



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie



N° d'ordre : GM/...../2019

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : construction mécanique

Thème :

Caractérisation et contrôle non destructif

des soudures

Proposé et dirigé par :

Dr : ZAOUI MOUSSA

Président Amroun .s

Examineur M. Bedda

Examineur MENASRI.N

Présenté par :

SOUIAH AMAL

CHOUITER HADJIRA

Université de M'sila

Année Universitaire : 2018 / 2019

REMERCIEMENT

**Avant tous nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir
aide te éclaire notre chemin**

Donc dans ce cadre nous adressons nos remerciements :

A monsieur Dr : ZAOUI MOUSSA de m'avoir apporté toutes ces

Compétences techniques, son esprit d'équipe,

et d'avoir dirigé cette mémoire en

ayant suivi son déroulement avec un très vif intérêt.

Nous remercions également :

**-Je remercie du fond du cœur, tous les enseignants au sein de
génie mécanique qui ont contribué à mon département**

-Membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

SOUHA AMEL ET CHOUITER HADJRA

2018/2019

Introduction générale :

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire... etc. la connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adaptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser, ...).

La non conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner, et la soudabilité, et l'obtention d'une structure nécessaire pour une optimisation de ses caractéristiques mécaniques. Pour ces raisons des travaux de recherches au niveau international sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées.

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par méthodes non destructives des assemblages soudés. Notre partie expérimentale est réalisée au niveau des ateliers MEI – M'sila. Le contrôle non destructif est fait sur un cordon de soudure bout à bout pour l'assemblage des tôles en acier A33 , réalisé à l'arc électrique avec baguette métallique de même composition.

Notre étude est composée de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- Le deuxième chapitre est réservé aux défauts de soudage.
- Le troisième chapitre contient une présentation des Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif

- Le quatrième chapitre est une partie expérimentale sur les techniques d'application des CND sur le joint soudée, résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout sous forme de tôles fortes réalisé au niveau de MEI Msila où ce travail a été achevé.

Résumé :

Cette recherche est de savoir comment surveiller et atténuer les effets de la poursuite sur Les assemblages soudés la présence de restrictions archéologique et haute accumulés à la périphérie de fissures à l'intérieur de la soudure corde, et son existence est pourquoi efficace dans la possibilité de corrosion sous les restrictions, une température élevée, nous devons réduire la proportion de ces restrictions archéologique et représentant la principale raison de la propagation des fissures et donc le soudage corde de réfraction soudaine, et de veiller à la construction de mécanique soudé lors de l'opération, nous devons avoir à faire quelques traitements thermiques appropriés à différents stades de l'industrialisation, et je l'ai traitée dans notre présent à quelques observations sur un morceau de l'épopée en vue de déterminer les questions de dommages ou de restrictions archéologiques à l'intérieur de cordon de soudure, Nous décrivons les moyens, les techniques et les modes opératoires utilisés au cours de notre analyse.

Mots-clés : Soudage ; joint soudée ; contraintes résiduelles, rupture fragile traitements thermiques.

ملخص:

هذا البحث عبارة عن كيفية مراقبة وتخفيف الاجهادات المتبقية علي القطع الملحمة وجود القيود الاثرية العالية والمتجمعة وارتفاع درجة الحرارة , ولوجودها السبب الفعال في امكانية التآكل تحت القيود, عند اطراف التشققات داخل حبل التلحيم ويجب علينا التقليل من نسبة هذه القيود الاثرية والممثلة للسبب الرئيسي لانتشار التشققات وبهذا يكون الانكسار المفاجئ ولضمان الانشاءات الميكانيكية الملحومة اثناء التشغيل يجب علينا ان نجري بعض المعالجات الحرارية , لحبل التلحيم ولقد تطرقنا في بحثنا هذا الي بعض المراقبات علي قطعة ملحمة لكي نحدد , المناسبة وفي مختلف مراحل التصنيع لقد بيننا الوسائل و التقنيات والطرق العملية المستخدمة خلال هذا التحليل. الاعطاب او القيود الاثرية داخل حبل التلحيم **الكلمات المفتاحية:** التلحيم، وصلة التلحيم، قيود أثرية، معالجات حرارية، انكسار هش .

Abstract:

This research is how to monitor and mitigate the effects of remaining on the soldered assemblies the presence of restrictions archeological and high accumulated on the outskirts of cracks inside the rope welding, and its existence is why effective in the possibility of corrosion under the restrictions, high temperature, we must reduce the proportion of these restrictions archaeological and representing the main reason for the spread of cracks and thus the refractive sudden rope welding, and to ensure the construction of mechanical welded during the operation we must have to make some heat treatments appropriate at different stages of industrialization, and I have dealt in our present to some observations on a piece of the epic in order to determine the damage issues or restrictions archaeological inside the rope welding. We describe the means, the techniques and the modes of operation to be used during our analysis.

Key words : Welding, welding link vestigial constraints, thermal treatments, fragile rupture.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

INTRODUCTION GENERALE01

CHAPITRE I : GENERALITE SUR SOUDAGE

I-1 INTRODUCTION.....	03
I-2 HISTORIQUE DU SOUDAGE	03
I-3 DEFINITION	04
I-4 PHENOMENES DU SOUDAGE	07
I-4-1 Les soudures autogènes	07
I-4-2 Les soudures hétérogènes	07
I-5 LES PROCEDES DE SOUDAGE	07
I -5. a. soudage par fusion	07
I -5. b. soudage sans fusion	13
I -6. Types de joints	16
I -6. 1. Généralités.....	16
I -6.2. Préparation des joints	17
I -6. 3. Méthodes de réalisation d'un joint soudé	17
I -7. Sécurité	20
I -8. Conclusion	21

Chapitre II: : LES DEFAUTS DE SOUDAGE

II-1 INTRODUCTION	22
II.2 LES FISSURES	22
II .2.1 Orientation des fissures	23
II.2.2 Types de fissures.....	24
II.3 MANQUES DE FUSION	31

II.3.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure Définition	31
II.3.2 Manque de fusion entre passes	32
II.3.3 Manque de fusion à la racine de la soudure	33
II.4 MANQUES DE PENETRATION	34
II.4.1 Manque de pénétration à la racine	34
II.4.2 Manque de pénétration dans la soudure	35
II.5 INCLUSIONS GAZEUSES	36
II.5.1 Porosités vermiculaires	36
II.5.2 Porosités uniformes	37
II.6 INCLUSIONS SOLIDES	38
II.6.1 Inclusions de laitier	38
II.6.2 Inclusions de tungstène	39
II.6.3 Inclusions de cuivre	40
II.7 EXCES DE MATIERE	40
II.7.1 Excès de pénétration	41
II.7.2 Surépaisseur	42
II.7.3 Recouvrements non fusionnés (Débordements)	43
II.8 CRATERE ET DEFAUTS DE SURFACE	44
II.8.1 Cratère	44
II.8.2 Défauts de surface	44

Chapitre III : LES TECHNIQUE DE CONTROLE DE SOUDAGE

III -Contrôle des soudures	48
III.1. Contrôles destructifs	49
III.1.3. Examens macrographiques et micrographiques	53
III.2. Contrôles non destructifs	54
III.2.1. Examen visuel	54
III.2.2. Contrôles par ressuage	54
III.2.3. Les Ultrasons.....	55

III.2.4. La Magnétoscopie.....	59
III.2.5. Les Courants de Foucault.....	61
III.2.6. La Radiologie Industrielle.....	62

Chapitre IV : Partie Expérimentale

IV -1. Introduction	64
IV-2. Identification du matériau	64
IV-2.1. Choix du métal de base	64
IV-2.2. Caractérisation du métal de base	65
IV-2.2.1. Analyse chimique.....	65
IV-2.2.2. Caractéristiques mécaniques.....	65
IV-3. Identification du métal d'apport.....	65
IV-4. Découpage et usinage des tôles.....	66
IV-4.1. Préparation des tôles	66
IV-4.2. Partie construction ou soudage.....	67
IV-4.2.1. Exécution des joints soudés.....	68
IV -5. Contrôle les tôles soudées	69
IV-5. 1. Généralités :(contrôles non destructifs « CND »).....	69
IV -5. 2. Contrôle visuel	69
IV -5. 2.1. Examen Contrôle visuel.....	70
IV -5. 2.2. Observations visuelles	70
IV -5.2. Contrôle par ressuage « pt »	70
IV -5. 3. Contrôle par magnétoscopie	76
IV.5.4. Contrôle par ultrasons «UT»	82
IV.5.4.1 : Émission et réception des ultrasons	82
IV.5.4.2. Technologie des palpeurs :	83
IV.5.4.3. Les type des palpeurs	84

IV.5.4.4. Le choix du palpeur	84
IV.5.5. Méthode de contrôle	85
IV.5.5.1 : Méthodes par réflexion ou par écho	85
IV.5.5.2 : Vérification des appareillages	85
IV.5.5.3 : Choix du milieu de couplage	85
IV.5.5.4 : Les couplant les plus utilisés.....	86
IV.5.6 : Paramètres à régler avant l'examen	86
IV.5.6.1 : Evaluation des indications	86
IV.5.7 : Les matériels utilisés	87
IV.5.7.1 : Vérification des caractéristiques des palpeurs	88
IV.5.7.1.1 : Détermination de la zone de silence ou la zone morte	88
IV.5.7.1.2 : Détermination du point d'émergence (ou d'incidence)	89
IV.5.7.2 : Choix du Palpeur	89
IV.5.7.3 .Exécution du contrôle	90
IV.5.7.4. L'échelle minimale (l'étendu)	90
IV.5.7.5 : Localisation du défaut	91
IV.5.7.5 : Localisation de défaut	91
IV.5.7.5.1 : la détection du défaut était par ½ bond	91
IV.5.7.5.2 : la détection du défaut était par bond complet	93
IV.5.7.5.3 Interprétation des défauts	94
IV.5.7.6 : Localisation des défauts	94
IV.5.7.6.1 : calcule la position du palpeur	94
IV.5.7.6.2 : Détermination des palpeurs pour ½ bond et le bond complet .	94
IV.5.8 : Interprétation	95
IV.6 : conclusion.....	95

Conclusion générale

Références bibliographies

Introduction générale :

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire... etc. la connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adaptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser, ...).

La non conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner, et la soudabilité, et l'obtention d'une structure nécessaire pour une optimisation de ses caractéristiques mécaniques. Pour ces raisons des travaux de recherches au niveau international sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées.

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par méthodes non destructives des assemblages soudés. Notre partie expérimentale est réalisée au niveau des ateliers MEI – M'sila. Le contrôle non destructif est fait sur un cordon de soudure bout à bout pour l'assemblage des tôles en acier A33 , réalisé à l'arc électrique avec baguette métallique de même composition.

Notre étude est composée de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- Le deuxième chapitre est réservé aux défauts de soudage.
- Le troisième chapitre contient une présentation des Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif

- Le quatrième chapitre est une partie expérimentale sur les techniques d'application des CND sur le joint soudée, résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout sous forme de tôles fortes réalisé au niveau de MEI Msila où ce travail a été achevé.



CHAPITRE I : GENERALITE SUR SOUDAGE



I-1 INTRODUCTION :

La soudure est le moyen d'assemblage le plus fréquemment utilisé pour la fabrication en atelier. Sur le chantier, son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables. Pour les charpentes courantes, on préfère l'emploi de boulons.

Les principaux avantages qu'offre l'emploi de la soudure sont :

- La réalisation d'assemblages rigides, donc peu déformables,
- Une diminution du temps de préparation des pièces de l'assemblage par rapport au boulonnage, notamment dans le cas de soudures non pénétrées (pas de trous à percer, réduction du nombre de couvre-joints et de platines),
- Une simplification des assemblages,
- Une amélioration de l'apparence de la construction,
- La réalisation d'un assemblage étanche.

Elle nécessite par contre certaines précautions de mise en œuvre, notamment :

- Le recours à un personnel qualifié,
- La protection des soudeurs sur le chantier contre les intempéries,
- L'utilisation de procédés de contrôles de qualité.

I-2 HISTORIQUE DU SOUDAGE :

Le soudage est né à la fin du 19^{ème} siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé Rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance. D'autres procédés sont arrivés ensuite et le 20^{ème} siècle a vu la naissance du soudage par Laser est aussi :

- le soudage avec électrode de carbone : Bernardos et Olszewski ; Russie.
- le soudage avec électrode fusible nue : Slavianov ; Russie.
- le soudage avec électrode enrobée : Kjell berg ; Suède.
- le soudage par résistance : Thompson ; USA.
- le soudage au gaz (chalumeau) : Picard ; France.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui à rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout en USA et en Angleterre). L'introduction massive de Soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile. Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- le soudage avec électrode de tungstène : 1924 – USA.

- le soudage sous flux : 1935 – USA.
- le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- le soudage sous la protection gazeuse : 1950 –1960.
- le soudage avec fils fourrés : 1950 –1960.
- le soudage par explosion : 1950-1960.
- le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.
- le soudage par laser : 1965. [2].

I-3 DEFINITION :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou 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.

Le soudage est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructive (une carrosserie), de poids (un panneau), économique (un plancher) ou d'autres. [2].

Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels les visages, le sertissage, Le rivetage, le collage, l'agrafage. L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, des trains, des avions, des fusées, de

L'automobile, des ponts tuyaux, des réservoirs et tant d'autres structures qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

De nombreux aciers d'usage général, et notamment des tôles et profilés, sont mis en œuvre par soudage.

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :

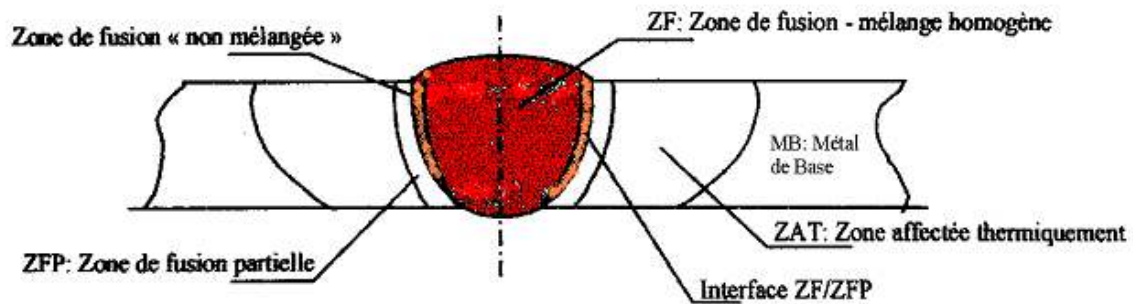


Figure (I-1) : les zones du soudage [3].

- **La zone fondue (ZF) :**

Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

- **La zone affectée thermiquement (ZAT) :**

Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

- **La zone de liaison :**

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

- **Le métal de base :**

Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains

constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Le faible temps de maintien de la température maximale.
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile. [4].

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques, ...
- Le couple métal d'apport
 - gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
 - L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.

Le dépôt de métal réunissant pour souder deux éléments d'un assemblage s'appelle "cordon" ou "joint", la soudure de deux pièces et d'autant plus facile que leur composition est identique ou très voisine : la fusion se produit pour chacune d'elles à la même température et la pièce réalisée se présente alors sans discontinuité de matière, facilement soudable, exemple : Aciers de type A33 à A48.

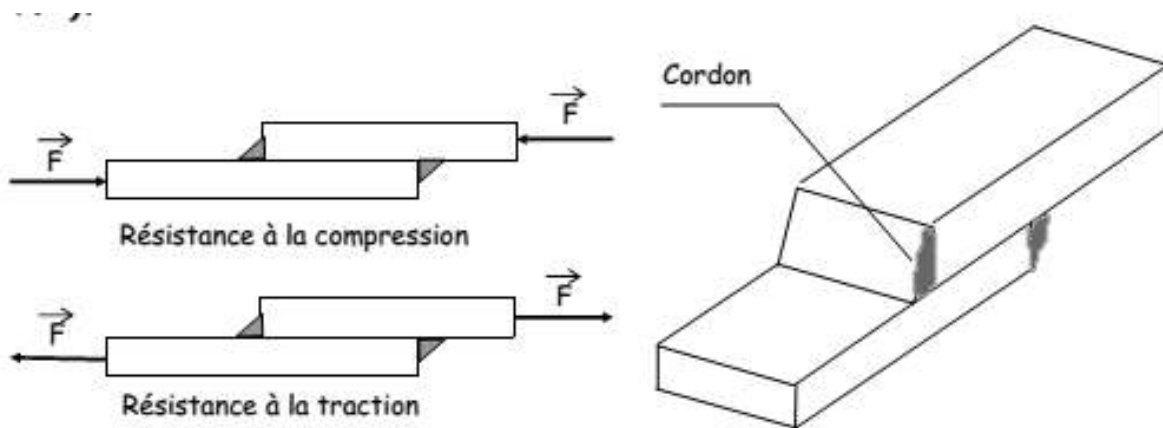


Figure (I-2) : Cordon(joint) de soudure.

I-4 PHENOMENES DU SOUDAGE :

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Dans le soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation de la température dans les pièces. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique (friction) ou optique (Laser). [5].

On distingue deux grandes classes de soudures :

I-4-1 Les soudures autogènes :

Ce sont des assemblages homogènes car les éléments sont assemblés soit sous le même métal d'apport soit avec un métal d'apport de même nature chimique. [6].

I-4-2 Les soudures hétérogènes :

Elles sont réalisées à l'aide d'un métal d'apport déposé par fusion et d'une nature chimique différent de celle des éléments soudés. [6].

I-5 LES PROCEDES DE SOUDAGE :

I -5. a. soudage par fusion :

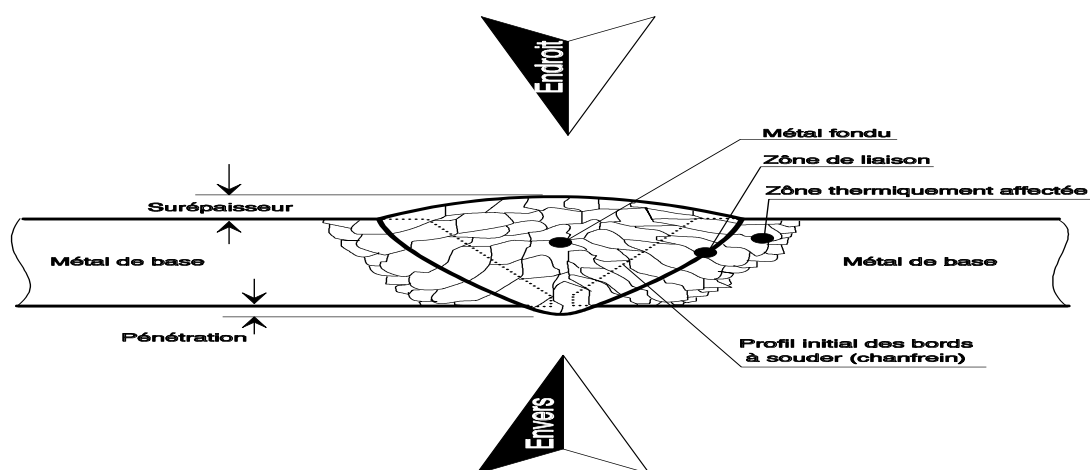


Figure (I - 3) : soudage par fusion.

I -5. a.1. Soudage au gaz (au chalumeau) :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par la combustion de gaz. La composition oxygène-acétylène (oxyacétylénique) est aujourd'hui presque exclusivement employée. L'emploi de flux décapants permet de combattre l'oxydation en cours de soudage. Ce procédé se subdivise comme suit :

- sans flamme auxiliaire.
- avec flamme auxiliaire réductrice.

Flamme oxyacétylénique résultant de la combustion d'un volume d'acétylène (gaz de combustible) pour deux volumes et demi d'oxygène (combura

On notera qu'une trop forte proportion d'oxygène entraîne une chaleur plus importante mais le risque d'oxydation augmente. [6]

Fonctionnement : [7]

- énergie fourni par réaction de combustion
- gaz combustibles : C_2H_2 , H_2 , CH_4 , C_3H_8
- gaz comburant : O_2

Caractéristiques :

- système flexible
- soudage sans ou avec métal d'apport
- portable, pas cher
 - apport d'énergie limité=> faibles épaisseurs
- ne va pas pour métaux réactifs et réfractaires

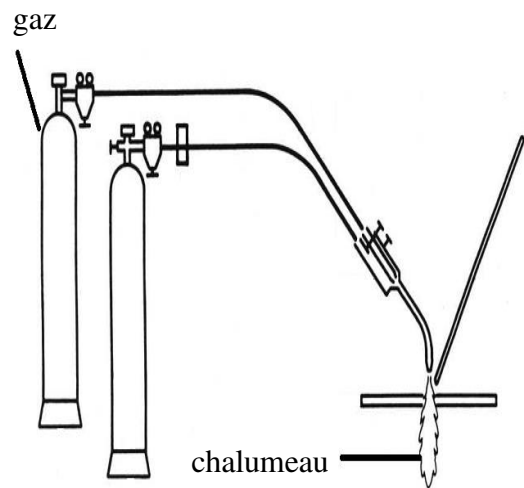


Figure (I - 4) : jet de chalumeau.

I-5. a.2. Soudage au à l'arc :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proche du métal des deux pièces à souder.

Principe de la soudure à l'arc électrique

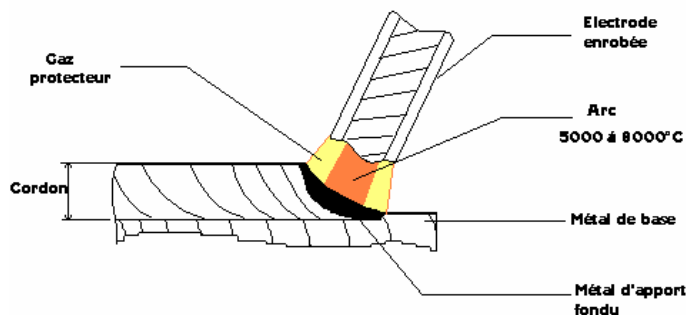


Figure (I - 5) : le soudage à l'arc électrique .

I -5. a.3. Soudage à l'électrode enrobée :

L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe (voir schéma précédant). [6]

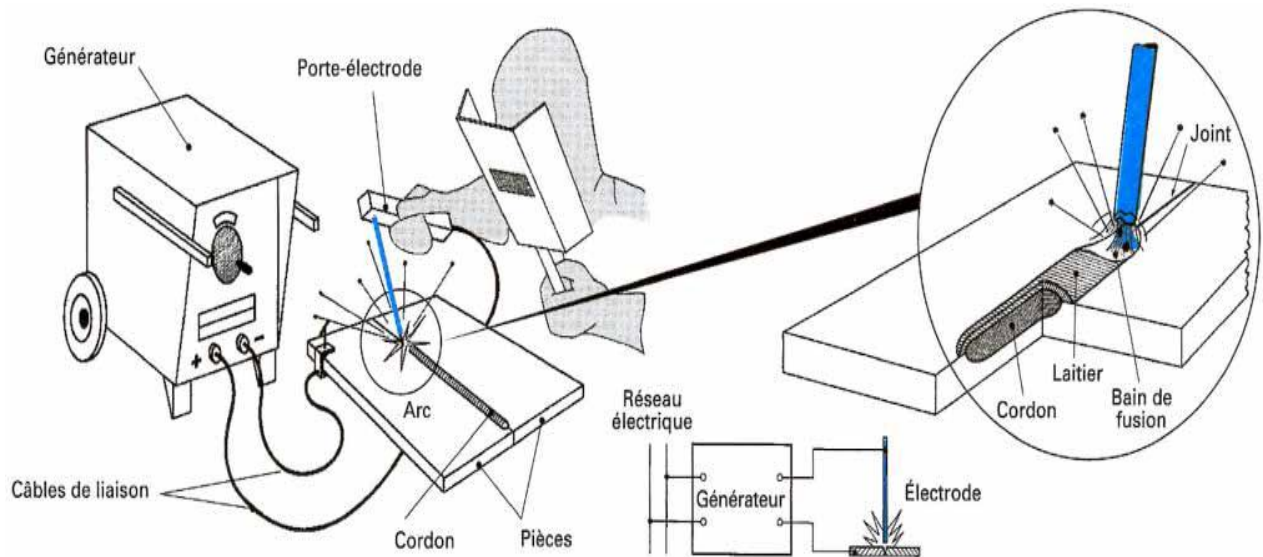


Figure (I - 6) : Soudage à l'électrode enrobée [8].

I -5. a.4. Soudage MIG (Métal Inerte Gas)

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion. [6]

I -5. a.5. Soudage MAG (Métal Active Gas) :

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO_2 et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone. [6]

Principe des soudages MIG et MAG

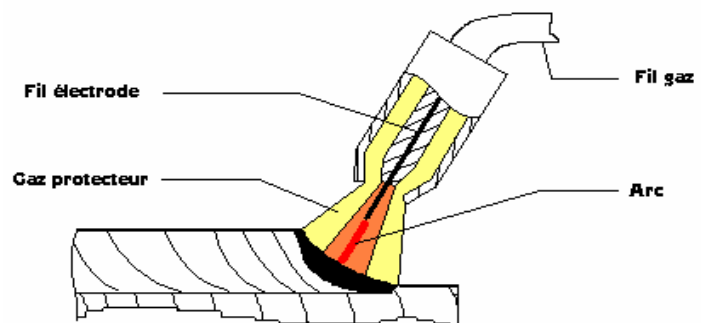


Figure (I - 7) : soudages MIG et MAG.

- **Principe :** [9]

- électrode infinie
- gaz protecteur ou active
- le fil électrode est l'anode en courant continu
- guidage automatique ou manuelle

- **Caractéristiques :**

- coût moyen
- puissance moyenne
- tous les métaux
- flexibilité limitée (changement de bobine)
- soudage à l'abri du vent

- **Variante :**

Fil fourré

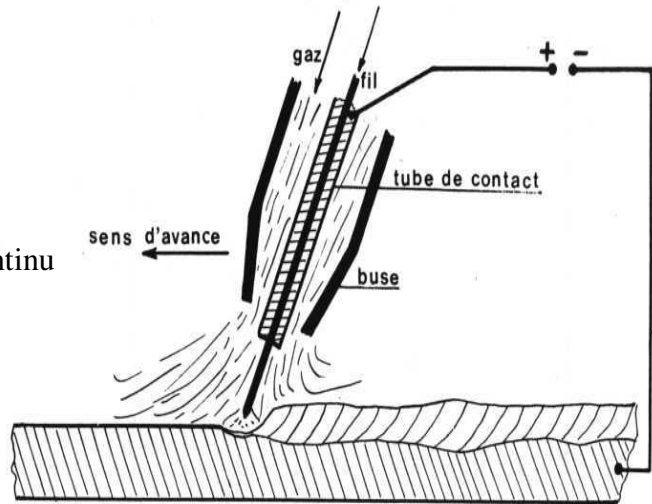


Figure (I - 8) : soudage MIG et MAG : schéma de principe [10] .

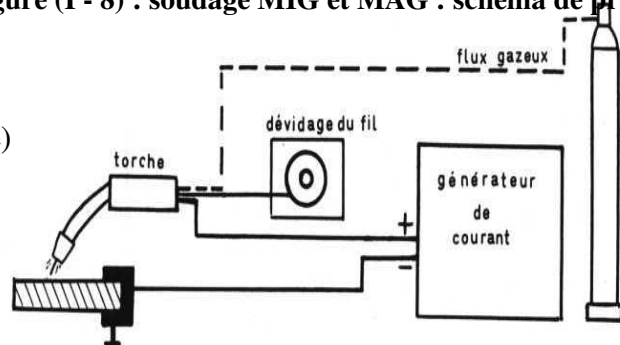


Figure (I - 9) : soudage MIG et MAG : schéma de l'installation [10] .

I-5. a.6. Soudage TIG (tungstène inerte Gas) :

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance). [6]

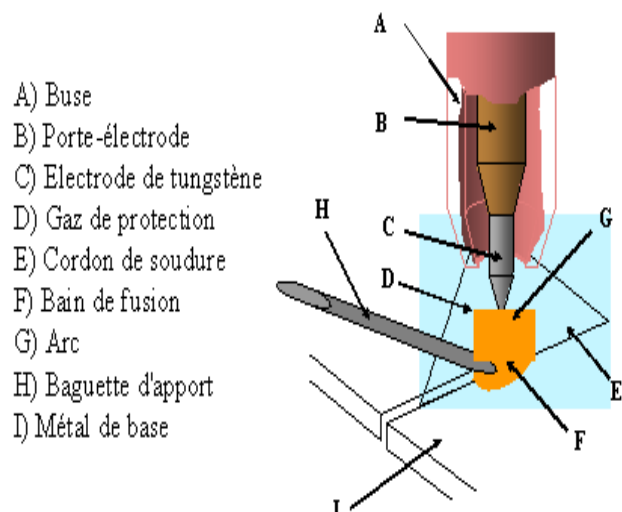
- **Principe :** [9]

- guidage manuelle
- électrode (cathode) réfractaire (non-consommable)
- gaz inert (Ar, He, H₂)
- soudage autogène ou métal d'apport additionnel

- **Caractéristiques :**

- coût moyen
- puissance moyenne (rendement faible)

Description du procédé



- tous les métaux
- flexibilité élevée
- soudage à l'abri du vent

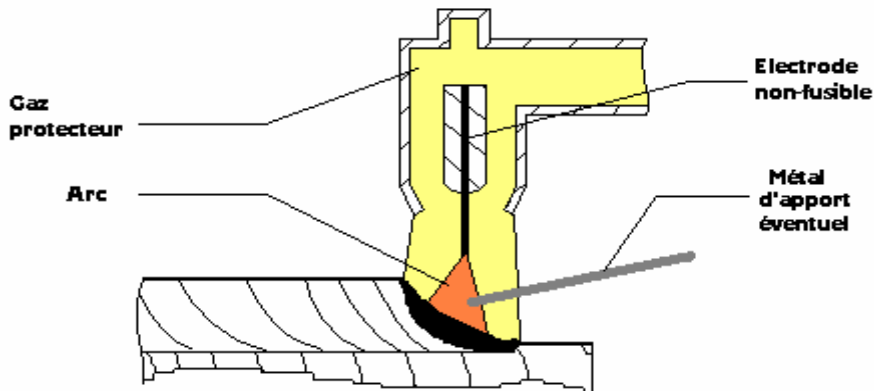


Figure (I - 10) : Principe du soudage TIG.

I-5. a.7. Soudage par plasma :

Appelé également PAW (plasma arc Welden). Comme montré sur la figure (I-11), l'apport d'énergie nécessaire au soudage est assuré par un arc électrique jaillissant sous une atmosphère de gaz neutre plasmagène entre une électrode infusible et les pièces à assembler. L'éventuel apport de fil se fait à l'extérieur de la torche. Cet arc est confiné mécaniquement et cinétiquement par l'intermédiaire d'une tuyère au travers de laquelle on l'oblige à passer.

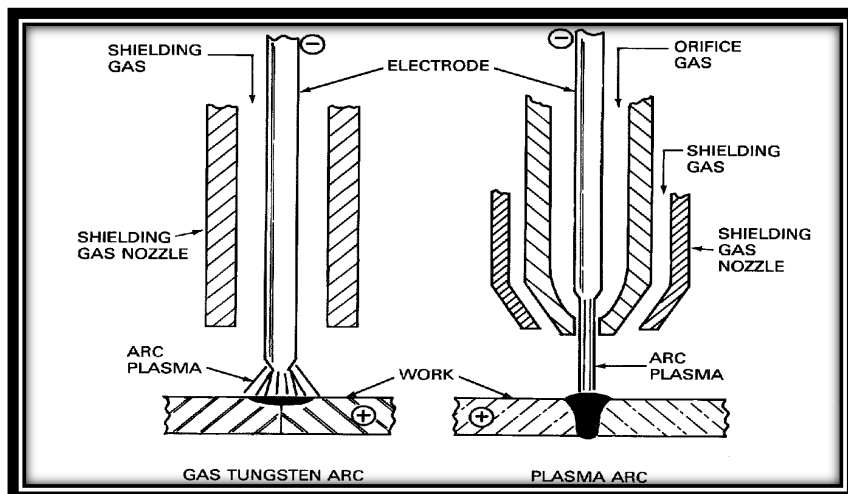


Figure (I - 11) : soudage par plasma.

I-5. a.8. Soudage par laser :

L'outil de ce procédé est un rayon laser puissant généré dans une cavité comportant un milieu actif amplificateur et se propageant l'atmosphère ou dans un guide jusqu'à une optique de focalisation permettant de l'utiliser.

L'onde est caractérisée par sa puissance et sa fréquence. Cette dernière est déterminée par l'énergie des photons émis par les atomes ou les molécules du milieu actif. [6]

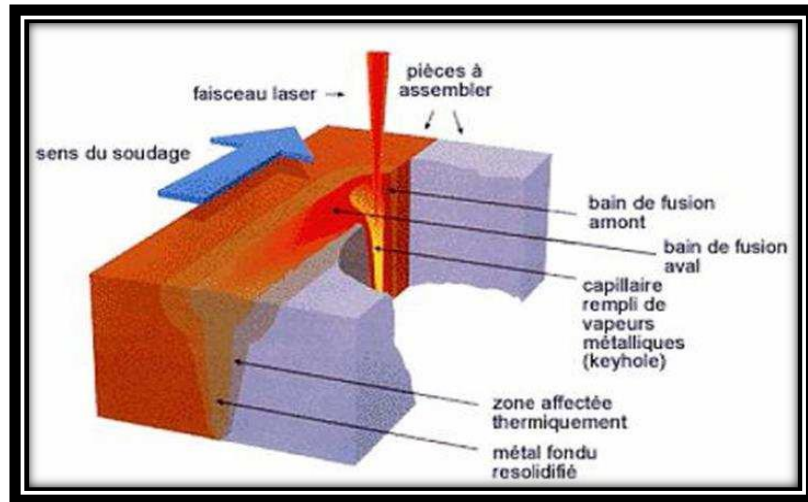


Figure (I - 12) : soudage par laser.

I-5. a.9. Soudage par Aluminothermie :

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

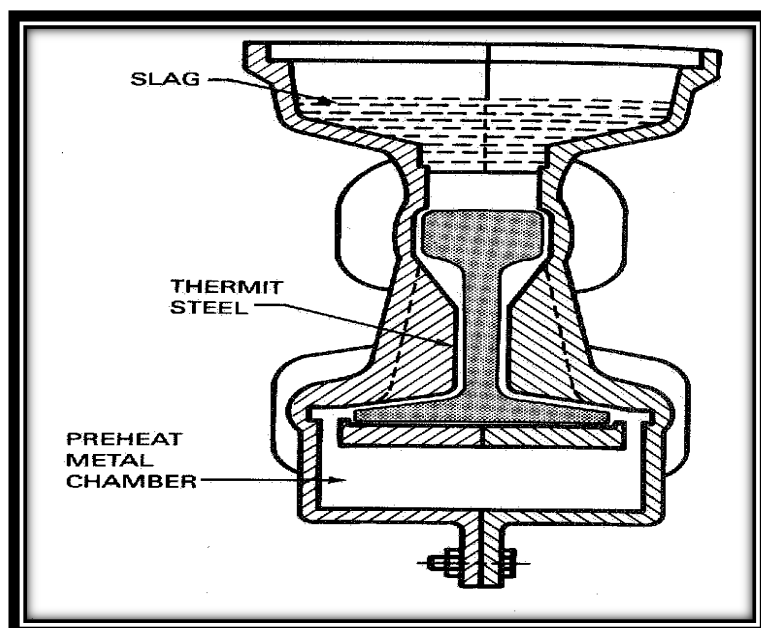


Figure (I - 13) : soudage par aluminothermie .

I -5. b. soudage sans fusion :

I -5. b.1. Soudage par résistance :

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ($I > 2000 \text{ A}$) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression « forge » la soudure.

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, nous allons voir le plus caractéristiques : le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder [6].

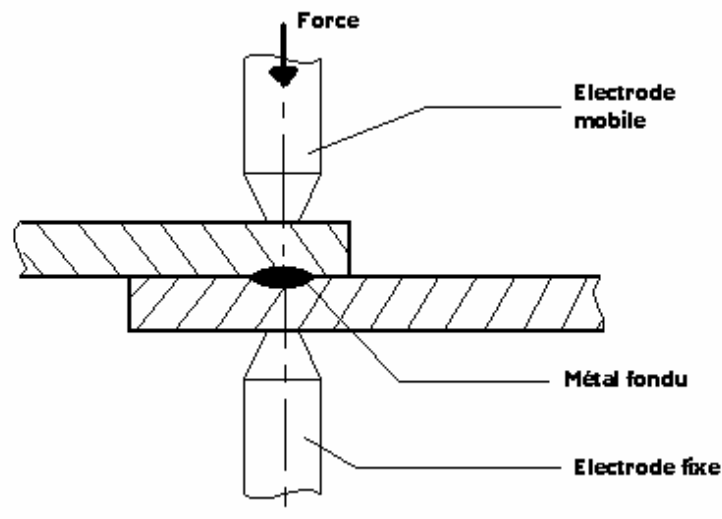


Figure (I - 14) : soudage par point [10].

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide. [6]

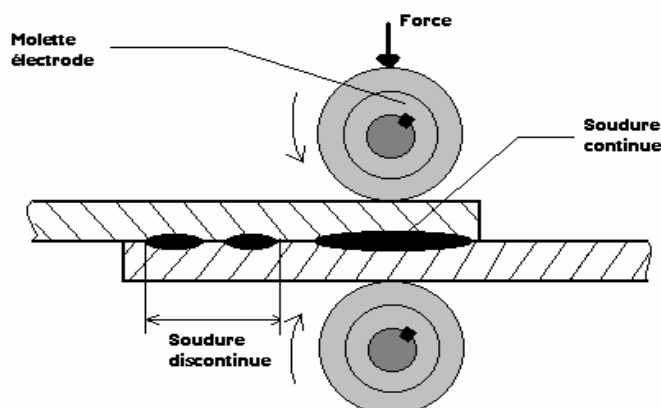


Figure (I - 15) : soudage par molette [6].

I-5. b.2. Soudage au fer :

Ce procédé de soudage est employé majoritairement dans l'industrie électronique pour les petites soudures. On utilise un fer qui fait office de résistance ce qui produit la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport souvent l'étain. [6]

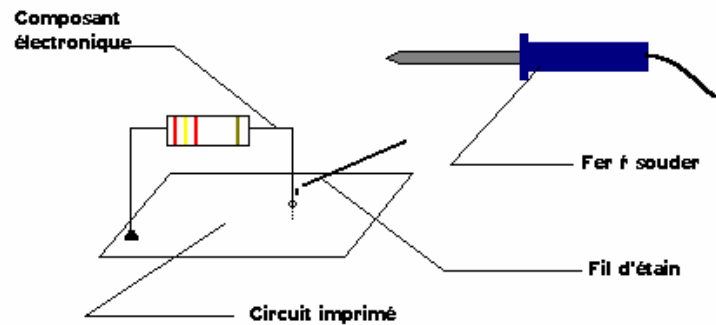


Figure (I - 16) : soudage au fer [6].

I-5. b.3. Soudage par friction :

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et

Lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte [11].

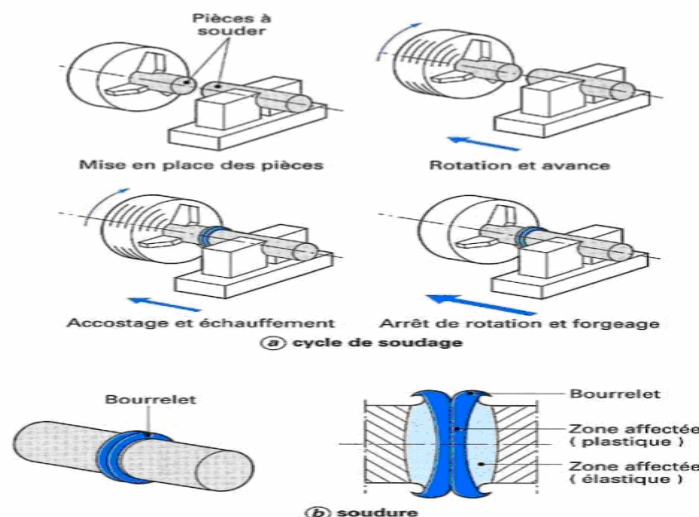


Figure (I - 17) : Principe du soudage par friction [11].

I-5. b.4. Soudage par ultrason :

La pièce à souder, serrés entre enclume et sonotone, sont soumises à vibration qui provoquent des frictions locales. Les pellicules superficielles des zones de contact sont rompues par les déformations plastique localisées, l'interpénétration des surfaces de contact s'ensuit. Sous l'effet du frottement à l'interface, la température s'élève, la zone de déformation s'étend et le soudage se produit .il ya de nombreux point commun entre ce procédé et le soudage par friction. [10]

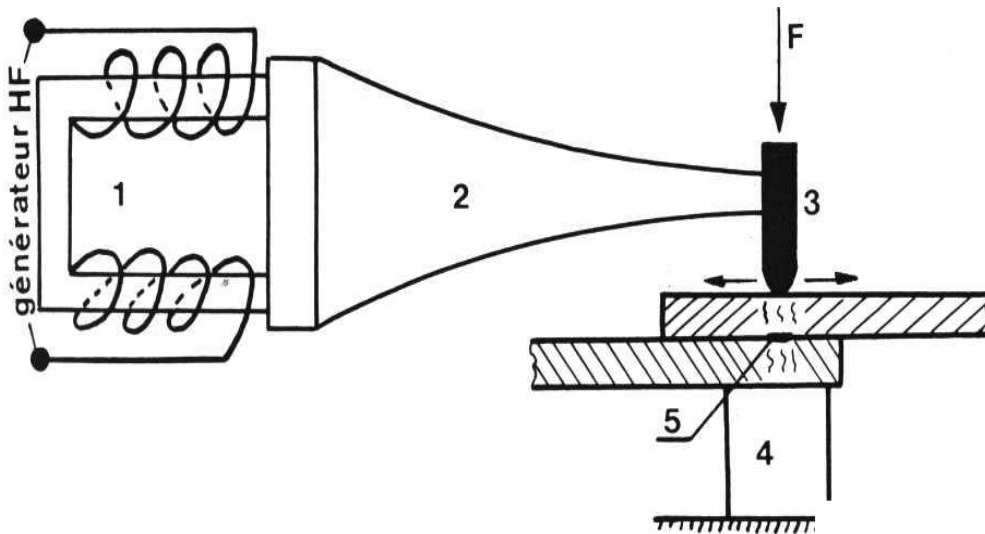


Figure (I - 18) : soudage par ultrason [10].

I-5. b.5. Soudage à la forge :

C'est le plus ancien des procédés de soudage de tout les temps. Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de « blanc soudant » (de 950 °C à 1 050 °C) estimée à l'œil par le forgeron. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées.

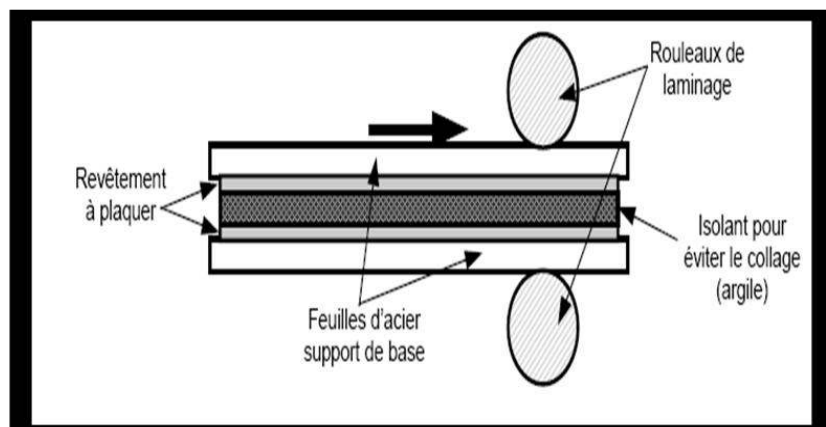


Figure (I - 19) : soudage à la forge .

I-5. b.6. Soudage par brasage(sud-brasage) :

Le métal d'apport est un litons silicium, fondant à 900°C et ayant la propriété de s'accrocher à des alliages de nature très différente. Ce procédé permet de réaliser le métal tels que fontes guises ; malléables ; aciers durs difficilement soudables.

I-6. Types de joints :

I-6. 1. Généralités :

Sur les structures, on trouve une grande variété de joints soudés : ils sont fabriqués à Partir des quatre configurations de base représentées (Figure. I – 20.) que l'on peut classer de la Manière suivante :

- joints bout à bout.
- joints en T.
- assemblages à recouvrement.
- joints en angle.

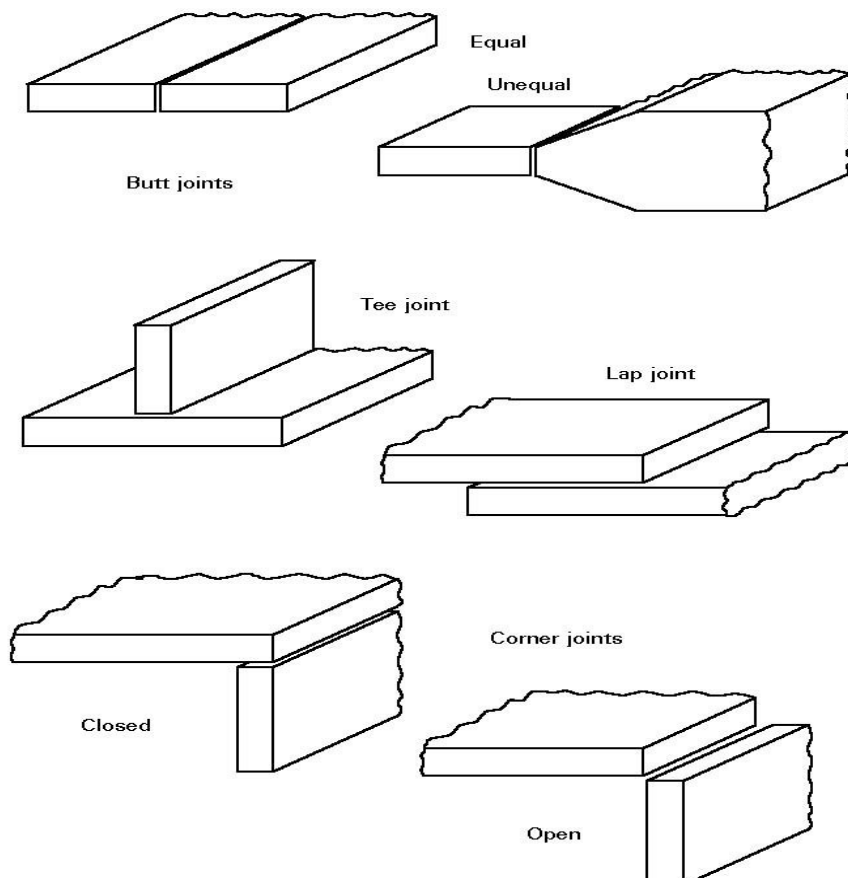


Figure (I - 20) :types de joints.

I -6.2. Préparation des joints :

L'application permet de souder tous les types de joints. Toutefois, il est important de savoir que généralement, on n'utilise pas de baguette d'apport pour le soudage des plaques minces. Dans ce cas, on privilégie un joint à bords relevés pour permettre un assemblage par fusion des bords seulement.

Le type de préparation du joint pour un travail donné dépend principalement des facteurs suivants :

- Propriétés requises pour le cordon de soudure ;
- Coût de préparation du joint et du dépôt de la soudure ;
- Nature du métal de base ;
- Dimensions, forme et apparence de l'assemblage à souder.

Il faut aussi tenir compte des considérations suivantes pour le choix du type de joint :

- Nombre de points de soudage et dimensions de ces points ;
- Possibilité de réaliser une purge ;
- Distance entre les plaques, profondeur et angle du chanfrein, s'il y a lieu ;
- Nombre de passes requises ;
- Diamètre de la baguette d'apport ;
- Méthode d'amorçage de l'arc ;
- Position de soudage ;
- Possibilité de renforcement du joint (bridage) ;
- Type d'électrode employée ;
- Type de poste de soudage ;
- Tolérances de l'assemblage.

I -6. 3. Méthodes de réalisation d'un joint soudé :

Comme on peut le voir sur la Figure. I – 21. Un joint soudé s'obtient en faisant fondre des plats en acier ou des profilés (métal de base) le long de la ligne du joint. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal fondu qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base, comme on le voit sur la Fig. I – 22. Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.

Deux types de soudure sont d'usage commun : les soudures bout à bout et les cordons d'angle. Dans le premier cas, le métal fondu est généralement celui du profilé des éléments à souder ; dans le second le métal fondu déposé est extérieur aux éléments à souder.

Bien évidemment, on ne peut pas faire en même temps toute la longueur du joint. En pratique, la source de chaleur utilisée pour fondre une petite surface est ensuite déplacée le long de la ligne du joint, faisant fondre progressivement le métal de base sur le bord avant du bain de fusion, comme on le voit sur la Fig. I – 23. Au même moment, le métal du bord arrière du bain de fusion se solidifie. La source de chaleur la plus souvent utilisée, pour des travaux sur des structures est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V), d'intensité élevée (50 à 1 000 A). Comme on le voit sur le schéma de la Fig. I – 24., l'arc se développe entre le bout de l'électrode en acier (barreau) et la pièce à souder ; il fait fondre à la fois le métal de base et l'électrode ; le métal fondu provenant de l'électrode est ainsi ajouté au bain de fusion.

L'acier fondu du bain de fusion absorbe volontiers l'oxygène et l'azote de l'air, ce qui peut rendre poreuse la soudure solidifiée et conduire éventuellement à des problèmes métallurgiques.

La Fig. I – 25. montre comment on peut éviter ceci en couvrant le bain avec un flux en fusion, comme dans le soudage à l'arc manuel et le soudage à l'arc sous flux en poudre ou en remplaçant l'air autour de l'arc par un gaz inerte, comme dans le soudage MAG ou le soudage par électrode enrobée.

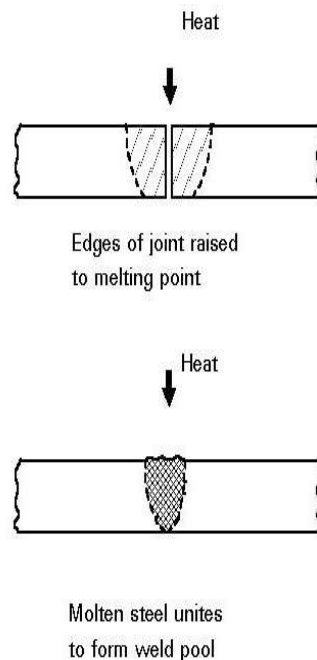


Figure (I - 21) : Formation d'une piscine de la soudure.

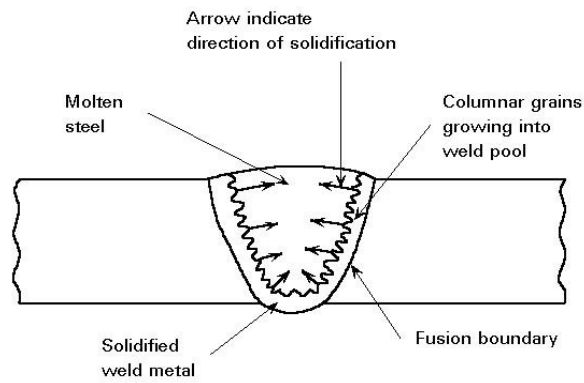


Figure (I - 22) :Solidification de métal de la soudure.

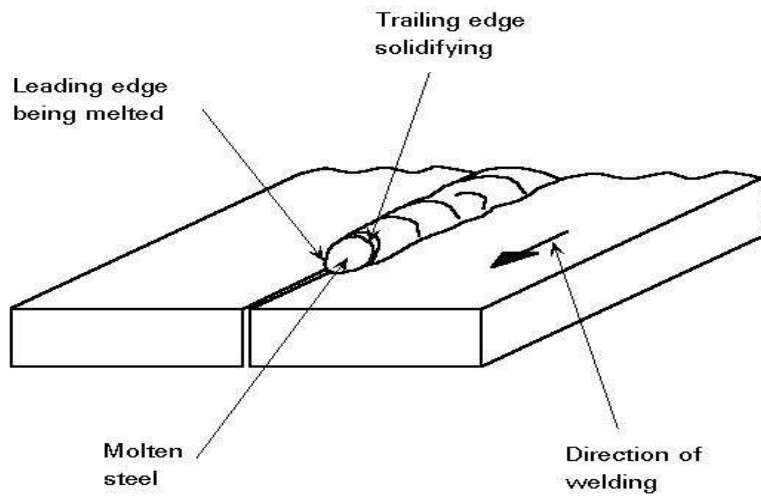


Figure (I - 23) : Fusion progressive et solidification.

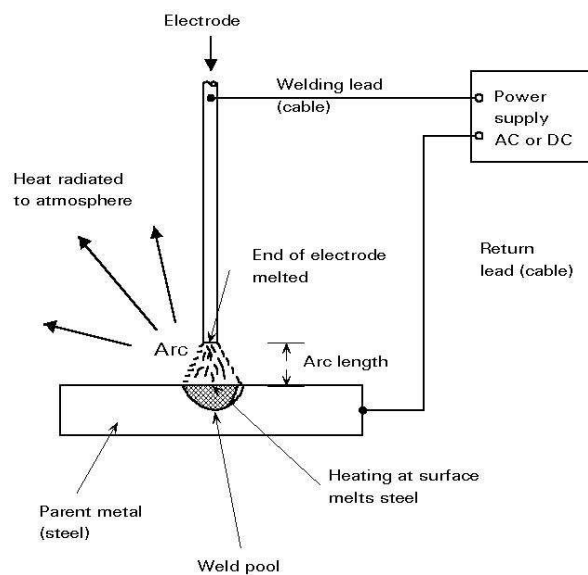


Figure (I - 24) :Soudure par arc.

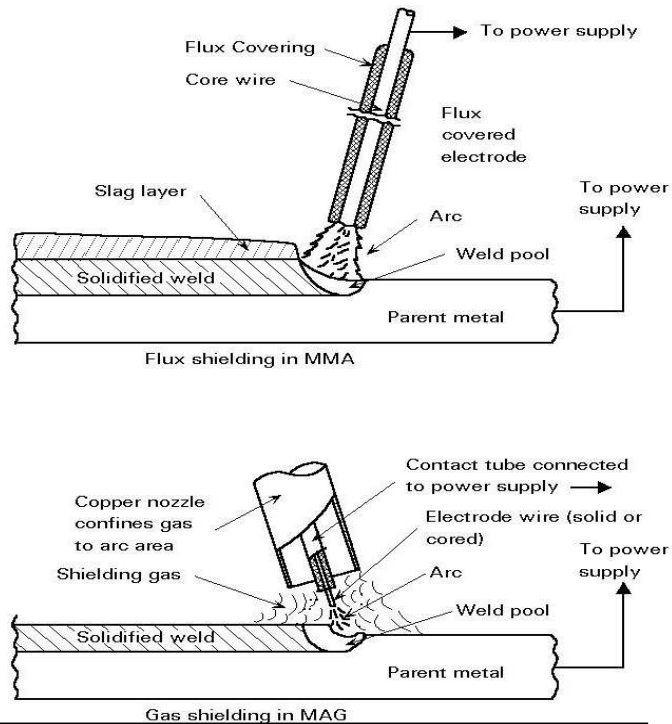


Figure (I - 25) : méthode de protection.

I-7. Sécurité :

Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail.



Figure (I - 26) : Sécurité Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail

I -8. Conclusion :

1-On distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes.

2-On distingue de deux types PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE :

- Procédés nécessitant un effort extérieur : Soudage réalisé en phase solide
- Procédés sans effort extérieur : Soudage réalisé en phase liquide



CHAPITRE II : LES DEFAUTS DE SOUDAGE



II-1 INTRODUCTION :

La majeure partie des discontinuités se produisent dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles. Pour les propos de ce paragraphe, la fissure se distingue d'un autre défaut comme la cassure ; Les soudures casent à cause des contraintes, mauvaise conception du joint, ou fatigue, la fissure en cause ici est due à la solidification, le refroidissement les tensions dues au retrait du joint.

Les facteurs de défaillance des assemblages soudés sont de trois ordres différents :

- Facteur technologique : facteurs associés à l'exécution des soudures.
 - Facteur métallurgique : facteurs associés à l'altération métallurgique due au soudage.
 - Facteur mécanique : facteurs associés au dimensionnement des cordons et aux tracés
- Des ensembles soudés.[12].

II.2 LES FISSURES :

•Généralités :

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Par une

Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau.

La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint.

Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique.

Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage.

Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [12].

II .2.1 Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur.

- **Les fissures longitudinales :**

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure. Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous.

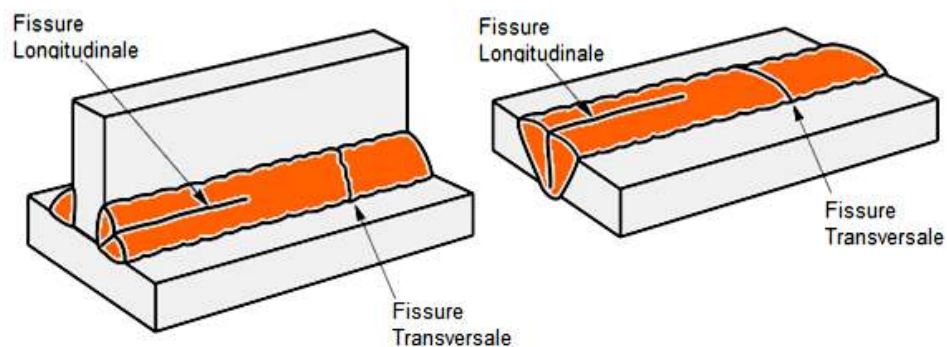
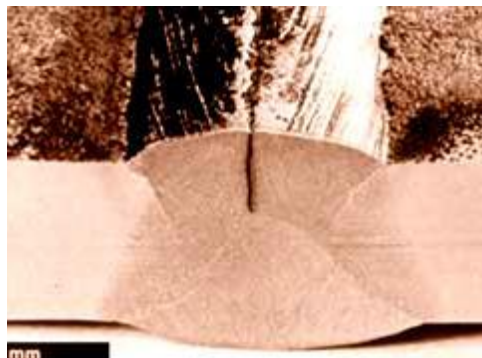


Figure (II.1) Les fissures longitudinales .

- **Les fissures transversales :**

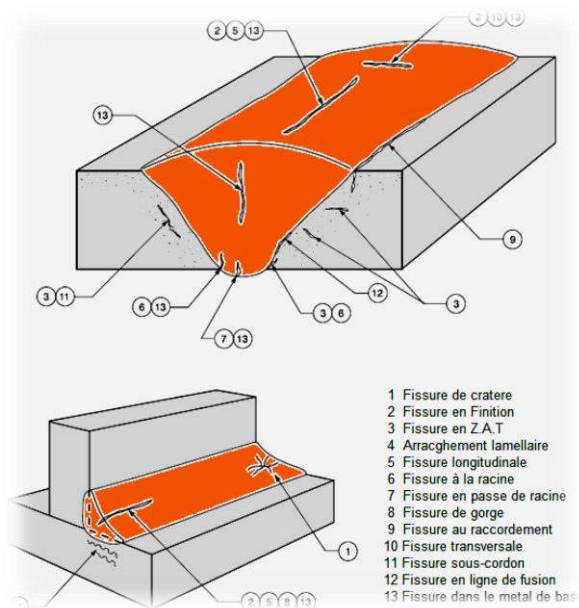
Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens Trans



Figure (II.2) Les fissures transversales.

II.2.2 Types de fissures



Figure(II.3) référence types des fissures.

Fissures de Gorge (Throat Cracks):

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle. Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud.

- **Fissures de Racine :**

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine. Elles peuvent être des fissures

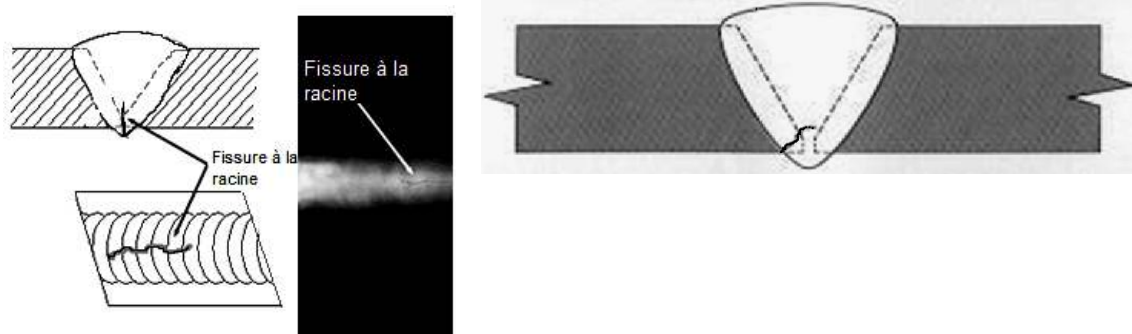


Figure (II.4) fissure à la racine.

- **Fissures de Cratère :**

Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile.

Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc. Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère.

- **Fissures au raccordement :**

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement. Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage.



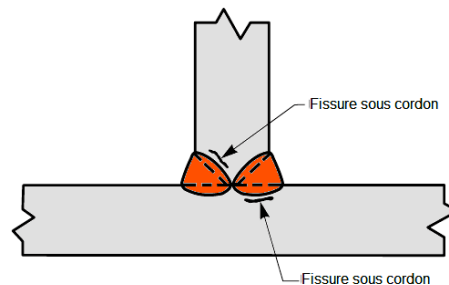
Figure (II.5) : Fissures au raccordement.

- **Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).**

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément :

- (1) Hydrogène
- (2) Une microstructure de ductilité relativement faible
- (3) De fortes contraintes résiduelles

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout. [12].

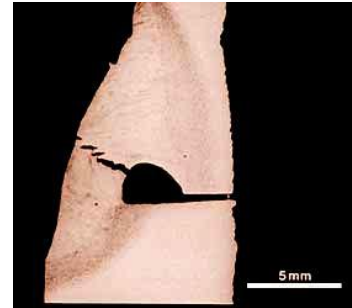
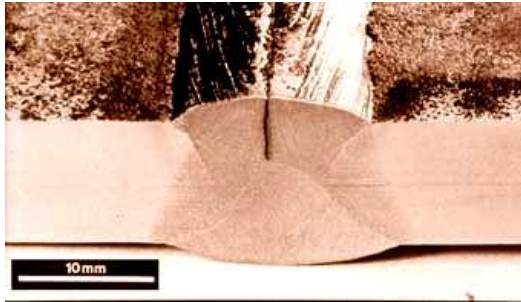


Figure(II.6) : Fissures Sous –Cordon.

- a) **Fissures à Chaud (ou de Solidification) :**

- **Définition :**

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal (voir croquis du tableau I). Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée.



Figure(II.7) : fissures à chaud.

- **Causes possibles :**

- Retrait transversal exagéré, surtout pour des cordons avec un rapport profondeur/largeur supérieur à 2 (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).
- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (voir fig. 8). Notons que l'importance de la Migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.

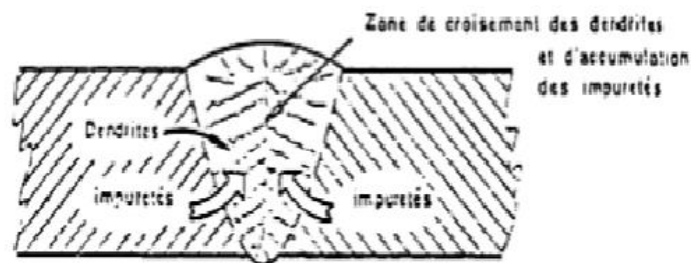


Figure (II.8) : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement .

- Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier ; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

- **Méthodes de détection :**

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie

- **Méthode de réparation :**

Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

Mesures préventives

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en *P* et *S* dans le métal de base à limiter à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important

b) Fissures à Froid (ou d'Hydrogène) :

- **Définition :**

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage.

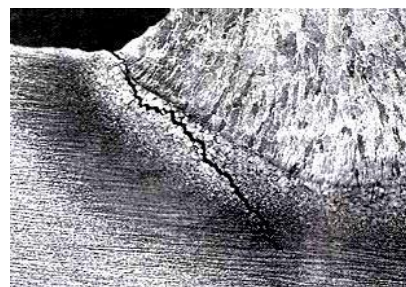
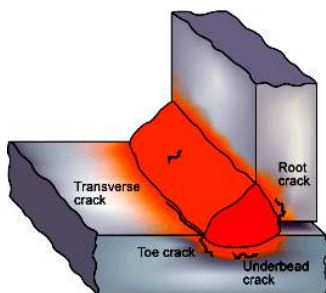


Figure (II.9) : Fissures à Froid.

- **Causes possibles :**

La diffusion de l'hydrogène du métal de base
Vers la zone affectée thermiquement qui a une
Structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression

Élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure.

. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres Produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.

De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments contribuant

- **Méthodes de détection :**

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage - Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie

- **Méthode de réparation :**

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct

Et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration

- **Mesures préventives :**

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique. - S'il y a préchauffage, chauffer l'entière de la section à la température voulue. - Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement

c) Fissures de Réchauffage « Reheat Cracking » :

- **Définition :**

Forme de fissure qui apparaît dans des aciers au Va ou Mo qui, dans le cas d'une teneur suffisamment élevée, provoquent une trempe importante dans la zone affectée thermiquement et par la suite une ductilité au fluage basée aux joints des grains dans cette zone affectée thermiquement, d'où apparition de fissures lors du fonctionnement à température élevée.

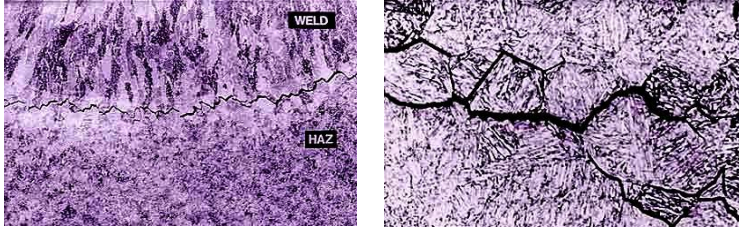


Figure (II.10) : Fissures de Réchauffage.

- **Causes possibles :**

Des facteurs contribuant sont :

- impuretés dans l'acier (As, Sn, .)
- effets d'entaille - manque de pénétration
- manque de fusion à la racine de la soudure

- **Méthodes de détection :**

- à la surface : examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- à l'intérieur : examen par ultrasons.

- **Méthodes de réparation :**

Traitement thermique de la zone de soudage afin de restaurer la ductilité de la zone influencée thermiquement, suivi par l'élimination du défaut jusqu'à 5mm au-delà de l'extrémité de la fissure. Préchauffage suffisant avant la réparation ; elle-même étant suivie par un nouveau traitement thermique.

- **Mesures préventives :**

- Elimination de toute entaille avant traitement thermique.
- Traitement de détente entre les différentes passes.
- Choix du matériau
- Procédure et technique de soudage

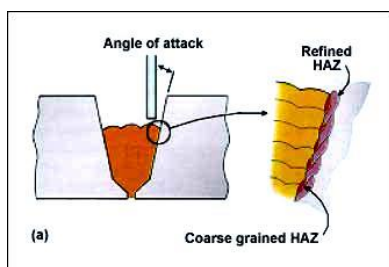
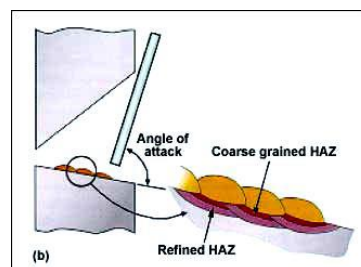


Figure (II.11) Soudage en position à plat – haut verticale ou horizontale – faible Degré de raffinement de la ZAT.



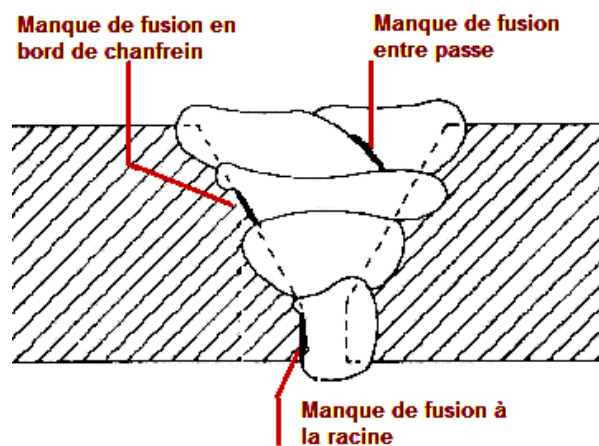
figure(II.12) Soudage en position de degré de raffinement de la ZAT.

II.3 MANQUES DE FUSION :

- **Localisations possibles des manques de fusion :**

Des manques de fusion peuvent apparaître :

- Soit dans le flanc de la soudure entre métal de base et métal déposé
- Soit entre passes de soudage
- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé



Figure(II.13) : manques de fusion .

II.3.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure Définition :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure

- **Causes possibles :**

- Energie de l'arc trop faible
- Vitesse de soudage trop élevée
- Mauvais angle de l'électrode
- Métal d'apport qui coule devant l'arc à la suite de la position de soudage
- Bords à souder mal nettoyés

- **Méthodes de détection :**

-Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie)

- **Méthodes de réparation :**

-Eliminer la partie défectueuse et ressouder

- **Mesures préventives :**

-Qualification de la procédure pour vérifier la fusion

-Eventuellement modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage

-Nettoyer suffisamment les bords à souder.

II.3.2 Manque de fusion entre passes :

- **Définition :**

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes

- **Causes possibles :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

- **Méthodes de détection :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

- **Méthodes de réparation :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

- **Mesures préventives :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

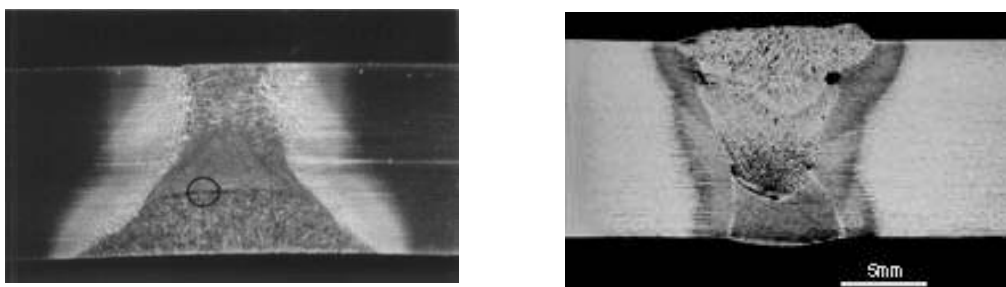


Figure (II.14) : Manque de fusion entre passes.

II.3.3 Manque de fusion à la racine de la soudure :

- **Définition :**

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration.

- **Causes possibles :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

Autres causes spécifiques :

-Ecartement trop faible

-Méplat trop important lors de la préparation

-Diamètre de l'électrode trop important dans le Soudage à l'arc électrique

- **Méthodes de détection :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

Si la soudure peut être contrôlée à revers : examen

Visuel, magnétique ou par ressuage

- **Méthodes de réparation :**

-Si la reprise à revers est possible : éliminer le défaut

Par meulage et reprendre à revers

-Si la reprise à revers est impossible : éliminer toute La soudure et ressouder.

- **Mesures préventives :**

-Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure

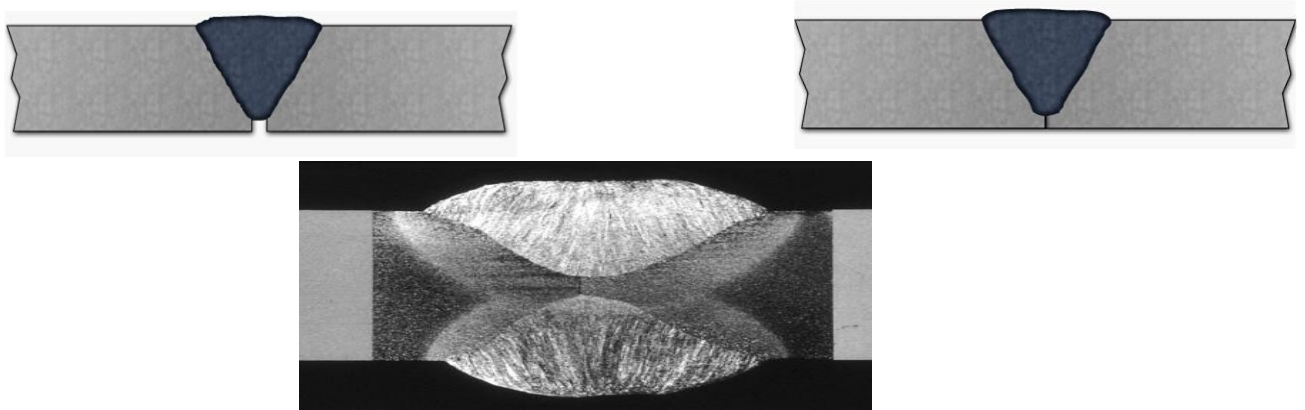
et surtout spécialement soigner préparation (écartement, méplat,...)

II.4 MANQUES DE PENETRATION :

- **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(II.15): manque de pénétration.

II.4.1 Manque de pénétration à la racine :

- **Définition :**

Le métal d'apport n'atteint pas la racine du chanfrein.

- **Causes possibles :**

- Ecartement trop faible
- Méplat trop grand
- Soudage vertical descendant tandis que vertical montant spécifié pour obtenir une pénétration complète
- Apport calorifique trop faible
- Vitesse de soudage trop grande
- Diamètre d'électrode fautif dans le soudage électrique manuel.
- Laitier qui coule devant le bain de soudage.

- **Méthodes de détection :**

- Défaut débouchant en surface ; examen visuel, magnétique ou ressuage.
- Défaut interne : examen par ultrasons ou radiographie.

- **Méthodes de réparation :**

- Éliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage.

- **Mesures préventives :**

- Adapter la préparation de soudage (écartement, méplat,...)
 - Adapter les paramètres de soudage (vitesse de soudage, régime thermique...)
 - Diminuer la fluidité du laitier.

II.4.2 Manque de pénétration dans la soudure :

- **Définition :**

Le métal d'apport n'atteint pas le Milieu du chanfrein en X.

- **Causes possibles :**

- Idem Manque de pénétration à la racine.

- **Méthodes de détection :**

- Examen par ultrasons ou radiographie

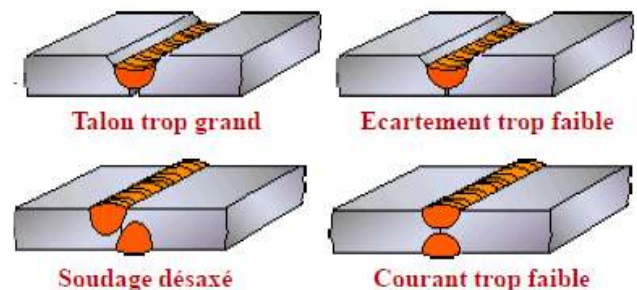


figure (II.16) : Manque de pénétration .

- **Méthodes de réparation :**

- Éliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage.

- **Mesures préventives :**

- Idem Manque de pénétration à la racine.
 - Une mesure spécifique est de faire un examen magnétique ou un ressuage après grugeage afin de contrôler la qualité de la grugeage.

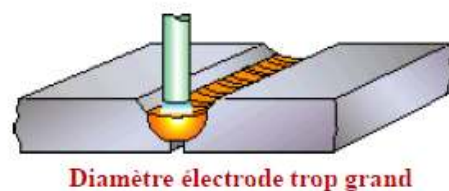
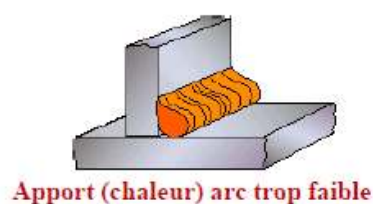


Figure (II.17): Manque de pénétration.

II.5 INCLUSIONS GAZEUSES :

- **Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités :**

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

- Porosités vermiculaires
- Porosités de reprise
- Porosités uniformes

II.5.1 Porosités vermiculaires :

- **Définition :**

Cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon. Elles peuvent se présenter isolées ou groupées (elles ont souvent une forme caractéristique d'arête de poisson suivant les séquences de solidification des dendrites).

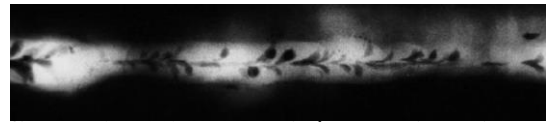


figure (II.18) : Porosités vermiculaires .

- **Causes possibles :**

- Contamination de la surface à souder
- Ouvertures, telles que l'ouverture entre

Une tôle verticale et horizontale qui sont assemblées par une double soudure d'angle.

- Doublures dans les tôles, si elles débouchent en surface.

- **Méthodes de détection :**

- A la surface : examen visuel
- A l'intérieur : radiographie et ultrasons.

- **Méthodes de réparation :**

- Éliminer la zone défectueuse et ressouder (éventuellement éliminer la doublure par meulage).

- **Mesures préventives :**

- Nettoyage des bords à souder avant soudage
- Recherche de doublures dans les bords à souder (examen magnétique ou ressuage) et les éliminer ou boucher par soudage
- Éviter des préparations de soudage qui causent des cavités.

II.5.2 Porosités uniformes :

- **Définition :**

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon.

- **Causes possibles :**

- Electrodes ou baguettes de soudage corrodées.
- De l'air dans le gaz de protection
- De l'huile ou des hydrocarbures (par ex. suite au nettoyage)
- Manque de débit des gaz de protection
- Des fuites d'eau dans des équipements de soudage
- Refroidis à l'eau
- Manque d'éléments désoxydants dans l'électrode
- Ou la baguette
- Humidité (de l'électrode ou de la pièce à souder)
- Courants d'air (par ex. lors du soudage de tuyauteries
- En plein air)

- **Méthodes de détection :**

- A la surface : examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- A l'intérieur : radiographie ou ultrasons
- Méthodes de réparation
- Réparation de toute la soudure.

- **Mesures préventives :**

- Sécher les électrodes et le métal de base.
- Dégraisser les bords à souder
- Protéger l'arc contre les courants d'air
- Quand les porosités uniformément réparties sont très denses, il y aura presque toujours des porosités en surface
- Ne pas utiliser d'électrodes ou baguettes corrodées.

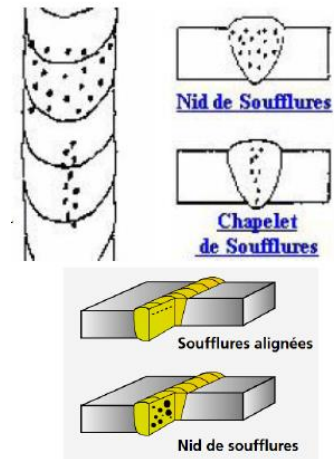


Figure (II.18) : Porosités uniformes .

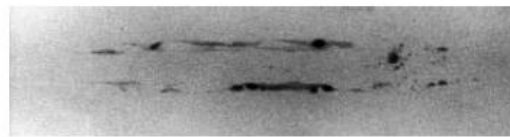
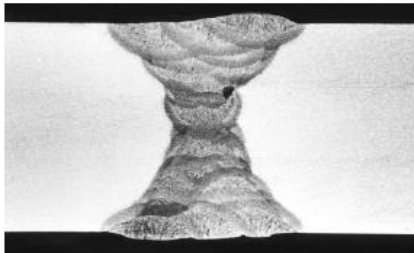
- Rechercher les fuites d'eau
- Ajouter des éléments désoxydants aux électrodes et aux baguettes.

II.6 INCLUSIONS SOLIDES :

- **Différents types d'inclusions solides :**

Des inclusions solides peuvent être de 3 types différents :

- Laitier



-Tungstène



-Cuivre

Figure (II.19): types d'inclusions solides.

II.6.1 Inclusions de laitier :

- **Définition :**

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure. Ces inclusions peuvent avoir 2 aspects :

- Un aspect linéaire : les inclusions sont alors groupées en parallèle à l'axe du cordon.
- Un aspect quelconque : elles sont alors isolées

- **Causes possibles :**

- Manque de contrôle sur le laitier (par ex. le laitier qui coule devant le bain de fusion à cause de la position de soudage.
- Manque d'élimination du laitier entre passes d'une soudure multi-passes.

- **Méthodes de détection :**

- Ultrasons et radiographie.

- **Méthodes de réparation :**

- Eliminer la zone défectueuse par meulage et réparer.

- **Mesures préventives :**

- Eventuellement adapter la position de soudage pour mieux contrôler le bain de fusion.
- Eliminer suffisamment le laitier entre passes.

II.6.2 Inclusions de tungstène :

- **Définition :**

Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US= GTAW).

- **Causes possibles :**

- Electrode trop pointue
- Intensité de courant trop élevée
- Débit de gaz de protection trop faible.
- Coupure trop rapide du gaz de protection à la fin du soudage.

- **Méthodes de détection :**

- Surtout radiographie où les inclusions de tungstène forment des taches très blanches sur le film (le tungstène absorbe très fort les rayonnements).

- **Méthodes de réparation :**

- Eliminer le défaut par meulage et ressouder.

- **Mesures préventives :**

- Ne pas utiliser des électrodes trop pointues
- Limiter l'intensité du courant
- Augmenter le débit du gaz de protection.
- Ne pas couper trop vite l'alimentation en gaz de protection

II.6.3 Inclusions de cuivre :

- **Définition :**

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage.

- **Causes possibles :**

- Fusion de points de contact lors du soudage MIG à la suite d'un arc instable.
- Perte de refroidissement à l'eau provoquant la fusion de certaines parties de la torche.

- **Méthodes de détection :**

- Contamination : Non décelable par des moyens CND
- Inclusion importante : Radiographie.
- Dans le cas où ces inclusions provoqueraient des fissures se référer au chapitre fissures.

- **Méthodes de réparation :**

- Eliminer la zone complète par meulage et même un peu au-delà, car l'étendue de la contamination est très difficile à évaluer.

- **Mesures préventives :**

- Stabiliser l'arc lors du soudage MIG.
- Minimiser les pertes de refroidissement de la torche
- Eliminer toute source de contamination possible

II.7 EXCES DE MATIERE :

- **Généralité :**

Un excès de matière peut se présenter la racine du cordon (excès de pénétration) ou à la surface (surépaisseur) éventuellement accompagné de recouvrements du métal de base non fusionnés

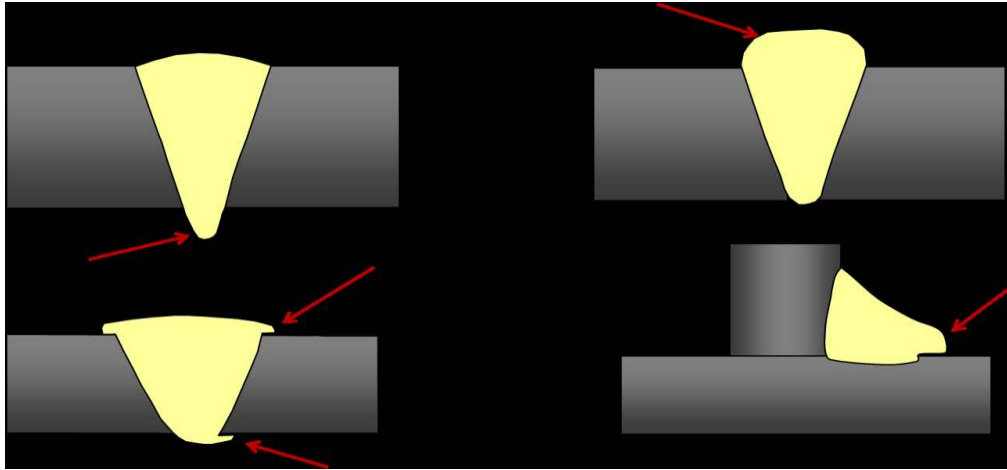


Figure (II.20): excès de pénétration.

II.7.1 Excès de pénétration :

- **Définition :**

Pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon.

- **Causes possibles :**

- Ecartement trop important.
- Jeu entre l'anneau-support et le métal de base lors du soudage sur anneau-support.
- Apport énergétique trop important.
- Vitesse de soudage trop faible.
- Manque d'expérience du soudeur.

- **Méthodes de détection :**

- Contrôle visuel, éventuellement radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).

- **Méthodes de réparation :**

- Eliminer l'excès par voie mécanique.

- **Mesures préventives :**

- Diminuer l'écartement.

- Lors d'utilisation d'anneau supports, limiter le jeu.
- Adapter la vitesse de soudage et l'apport énergétique.

II.7.2 Surépaisseur :

- **Définition :**

Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout.

- **Causes possibles :**

- Energie de l'arc trop importante surtout pour le soudage MIG, MAC et sous flux. Figure 20 : convexité excessive
- Mauvais choix des diamètres des électrodes dans des Soudures multi-passes.
- De mauvaises manipulations de l'électrode.

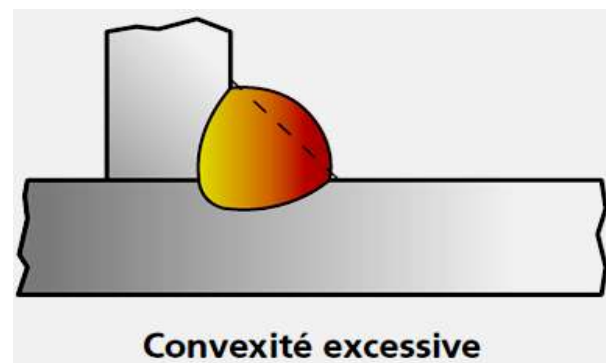


Figure : (II.21): convexité excessive .

- **Méthodes de détection :**

- Examen visuel avec un calibre de soudage.

- **Méthodes de réparation :**

- Elimination mécanique (seulement si l'épaisseur dépasse une certaine limite).

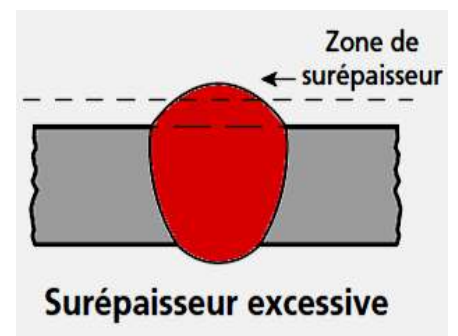


Figure (II.22):: surépaisseur excessive

- **Mesures préventives :**

- Diminuer l'énergie de l'arc.
- Contrôler le choix des diamètres des Électrodes à l'aide d'un coupon soudé.
- Améliorer l'expérience du soudeur.

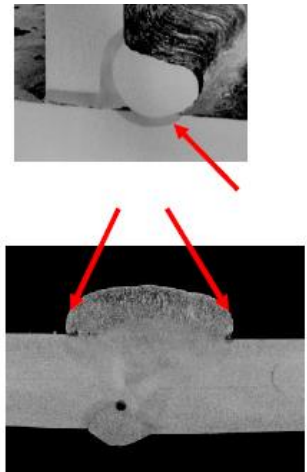
II.7.3 Recouvrements non fusionnés (Débordements) :

- **Définition :**

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit à la racine de la soudure, soit à la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base

- **Causes possibles :**

- Mauvaise manipulation de l'électrode lors du soudage
Manuel (balancement excessif), surtout en soudage vertical.
- Apport énergétique trop faible.
- Vitesse de soudage trop faible avec un apport énergétique
Trop important.
- Mauvaise position de soudage...



Figure(II.23) :Recouvrements non fusionné

- **Méthodes de détection :**

- Examen visuel complété d'un examen par ressuage,

- **Méthodes de réparation :**

- Couper jusqu'au métal sain et éventuellement ressouder.

- **Mesures préventives :**

- Modifier la position de soudage.
- Modifier les paramètres énergétiques.
- Modifier la vitesse de soudage.

II.8 CRATERE ET DEFAUTS DE SURFACE :

II.8.1 Cratère :

- **Définition :**

Une dépression de retrait à la fin d'une Passe où la source de chaleur a été enlevée.

- **Causes possibles :**

Ce défaut est provoqué par une combinaison de l'interruption des réactions de désoxydation et du changement de volume lors de la solidification du dépôt.

- **Méthodes de détection :**

Inspection visuelle - un examen interne

Complémentaire par ex. par radiographie

Démontrera presque toujours des porosités associées.

- **Méthodes de réparation :**

-Meuler et ressouder.

- **Mesures préventives :**

- Diminution progressive de l'apport de chaleur peut éviter les défauts.

-Prévoir un prolongement au cordon dans lequel la Soudure se termine et que l'on élimine par après

II.8.2 Défauts de surface :

a) Morsures/Caniveaux

- **Définition :**

Un creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.

- **Causes possibles :**

- La fusion du bord supérieur d (une soudure d'angle ou d'une soudure bout-à-bout par une intensité trop forte.
- Le dépôt d'un cordon d'angle avec en section transversale une longueur de côté supérieure à 9 mm.
- Un balancement trop fort de l'électrode (surtout en position verticale).
- Vitesse de soudage trop basse.
- Gaz de protection fautif (MIG/TIG).
- Angle de l'électrode fautif, surtout lors du soudage d'une pièce plus mince à une pièce plus épaisse.

- **Méthodes de détection :**

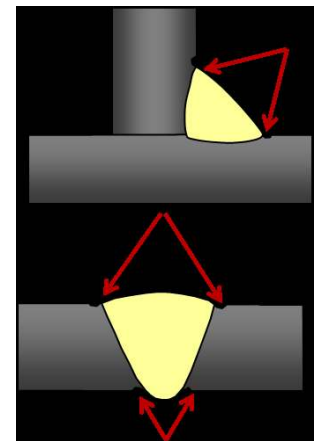
- Visuel (mesure de la profondeur avec un calibre de soudage).

- **Méthodes de réparation :**

- Réparation par soudage éventuellement après meulage.

- **Mesures préventives :**

- Souder avec la pièce en position plane (sous la main).
- Limiter le balancement en passant à un cordon multi-passes.
- Ne pas terminer le cordon sur un bord libre.
- Remplacer le laitier de protection par un laitier qui mouille plus le métal de base.



Figure(II.24): : Défauts de surface

b) Effondrement :

- **Définition :**

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



Figure(II.25): différents types d'effondrements.

- **Causes possibles :**

- Vitesse de soudage trop lente
- Chaleur trop élevée

- **Méthodes de détection :**

-Inspection visuelle.

- **Méthodes de réparation :**

-Eliminer les parties en excès et remplir celles de manque par soudage.

- **Mesures préventives :**

-Augmenter la vitesse.

-Réduire l'intensité du courant.

-Effectuer un bon mouvement oscillatoire lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de **trou** ou **perçage**.

Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort.



Figure (II.26): Effondrement.

c) Projections sur le métal de base :

- **Définition :**

De petites gouttes du matériau d'électrode qui ont été projetées sur le métal de base et qui sont fusionnées avec ce métal.

- **Causes possibles :**

Tous les procédés de soudage avec électrode fusible à arc ouvert produisent une certaine quantité de projections (par ex. soudage manuel à l'électrode avec enrobage cellulosique), mais si la densité des projections est trop importante, les causes spécifiques peuvent être :

-Apport d'énergie trop élevé.

-Longueur de l'arc trop important.

-Produits de soudage contaminés

- **Méthodes de détection :**

Examen visuel.

- **Méthodes de réparation :**

-Léger meulage.

- **Mesures préventives :**

-Diminuer l'apport d'énergie .

-Utiliser une longueur d'arc plus faible.

-Utiliser du courant alternatif afin d'éviter le soufflage magnétique de l'arc



Figure (II.27) : le métal de base fusionnée avec ce métal.

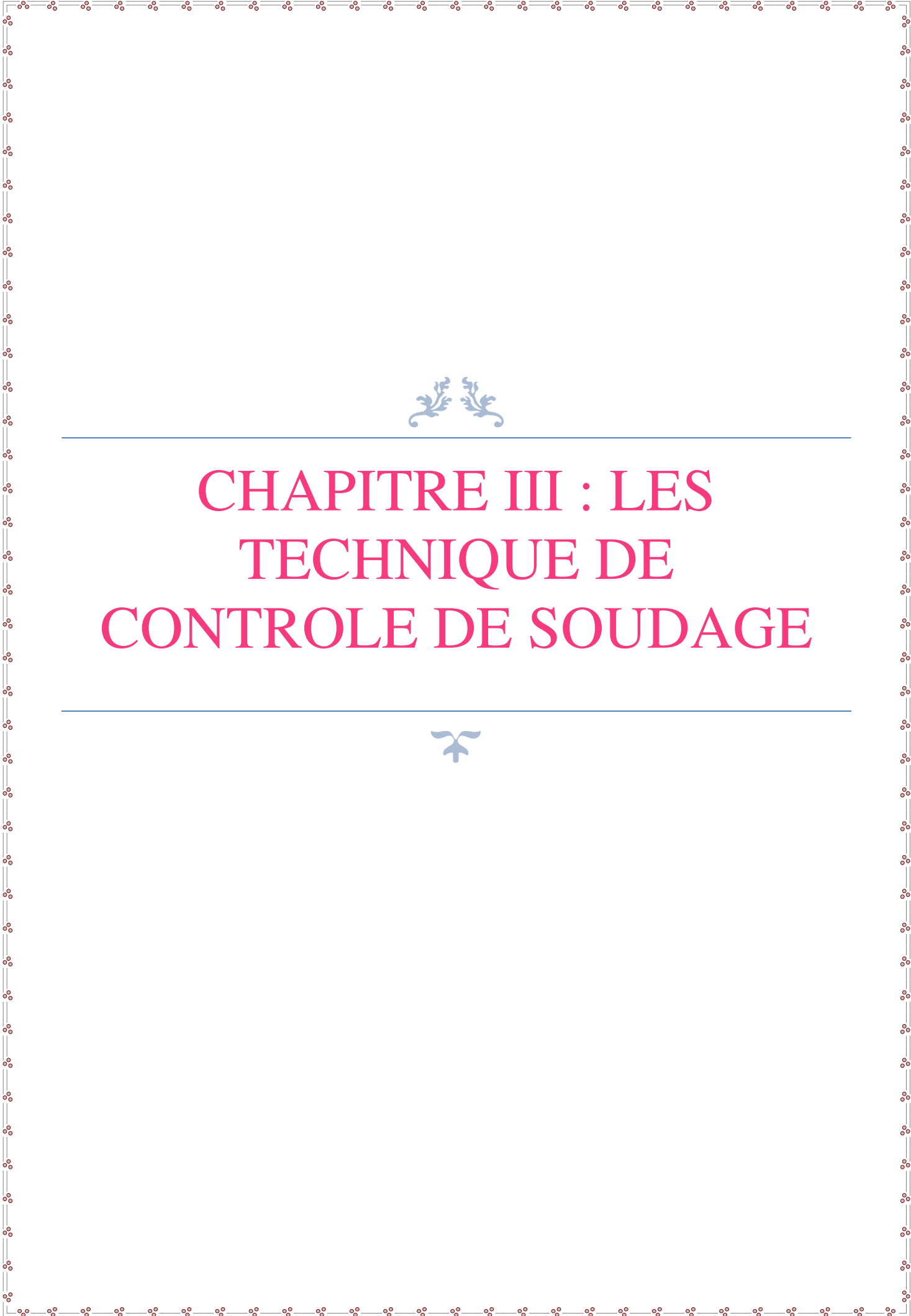
d) Défaut d'aspect :

Une pauvre technique de soudage est la cause habituelle de ces imperfections, telles que:

- Dimension de l'électrode pour la passe de finition trop grande
- Vitesse de soudage trop lente
- Courant de soudage trop faible
- Tension d'arc trop basse (SAW et GMAW)
- Une mauvaise manipulation de l'électrode
- Un positionnement/placement incorrect du cordon de soudure



Figure (II.28) : Défaut d'aspect.



CHAPITRE III : LES TECHNIQUE DE CONTROLE DE SOUDAGE



III -Contrôle des soudures :

Une soudure normalement exécutée doit être au moins plus solide que les pièces de métaux qu'elle unit, elle doit pouvoir résister aux sollicitations auxquelles elle a été calculée dans les conditions de service prévues. Cela suppose qu'elle est exempte de défauts graves, qui rendraient la structure dont elle fait partie, impropre à l'usage pour lequel elle est destinée. Certaines soudures ne peuvent pas être mises en service prévu, car elles comportent des défauts plus au moins graves provenant de leur exécution. Il est donc important de définir ces différents défauts ainsi que leurs principales causes d'apparition et les moyens à mettre en œuvre pour les éviter. Il y a lieu de distinguer entre contrôles à la fabrication et contrôles en service. Les premiers ont pour objet de rejeter ou d'accepter (après éventuelles réparations) les pièces contrôlées. Les seconds visent à s'assurer que la structure reste apte à fonctionner après un certain temps de service. La réalisation d'une telle soudure, demande différentes sortes de contrôles, avant, pendant et après l'opération de soudage :

- **Contrôle avant le soudage :**

Le contrôle avant le soudage a pour but de prévenir des défauts. Il portera sur :

- La qualité du métal.
- La préparation des pièces à souder.
- Les traitements thermiques (post et préchauffage, maintien en température).
- Le matériel de soudage (état, puissance, réglage).
- La qualification du soudeur.

- **Contrôle au cours du soudage :**

Le contrôle au cours de soudage a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joint sont bien respectées. Il portera sur :

- La nature et la dimension du métal d'apport.
- Le réglage de l'appareil de soudage.
- L'état du joint réalisé.
- La disposition des passes nombre et sens de réalisation.
- Les déformations.
- Le maintien en température.

- **Contrôle après le soudage:**

Ces contrôles ont un double but, soit la vérification de la soudabilité à partir des essais qui doivent être exécutés dans les mêmes conditions que l'ensemble à réaliser (procédés, matériaux, épaisseurs,

paramètres, séquences et main-d'œuvre), soit la vérification de la qualité des joints par un contrôle effectué soit sur la totalité des soudures, soit localement dans les zones les plus propices à l'apparition des défauts ou, si cela est possible par des essais sur pièces témoins placées par exemple à l'extrémité du joint, comme s'il était une partie intégrale de l'ensemble. Il y a deux groupes principaux de méthodes de contrôle :

- Contrôle destructif: (essai de texture, essais mécaniques: pliage, résilience).
- Contrôles non destructifs: (examen visuel, ressuage, rayons X, rayon gamma, courants de Foucault, ultrason).

III.1. Contrôles destructifs:

Les principaux essais utilisés sont les essais de texture, les essais mécaniques, les essais de corrosion, les essais macro et micrographiques.

III.1.1. Essais de texture :

Ce sont des essais simples d'ateliers destinés à vérifier que la soudure est compacte et bien pénétrée, il consiste à rompre l'éprouvette dans la soudure et on examine les défauts apparents sur la section rompue.

III.1.2. Essais mécaniques:

Ils ont pour but le contrôle des assemblages du point de vue de la résistance et des caractéristiques mécaniques et la vérification que les conditions de soudage mises en œuvre ne mettent pas en cause la résistance globale de l'ensemble. Les différents essais mécaniques sont : la traction, la dureté Vickers, le pliage, la résilience, ces essais sont parfois complétés par des examens macrographiques (fissuration, pénétration) ou micrographiques (structure de la zone fondue, et de la zone affectée par la chaleur).

• Essais de traction :

Les conditions générales de réalisation (Définitions des caractéristiques de traction, réalisation des éprouvettes, conditions d'exécution de l'essai, exploitation de l'essai) de l'essai de traction sont définies par la norme EN 10002-1.

Suivant l'utilisation prévue des résultats (Caractérisation de l'assemblage, du métal d'apport,...) le prélèvement des éprouvettes peut se faire :

transversalement à la soudure (Norme NF A 89-200,

longitudinalement dans le métal fondu (Norme NF A 89-201)

Il faut noter que la détermination des caractéristiques de traction (Limite de rupture, allongement) est difficile, voire impossible à cause de l'hétérogénéité des structure et des

dimensions faibles des différentes zones (Zone fondue, zone affectée thermiquement,...) sollicitées.

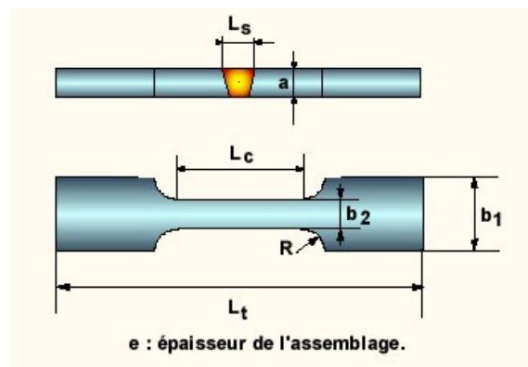


Figure (III.1) : Essais de traction.

- **Essais de pliage**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à l'action de pliage d'un outil composé d'un poinçon et de deux rouleaux (Figure 2)

On distingue :

- le pliage transversal (poinçon parallèle à la soudure),
- le pliage longitudinal (poinçon perpendiculaire à la soudure),
- le pliage envers (poinçon à l'endroit de la soudure),
- le pliage endroit (poinçon à l'envers de la soudure).

La mise en œuvre du pliage est donnée par les normes NF A 89-203 et NF A 89-204. La sévérité de l'essai est fonction de :

de la dimension du poinçon par rapport à l'épaisseur de l'éprouvette,
de l'écartement des rouleaux.

La caractéristique d'un assemblage correct est un angle de pliage de 180°. Une rupture

peut intervenir avant le pliage total dans les cas suivants :
présence de défauts (soufflures, inclusions,...),
métal déposé fragile.

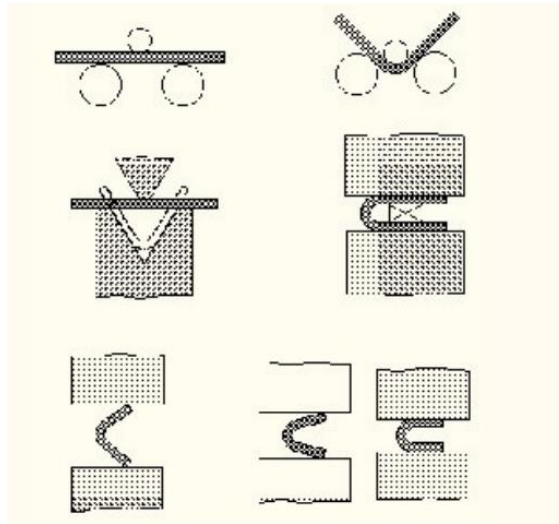


Figure (III.2) : Essais de pliage.

- **Essais de résilience**

L'essai de résilience permet d'évaluer l'aptitude d'un joint soudé de résister aux chocs (ou la sensibilité à la rupture fragile). Plusieurs méthodes permettent d'évaluer cette aptitude, la plus utilisée est la flexion par choc sur éprouvette Charpy définie par la norme EN 10045.

L'essai consiste à soumettre une éprouvette dont la partie centrale est entaillée à une charge d'un mouton pendule tombant d'une certaine hauteur (Figure 3). On enregistre l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette en Joules.

Le prélèvement des éprouvettes est caractérisé par :

la position de l'éprouvette dans l'épaisseur du cordon,

la position et l'orientation de l'entaille par rapport aux différentes zones d'un cordon.

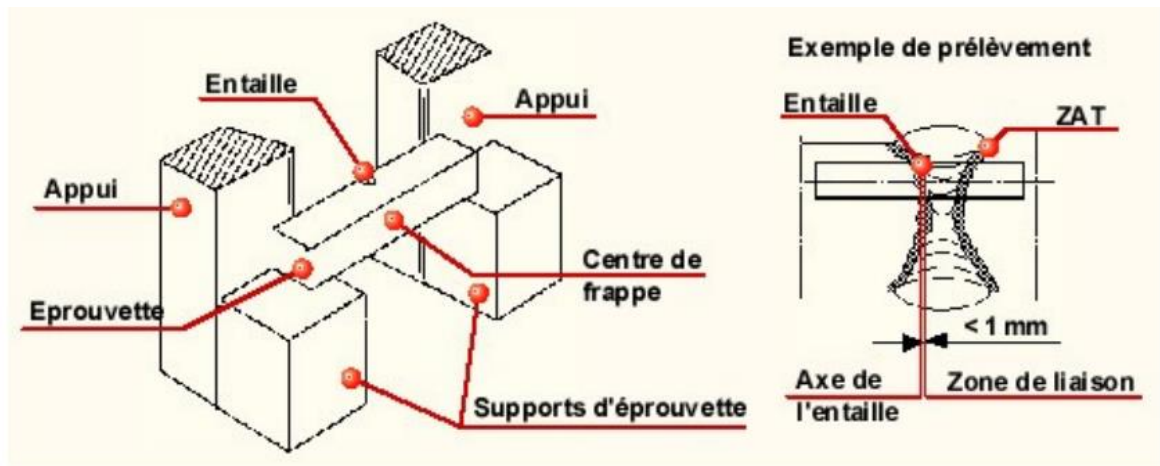


Figure (III.3) : Essais de résilience.

• Essais de dureté

L'essai de dureté sous cordon permet de caractériser les différentes zones d'une soudure. La mesure de la dureté sous cordon (Figure 4) fait l'objet de la norme NF A 81-460.

L'essai consiste à :

prélever par usinage une éprouvette constituée par une section droite du joint considéré,

réaliser un polissage micrographique afin d'identifier la zone à gros grains du métal de base thermiquement affecté,

effectuer, dans cette zone, une série de mesures de dureté Vickers sous une charge de 49,2N .

La valeur à retenir pour la dureté sous cordon est la moyenne des trois valeurs les plus élevées.

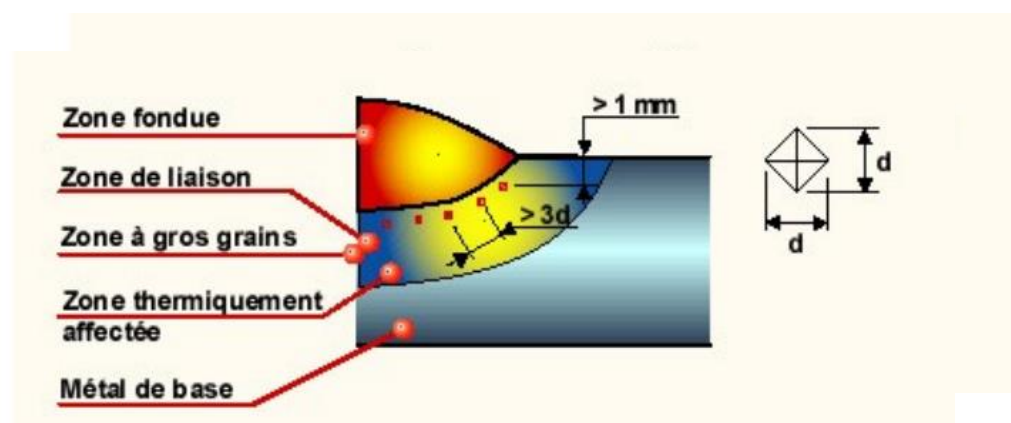


Figure (III.4) : Essais de dureté sous cordon.

- **Autres essais**

En fonction de la destination de la construction soudée, du procédé de soudage des essais spécifiques peuvent être utilisés, comme par exemple :

- Essai de mécanique à la rupture (Mesure du K1c, mesure du COD)
- Essai de résistance à la fatigue
- Essai de déboutonnage pour le soudage par points
- Essai de torsion pour le soudage par points
- Examen macrographique

III.1.3. Examens macrographiques et micrographiques :

Consistent à examiner une section du joint longitudinalement ou transversalement, après polissage et attaque par un produit chimique. L'examen se fait à l'œil (macro) ou au microscope (micro). Ces essais sont indispensables pour l'étude des phénomènes métallurgiques qui se produisent en cours de soudage.

III.2. Contrôles non destructifs :

2.1. Examen visuel :

C'est un examen rudimentaire, simple d'atelier et qui a pour but l'observation attentive du joint à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe, permet de vérifier que la soudure est compacte, et bien pénétrée, de déceler les criques débouchant en surface, les manques ou les excès de métal d'apport, le manque de pénétration, les caniveaux, les morsures et la forme du cordon. Ce contrôle porte souvent de fruits, malgré qu'il se limite aux défauts apparents relatifs à la structure et aux fissures apparentes.

III.2.2. Contrôles par ressuage:

- **Principe**

Le procédé consiste appliquer sur la surface à contrôler, préalablement nettoyée et séchée 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 celui-ci. L'examen est visuel par la lumière naturelle (liquide d'imprégnation coloré) ou par la lumière noire (liquide d'imprégnation fluorescent).

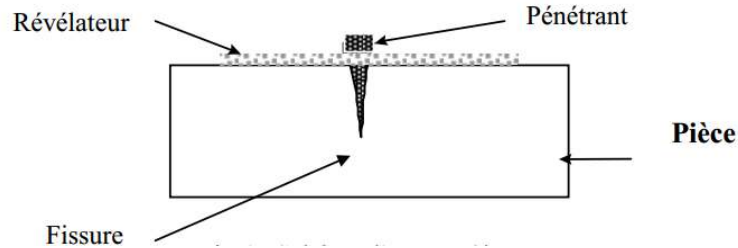


Fig. (III.5). Schéma d'un contrôle par ressuage.

- **Avantages**

- Méthode bon marché
- Facile d'emploi
- Assez rapide
- Sensible (fines criques)
- Toutes les matières sont justifiables de cet examen sauf si la surface est absorbante
- Systèmes portables

- **Inconvénients**

- Uniquement sur des défauts débouchant en surface
- Etat de surface et propreté des pièces primordiales
- Impossible à haute et surtout basse température
- Manipulations multiples
- Nettoyage et éventuellement application d'un produit anticorrosif
- Produits toxiques

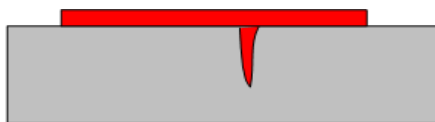


Fig.(III.6)a. application du pénétrant .

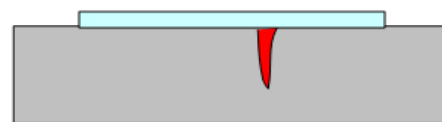


Fig. (III.6).c application du revelateur.

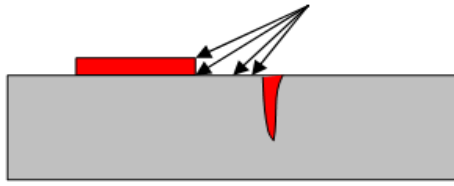


Fig. (III.6).b Enlèvement de l'excès de pénétrant l'indication quand le pénétrant .

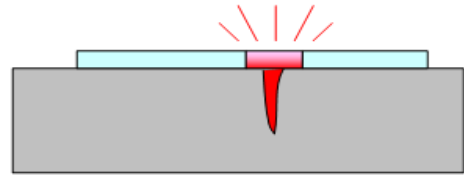


Fig. (III.6).d. Accentuation de S'accumule autour l'ouverture.

III.2.3. Les Ultrasons

- **Principe**

Le procédé consiste à envoyer dans l'échantillon à examiner, une onde ultrasonore créée par un palpeur (traducteur).

Les défauts, manque de matière ou hétérogénéités (appelés communément interfaces) renvoient une partie du faisceau ultrasonore vers le palpeur qui est également récepteur.

Le positionnement du défaut est connu avec précision grâce à la connaissance de la vitesse des ultrasons dans la matière considérée et le temps correspondant à l'aller-retour de l'onde ultrasonore : surface de la pièce, vers défaut, vers surface de la pièce.



Fig(III.7) : Contrôle de pièce fonderie .

- **Avantages**

- Profondeur d'examen importante
- Haute sensibilité aux défauts à différentes profondeurs

- Résultats instantanés
- Automatisable
- Echantillon accessible sur face
- Utilisable sur chantier
- Donne la taille et la localisation du défaut
- **Inconvénients**
 - Personnel très entraîné
 - Défauts en surface difficiles à voir
 - Utilisation d'un couplant
 - L'orientation des défauts a un rôle très important sur leur détectabilité
- **Les méthodes d'échographie:**

Visualisation du type A scan

Dans la représentation de type A:

La ligne horizontale représente le temps écoulé ou la distance parcourue par l'onde US.

La hauteur de l'écho représente la quantité d'énergie US réfléchi (taille et orientation du défaut).

C'est la méthode la plus couramment utilisée en contrôle industriel.

Le contrôle s'effectue par contact direct du palpeur sur la pièce à contrôler.

L'onde envoyée dans la pièce à contrôler en se réfléchissant sur la face opposée est récupérée par le palpeur qui renvoie une impulsion à la chaîne de mesure (poste US).

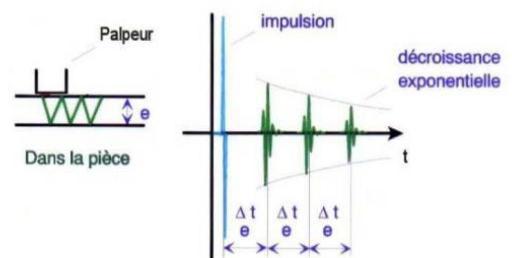


Figure (III.8) : la méthode d'échographie.

Visualisation du type A scan : Exemple

de matériel adapté au contrôle manuel

Epoch 4plus de marque Panam trics

Capacité de stockage: 5000 A scan

Autonomie: 8heures sur batteries

Sauvegardé pendant un control



Fig(III.9) : contrôle manuel .

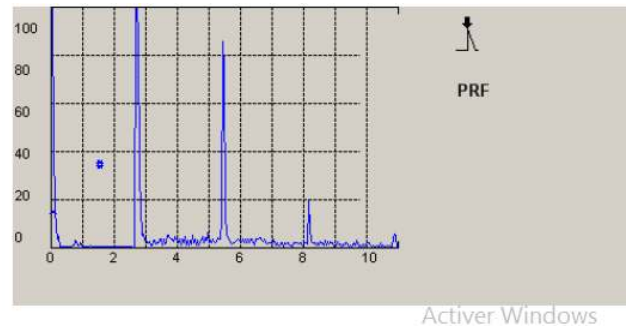


Fig (III.10): Exemple de A scan pouvant être sauvegardé pendant un control.

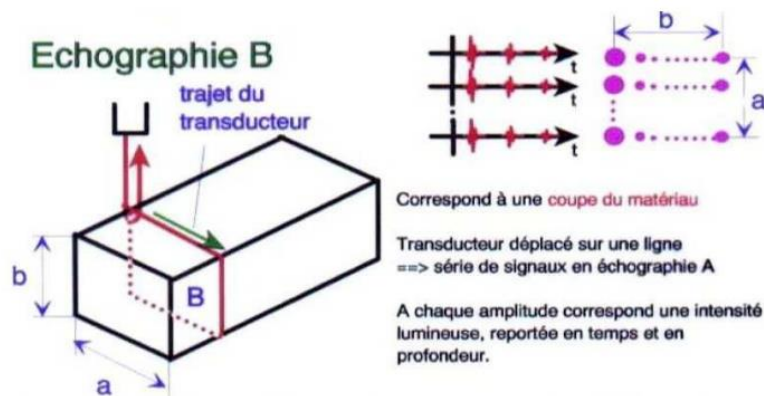
- **Les méthodes d'échographie:**

Visualisation du type B scan :

Il s'agit d'une représentation en coupe de la pièce contrôlée.

Le transducteur effectue des tirs US tout au long du trajet.

Chaque amplitude est enregistrée et une cartographie de la coupe peut être établie.



Fig(III.11):Exemple de matériel adapté au contrôle manuel et automatique.

L'image en coupe est directement obtenue à l'aide d'un palpeur multiéléments (au nombre de 16) Ceux-ci sont excités l'un après l'autre ce qui permet d'obtenir directement le balayage de la zone contrôlée.

Avantage :

Changement rapide de l'angle de réfraction Du palpeur (de 35 à 80°).

Exemple de capture d'écran pouvant être réalisée



Fig(III.12) : Comparaison des méthodes de contrôle par ultrasons et Rx (pied de perceuse à colonne).

III.2.4. La Magnétoscopie

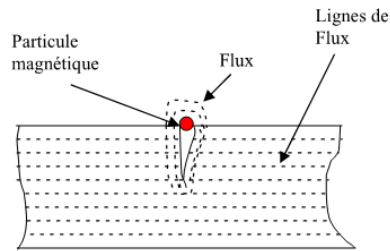
• Principe

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

La détection de ces fuites se fait au moyen d'une liqueur magnétique noire ou fluorescente (oxyde de fer magnétique en suspension dans un liquide) en contact immédiat avec la surface de la pièce.



Fig(III. 13).Banc de magnétoscopie.



Fig(III.14) : Principe du contrôle par magnétoscopie.

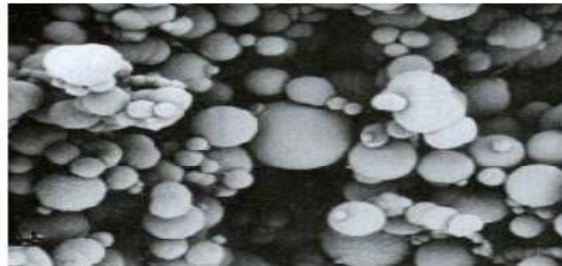


Figure (III.15): Particules magnétiques vues par un microscope optique.

- **Avantages**

- Méthode sensible pour les défauts de surface ou sous-jacents (maxi 8mmmm de la surface)-
- Bon marché
- Facile d'emploi
- Pas de calibration nécessaire
- Insensible aux faibles épaisseurs de protection.
- Système portable

- **Inconvénients**

- Exclusivement sur métaux ferromagnétiques
- Pas d'information en profondeur
- Propreté échantillon avant et après examen
- Démagnétiser les pièces
- Possibilité de « brûler » les contacts sur les pièces
- Nécessité de définir un mode de magnétisation en fonction des défauts recherchés

III.2.5. Les Courants de Foucault

• Principe

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

Un défaut, une variation de géométrie, de conductibilité (nuance du matériau) vont influencer sur ces courants de Foucault, en déformer le champ. Cette distorsion, donc sa cause, est détectée par le changement de l'impédance électrique du circuit.

HF: de 10 à 100kHz, détection des défauts en peau (q mm)

BFBF: $\leq 1000\text{Hz}$, tri matière, tri dure
profondeur de trempe....



Figure (III.16): Tri matière (bielle).

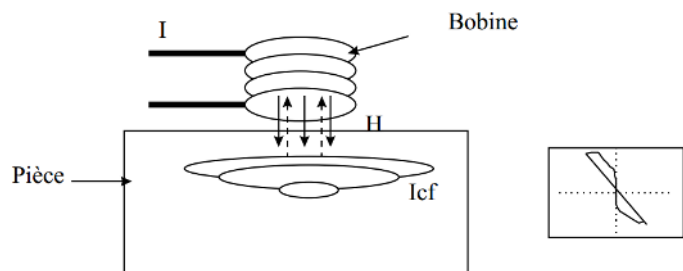


Figure (III.17) : Schéma du contrôle par COURANT DE FOUCAULT.

• Avantages

- pas de contact nécessaire
- contrôle «in line »à haute vitesse (1010 m/s parfois !)
- grande sensibilité (petits défauts)
- ferreux et non ferreux
- donne des informations sur la dimension des défauts

- **Inconvénients**

- exclusivement sur métaux
- pénétration <6mm
- haute sensibilité donc : «rejets abusifs »possibles
- méthode par comparaison
- sensible aux parasites et à la température

III.2.6. La Radiologie Industrielle

- **Principe**

Les rayonnements pénétrants générés par la source sont plus ou moins absorbés dans la pièce à contrôler. Un détecteur de rayonnement (film, écran...) convertit l'image radiante invisible en image visible.

(télécommande électrique)

Les sources de rayonnement sont principalement des tubes à rayon X et des isotopes radioactifs cobalt 6060, iridium 137 etc



Figure(III.18): Porte source Iridium.

- **Avantages**

- Défauts internes sur de grandes profondeurs (en rayonnement gamma)
- Large gamme des matériaux Film : preuve
- Scopie : automatisation
- Tous défauts (porosités, fissures...)

- **Inconvénients**

- Prix de revient élevé (film)
- Accès sur deux faces

- Défauts linéaires non visibles perpendiculaire au faisceau
- Microfissures non vues
- Protection due au danger des rayonnements ionisants
- Méthode film assez lente



CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE



IV -1. Introduction :

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

Cela se traduit par l'étude micrographique du joint, de la zone affectée thermiquement et du métal de base, étude complétée par le relevé de la micro dureté dans les mêmes zones pour confirmer les modifications structurales et par les essais de résilience, on doit pouvoir connaître la ténacité du métal d'apport et en savoir sur l'aptitude à la fissuration et ses mécanismes.

Parmi les objectifs partie relative au contrôle non destructif sera purement quantitative, reliant la taille de la fissure par rapport à l'épaisseur de la pièce au signal récupéré au niveau des récepteurs seulement on est confronté à deux problèmes, le premier est relatif à l'interprétation des signaux, car on ne peut différencier une fissure d'un autre obstacle en soudage surtout s'il est minuscule, cela dépend des compétences de l'opérateur, le deuxième c'est que l'obtention d'une fissure est purement du sort du hasard qu'on ne peut dimensionner selon nos besoins non plus. Pour surmonter ces obstacles on a pensé à travailler sur des fissures de formes facilement perceptibles qu'on dimensionne selon les besoins de notre étude et l'objectif serait donc de valider une technique de perception et dimensionnement des défauts, qu'il faut penser à l'améliorer dans des travaux futurs.

IV-2. Identification du matériau :

IV-2.1. Choix du métal de base :

Le choix de métal de base le **E36** est motivé par deux raisons :

- sa bonne soudabilité
- sa résistance à la corrosion.

Acier de construction générale conçu pour les applications nécessitant une très bonne soudabilité.

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE

IV-2.2. Caractérisation du métal de base

IV-2.2.1. Analyse chimique

Tableau (IV.1) : Composition chimique du métal de base.

Eléments	C %	Mn %	S %	Si %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Al %	Cu %
Pourcentages Massiques	0.171	1.335	0.006	0.476	0.006	0.027	0.022	0.030	0.042	0.018

IV-2.2.2. Caractéristiques mécaniques :

Tableau (IV. 2) : Caractéristiques mécaniques du métal de base.

Caractéristiques	σ_m (N/mm ²)	σ_e (N/mm ²)	A % min	Hv (N/mm ²)	Kv à -30°C (J/cm ²)
Valeur	520 - 620	360- 420	16 -22	155 - 185	45 - 75

IV-3. Identification du métal d'apport

Tableau (VI. 3) : Composition chimique du métal d'apport.

Eléments	C %	Mn %	Si %	P %	Cr %	Al %	Cu %	S %
Pourcentages Massiques	0.13 max	1.9 max	1.2 max	0.025 max	-	-	0.3 max	0.025 Max

Tableau (IV.4): Caractéristiques mécaniques du métal d'apport.

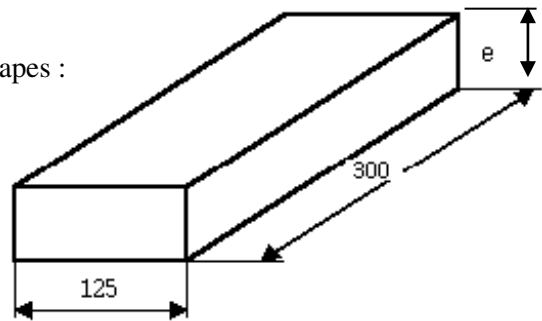
Caractéristiques	σ_m (N/mm ²)	σ_e (N/mm ²)	A % max	Kv à -30°C (J/cm ²)
Valeur	550 – 620	420- 520	26 -32	>70

IV-4. Découpage et usinage des tôles

Nous avons prélevé sur des chutes de tôles des éprouvettes de chaque épaisseur de dimension 300x 125, (Fig.IV.1).

Pour la préparation des éprouvettes, on passe par trois étapes :

- préparation et découpage des tôles.
- Partie de construction ou de soudage.
- Partie usinage.

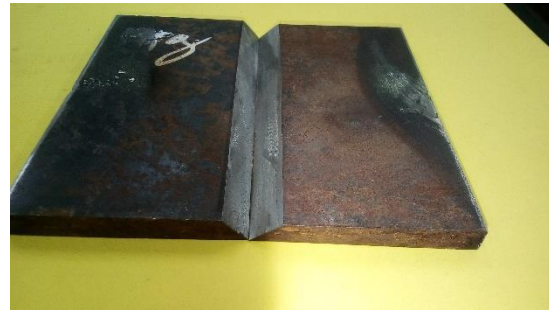
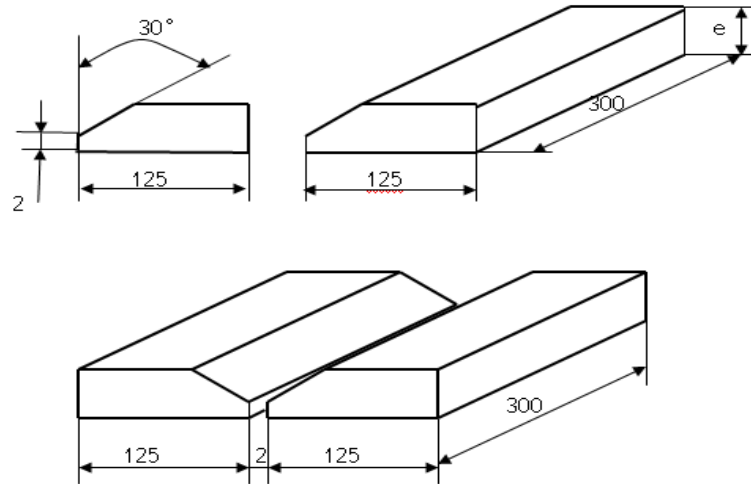


Fig(IV.1) Dimensions des Tôles.

IV-4.1. Préparation des tôles :

La première partie consiste en la préparation des tôles à assembler ; pour notre nuance du métal de base E36, le découpage est réalisé à froid pour obtenir des tôles de dimension 300mm de longueur et de 130mm de largeur, après le découpage on obtient trois types de tôles de différentes épaisseurs : 10mm, 12mm, 15mm. Le découpage est fini, on réalise un chanfrein d'un angle de 30° dans une machine à chanfreiner à froid

‘ PULLMAX X91’. Pour les différentes épaisseurs 10mm, 12mm, 15mm les dimensions et la forme des tôles (finis) sont présentée en (figureIV-2) ci-dessous.



Fig(IV.2) Tôles avant soudage.

Pour éviter toute contamination du bain fondue au cours du soudage, un décapage mécanique suivi d'un nettoyage chimique a été effectué sur les bords des joints à souder.

IV-4.2. Partie construction ou soudage

La seconde partie consiste à régler les paramètres de soudage dont :

- Nous avons utilisé une protection gazeuse de 100%CO₂ avec un débit de 16 l/mn.
- Le fil utilisé pour le soudage est un fil plein SG3 de diamètre Ø 1,2 mm
- La vitesse d'avance du fil d'apport est réglée par l'opérateur de telle manière à obtenir un bon arc. Avant de procéder au remplissage, on réalise le pointage des tôles à assembler pour éviter d'éventuelles déformations dues au retrait. Il est à noter qu'on a cinq types d'éprouvettes :
- La première éprouvette est l'assemblage de deux tôles de 15mm d'épaisseur dont le soudage est réalisé sans préchauffage.

- Le deuxième type d'éprouvette est l'assemblage de deux tôles de 12mm d'épaisseur dont le soudage est réalisé sans préchauffage.
- Le troisième type d'éprouvette est l'assemblage de deux tôles de 10mm d'épaisseur dont le soudage est réalisé sans préchauffage.

VI-4.2.1. Exécution des joints soudés

Pour l'exécution des joints soudés, on fait le choix de la tension et de l'intensité du courant de soudage suivant l'épaisseur de la pièce à souder. Il est à noter qu'on laisse un jeu de l'ordre de 1,5 à 2,5mm entre les deux tôles à assembler, pour cette opération on doit utiliser les valeurs indiquées dans le tableau 7.5.

Après l'exécution de l'opération de soudage on obtient deux tôles assembler comme indique la (figure IV.3).

Type d'éprouvette	Passe de pénétration			Passe de chargement		
	Tension U [V]	Intensité I [A]	Energie [KJ/cm]	Tension U [V]	Intensité I [A]	Energie [KJ/cm]
Type a 15 x 15	42,5	265	23,65	48	314	31,65
Type b 12 x 12	35,5	186	13,83	42,5	265	23,65
Type c 10 x 10	32	130	8,7	41	210	18

Tableau (IV.5) : Energie équivalente en fonction de l'épaisseur.



Fig(IV.3) Tôles après soudage .

IV -5. Contrôle les tôles soudées :

V-5. 1. Généralités :(contrôles non destructifs « CND »)

Après la réparation, on rencontre parfois des défauts dans les pièces réparées tel que : manque de pénétration, manque de fusion, inclusions, fissures et micro fissures ainsi que les caniveaux, qui auront des conséquences néfastes sur la durée de vie de la pièce.

Les fissures qui sont en quelque sorte des cassures fines localisée s'amorcent à chaud ou à froid, la micro fissure sur des fissures à l'échelle microscopique. Ces défauts ont tendance à ce propager dans le métal et constituent des entailles appropriés à l'amorçage d'une rupture.

Les caniveaux sont des sillons apparaissant du raccordement des soudures, ces défauts sont pris en compte lorsqu'ils sont profonds.[15]

La détection de tout ces défaut et l'évaluation de leur gravité est indispensable, et les contrôles non destructifs « CND » sont les plus utilisés à cette fin, parmi elles nous trouvons :

- ☐ Contrôle visuel.
- ☐ Contrôle par ressuage« PT».
- ☐ Contrôle par magnétoscopie «MT».
- ☐ Contrôle par ultrasons«UT».

V -5. 2. Contrôle visuel:

Avant les essais non destructifs on doit procéder à un contrôle d'aspect. Il comporte l'examen visuel de la totalité de la pièce sous les aspects suivants :

- ☐ Etat de surface.
- ☐ Défauts visibles à l'œil.
- ☐ Conformité aux documents de la commande.

L'examen à l'œil de l'endroit de la soudure peut donner un certain nombre de renseignements précieux: régularité d'aspect du métal déposé, pénétration, dénivellation des bords, caniveaux, excès ou manque de métal, fissures..... On peut être conduit, pour déceler certains

défauts peu visibles, à utiliser des loupes. Pour l'examen intérieur des corps creux, on utilise des endoscopes ; appareils comprenant des jeux de miroirs. [15]

IV -5. 2.1. Examen Contrôle visuel : voir (figure IV-8).

IV -5. 2.2. Observations visuelles :

Les contrôles après soudure il comporte l'examen visuel de la totalité de la pièce : ni pas défauts de surface allouer en passe le Control.



Fig. (IV-4) : pièce après la soudeur.

IV -5.2. Contrôle par ressuage « pt » :

A. Conditions d'examen :

A.1. Condition de la surface :

La préparation de la surface est par meulage, usinage, ou d'autres méthodes qui peuvent être nécessaire lorsque des irrégularités de surface peuvent masquer les discontinuités inacceptables. Avant chaque examen par ressuage, la surface à examiner doit être sec et exempt de toute saleté (graisse, rouille, peluches, flux de soudage, projections de soudure, peinture, huile) et autres substances étrangères qui pourrait dissimuler les ouvertures de surface ou interférer avec l'examen afin d'avoir des résultats satisfaisants.

A.2. Exigences de température :

La température de la substance de pénétration et de la surface de la pièce à examiner ne doit pas être inférieure à 10 ° C, ni supérieures à 52 ° C tout au long de la période d'examen. Le chauffage local ou le refroidissement est autorisée à condition que la température de la pièce reste dans la plage de 10 ° C à 52 ° C pendant l'examen. Où il n'est pas pratique de se conformer à ces limites de température, d'autres températures et les durées peuvent être utilisés, la procédure d'examen à la gamme proposée inférieure ou supérieure la température doit être nuancée selon code ASME, section V, article 6, par. T-653.

B. Matériel :

Tous les produits de ressuage utilisés pour l'examen doivent avoir un certificat de lot, indiquant la composition chimique nécessaire de chlore, de fluor et de soufre selon ASME Sec. V. Le matériel d'examen doit être fourni avec certificat de qualité, de fabrication récente, et de même marque. [16]



Fig. (IV-5) : Matériel utilisés dans le ressuage.

C. Mode opératoire :

C.1. Pré-nettoyage :

Toutes les surfaces à examiner doivent être propres et secs avant l'application du pénétrant.

La surface doit être exempte de toutes régularité qui peut nuire aux résultats d'examen (graisse, rouille, peluches, flux de soudage, projections de soudure, peinture, huile, etc.).

C.2. Séchage après nettoyage :

Il est essentiel que la surface à examiner doit être complètement sec après le nettoyage. Le séchage est généralement réalisé par exposition à la température ambiante. Si nécessaire, de l'air chaud pulsé ou un autre procédé peut être utilisé pour chauffer les pièces à sécher. [16]



Fig. (IV-6) : nettoyage les pièces.

C.3. Application du pénétrant :

Le pénétrant peut être appliquée par pulvérisation. Le temps d'imprégnation minimum est de 5 minutes où recommandé par le fabricant du pénétrant.



Fig. (IV-7) :Application du pénétrant .

C.4. Suppression de l'excès du pénétrant :

Après le temps d'imprégnation spécifié écoulé, l'excès de pénétrant restant sur la surface doit être enlevé en utilisant un chiffon blanc propre sec non pelucheux ou un papier absorbant. En recommence l'opération mais cette fois le chiffon est imbibé par du solvant avec une légère application. Afin de minimiser le retrait du pénétrant des discontinuités, des précautions doivent être prises si en utilise de l'eau la pression ne doit pas dépasser 2 bars et éviter l'excédent du solvant avant l'application du révélateur.

C.5. Application du révélateur :

Le révélateur ne sera appliqué que sur une surface sèche. Il doit être appliqué par pulvérisation et à 25 cm de la surface examiner. L'épaisseur du revêtement doit être uniforme adaptée car

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE

l'épaisseur du revêtement insuffisante ne peut pas retirer le pénétrant des discontinuités, à l'inverse, l'épaisseur du revêtement excessive peut masquer des indications inacceptables. Temps de révélateur doit être de 10-15 minutes ou comme recommandé par le fabricant du révélateur.

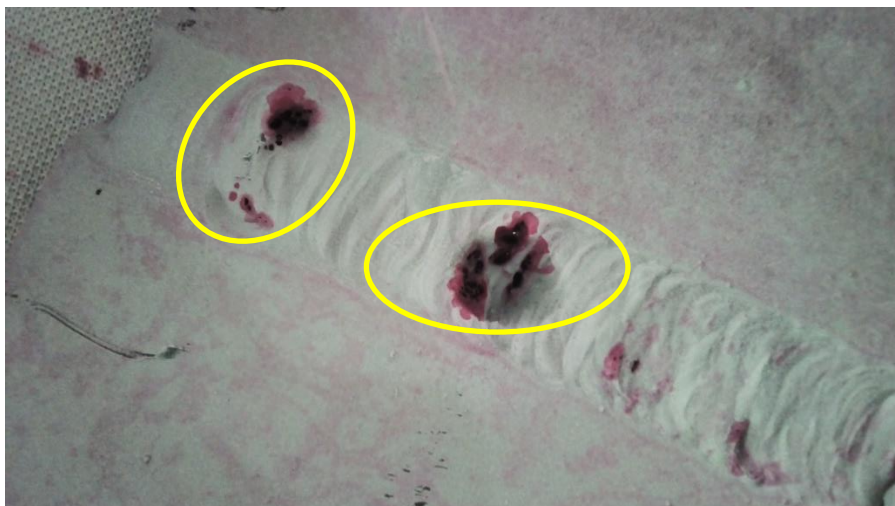


Fig. (IV-8) : Application du révélateur.

OBSERVATION :

- Présence de quelques soufflures Sur Le Joint Soudure. (Voir photos ci-joints)
- Le controle par ressuage a révéle des quelques soufflures sur Le Joint Soudure

Piece N°2



Piece N°3



Fig. (IV-9) Piece N°2 et N°3 resultat de Contrôle par ressuage

C.6. Interprétation :

La surface doit être soigneusement observé lors de l'application du révélateur et les résultats doivent être interprétés au 7 ~ 60 minutes après l'application du révélateur ou que recommandés par le fabricant du révélateur. La surface sous inspection doit être éclairée par la lumière naturelle ou artificielle selon ASME sec V suffisante pour interpréter clairement les résultats. Si de fausses indications sont soupçonnées, réexaminer cette partie.

D. Evaluation :

Toutes les indications de surface pertinente doivent être relevées et évaluées conformément selon les codes, norme et les spécifications d'acceptation ou spécifications applicables émises par le mètre de l'ouvrage.

Un PV de contrôle par ressuage doivent être préparés pour examen et doivent être tractables à chaque type des matériaux à contrôler. Le PV de contrôle par ressuage est composé d'au moins toutes les informations en annexe-1 "Procès-Verbal de Contrôle par Ressuage" Tous les pvs d'origine doit être remis au mètre de l'ouvrage après l'achèvement et dont une copie tenue par un pour la documentation.

E. Nettoyage final :

Après l'achèvement de l'opération. La surface examinée doit être bien nettoyée de tous résidus de produits du ressuage.

IV -5. 3. Contrôle par magnétoscopie :

Cette procédure décrit les méthodes et les exigences pour l'examen magnétoscopique (MT) en utilisant les techniques électromagnétiques.

La méthode de l'examen magnétoscopique s'applique pour les matériaux ferromagnétiques L avec une température ne dépassant pas 135 ° F (57 ° C). L'examen de particules magnétiques peut être effectué au lieu d'un examen par ressuage ou sur demande de l'inspecteur.

La méthode de l'examen magnétoscopique est appliquée pour détecter les fissures et autres discontinuités sur les surfaces des matériaux. La sensibilité est la plus élevée pour les discontinuités de surface et diminue rapidement avec l'augmentation de la profondeur de discontinuités de profondeur

En principe, cette méthode consiste à magnétiser une zone à examiner, et à appliquer des particules ferromagnétiques (moyennes de l'épreuve) à la surface où le champ magnétique est forcé hors de la pièce et au-dessus de discontinuités pour provoquer un champ de fuite qui attire les particules.

Les modèles de particules sont généralement caractéristiques du type de la discontinuité a détectée quelle que soit la technique utilisée pour produire le champ magnétique dans l'objet à examiner.

Pour une efficacité optimale dans la détection de tous les types de discontinuités, chaque zone doit être examinée au moins deux fois, avec des lignes de flux au cours d'un examen étant approximativement perpendiculaire aux lignes de flux au cours de l'autre.

B. Equipements :

B.1. Technique de prod :

Pour la technique de prod, l'aimantation est réalisée par des contacts électriques de type prod portables pressés contre la surface de la zone à examiner. Pour éviter un arc électrique, un interrupteur de commande à distance, qui peut être intégré dans les poignées de prod, doit être prévu pour permettre le courant à appliquer après les prods ont été correctement positionné.

B.2. Technique de magnétisation longitudinale :

Pour cette technique, l'aimantation est effectuée par un passage de courant à travers une bobine multi-tours fixes (ou câbles) qui est enroulé autour de la partie ou section de la pièce à examiner. Ceci produit un champ magnétique longitudinal parallèle à l'axe de la bobine. Si la bobine pré rembobiné est utilisé, la pièce doit être placée près du côté de la bobine lors de l'inspection. Cela revêt une importance particulière lorsque l'ouverture de la bobine est plus de 10 fois la surface en coupe transversale de la pièce.

B.3. Technique d'aimantation circulaire :

- La procédure de magnétisation pour cette technique, l'aimantation est effectuée par passage de courant à travers la partie à examiner. Le champ magnétique appliqué doit avoir une résistance suffisante pour produire de satisfaisantes indications, mais ne doit pas être si fort qu'il provoque le masquage des indications pertinentes par des accumulations non pertinentes de particules magnétiques et Selon les facteurs qui influencent sur l'intensité du champ magnétique requis (la taille, la forme et la perméabilité du matériau à examiner). Cela produit un champ magnétique circulaire qui est sensiblement perpendiculaire à la direction de circulation du courant dans la pièce.

- Le courant de magnétisation direct ou rectifiés (redressé demi-onde ou pleine onde redressée) courant magnétisant doit être utilisé.
- Le courant doit être de 300 ampères / dans. (12 A / mm) à 800 Ampères / in. (31 A / mm) de diamètre extérieur.
- Les parties avec des formes géométriques autres que ronde avec la diagonale la plus grande coupe transversale dans un plan perpendiculaire à l'écoulement du courant détermine les pouces à être utilisé dans (1) ci-dessus.
- Si les niveaux actuels requis pour (1) ne peuvent pas être obtenus, le maximum pouvant être obtenu en cours doivent être utilisés.

B.4. Technique de culasse :

Pour cette technique, alternatif ou culasses électromagnétiques en courant continu, ou culasses d'aimants permanents, doivent être utilisés.

B.5. Technique d'aimantation multidirectionnelle :

Pour cette technique, l'aimantation est réalisée par des blocs d'alimentation à haute intensité de courant fonctionnant autant que trois circuits qui sont alimentés à la fois en succession rapide, l'effet de ces courants de magnétisation alternés rapidement est de produire une aimantation globale de la partie à examiner dans de multiples directions.

B.6. Particules magnétiques :

Les particules ferromagnétiques finement divisées utilisées pour l'examen doivent satisfaire aux exigences suivantes.

B.7 Caractéristiques des Particules :

Les particules magnétiques doivent avoir une perméabilité élevée pour permettre une bonne magnétisation et attraction aux discontinuités.

Les particules devraient être non toxique exempte de rouilles, graisses, peintures et d'autres matériaux délétères qui pourrait altérer leur utilisation.

Mode opératoire :

1-Utilisation des particules visible (contraste couleur):

En règle générale, dans la journée ou dans une zone où la surface d'examen est suffisamment éclairée avec une intensité de 100 fc (1000Lx) ou plus, les particules humides visibles (contraste couleur) doivent être utilisés comme un moyen d'examen, et la procédure suivante doivent être suivie :

- nettoyer la surface à examiner pour l'amélioration du contraste des couleurs, si nécessaire.
- Appliquer une couche de revêtement blanc à la surface d'examen.
- Appliquer un champ magnétique par une culasse électromagnétique à la zone d'examen.
- Appliquer la solution des particules magnétiques sur la zone (technique continue).



Fig. (IV-10) : Matériel utilisés dans la magnétoscopie.

- Tenir le champ magnétique pendant 1-3 secondes pour permettre la migration des particules avant le retrait de la culasse.
- Examiner les indications de surface sur la zone soigneusement pour détecter les défauts.
- L'espace entre les deux culasses est 120mm à 200mm ou comme l'exigence de la spécification de l'équipement, si l'espace est dépassé ci-dessus, une démonstration sera faite pour vérifier le levage est satisfait à l'exigence de ce document.



Fig. (IV-11) : l'examen magnétoscopique (MT).

2- Pendant l'opération, il faut noter :

Pour chaque zone d'examen, les étapes ci-dessus, (mode opératoire de 1 à 3) sont répétées au moins deux fois avec la culasse positionné dans des orientations telle qu'ils soient perpendiculaires les uns aux autres pour assurer la détection des défauts dans une direction différente est délectable.

La zone d'examen doit avoir un recouvrement suffisant pour obtenir 100% de sensibilité requise.

CONCLUSION :

- Présence des fissures Sur Le cordon Soudure de la pièce N°3. (Voir photos ci-joints)
- Le contrôle par magnétoscopie a révélé des fissures sur Le cordon Soudure de la pièce N°3



Fig.(IV-12) resultat de Contrôle par magnétoscopie.

Interprétation :

Toutes les discontinuités sur ou près de la surface est indiqué par examen medium est pertinente.

Des précautions doivent être prises pour distinguer une indication pertinente ou non pertinente et fausse indication.

Si cela est nécessaire la surface sera nettoyé un réexamen doit être effectué.

Les grands zones ou l'accumulation de particules qui pourraient masquer des indications de discontinuités sont interdits, et ces zones doivent être nettoyés et réexaminées.

Seule une personne qualifiée de niveau II ou de niveau III est autorisé à interpréter les résultats des examens.

Evaluation

Toutes indications pertinentes doivent être évaluées en fonction des normes et codes d'acceptation applicable de l'examen ou exigences du client.

Démagnétisation

Dans la fin de l'examen La démagnétisation est effectuée pour l'objet à examiner si le magnétisme résiduel pourrait interférer avec le traitement ou l'utilisation ultérieure de cet objet.

IV.5.4. Contrôle par ultrasons «UT» :

IV.5.4.1: Émission et réception des ultrasons :

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

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

- **Un élément d'excitation ou de commande :**

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

➤ **Un générateur d'impulsions :** Il délivre l'impulsion grâce à laquelle le palpeur sera excité pour engendrer les oscillations mécaniques.

➤ **Un palpeur (ou des palpeurs) :**

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

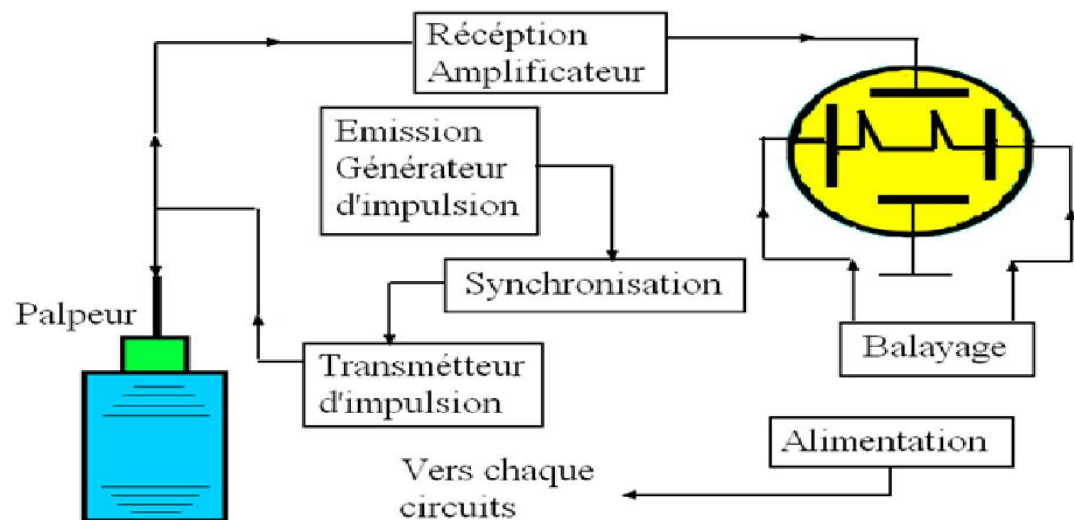
Les palpeurs peuvent être au même temps émetteur-récepteur ou séparés.

➤ **Un amplificateur :**

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

➤ **Un tube cathodique (ou écran de visualisation) :**

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



Fig(IV.13): chaines de mesure de contrôle par ultrason.

IV.5.4.2. Technologie des palpeurs :

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

Un palpeur est constitué principalement de quatre éléments :

- La pastille piézoélectrique
- L'amortisseur
- Les connections électriques
- Le boîtier

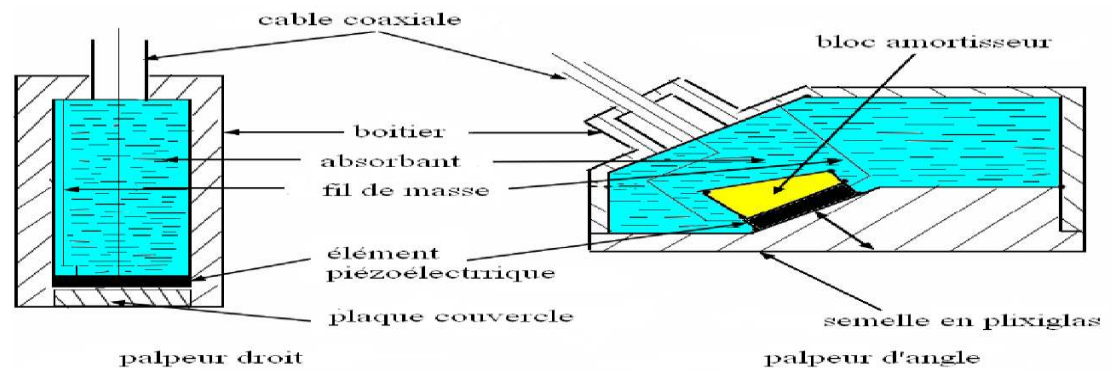


Fig (IV.14) : élément des palpeurs.

IV.5.4.3. Les types des palpeurs :

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

- Palpeurs droits ou normaux
- Palpeurs doubles monoblocs
- Palpeurs d'angle

IV.5.4.4. Le choix du palpeur :

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

- **type de palpeur et son élément actif :**

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

- **choix de la fréquence :**

La fréquence du palpeur est subordonnée au contrôle à effectuer :

- ✓ pour les épaisseurs faibles ou les défauts très fins on utilise les fréquences élevées.

- ✓ pour les matériaux à gros grains, on choisit les fréquences faibles pour éviter le phénomène de diffusion.

IV.5.5. Méthode de contrôle :

IV.5.5.1 : Méthodes par réflexion ou par écho :

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

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

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

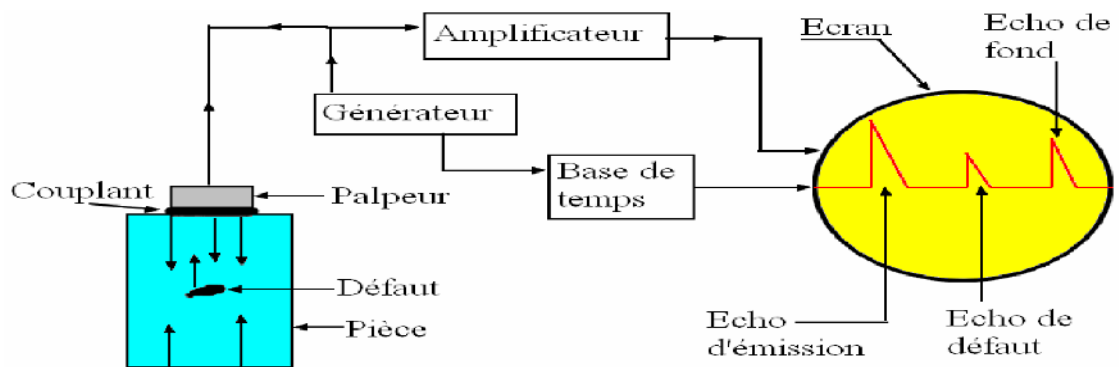


Fig (IV.15) : méthode de contrôle par réflexion.

IV.5.5.2 : Vérification des appareillages :

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

IV.5.5.3 : Choix du milieu de couplage :

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

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

IV.5.5.4 : Les couplant les plus utilisés

- Huiles.
- Graisses.
- Pâtes de contact.
- Colles additionnées d'eau.
- Gel thixotropique.
- Eau additionnée ou non d'agent mouillant

IV.5.6 : Paramètres à régler avant l'examen :

a) Détermination de l'axe de soudure :

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

b) Volume à contrôler :

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

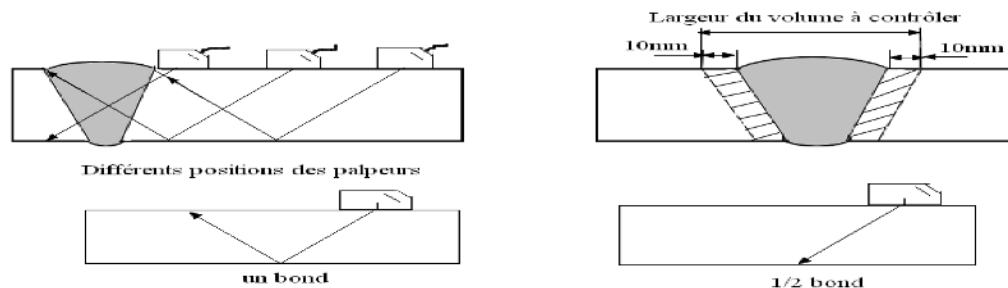


Fig (IV.16) : le volume à contrôler.

c) Préparation des surfaces d'examen :

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

IV.5.6.1 : Evaluation des indications :

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

- La détermination du pouvoir réfléchissant maximum.

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

IV.5.7 : Les matériels utilisés :

- **Appareil à ultrasons** : Sonatest D-10+.
- **Producteur** : sofranel « Allemagne ».
- **Traducteurs** : -palpeur droit « OL », Ø10, 4MHz.
-palpeur à angle « OT », « 45°, 60°, 70° », 4MHz, 8×9
- **Blocs d'étalonnages** : V1 type B.
- **Blocs de référence** : ce sont des blocs réalisés dans un matériau présentant des caractéristiques acoustiques voisines, qui présentent des réflecteurs artificiels tels que :
 - des trous cylindriques à fond plat,
 - des génératrices de trous cylindriques,
 - des rainures ou entailles.



Fig(IV.17) :matériel utilisé.

IV.5.7.1 : Vérification des caractéristiques des palpeurs :

➤ Palpeur droit :

IV.5.7.1.1 : Détermination de la zone de silence ou la zone morte :

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

Pour déterminer la zone morte de notre palpeur droit nous avons utilisé une cale à gradins.

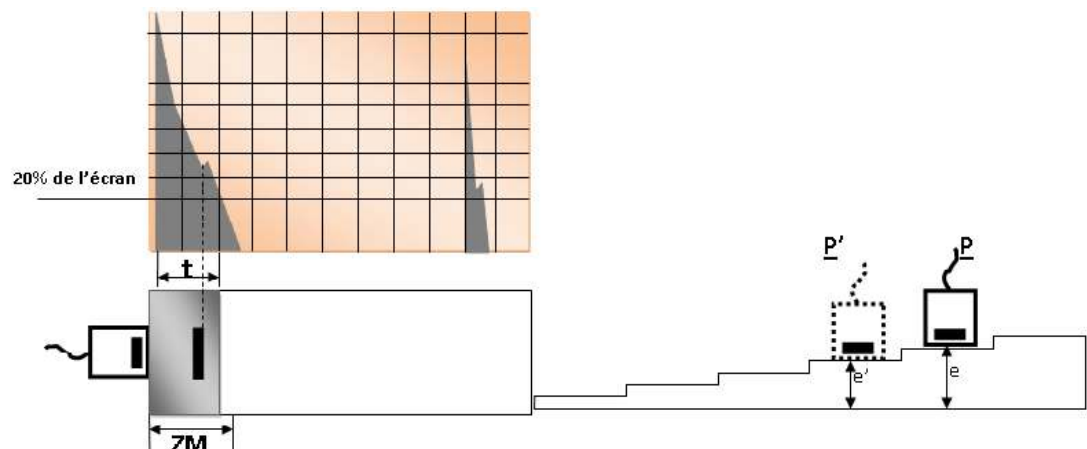
« t » correspond à la durée de l'émission. Pendant ce temps, tout écho correspondant à un défaut ne sera pas visualisé, donc non détecté, puisque son écho sera superposé à celui de l'émission.

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

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

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

NB : Si un contrôle à 100% de la pièce est exigé, c'est un examen près de la surface doit être effectué alors un « relais » peut être adapté au palpeur ou la technique par immersion doit être adoptée.



Fig(IV.18) : détermination de la zone morte.

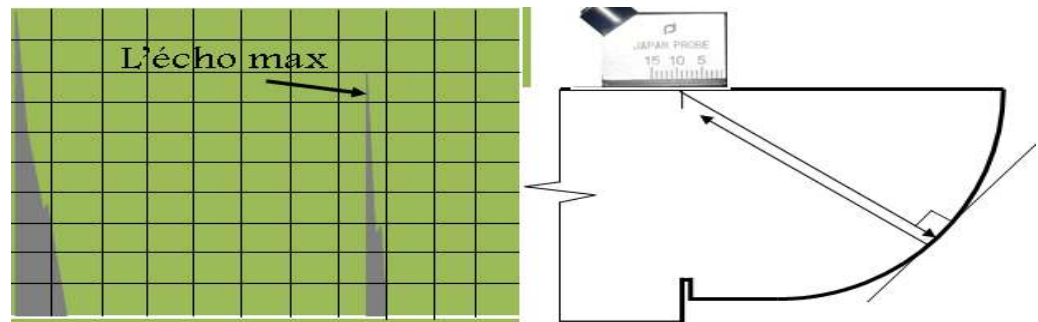
Pour notre palpeur la zone de silence égal à 4mm.

➤ **Palpeur à angle :**

IV.5.7.1.2 : Détermination du point d'émergence (ou d'incidence) :

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

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



Fig(IV.19) : détermination du point d'émergence.

Dans notre cas nous avons trouvé les points d'émergences suivantes :

Palpeur à angle (45°) : PE=14mm.

Palpeur à angle (60°) : PE=9mm.

Palpeur à angle (70°) : PE=13mm.

Avec : « PE » : la point d'émergence.



Fig (IV.20) : Déterminer le point d'émergence de Palpeur (OT 70°).

IV.5.7.2 : Choix du Palpeur :

$D \leq 20\text{mm}$: angle 70°

$20 \leq D \leq 35$: angle $70^\circ + 60^\circ$

$D > 35$: angle $45^\circ + 60^\circ$

L'épaisseur de la pièce < 20mm donc le Palpeur utilisée est : Palpeur 70°



Fig(IV.21): Choix le Palpeur (OT 70°).

IV.5.7.3 .Exécution du contrôle :

Après avoir réussi à étalonner nous allons procéder au contrôle d'une pièce soudée, mais avant le commencement et afin de faciliter le travail il y a des paramètres à déterminer tels que le recule max et l'échelle minimale.

IV.5.7.4. L'échelle minimale (l'étendu) :

C'est le parcours sonore minimal à afficher sur l'écran de visualisation et il est défini par la relation suivante [1] :

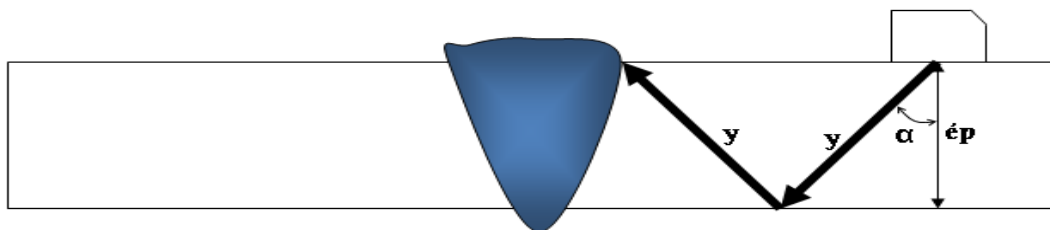
Etendu = 1.25 X (un bond complet)

Un bon complet = 2. y

$$y = \frac{ép}{\cos \alpha} \text{ Dons notre cas :}$$

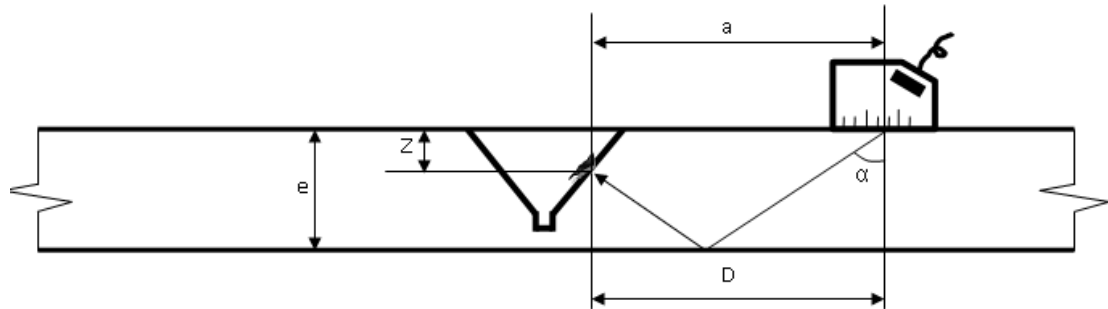
$$y = \frac{20}{\cos 70} = 58.47 \text{ mm}$$

$$\text{Etendu} = 1,25 \times 2 \times 58.47 = 146.175 \text{ mm}$$



Fig(IV.22) : calcul de l'étendu.

IV.5.7.5 : Localisation du défaut :



Fig(IV.23): Localisation du défaut .

Lorsqu'un écho est apparu sur l'écran de l'appareil à ultrason :

- L'amplitude maximale est d'abord recherchée.
- Le parcours sonore est déterminé (lu directement sur l'écran de l'appareil)
- La cote « a » est mesurée du point d'émergence du transducteur à l'axe de la soudure.
- La cote « x » du point « 0 », début de palpé à l'axe géométrique du transducteur.

Ensuite la localisation, c'est à dire l'endroit exacte de l'indication dans le joint de soudure (cote « x » et « z ») est déterminée par **calcul**.

Connaissant l'angle de réfraction « α réel » ainsi que l'épaisseur de la pièce « $ép$ » :

1^{er} cas : détection en $\frac{1}{2}$ bond

$$D = PS \times \sin \alpha, Z = PS \times \cos \alpha$$

2^{em} cas : détection en bond complet

$$D = PS \times \sin \alpha, Z = 2 \times e - (PS \times \cos \alpha).$$

IV.5.7.5 : Localisation de défaut :

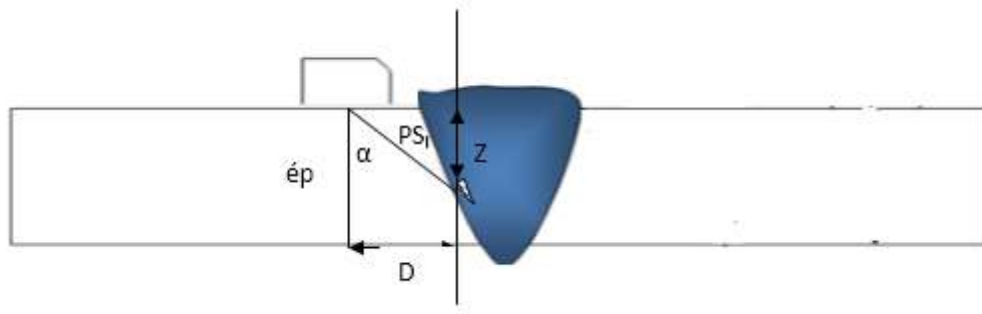
Détermination du palpeur pour $\frac{1}{2}$ bond et le bond complet.

IV.5.7.5.1 : la détection du défaut était par $\frac{1}{2}$ bond :

Nous présentons ci-dessous les échos des défauts en contrôle par la méthode d'écho d'anomalie : voir (figure IV.24) et (figure IV.25).



Fig(IV.24): Contrôle la pièce par ultrasons



Fig(IV.25) : la détection du défaut était par ½ bond.

1^{er} cas : détection en ½ bond

1/ ép = 20mm ; $PS_I = 22.12$

$$D = PS \times \sin \alpha = 22.12 \times \sin 70 = 20.78 \text{ mm}$$

$$Z = PS \times \cos \alpha = Z = 22.12 \times \cos 70 = 7.56 \text{ mm}$$

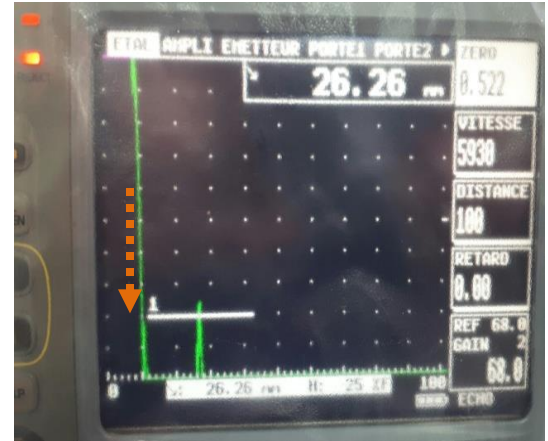
2/ ép = 20mm; $PS_{II} = 26.26$

$$D = PS \times \sin \alpha = 26.26 \times \sin 70 = 24.67 \text{ mm}$$

$$Z = PS \times \cos \alpha = Z = 26.26 \times \cos 70 = 8.98 \text{ mm}$$

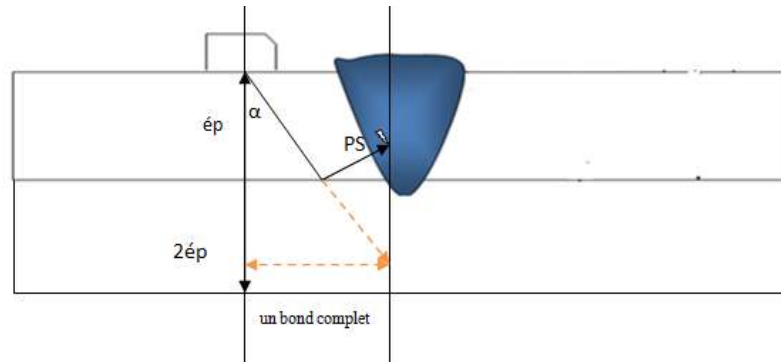


Fig(IV.26) : tracé de l'écho de défaut I.



Fig(IV.27) : tracé de l'écho de défaut II.

IV.5.7.5.2 : la détection du défaut était par bond complet :

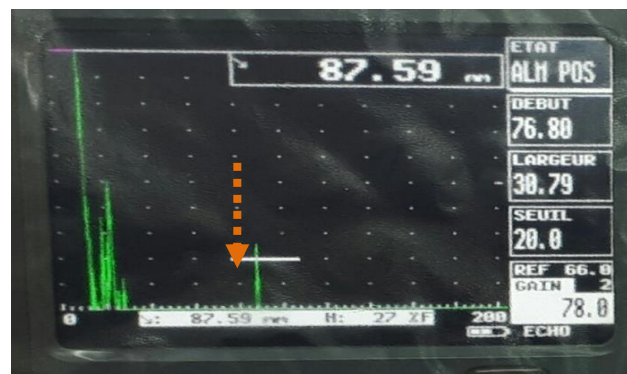


Fig(IV.28) : la détection du défaut était par bond complet.

$$\text{ép} = 20\text{mm} ; \quad \text{PS}_{\text{III}} = 87.59$$

$$D = \text{PS}_{\text{III}} \times \sin \alpha = 87.59 \times \sin 70 = 82.30 \text{ mm}$$

$$Z = 2 \times \text{ép} - (\text{PS}_{\text{III}} \times \cos \alpha) = 2 \times 20 - (87.59 \times \cos 70) = 10.05 \text{ mm}$$



Fig(IV.29) : tracé de l'écho de défaut III.

IV.5.7.5.3 Interprétation des défauts :

D'après les résultats obtenus le défaut est volumique de type « manque de fusion »

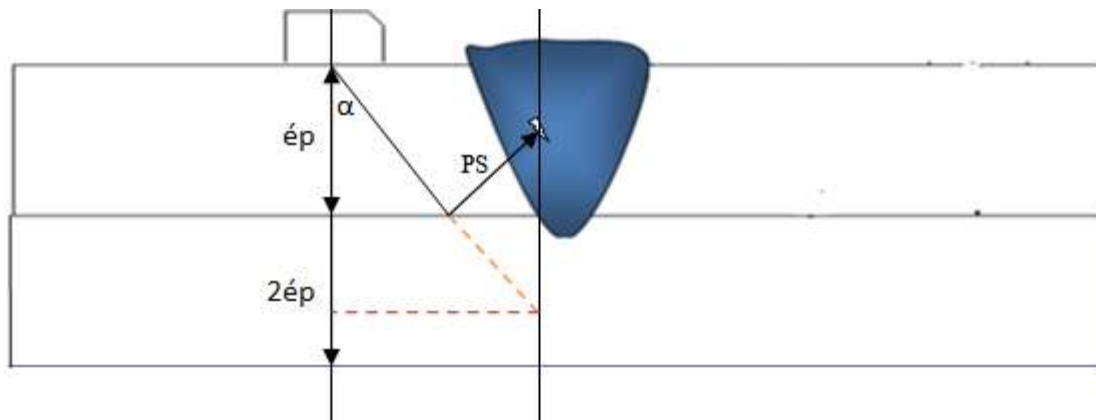
Les défauts	Longueur D (mm)	Profondeur Z (mm)
1ere défaut	$D_I = 20.78$	$Z_I = 7.56$
2ème défaut	$D_{II} = 24.67$	$Z_{II} = 8.98$
3ème défaut	$D_{III} = 82.30$	$Z_{III} = 10.05$

Tableau (IV.6): Localisation des défauts

Pour le Deuxième échantillon en à trouvé les résultats suivants :

IV.5.7.6 : Localisation des défauts :

IV.5.7.6.1 : calcule la position du palpeur :



IV.5.7.6.2 : Détermination des palpeurs pour 1/2 bond et le bond complet :

1/2 bond : Calculer la valeur (d)

$$\text{➤ } ép = 17\text{mm} ; \alpha = 70 ; \quad PS = 61.57$$

$$\cos \alpha = \frac{ép}{d} \text{ donc } d = \frac{ép}{\cos \alpha} = \frac{17}{\cos 70} = 49.70 \text{ mm}$$

Nous avons remarqué que : $PS > d$ (1/2 bond) donc le défaut dans le bond complet

Bond complet :

$$\text{➤ } ép = 17\text{mm} ; \quad PS = 61.57$$

$$D = PS \times \sin \alpha = 61.57 \times \sin 70 = 57.85 \text{ mm}$$

$$Z = 2 \times ép - (PS \times \cos \alpha) = 2 \times 17 - (61.57 \times \cos 70) = 12.94 \text{ mm}$$



Fig (IV.30) : tracé de l'écho de défaut .

IV.5.8: Interprétation :

D'après les résultats obtenus le défaut est volumique de type « manque de fusion »

Sa longueur est $D = 57.85\text{mm}$. et Profondeur $Z = 12.94$

IV.6: conclusion :

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

Interprétation des résultats :

1-Pour le contrôle visuel :

Toute inspection commence par un contrôle visuel du joint de soudure, pour vérifier les défauts superficiels à l'aide des instruments optiques.

2- Contrôle par ressuage :

le contrôle par ressuage a révélé quelques défauts de surface :

- 1- apparition de quelques souffleurs éparpillés ; sans incidences sur le joint de soudure on admet alors que la qualité de la soudure est bonne.
- 2- Présence d'une fissure débouchant pour la pièce en fonte.

3- Contrôle par Magnétoscopie

Ce type de contrôle se rapporte à l'Observation des défauts de surface sur le joint de soudure. Dans notre cas ce contrôle n'a révélé aucun défaut de surface pour la première pièce . il nous confirme la fissure détectée dans la pièce en fonte.

Alors Le contrôle par magnétoscopie confirme le résultat du 1^{er} contrôle par ressuage .

4- Résultats des essais aux ultrasons

Le contrôle par ultrason nous a aidé à détecter des défauts de manque de fusion dans les deux types de soudure.

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

- Une intensité très faible du courant de soudure.
- Une vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal.
- un angle d'inclinaison de l'électrode incorrect.
- bords à souder mal nettoyés.

Conclusion et perspectives :

La qualité d'une soudure dépend certainement du bon déroulement de l'opération de soudage, mais on n'aura aucune certitude sur l'état de la soudure si celle-ci, n'est pas certifiée par un contrôle fiable et sûr.

Les défauts de soudage probables sont nombreux, mais aussi les procédés de contrôle sont multiples, et avec des techniques différentes. Mais le plus difficile est la détection des fissures dans une soudure.

En pratiquant l'analyse aux ultrasons, nous n'avons pas rencontré d'obstacles avec notre produit de soudage, relatifs à la structure métallographique c'est à dire de déviation du faisceau ultrasonore à cause des hétérogénéités du métal, donc la structure ferritique est parfaitement perméable aux ultrasons. Cependant on a enregistré pas mal de difficultés relatifs aux signaux perturbateurs dus aux plans de solidifications ou aux poches de gaz superposées au bouts des défauts que nous avons créés.

Parmi les difficultés entravant la mise en œuvre des contrôles ultrasonores sur les soudures, on peut citer la forme du joint qui n'est pas bien connue et la présence d'inclusions ou plans de solidifications plans ou volumiques au niveau des interfaces entre le métal fondu et le métal de base qui faussent les interprétations on peut attribuer d'autres difficultés liées au comportement du matériel (les sondes) vis-à-vis de la matière qui dépend de beaucoup de paramètres (rugosité, structure métallique) et d'autres sont relatifs à l'utilisateur (choix des palpeurs, calibrages, interprétations des signaux recueillis). Notre produit de soudage à l'arc électrique au Ateliers MEI de SONELGAZ par des soudeurs certifiées selon la norme ISO 2003, avec le respect des normes de soudage en vigueur.

Perspectives :

Les techniques de détection des fissures sont nombreuses mais certaines d'entre elles sont coûteuses donc difficiles à réaliser en Algérie faute de moyens. Les techniques ultrasonores sont du moins faisables par rapport aux autres techniques citées dans ce manuscrit et peuvent devenir rentables si le problème de l'interprétation est résolu. Nous proposons de poursuivre cette étude par d'autres consacrées aux techniques d'interprétations par d'autres techniques tel que le contrôle par rayon X,

Références

Bibliographiques

- [2] Wikipédia l'encyclopédie libre / Procédés de soudage de pièces métalliques.
- [3] Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de: MASTER
CONCEPTION ET PRODUCTIQUE/Optimisation de la vitesse de soudage a l'arc
électrique des aciers /HICHEM BEKOUCHE -2013.]
- [4] Wikipédia l'encyclopédie libre / Procédés de soudage de pièces métalliques.
- [5] -www.soudage.com
- [6] -www.soudage.com
- [7] Matériaux Inorganiques (Olivier Dezellus).
- [8] S. LAROZE (Eyrolles, Masson 1982)
Résistance des matériaux et structures, tome3
- [9] - Matériaux Inorganiques (Olivier Dezellus).
- [10] R. Varisellaz (Dunod 1987).
Soudage : Eléments de conception de réalisation.
- [11] Techniques de l'I ingénieur
traité Génie mécanique B (7745) (article Soudage par friction).
- [12] CSMOFMI / Soudage et assemblage-soudage /Métallurgie.
- [13] Fissure : Mars 2011 à YAMANI INSTITUTE OF TECHNOLOGY
M.K. BENCHARI

LES DEFAUTS DE SOUDAGE (définition, Cause et Prévention)

[14]

À l'IUT Reims-Châlons-Charleville

Département Génie Industriel et Maintenance

Chaussée du Port CHALONS EN CHAMPAGNE (Jeudi 29 SEPTEMBRE 2011)

[15] document Techniques en Cours sur des pièces mécaniques au niveau de M.E.I.

[16] Examen Contrôle pièces mécaniques au niveau de M.E.I.