour 1^{ère} passe : $d_e = 3.25$ mm.
 - Pour 2^{ème} et 3^{ème} passe : $d_e = 4.00$ mm.
 - Pour 4^{ème} et 5^{ème} passe : $d_e = 5.00$ mm.

VI-3-2 Calculs des paramètres de soudage à l'arc électrique

Selon les formules (V-1) et (V-2) on trouve :

Les passes	Diamètre d'électrodes en mm	Intensité de courant (I_s) en A	Tension de courant (U_s) en V
1 ^{ère} passe	3.25	112.5	24.5
2 ^{ème} passe et 3 ^{ème} passe	4.00	150	26
4 ^{ème} passe et 5 ^{ème} passe	5.00	200	28

Tableau (VI-01) : Paramètre de soudage à l'arc électrique

➤ **Diamètre de fil électrode**

Selon la formule (V-3) on trouve :

$$S_e = \frac{0.0175 \times 30 \times 400}{15}$$

$$S_e = 14 \text{ mm}^2$$

Selon la formule (V-4) on trouve :

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 14}{\pi}}$$

$$d_c \approx 5 \text{ mm}$$

➤ **Température de préchauffage T_p**

Notre acier comprend : 0.30 % de carbone (C) et 1.35 % de manganèse (Mn), (voir annexe 7).

Selon la formule (V-6) on trouve :

$$C_{eq} = 0.30 + \frac{1.35}{6}$$

$$C_{eq} = 0.52\%$$

$$C_{eq} = 0.52 > 0.46 \text{ Donc notre acier nécessite un préchauffage (voir annexe 8).}$$

Selon la formule (V-5) on trouve :

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(0.52 - 0.25)}$$

$$T_p = 182^\circ\text{C}$$

Conclusion :

Notre acier nécessite une température de préchauffage de 182°C, d'après le tableau (V-02) cette valeur est acceptable.

VI-3-3 Calcul de produit consommable

VI-3-3-1 Calcul de métal déposé par joint

➤ **Volume d'un joint (V_j)**

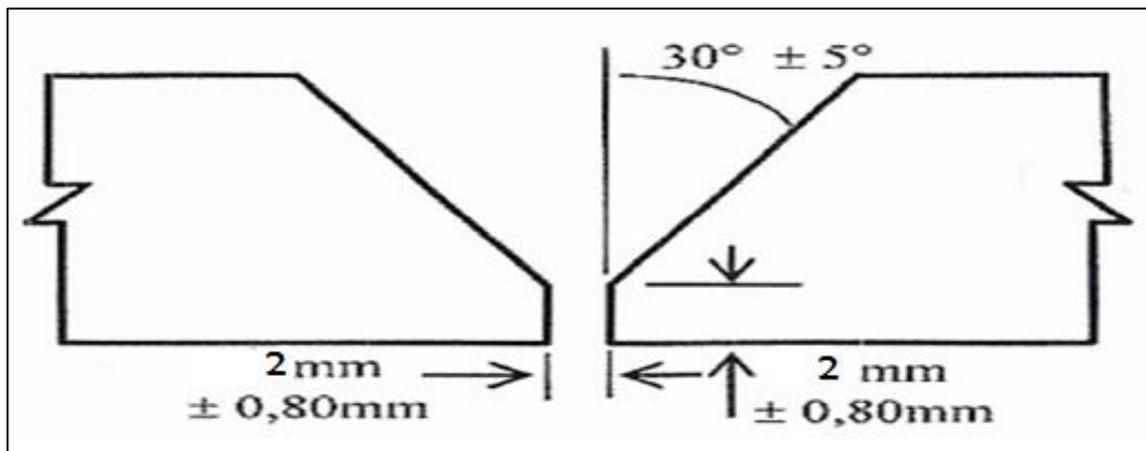


Figure (VI-01) : Dimensionnement du chanfrein

Nous avons les données suivantes :

$$a = b = 2 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 1038.46 \text{ mm}$$

$$e = 14.27 \text{ mm.}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{2} = 30^\circ$$

Selon la formule (V-12) on trouve :

$$V_j = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \left(\frac{14.27 - 2}{\cos 30} \right)^2 [1038.46 + 2 + 14.27] + 2^2 \cdot \pi(1038.46 + 2)$$

$$V_j = 361346.08 \text{ mm}^3$$

➤ **Poids d'un joint**

Selon la formule (V-13) on trouve :

$$P_j = 361346.08 \times 7.856 \cdot 10^{-3}$$

$$P_j = 2838.73g$$

➤ **Volume de métal déposé par électrode**

On a : $L_{r_e} = 450mm$

Selon la formule (V-16) on trouve :

- **Pour 1^{ère} passe :**

$$V_{Ue(3.25)} = 0.75 \cdot \pi \cdot 450 \left(\frac{3.25}{2} \right)^2$$

$$V_{Ue(3.25)} = 2799.8mm^3 / \text{électrode}$$

- **Pour 2^{ème} et 3^{ème} passe**

$$V_{Ue(4)} = 0.75 \cdot \pi \cdot 450 \left(\frac{4}{2} \right)^2$$

$$V_{Ue(4)} = 42410.2mm^3 / \text{électrode}$$

- **Pour 4^{ème} et 5^{ème} passe**

$$V_{Ue(5)} = 0.75 \cdot \pi \cdot 450 \left(\frac{5}{2} \right)^2$$

$$V_{Ue(5)} = 6626.8mm^3 / \text{électrode}$$

➤ **Volume du métal déposé par passe et nombre d'électrodes**

Le choix de nombre de passes se fait selon l'épaisseur de la pièce, et par les données du tableau de chapitre précédent : on a l'épaisseur qui est égale à 14.27 mm correspond à 5 passes.

- **Calcul de rayon de la section de la gorge en V**

Selon la formule (V-17) on trouve :

$$R = \frac{(14.27 - 2)}{\cos 30}$$

$$R = 14.16mm$$

On devise ce rayon R estimation en quatre parties ($R = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$).

$$r_2 = r_3 = 3.08 \text{ mm} \quad \text{et} \quad r_4 = r_5 = 4 \text{ mm}$$

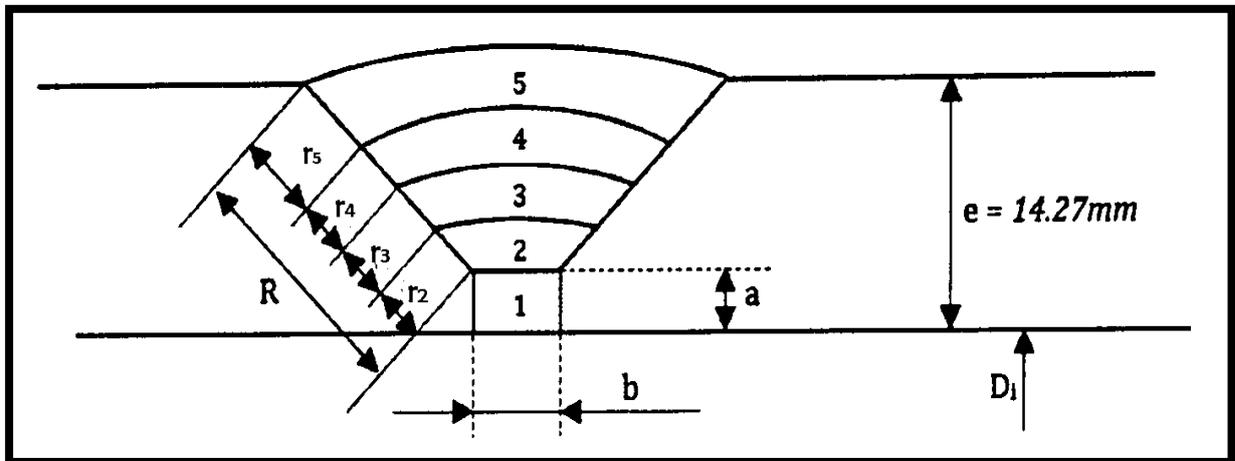


Figure (VI-02) : Rayon de la section de gorge en V

- **Volume du métal déposé par la 1^{ère} passe**

Selon la formule (V-18) on trouve

$$V_c = 2^2 \cdot \pi (1038.46 + 2)$$

$$V_c = 13074.80 \text{ mm}^3$$

- **Nombre d'électrodes déposés par la 1^{ère} passe**

Selon la formule (V-20) on trouve :

$$n_1 = \frac{13074.80}{2799.8}$$

$$n_1 = 4.66 \Leftrightarrow n_1 \approx 5 \text{ électrodes}$$

- **Volume de métal déposé par 2^{ème} passe**

Selon la formule (V-19) on trouve :

$$V_2 = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \cdot 3.08^2 \left(1038.46 + 2 \times 2 + 2 \left(\frac{3.08}{2} \right) \right)$$

$$V_2 = 16315.13 \text{ mm}^3$$

- **Nombre d'électrodes déposés par la 2^{ème} passe**

Selon la formule (V-20) on trouve :

$$n_2 = \frac{16315.13}{4241.2}$$

$$n_2 = 3.84 \Leftrightarrow n_2 \approx 4 \text{ électrodes}$$

- **Volume de métal déposé par 3^{ème} passe**

Selon la formule (V-19) on trouve :

$$V_3 = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \cdot 6.16^2 \left(1038.46 + 2 \times (2 + 3.08) + 2 \left(\frac{3.08}{2} \right) \right) - 16315.13$$

$$V_3 = 49329.89 \text{ mm}^3$$

- **Nombre d'électrodes déposés par la 3^{ème} passe**

Selon la formule (V-20) on trouve :

$$n_3 = \frac{49329.89}{4241.2}$$

$$n_3 = 11.66 \Leftrightarrow n_3 \approx 12 \text{ électrodes}$$

- **Volume de métal déposé par 4^{ème} passe**

Selon la formule (V-19) on trouve :

$$V_4 = \frac{1}{6} \cdot \pi^2 \cdot (6.16 + 4)^2 \left(1038.46 + 2 \times (2 + 3.08 + 4) + 2 \left(\frac{4}{2} \right) \right) - 65645.02$$

$$V_4 = 112447.52 \text{ mm}^3$$

- **Nombre d'électrodes déposés par la 4^{ème} passe**

Selon la formule (V-20) on trouve :

$$n_4 = \frac{112447.52}{6626.8}$$

$$n_4 = 16.96 \Leftrightarrow n_4 \approx 17 \text{ électrodes}$$

- **Volume de métal déposé par 5^{ème} passe**

$$V_5 = V_j - (V_c + V_2 + V_3 + V_4)$$

$$V_5 = 361346.08 - (13074.80 + 16315.13 + 49329.89 + 112447.52)$$

$$V_5 = 170178.74 \text{ mm}^3$$

- **Nombre d'électrodes déposés par la 4^{ème} passe**

Selon la formule (V-20) on trouve :

$$n_5 = \frac{168207.78}{6626.8}$$

$$n_5 = 25.68 \Leftrightarrow n_5 \approx 26 \text{ électrodes}$$

Résultats sous forme tableau :

N° de passe	Nombre d'électrodes	Diamètre d'électrode (mm)
1 ^{ère} passe	5	3.25
2 ^{ème} passe	4	4
3 ^{ème} passe	12	4
4 ^{ème} passe	17	5
5 ^{ème} passe	26	5
En total		
1 ^{ère} passe	5	3.25
2 ^{ème} passe et 3 ^{ème} passe	16	4
4 ^{ème} passe et 5 ^{ème} passe	43	5

Tableau (VI-02) : Nombre d'électrodes déposés par joint, résultats obtenus

VI-3-4 Production journalière

➤ Le temps de fusion

Selon le graphe $T_f = f(I_s, d_e)$ on a :

- Pour 1^{ère} passe : $T_f = 1.4$ min.
- Pour 2^{ème} et 3^{ème} passe : $T_f = 1.6$ min.
- Pour 4^{ème} et 5^{ème} passe : $T_f = 1.9$ min.

➤ **La vitesse de fusion**

Selon la formule (V-21) et (V-22) on trouve les résultats représentées dans le tableau suivant :

Nombre d'électrodes par passe	Diamètre d'électrode (mm)	Intensité de soudage (A)	Temps de fusion (min)	Vitesse de fusion (cm/min)	Temps d'arc par passe (τ_f)
5	3.25	112.5	1.4	24	7
16	4	150	1.6	21	25.6
43	5	200	1.9	18	81.7

Tableau (VI-03) : Vitesse de fusion et temps d'arc par joint, résultats obtenus

➤ **Calcul du temps d'arc par joint**

Selon la formule (VI-23) on trouve :

$$T_a = 7 + 25.6 + 81.7$$

$$T_a = 114.3 \text{ min}$$

Ce temps ne représente pas la durée réelle de soudage.

➤ **Le temps de travail pour faire un joint**

Selon le tableau (V-02) : le soudage des tubes qui s'effectue sur chantier est un travail à la chaîne avec clamps : $C_s = 40\%$

Selon la formule (V-24), le temps de travail pour faire un joint est :

$$T_s = \frac{114.3}{0.4}$$

$$T_s = 285.75 \text{ min}$$

➤ **Nombre de joints soudés par jour**

Selon la formule (V-25) on trouve :

$$t_s = \frac{285.75}{10}$$

$$t_s = 28.57 \text{ min (Le temps moyen d'une soudure par une passe)}$$

Selon la formule (V-26), le nombre de joints produits par jour est :

$$N = \frac{480}{28.57}$$

$$N \approx 17 \text{ Joints par jour.}$$

➤ **Longueur total des joints par jour**

Selon la formule (V-27) on trouve :

$$L_{ts} = 17 \times \pi \times 1.067$$

$$L_{ts} = 57 \text{ m / jour.}$$

➤ **Longueur de la conduite soudée par jour**

Les tubes sont soudés préalablement deux à deux, sachant que la longueur d'un tube est égale à 12 m, donc la longueur du tube sur chantier est égale 24 m (en générale).

Selon la formule (V-28) on trouve :

$$L_c = 17 \times 24$$

$$L_c = 408 \text{ m / jour}$$

VI-4 Calculs relatifs au soudage sur la station double jointing

VI-4-1 Calculs des paramètres de soudage sur les Stations double jointing

On utilisera un fil électrode de 4 mm.

Selon l'abaque (figure V-02), on a : pour $I = 600 \text{ A}$ et $d_e = 4 \text{ mm}$

$$\alpha = 14 \text{ g/A.h}$$

pour $I = 650 \text{ A}$ et $d_e = 4 \text{ mm}$

$$\alpha = 14.20 \text{ g/A.h}$$

pour $I = 700 \text{ A}$ et $d_e = 4 \text{ mm}$

$$\alpha = 14.36 \text{ g/ A.h}$$

➤ **Détermination de la section de cordon**

Selon la formule (V-32), on trouve :

$$S_c = 2^2$$

$$S_c = 4 \text{ mm}^2$$

Selon la formule (V-33), on trouve :

$$S_w = \frac{1}{6} \times \pi \times 14.16^2$$

$$S_w = 104.98 \text{ mm}^2$$

Selon la formule (V-34), on trouve :

$$S = 4 + 104.98$$

$$S = 108.98 \text{ mm}^2$$

Selon les formules (V-29), (V-30) et (V-31), le tableau ci-dessous exprime l'intensité, la tension et la vitesse de soudage en fonction du nombre de passe :

Diamètre du fil électrode	Nombre de passes	Intensité (A)	Tension (V)	Vitesse (m/h)
4 mm	1 ^{ère} passe	600	32	42.7
	2 ^{ème} passe	650	36	32
	3 ^{ème} passe	700	40	30.5

Tableau (VI-04) : paramètre de soudage sur les stations double jointing

VI-4-2 Production journalière

➤ Le temps total pour faire un joint

Selon la formule (V-35), Le temps de soudage d'un joint :

- Pour 1^{ère} passe

$$T_{s_1} = \frac{\pi \times 1.067}{42.7}$$

$$T_{s_1} = 0.079 \text{ h} \approx 4.71 \text{ min}$$

- Pour 2^{ème} passe :

$$T_{s_2} = \frac{\pi \times 1.067}{32}$$

$$T_{s_2} = 0.10 \text{ h} \approx 6.29 \text{ min}$$

- Pour 3^{ème} passe

$$T_{s_3} = \frac{\pi \times 1.067}{30.5}$$

$$T_{s_3} = 0.11 \text{ h} \approx 6.59 \text{ min}$$

Alors selon la formule (V-36) le temps total pour faire un joint est :

$$T_{s_{tot}} = 4.71 + 6.29 + 6.59$$

$$T_{s_{tot}} = 17.59 \text{ min}$$

➤ **Nombre de joints par jour**

Sachant que ce type de soudage (semi-automatique sous flux) s'effectue sur station double jointing, il est un travail à la chaîne avec clamps en atelier.

Le facteur de marche est environ entre 50 et 60%, ($C_s=0.5$ à 0.6)

On prend $C_s=0.55$, donc :

Selon la formule (V-37) on trouve :

$$t_s = \frac{6.59}{0.55}$$

$$t_s = 11.98 \text{ min}$$

Alors le nombre de joints selon la formule (V-38) est :

$$N = \frac{480}{11.98}$$

$$N \approx 41 \text{ joints}$$

La production journalière est de : 41 joints/jour.

VI-4-3 Calculs la vitesse de fusion d'un fil électrode et poids du métal d'apport

On calcule d'abord la section du fil électrode.

Selon la formule (V-40), on trouve :

$$F = \frac{\pi \cdot 0.4^2}{4}$$

$$F = 0.125 \text{ mm}^2$$

Alors selon les formules (V-39) et (V-41) les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Diamètre de fil électrode (mm)	N° de passe	Intensité du courant (A)	Section du fil électrode (cm ²)	Coefficient de fusion (g/A.h)	Vitesse de fusion (m/s)	Temps de soudage (h)	Poids de métal d'apport/joint (g)
4	1 ^{ère} passe	600		14.00	0.0234	0.079	663.6
	2 ^{ème} passe	650	0.125	14.20	0.0257	0.100	923.0
	3 ^{ème} passe	700		14.36	0.0280	0.110	1105.7

Tableau (VI-05) : poids de métal déposé par joint, résultats obtenus

Donc selon la formule (V-42), le poids total déposé par joint est :

$$P_{tot} = 663.6 + 923.0 + 1105.7$$

$$P_{tot} = 2692.3g$$

VI-4-4 Calcul de la puissance électrique de l'arc

Selon la formule (V-43), on trouve :

- **Puissance pour faire la 1^{ère} passe**

$$P_1 = 32 \times 600$$

$$P_1 = 19200 \text{ W}$$

- **Puissance pour faire la 2^{ème} passe**

$$P_2 = 36 \times 650$$

$$P_2 = 23400 \text{ W}$$

- **Puissance pour faire la 3^{ème} passe**

$$P_3 = 40 \times 700$$

$$P_3 = 28000 \text{ W}$$

VI-4-5 Calcul de l'énergie calorifique de l'arc

Selon la formule (V-44), on trouve :

- Pour $P_1 = 19200 \text{ W} = 19.2 \text{ KW}$ et $V_{s1} = 42.7 \text{ m/h} = 1.186 \text{ cm/s}$

$$\Leftrightarrow E_1 = \frac{19.2}{1.186} = 16.2 \text{ KJ / cm.}$$

- Pour $P_2 = 23.4 \text{ KW}$ et $V_{s2} = 0.888 \text{ cm/s}$

$$\Leftrightarrow E_2 = \frac{23.4}{0.888} = 26.3 \text{ KJ / cm.}$$

- Pour $P_3 = 28 \text{ KW}$ et $V_{s3} = 0.850 \text{ cm/s}$

$$\Leftrightarrow E_1 = \frac{28}{0.850} = 32.94 \text{ KJ / cm.}$$

VI-4-6 calcul de la puissance du moteur d'entraînement➤ **Données de base**

- Le diamètre extérieur du tube : $D_{ext} = 42'' = 1067 \text{ mm.}$
- Rayon : $R = 533.4 \text{ mm.}$
- Epaisseur : $e = 14.27 \text{ mm.}$
- Diamètre de galet : $d = 560 \text{ mm.}$
- Longueur de tube : $L = 12 \text{ m.}$
- Le poids spécifique de l'acier : $\gamma = 7.85 \text{ kg/cm}^3.$
- Ecartement entre les galets : $b = (1 \div 1.2).R$
- Entraxe des galets : $a = b + 2r.$
- Nombre de galets : $i = 2.$
- Coefficient de frottement (acier/acier): $k = 5.10^{-4}.$

➤ **Caractéristiques d'un moteur**

- Tension du courant varie de 230 à 460 V.
- Intensité du courant varie de 3.7 à 7.4 A.
- Fréquence : $f = 60 \text{ Hz.}$
- Puissance de moteur varie de 20 à 25 ch.

➤ **L'entraxe a**

Selon la formule (V-47), on trouve :

$$b = 1.1 \times 533.5$$

$$b = 586.85 \text{ mm}$$

Selon la formule (V-46), on trouve :

$$a = 586.85 + 2 \times 280$$

$$a = 1146.85 \text{ mm}$$

➤ **Calcul de la force N**

• **Calcul de l'angle α**

Selon la formule (V-49), on trouve :

$$\sin \alpha = \frac{573.44}{533.5 + 280}$$

$$\sin \alpha = 0.70 \Rightarrow \alpha = \arcsin 0.70 \Rightarrow \alpha = 45^\circ$$

• **Calcul de G (poids du tube jointé)**

Selon la formule (V-50), on trouve :

$$G = 2 \times \pi \times 0.5335 \times 0.01427 \times 24 \times 7.85 \times 9.81$$

$$G = 88362.48 \text{ N}$$

Alors Selon la formule (V-48), on trouve :

$$N = \frac{88362.48}{\cos 45}$$

$$N = 124963.42 \text{ N}$$

➤ **Calcul du moment du galet**

Selon la formule (V-51), on trouve :

$$M = 2 \times 124963.42 \times 0.0005 \left(1 + \frac{533.5}{280} \right)$$

$$M = 363.06 \text{ N.m}$$

➤ **Le moment total des galets**

Selon la formule (V-52), on trouve :

$$M_{tot} = 2 \times 363.06$$

$$M_{tot} = 726.12 \text{ N.m}$$

➤ **La puissance de moteur**

• **Calcul de la vitesse de rotation du galet n_g**

Selon la formule (V-54), on trouve :

$$n_g = \frac{30 \times (29.89 / 60)}{\pi \times 0.280}$$

$$n_g \approx 17 \text{ tr / min}$$

• **Calcul de la puissance du moteur**

Selon la formule (V-55), on trouve :

$$P_m = \frac{726.12 \times 23}{0.85}$$

$$P_m = 14522.4 \text{ W}$$

La valeur de puissance du moteur par unité de cheval est comme suite :

$$1 \text{ ch} \rightarrow 736 \text{ W}$$

$$x \text{ ch} \rightarrow 14522.4 \text{ W}$$

$$x \approx 21 \text{ ch}$$

VI-4-7 Calcul le nombre de films radiographiques nécessaire pour toute la conduite

➤ **Calcul le nombre de films nécessaire par joint**

Les dimensions du film sont : Longueur = 40 cm.

Largeur = 10 cm.

Recouvrement $r = 2$ cm.

Selon la formule (V-56), le périmètre du tube est :

$$P = \pi \times 106.7$$

$$P = 335.21 \text{ mm}$$

Selon la formule (V-57), le nombre de films utilisés par joint est :

$$n = \frac{335.21}{40}$$

$$n = 8.38 \approx 9 \text{ films}$$

➤ **Calcul du nombre de joints total**

Selon la formule (V-58), on trouve :

$$n_{JT} = \frac{116 \cdot 10^3}{24}$$

$$n_{JT} \approx 4834 \text{ joints}$$

➤ **Le nombre de films pour toute la conduite**

Selon la formule (V-59), on trouve :

$$n'_f = 4834 \times 9$$

$$n'_f = 43506 \text{ films}$$

Ce nombre est destiné pour le contrôle radiographique sur chantier.

VI-5 Interprétation des résultats

D'après Les résultats obtenus on remarque que :

- La production journalière du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobé (manuel) est très faible par rapport à celle du soudage semi-automatique en station double jointing, cela est expliqué par :
 - La vitesse du soudage semi-automatique (en station DJ) est supérieure à celle du soudage manuel ;
 - Le facteur de marche du soudage en station DJ est supérieur à celui du soudage manuel.
- La puissance calculée est dans la gamme de la puissance du moteur utilisé réellement qui varie de (20 à 25ch), ce qui implique une bonne utilisation de la puissance du moteur d'entraînement des galets qui assure la rotation des tubes.
- Le nombre de films nécessaire pour le contrôle radiographique de toute la conduite est très élevé ce qui influe négativement sur le facteur économique de la réalisation du projet.

Chapitre VII

Hygiène et sécurité lors du soudage et son contrôle

VII-1 Introduction sur la sécurité technique

La sécurité technique c'est un ensemble de règle, de moyen technique, d'hygiène et d'état d'esprit permettant de créer certaine condition de travail éliminant les risques d'accidents faute de pouvoir supprimer tous les dangers, il faut essayer d'y soustraire les travailleurs par d'autres moyen, de les en éloigner, d'interposer de poussier, gaz, vapeur toxiques ou seulement incommodes doivent être rendus inaccessible.

VII-2 Analyse des risques

L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens.

Les risques identifiés au cours de l'analyse et de pouvoir comparer ultérieurement ce niveau de risque à niveau jugé acceptable.

Son estimation peut être effectuée de manière semi quantitative à partir :

- D'un niveau de probabilité que le dommage survienne ;
- D'un niveau de gravité de ce dommage.

Bien entendu, l'acceptation de ce risque est subordonnée à la définition préalable de critère d'acceptabilité du risque.

VII-3 Réduction des risques

La réduction du risque désigne l'ensemble des actions ou disposition entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier.

De telles mesures doivent être envisagées dès lors que le risque considéré est jugé inacceptable.

De manière très générale, les mesures de maîtrise du risque concernent :

➤ La prévention

C'est-à-dire réduire la probabilité d'occurrence de la situation de danger à l'origine du dommage.

➤ La protection

Visant à limiter la gravité du dommage considéré. Notons que, suivant cette définition, l'intervention pourra être considérée comme un moyen de protection.

VII-4 Risques liés à l'opération de soudage

Les accidents au cours d'une opération de soudage sont les mêmes pour presque tous les types de procédés de soudure, de ce fait, il existe certains risques à ne pas négliger :

- Les émanations gazeuses ;
- Les coups d'arc ;
- Les brûlures et les blessures par projection ;
- Les explosions et les incendies ;
- Les électrisations.

➤ **Les émanations gazeuses**

La chaleur et les rayonnements de l'arc provoquent un dégagement de gaz et de fumées métalliques plus ou moins nocifs pour l'homme et l'environnement.

- Combustion des enrobages (fluorures, vapeurs nitreuses) ;
- Volatilisation des métaux d'apports et de base ;
- Volatilisation des revêtements de protection (zinc, peinture) ;
- Décomposition des gaz de protection ou des produits de dégraissage (ozone, chlore).

➤ **Les brûlures et blessures par projection**

- Lors du soudage, des brûlures sont provoquées par la projection de gouttelettes de laitier et de métal.
- Après le soudage par la protection de laitier solide et les projections de meulage, des pièces restent très chaudes encore après le soudage, des brûlures aux yeux peuvent intervenir et s'appellent coup d'arc.

➤ **Les explosions et incendies**

Ces risques sont liés aux projections, à des appareillages électriques non-conformes ou en mauvais état, à l'échauffement des pièces et à la présence de gaz inflammables.

➤ **les électrisations :**

- Liés aux tensions mises en jeu : tension à vide des générateurs.
- Liés aux pièces nues sous tension (pièces à souder, électrodes, raccords, câbles,..).
- Liés à l'environnement conducteur ou très conducteur : pièces métalliques ; enceintes conductrices, milieu humide sueur.

VII-5 : Protections – préventions

A condition de mettre en œuvre des moyens adaptés et de respecter certaines règles élémentaires de sécurité, il est possible de se protéger efficacement contre les risques inhérents au soudage à l'arc électrique.

➤ Les émanations gazeuses

- Les postes de travail devront être équipés de systèmes d'aspiration adaptés aux mondes de soudage et compatibles avec les techniques de soudages sous protection gazeuse ;
- Le pote d'un masque individuel peut être indispensable selon les conditions de travail ;
- Une ventilation forcée (air uniquement) est obligatoire pour le soudage à l'intérieur des endroits fermés, ainsi que la présence d'une personne pouvant intervenir en cas d'incident.

➤ Les brûlures et blessures par projection

- Masque de soudage ou cagoule de soudage ;
- Vêtement épais, tablier de cuir, gants, guêtres ;
- Lunettes de protection avec œillères (verres blanches) pour le meulage ou le brossage.

➤ Les explosions et incendies

- Travailler dans un lieu propre (éliminer les papiers, chiffons...) ;
- Mettre en place des panneaux de protection ;
- Assurer une ventilation efficace pour éviter les mélanges explosifs ;
- Avoir, à proximité des moyens de lutte contre l'incendie aux différents types de feux (extincteurs).

➤ L'électrisation

- Mettre l'équipement hors tension si l'équipement n'est pas utilisé ;
- Porter des agents de cuir et un tablier de soudure permet de réduire le risque de décharge électrique ;
- Porter des vêtements secs ;
- Utiliser un support isolant pour déposer la porte électrode ;
- Laver régulièrement les vêtements de travail afin d'éviter l'accumulation d'huile ou de graisse.

VII-6 Les risques liés à la technique de contrôle par radiographie (RT)**VII-6-1 Les principaux risques des rayons Gamma**

Les rayons Gamma sont fortement énergétiques et peuvent ioniser les matières qu'ils traversent, ils arrachent ou ajoutent des électrons aux atomes, donc changent leur comportement chimique et électrique.

Il y a donc un risque d'exposition externe (à distance ou au contact), soit global, soit localisée, en rapport avec le flux des rayons Gamma émis par la source, la distance à laquelle on se trouve de la source et des obstacles qui peuvent atténuer le flux du rayonnement.

Ces rayonnements passent très aisément la barrière cutanée : ils entraînent une irradiation en profondeur du corps humain et, à partir d'une certaine dose, modifient les fonctions et les structures cellulaires puis tissulaires (par radiolyse de l'eau de la matière biologique), dérèglent la division cellulaire, avec parfois une détérioration de l'ADN, qui contient le programme génétique et les cellules endommagées peuvent être celles de l'ovaire ou des spermatozoïdes (reprotoxicité par mutation génétique)⁽¹⁶⁾.

VII-6-2 La prévention des risques professionnels des rayons Gamma

Les rayons Gamma sont des radiations électromagnétiques ionisantes de très grande énergie émises par les matières radioactives : leur pouvoir de pénétration et d'ionisation de la matière leur confère la capacité de créer d'importants dommages aux cellules vivantes : atteintes cutanées, ophtalmologiques, hématologiques, cellulaires pouvant provoquer des cancers, des malformations fœtales⁽¹⁶⁾.

La protection contre le rayonnement Gamma est impérative, tant par la prévention collective (vérification périodique des appareils, formation à leur utilisation, délimitation et signalisation des zones d'émission, écrans de protection, ventilation, confinement des sources radioactives, contrôles d'ambiance...) que par la prévention individuelle (dosimétrie, surveillance médicale renforcée, port d'équipements de protection...).

La prévention consiste à limiter l'ensemble des doses reçues à un très bas niveau (pour les risques aléatoires différés), et en évitant qu'une dose puisse excéder le seuil d'apparition des risques immédiats certains.

Les principes généraux de la radioprotection reposent sur trois piliers :

- Les durées : durée d'exposition aux rayons Gamma la plus brève possible ;
- Les distances : éloignement maximal des travailleurs par rapport aux sources de rayons Gamma, avec l'utilisation d'appareils manipulables à distance tels que des pinces de manutention télé-manipulées ;
- Les écrans : interposition d'un écran épais et absorbant (plomb, eau, béton...) entre la source de rayons Gamma et le travailleur et port de vêtements de protection.

VII-7 Conclusion

La maîtrise des mesures de sécurité appropriées durant le soudage et leur contrôle radiographique est nécessaire d'assurer qu'aucun risque n'atteint à l'être humain ou l'environnement.

Conclusion générale

Nos objectifs dans ce travail ont été une tentative d'approfondir nos connaissances sur les différents procédés de soudage et leur méthodes de contrôle les plus couramment utilisés, afin de définir les outils nécessaires à une démarche de compréhension des principes technologiques mis en œuvre lors du soudage et son contrôle, en construction des pipelines.

Parmi les procédés de soudage qui connaissent un essor dans l'industrie pétrolière ou gazière le soudage semi-automatique, l'adaptation de ce mode de soudure dans la construction de pipeline est le meilleur billet pour la perfection, l'efficacité ainsi que la rentabilité de l'opération de soudage.

Nous concluons que le critère pour caractériser la soudabilité globale est la sensibilité de la soudure à un défaut grave d'origine métallurgique (fissuration à chaud, fissuration à froid, ...), et que les défauts de soudure sont influencés par les paramètres de soudage.

Pour détecter les anomalies de soudage lors de la construction de pipeline, de différentes techniques de contrôle sont effectuées. Parmi ces techniques on note le contrôle radiographique qui est dangereux malgré son efficacité, ce qui nous a poussés d'utiliser une autre méthode comme l'ultrason qui a les avantages suivants :

- assure le volet HSE et ne présente aucun danger ni impact sur l'être humain et l'environnement ;
- efficace du point de vue qualité.

Le soudage sur station DJ apporte pour la réalisation d'un projet un gain de temps maximal qui permet d'augmenter la cadence du poste.

Référence bibliographique

- (1) Document stagiaire : technologies de soudage, centre de soudage et d'expertise (GTP).
- (2) Guide de soudage, Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), août 2010.
- (3) Collection terme et définition utilisés en soudage et techniques connexes, publications de la soudure autogène, 1996.
- (4) R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.
- (5) Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- (6) R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOUT1995.
- (7) H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2ème édition. Publications de soudage et de ses applications Paris .1995.
- (8) Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines, Yamani Institute of Technology.
- (9) R. BAUS, W. CHAPEAU, Application du soudage aux constructions, EYROLLES.
- (10) Documents technique de Contrôle CND COSIDER. Biskra.
- (11) Henri Walaszek, Pôle EPI, Expert référent CND, CETIM 2013.
- (12) FRIJA Mounire, Contrôle non destructif, Institut Supérieur des Systèmes Industriels de Gabès.
- (13) Contrôles non destructifs des soudures, Claude PHILIP – ENSAM, 2012.
- (14) Contrôle par radiographie, document RTO, 2014.
- (15) Projet RGZ 42'', volume1 : IDP, SONATRACH.
- (16) Sécurité et protection contre les rayonnements ionisants, document RTO, 2006.

Annexes

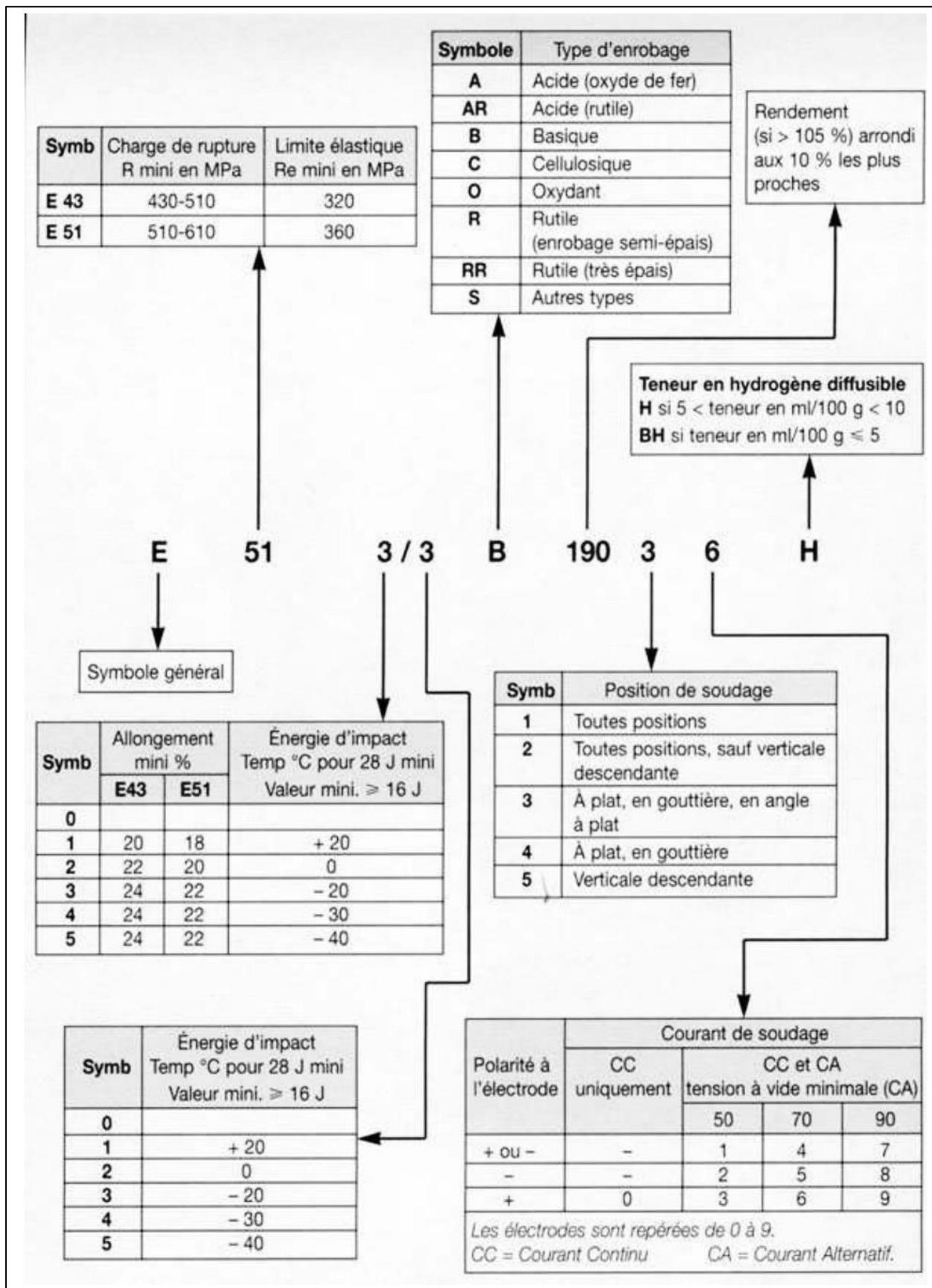
Annexes

Annexe 1 : Composition et propriétés des aciers inoxydables

Type d'acier inoxydable	Composition des alliages	Propriétés
Austénitique	Chrome : 14 à 30 % Nickel : 6 à 36 %	<ul style="list-style-type: none">- Ductile- Tenace- Très résistant à la corrosion- Non magnétique
Ferritique	Chrome : 11 à 27 % Carbone : 0,12 à 0,35 %	<ul style="list-style-type: none">- Magnétique- Résistant- Ductile- Résistant à la corrosion et à l'oxydation (surtout lorsque le taux de carbone est un peu plus élevé)
Martensitique	Chrome : 4 à 18 % Carbone : pas plus de 0,15 % Autres éléments d'alliage : jusqu'à 3 %	<ul style="list-style-type: none">- Très rigide et résistant- Magnétique- Fragile

Annexes

Annexe 2 : types des électrodes enrobées



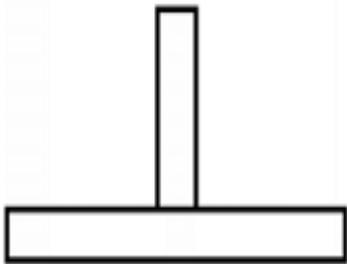
Annexe 3 : types de chanfreins



Préparation bout à bout à bords droits



Préparation en V



Joint en T



Préparation en X



Préparation en U



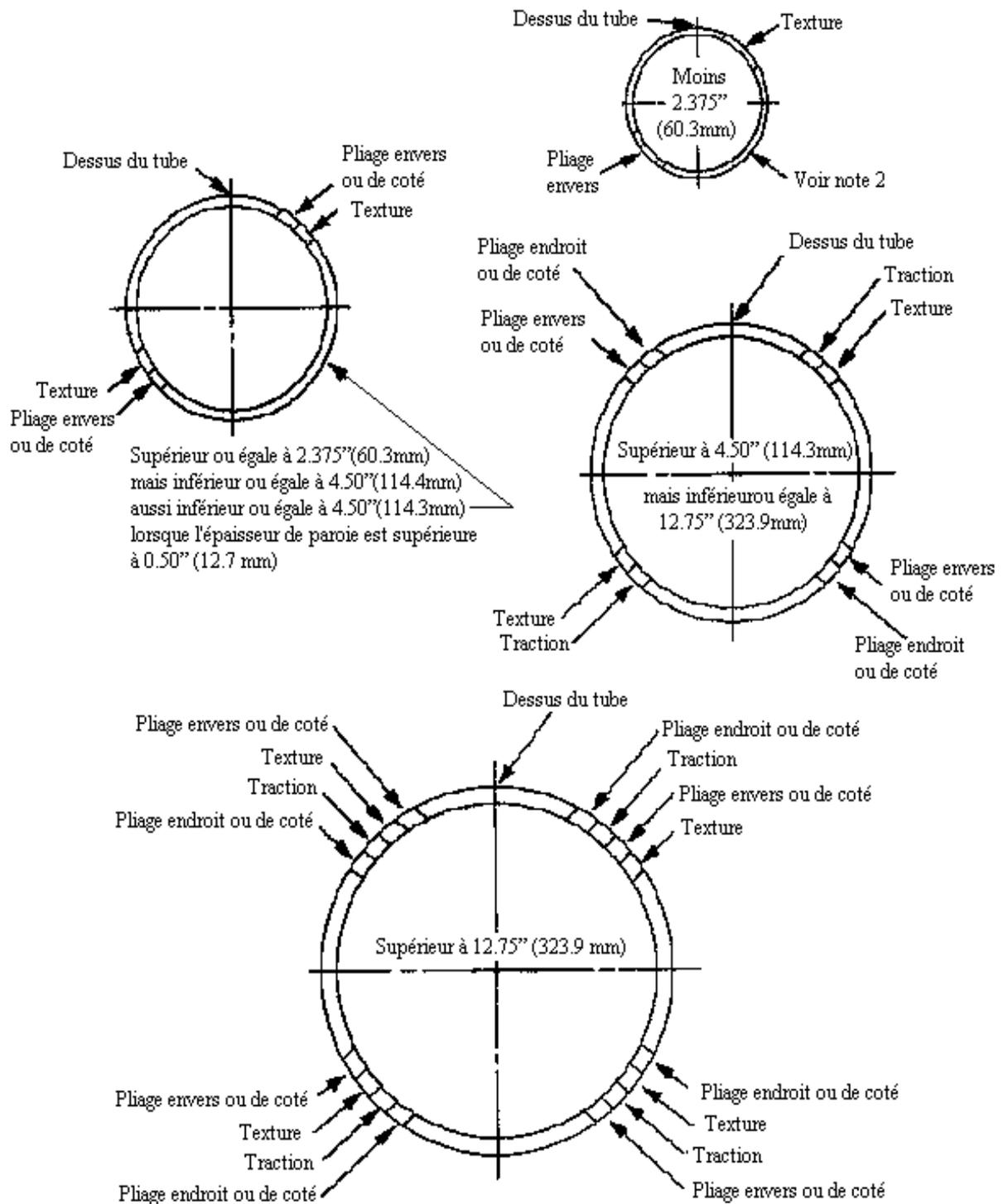
Assemblage par recouvrement



Joint en T avec préparation en tulipe simple

Annexes

Annexe 4 : Emplacement des éprouvettes de soudures d'essai bout à bout pour l'essai de qualification des soudeurs



Notes:

1. Au choix de la société, les emplacements peuvent être tournés à condition d'être répartis uniformément autour du tube; toutefois, les éprouvettes ne doivent pas inclure la soudure longitudinale.
2. Une éprouvette d'essai de traction sous forme de tube entier peut être utilisée pour les tubes d'un diamètre inférieur ou égale à 1,315" (33.4 mm)

Annexes

Annexe 5 : exemple de rapport d'essai d'éprouvette

RAPPORT D'ESSAI D'ÉPROUVETTE							
Date _____	No. d'essai _____						
Lieu _____							
Etat _____	Position _____	Roulé ()	Fixe ()				
Soudeur _____	Numéro du soudeur _____						
Durée du soudage _____	Heure _____						
Température moyenne _____	Paravent utilisé _____						
Condition météorologiques _____							
Tension _____	Intensité _____						
Type d'équipement de soudage _____	Capacité de l'équipement de soudage _____						
Métal d'apport _____							
Taille du renforcement _____							
Type et nuance du tube _____							
Epaisseur de paroi _____	Diamètre extérieur _____						
	1	2	3	4	5	6	7
Identification de l'éprouvette							
Dimension originale de l'éprouvette							
Surface originale de l'éprouvette							
Charge maximale							
Résistance à la traction							
Emplacement de la rupture							
() Mode opératoire		() Essai de qualification			() Qualifié		
() Soudeur		() Essai de ligne			() Disqualifié		
Résistance à la traction maximale _____ minimale _____ moyenne _____							
Remarques sur les essais de résistance à la traction							
1. _____							
2. _____							
3. _____							
4. _____							
Remarques sur les essais de pliage							
1. _____							
2. _____							
3. _____							
4. _____							
Remarques sur les essais de rupture avec entaille							
1. _____							
2. _____							
3. _____							
4. _____							
Essai réalisé à _____				Date _____			
Vérificateur _____				Superviseur _____			
Note: Utiliser le verso pour toutes remarques complémentaires. La présente formule peut servir à rapporter un essai de qualification, de mode opératoire ou de qualification de soudeur.							

Annexe 6 : dimensionnement de conduit selon la norme API 5L

tubes de conduite
à extrémités lisses

API 5L

DIMENSIONS, MASSES / DIMENSIONS, WEIGHTS

Diamètre nominal NPS	Dimension nominale Nominal size	Diamètre extérieur Outside diameter		Épaisseur Wall thickness		Designation	Masse Weight		Diamètre intérieur Inside diameter	
		mm	Pouces Inches	mm	Pouces Inches		kg/m	lb/ft	mm	Pouces Inches
40	40	1016,0	40.000	23,8	0.938		582,33	391.32	968,4	38.124
		1016,0	40.000	25,4	1.000		620,48	416.52	965,2	38.000
		1016,0	40.000	27,0	1.062		658,50	441.64	962,0	37.876
		1016,0	40.000	28,6	1.125		696,39	467.08	958,8	37.750
		1016,0	40.000	30,2	1.188		734,16	492.44	955,6	37.624
		1016,0	40.000	31,8	1.250		771,80	517.31	952,4	37.500
42	42	1067,0	42.000	8,7	0.344		227,05	153.04	1049,6	41.312
		1067,0	42.000	9,5	0.375	STD	247,74	166.71	1048,0	41.250
		1067,0	42.000	10,3	0.406		268,40	180.35	1046,4	41.188
		1067,0	42.000	11,1	0.438		289,03	194.42	1044,8	41.124
		1067,0	42.000	11,9	0.469		309,62	208.03	1043,2	41.062
		1067,0	42.000	12,7	0.500	XS	330,19	221.61	1041,6	41.000
		1067,0	42.000	14,3	0.562		371,22	248.72	1038,4	40.876
		1067,0	42.000	15,9	0.625		412,13	276.18	1035,2	40.750
		1067,0	42.000	17,5	0.688		452,91	303.55	1032,0	40.624
		1067,0	42.000	19,1	0.750		493,57	330.41	1028,8	40.500
		1067,0	42.000	20,6	0.812		531,57	357.19	1025,8	40.376
		1067,0	42.000	22,2	0.875		571,98	384.31	1022,6	40.250
		1067,0	42.000	23,8	0.938		612,26	411.35	1019,4	40.124
		1067,0	42.000	25,4	1.000		652,42	437.88	1016,2	40.000
		1067,0	42.000	27,0	1.062		692,45	464.33	1013,0	39.876
		1067,0	42.000	28,6	1.125		732,36	491.11	1009,8	39.750
		1067,0	42.000	30,2	1.188		772,14	517.82	1006,6	39.624
		1067,0	42.000	31,8	1.250		811,79	544.01	1003,4	39.500
44	44	1118,0	44.000	8,7	0.344		237,99	160.39	1100,6	43.312
		1118,0	44.000	9,5	0.375	STD	259,69	174.72	1099,0	43.250
		1118,0	44.000	10,3	0.406		281,35	189.03	1097,4	43.188
		1118,0	44.000	11,1	0.438		302,99	203.78	1095,8	43.124
		1118,0	44.000	11,9	0.469		324,59	218.04	1094,2	43.062
		1118,0	44.000	12,7	0.500	XS	346,16	232.29	1092,6	43.000

* Voir tolérances sur «masse» page 1.62

(2) Pas de pression d'essai alternative pour les nuances X42 à X80

Annexe 7 : Spécification de conduit selon la norme API 5L

spécification API 5L

41^{ème} édition – AVRIL 1995

COMPOSITION CHIMIQUE SUR COULÉE (Section 6)

Type de tube	Nuance	Carbone	Manganèse	Phosphore	Soufre
		maxi % (1)	maxi % (1)	maxi %	maxi %
sans soudure					
Non-expansé ou expansé à froid	A	0,22	0,90	0,030	0,030
	B(2)	0,27	1,15	0,030	0,030
Non-expansé	X42	0,29	1,25	0,030	0,030
	X46(4), X52(4)	0,31	1,35	0,030	0,030
Expansé à froid	X42(4), X46(4), X52(4)	0,29(2)	1,25	0,030	0,030
Non-expansé ou expansé à froid	X56(3,4), X60(3,4)	0,26	1,35	0,030	0,030
	X65, X70, X80	(par accord)			
soudé					
Non-expansé ou expansé à froid	A	0,21	0,90	0,030	0,030
	B(2)	0,26	1,15	0,030	0,030
Non-expansé	X42(4)	0,28	1,25	0,030	0,030
	X46(4), X52(4)	0,30	1,35	0,030	0,030
Expansé à froid	X46(4), X52(4)	0,28	1,25	0,030	0,030
Non-expansé ou expansé à froid	X56(3,4), X60(3,4)	0,26	1,35	0,030	0,030
	X65(5,4)	0,26	1,40	0,030	0,030
	X70(2)	0,23(7)	1,60(7)	0,030	0,030
	X80(2)	0,18(7,8)	1,80(7,8)	0,030(8)	0,018(8)

1. Dans les nuances X42 à X65, pour chaque réduction de 0,01 % de la teneur maximale en carbone, la teneur maximale en manganèse peut être augmentée de 0,05 %, sans pouvoir dépasser 1,45 % pour les nuances X52 et moins, et 1,60 % pour les nuances au-dessus de X52.
2. Pour les tubes sans soudure expansés à froid de diamètre nominal 20 pouces et plus, la teneur maximale en carbone doit être 0,28 %.
3. D'autres analyses chimiques peuvent être fournies, par accord entre l'acheteur et le fabricant.
4. Du niobium, du vanadium, du titane ou une combinaison de ces trois éléments peuvent être utilisés au choix du fabricant.
5. Pour la nuance X65 et les diamètres nominaux 16 pouces et plus ayant une épaisseur de 12,7 mm (0.500 pouce) et moins, la composition chimique sera celle indiquée ou celle définie par accord entre l'acheteur et le fabricant. Pour les autres diamètres et épaisseurs la composition chimique sera celle définie par accord entre l'acheteur et le fabricant.
6. Du niobium, du titane, du vanadium ou une combinaison de ces trois éléments peuvent être utilisés après accord entre l'acheteur et le fabricant.
7. Pour chaque réduction de 0,01 % de la teneur en carbone, la teneur en manganèse peut être augmentée de 0,05 %, sans pouvoir dépasser 2,00 %.
8. Les teneurs indiquées sont les valeurs limites des analyses sur produits.

Annexe 8 : Température de préchauffage en fonction de l'épaisseur et du carbone équivalent

