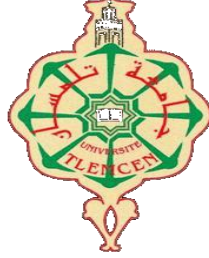


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblage soudé

Par : DJELLOUL ABBOU KHEIRA

Sujet

Panorama des méthodes de contrôle de qualité en temps réel des processus de soudage

Soutenu publiquement, le 19 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M.HADJOUI Fethi	MCB	Université de Tlemcen	Président
M.MAMI Elias Fouad	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M.GHERNAOUT Mohamed	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur
M. KARA-ALI DJAMEL	MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Avant tous nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir
Aider à éclairer notre chemin.

J'adresse mes sincères remerciements à
Monsieur HADJOUI Fethi d'avoir accepté de présider la soutenance du
mémoire. Monsieur MAMI Elias Fouad d'examiner mon travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes encadreurs monsieur
GHUERNAOUT Mohamed Elamine et monsieur KARA-ALI Djamel
Abdelillah.

De m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé pour la rédaction de ce
mémoire. J'adresse mes Sincères remerciements à tous les professeurs,
intervenants et toutes les personnes qui par leur Parole, leur écrit, leur conseil
et leur critique ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de
répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, Mohamed et Souad , qui ont toujours été
là pour moi, je remercie ma sœur Chahrazed et mon frère M'hamed, pour leurs
encouragement.

Enfin, je remercie mes amis ; Abderrahmen , Rawnak, Roufaida, Kamila,
Imene qui ont été toujours là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leur
encouragement ont été d'une grande aide.

Je veux remercier tous les gens qui ont cru en moi et m'encourager de ne jamais
abandonné.

Je veux me remercier d'avoir essayé de faire plus de bien que de mal et d'être
moi-même à tout moment.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma
gratitude.

Merci encore une fois

Résumé

Le contrôle qualité est le processus qui consiste à confirmer que le produit est conforme aux spécifications. Il comprend la vérification et l'essai des procédures de fabrication ainsi que des produits finis .

Toutes les soudures présentent des défauts ou des discontinuités. Le défaut est inacceptable quand la taille est trop importante. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé. L'objectif de cette recherche est axé sur les méthodes de surveillance et des examens de contrôle pour identifier les défauts de soudage.

✓ Essai destructifs :

Essai de dureté ; essai de traction, essai de résilience , essai de pliage et d'autres essais mécaniques .

✓ Essai non destructifs :

Contrôle visuel, contrôle par ressuage, contrôle par magnétoscopie, et contrôle par radiographie.

Mots clés : soudage, contrôle, essais destructifs, ressuage, magnétoscopie

Abstract

Qualité contrôle is the process of confirming that the product conforms to specification . it includes verification and tensting of manufacturing procedures as well as finished products.

All welds have defects or discontinuities. The defectisun acceptable when the size is too large. In practice, small size defects are few and do not affect the performance of the weldedassembly. The objective of this research is focused on monitoring methods and control reviews to identify weldingd effects.

The methods used for destructive testing are :

hardness testing, resilience testing , bending testing and other mechanical testing .

The methodsused for non-destructive testing are:

Visual inspection, liquid penetrant inspection, magneticparticle inspection, and radiography inspection.

Keywords : welding , inspecation , destructive testing , penetrant testing , magnetic particle testing .

ملخص

مراقبة الجودة هي عملية التأكد من مطابقة المنتج المواصفات . يتضمن التحقق و الاختبار من إجراءات التصنيع و كذلك المنتجات النهائية جميع اللحام بها عيوب أو انقطاعات . الخلل الغير مقبول عندما يكون الحجم كبير جدا . في الممارسة العملية العيوب ذات الحجم الصغير و القليلة لتؤثر على أداء التجميع بالتلحيم . الهدف من هذا على طرق الرصد والاستعراضات المراقبة لتحديد عيوب اللحام.

اختبار مدمر:

اختبار الصلابة . اختبار الشدة . اختبار المرونة. اختبار الانحناء. و الاختبارات الميكانيكية الأخرى .

اختبار الغير مدمر :

الفحص البصري فحص. اختراق السائل فحص .الجسيمات المغناطيسية. و فحص التصوير الإشعاعي.

الكلمات الدليلية: لحام ، فحص ، اختبار إتلافي ، اختبار اختراق ، اختبار جزيئات مغناطيسية

Liste des symboles :

ZAT : zone affecté thermiquement.

BHI : boliers handassa industrie Algérie .

MF : métal fondu.

ZL : zone de liaison.

MB : métal de base.

Table des matières

I.RESUME

II.ABSTRACT

III.ملخص

TABLE DES MATIERE

TABLE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

NORMALISATION

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	1
Chapitre I : Généralités sur le soudage.....	2
I.1.Introduction.....	3
I.2. historique de soudage.....	3
I.3 Définition de soudage.....	4
I.4 Phénomènes du soudage	7
I.5. Procèdes de soudages.....	8
I .6. Types de joints.....	20
I .7 Sécurité	25
Conclusions	25
Chapitre II : Défauts de soudage.....	26
II.1 Introduction	27
II.2. Défauts de soudages	27
II.3 Fissure.....	28
II .4 Orientation des fissures.....	29
a. Fissures longitudinales et transversale.....	29
II.5 Types de fissures.....	30
II.6 Manque de fusion	36
II.7 Manque de pénétration.....	37
II.8 Manque de pénétration	37
II.9 Défauts de forme	40
I.1. Inclusion gazeuse.....	42
Conclusion.....	45
Chapitre III : Techniques de contrôle de soudage.....	46
III .1.Contrôle des soudures.....	47
III.2. Contrôles destructifs.....	48
III.2.1. Essais de texture	48
III.2.1.1 Essais mécaniques.....	48
III.2.1.2 Principe de l'essai mécanique.....	49
III.2.2 Essais de traction	49
III.2.3 Essais de résilience.....	51
III.2.4 Essais de dureté	54
III.2.5 Essais de pliage	55
III.2.6 Autres essais.....	56

III.3. Contrôles non destructifs	56
III.3.1 Examen visuel	56
III.3.2 Contrôles par ressuage.....	57
III.3.3 Ultrasons.....	65
III.3.4 Magnétoscopie.....	71
III.3.5. Radiologie Industrielle.....	77
III.4. Descriptif de mode opératoire de soudage : (DMOS)	87
III.5.la QMOS qualification de mode opératoire de soudage :.....	98
Conclusion.....	100
Chapitre IV : Etude expérimentale.....	101
IV.1 Présentation de l'entreprise	102
IV.2 Introduction	104
IV.3 Identification du matériau	104
IV.4. Découpage et usinage des tôles.....	105
IV .5 Contrôle les tôles soudées.....	109
IV .6. Contrôle par ressuage « pt ».....	110
IV .7 Contrôle par magnétoscopie.....	119
CONCLUSION	124
Conclusion générale	127
Bibliographie de mémoire	128

Table des figures

Figure I.1 : zones du soudage.....	5
Figure I.2 : Cordon (joint) de soudure.....	7
Figure I.3 : brasure sur tubes.....	8
Figure I.4: soudage par fusion.....	9
Figure I.5 : principe de soudage au chalumeau.....	9
Figure I.6 :soudage à l'arc électrique.....	10
Figure I.7 : soudage MIG.....	11
Figure I.8 : soudage MAG.....	12
Figure I.9 : principe de soudage MIG /MAG.....	13
Figure I.10 : soudage TIG.....	14
Figure I.11 : soudage plasma.....	14
Figure I.12 : soudage par laser.....	15
Figure I.13 : Machines à souder par point sur socle.....	16
Figure II.1 : différentes zones de soudure.....	28
Figure II.2 fissures longitudinales et transversale.....	30
Figure II.3 : les fissures transversales.....	30
Figure II.4 : fissure à la racine.....	31
Figure II.5: fissures au raccordement.....	31
Figure II.6 : fissures Sous –Cordon.....	32
Figure II.7 : fissure à chaud.....	33
Figure II.8: fissure à froid.....	34
Figure II.9 : fissures de Réchauffage.....	34
Figure II.10 : fissures aux orteils.....	35
Figure II.11 : fissure cratère.....	36
Figure II.12 : manque de fusion de la soudure.....	36
Figure III.1 : différents types d'éprouvettes de traction.....	49
Figure III.2 : éprouvette de traction cylindrique.....	49
Figure III.3 : éprouvette de traction prismatique.....	50
Figure III.4 : courbe de traction.....	51
Figure III.5 : essai de résilience.....	52
Figure III.6 : éprouvettes de résilience dans un joint soudé.....	52
Figure III.7 : courbe de transition ductile – fragile.....	53
Figure III.8 : essai de pliage.....	55
Figure III.9 : examen visuel.....	57
Figure III.10: première étape de ressuage.....	58
Figure III.11 : deuxième étape de ressuage.....	58
Figure III.12 : troisième étape de ressuage.....	58
Figure III.13 : quatrième étape de ressuage.....	58
Figure III.14 : cinquième étape de ressuage.....	59
Figure III.15 : tension superficielle.....	60
Figure III.16 : mouillage.....	60
Figure III.17 : application du pénétrant.....	61
Figure III.18 : enlèvement de l'excès de pénétrant.....	62
Figure III.19 : l'émulsifiant se mélange par diffusion.....	62
Figure III.20 :l'émulsifiant se mélange sous l'action de l'eau.....	63
Figure III.21 évaluation et interpretation.....	64

figure III.22 évaluation et interprétation.....	64
Figure III.23 : représentation des vibrations du son (sinusoïde).....	66
Figure III.24 : onde longitudinale.....	66
Figure III.25 : onde transversale.....	67
Figure IV.1 : dimension des tôles.....	106
Figure IV.2 : différentes épaisseurs.....	106
Figure IV.3 : tôle avant soudage.....	107
Figure IV.4 : tôle après soudage.....	107
Figure IV.5 : pièce apes le soudage.....	110
Figure IV.6 : produit de ressuage.....	111
Figure IV.7.8 : nettoyage les pièces.....	112
Figures IV.9.10.11 : application du pénétrant.....	115
Figure IV.12.13 : application de révélateur.....	117
Figure IV.14. 15 : résultat de Contrôle par ressuage.....	118
Figure IV.16 : mesureur numérique de champ magnétique tangentiel affichant simultanément les valeurs : moyenne, crête vraie et efficace vraie.....	121
Figure IV.17 : matériel utilisés dans la magnétoscopie.....	122
Figure IV.18.19.20 : l'examen magnétoscopique (MT).....	123
Figure IV.21 : résultat de Contrôle par magnétoscopie.....	124

Liste des tableaux

Tableau I.1 :type se soudure (bout à bout).....	21
Tableau I.2 :symboles élémentaires normalisés pour soudure bout à bout.....	21
Tableau III .1 : caractéristiques mécaniques de la traction.....	50
Tableau III.2 : dimension des éprouvettes de résilience.....	52
Tableau III.3 : types d'essais de dureté.....	54
Tableau III.4 fréquences des ultrasons.....	65
Tableau III.5 : récapitulatif des paramètres à vérifier sur le DMOS.....	87
Tableau III.6 : symbolisation des types d'assemblage.....	90
Tableau III.7 :symbolisation des procédés de soudage de qualification.....	91
Tableau III.8 :symbolisation de la position de soudage.....	92
Tableau IV.1 : composition chimique du métal de base.....	105
Tableau IV. 2: caractéristiques mécaniques du métal de base.....	105
Tableau VI. 3 :composition chimique du métal d'apport.....	105
Tableau IV.4: caractéristiques mécaniques du métal d'apport.....	105
Tableau IV.5 : énergie équivalente en fonction de l'épaisseur.....	108

Introduction générale

Introduction générale

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.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires.

Les opérations de soudage d'aciers s'accompagnent de phénomènes thermiques métallurgiques et mécaniques. Ces phénomènes induisent inévitablement des champs de contraintes internes dans le rôle peut être déterminant sur la qualité et la tenue mécanique du composant.

Le grand nombre d'applications du soudage et la grande variété des procédés mis en œuvre résultent non seulement de la diversité des types de matériaux à assembler et de la multiplicité des conditions imposées aux constructions en service, mais aussi de la recherche toujours plus poussée d'une meilleure rentabilité.

La non conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner 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. Le contrôle non destructif est fait sur un cordon de soudure bout à bout pour l'assemblage des tôles en acier, réalisé à l'arc électrique avec baguette métallique de même composition. La partie expérimentale a été réalisée par des stages pratiques au niveau des ateliers BHI RELIZANE.

Notre mémoire est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre traite des généralités 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 traite la partie expérimentale sur les techniques d'application des CND sur le joint soudé. Les résultats et interprétations des défauts observés sont discutés.

Une conclusion générale parachève ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur le soudage

I.1.Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport.

Le soudage: c'est le premier moyen d'assemblage de l'acier

- le plus utilisé et le plus efficace, notamment dans la construction métallique.
- Le soudage relève de la métallurgie : il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité. C'est pourquoi le soudage est régi par des cahiers des charges et des modes opératoires précis.[1]

I.2. historique de soudage

- L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :
à l'âge de bronze on soudait à la poche
à l'âge de fer on soudait à la forge
- Jusqu'au milieu du 19ème siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850 on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.
- Fin 19ème : mise en œuvre de nouveaux procédés :
Le soudage oxyacétylénique
Le soudage aluminothermique
- Le soudage à l'arc électrique
Le soudage par résistance
Ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920.
- Début du 20ème siècle : le soudage se répand dans tous les secteurs industriels.
Conséquence : une modification importante dans la conception et la réalisation des objets. Exemple : l'utilisation pour les ponts de PRS (Poutres reconstituées soudées) de

grandes dimensions et fortes épaisseurs. Le soudage devient indissociable du développement de nombreux secteurs économiques

- Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit : construction navale, automobile, aéronautique. Un nouveau métier est apparu : celui de soudeur. Il devient nécessaire de former les ouvriers et d'organiser des cours. Le CAP de soudeur est créé en 1931.
- Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique.
industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultrasons
découvertes involontaires : le soudage par explosion et par diffusion
introduction croissante de la microélectronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.
- Depuis ces dix dernières années, les innovations portent moins sur les procédés mêmes, que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport. Ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité.
A l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de $100\text{kW}/\text{cm}^2$.[1]

I.3 Définition de soudage

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, 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, 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 :

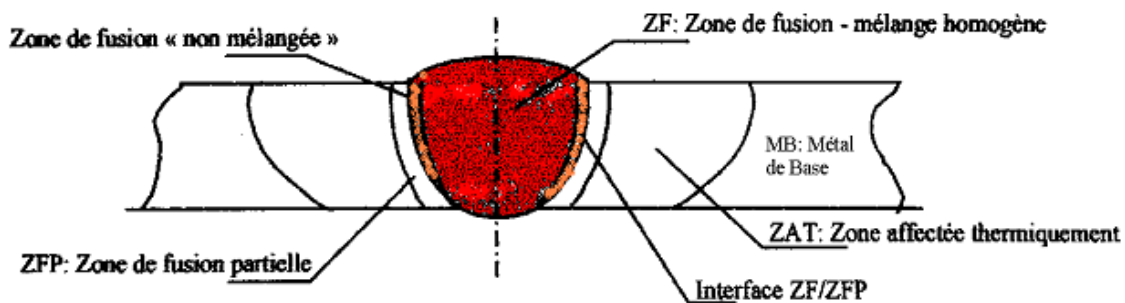


Figure I.1 : zones du soudage [3].

✓ **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.

✓ **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.

✓ **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.

✓ 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.

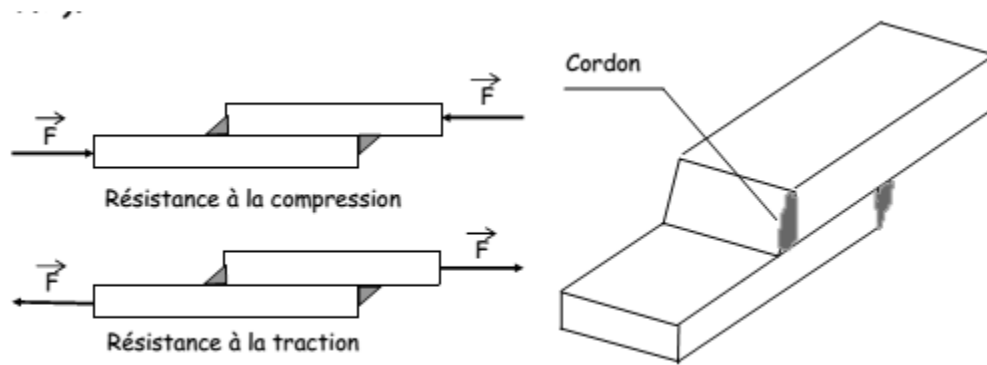


Figure I.2 : cordon (joint) de soudure.

I.4 Phénomènes du soudage :

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physicochimique 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 :

✓ 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]

✓ soudures hétérogènes :

Le soudage est hétérogène lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler.[7]

Dans ce procédé on distingue :

- **Le brasage fort** : température de fusion du métal $> 450^{\circ}\text{C}$, avec utilisation du décapant Borax.

- **Le brasage tendre** : température de fusion du métal < 450°C, avec utilisation du décapant Borax.
- **Le soudo-brasage** : réalisé généralement au chalumeau. La température à obtenir varie suivant les métaux à souder :
 - Acier et fonte : 600 à 900°C.
 - Cuivre : 850 à 900°C.
 - Aluminium 600°C

La figure 3 montrent un type de soudure hétérogène.[7]

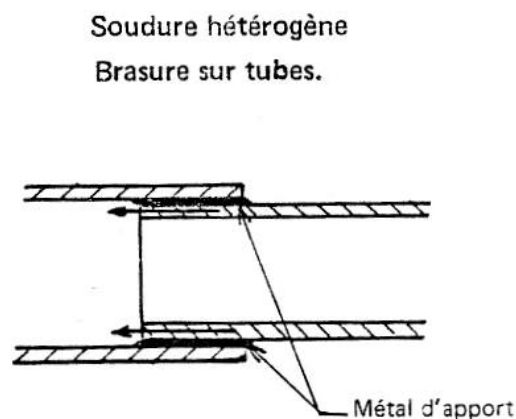


Figure I.3 : brasure sur tubes

I.5. Procèdes de soudages :

a. soudage par fusion :

Il consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels que l'arc électrique, la flamme de gaz, la réaction chimique, l'énergie de rayons laser, le jet de plasma, etc.

Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, lequel après solidification constitue la soudure. [7]

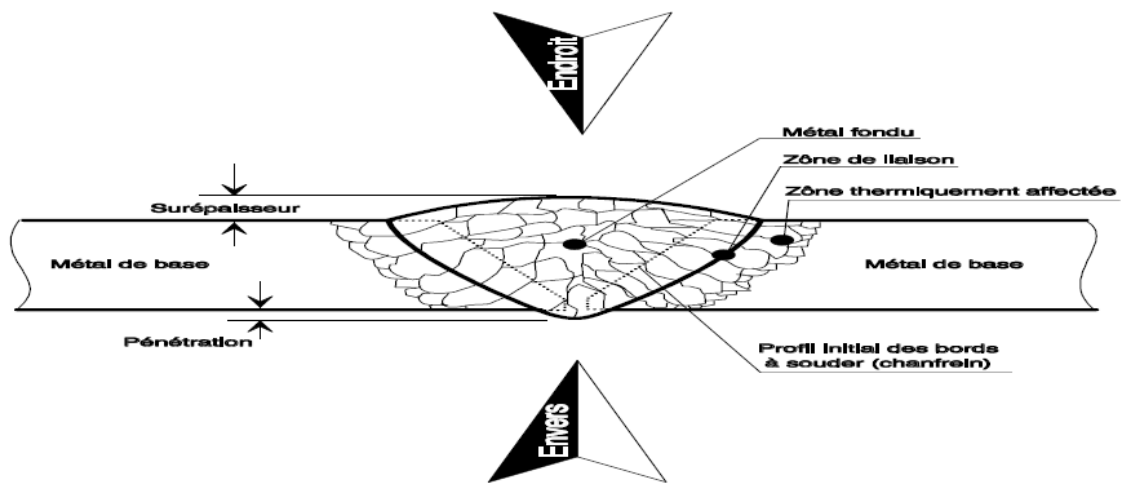


Figure I.4: soudage par fusion.

b. Soudage au gaz (au chalumeau) :

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudage à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née du mélange et de la combustion d'un gaz combustible d'acétylène avec un gaz comburant d'oxygène. La température de la flamme peut atteindre les 3200° Celsius lorsque le mélange d'acétylène et d'oxygène est correctement équilibré dans le chalumeau.

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de la flamme fait fond localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.[8]

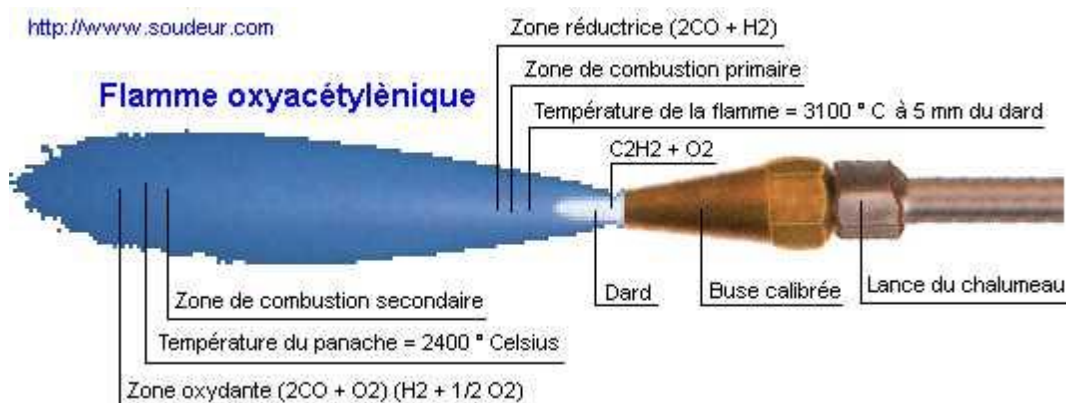


Figure I.5 : principe de soudage au chalumeau

c. Soudage à l'arc :

Le soudage à l'électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l'arc », il utilise des baguettes comme métal d'apport. La soudure autogène à l'électrode enrobée consiste à mettre en fusion l'acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d'apport (l'âme de l'électrode).

Pour obtenir cette fusion, il faut une température très élevée, (3200°C) qui est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode) en créant un "arc électrique" qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois une lumière et une chaleur intense.[8]

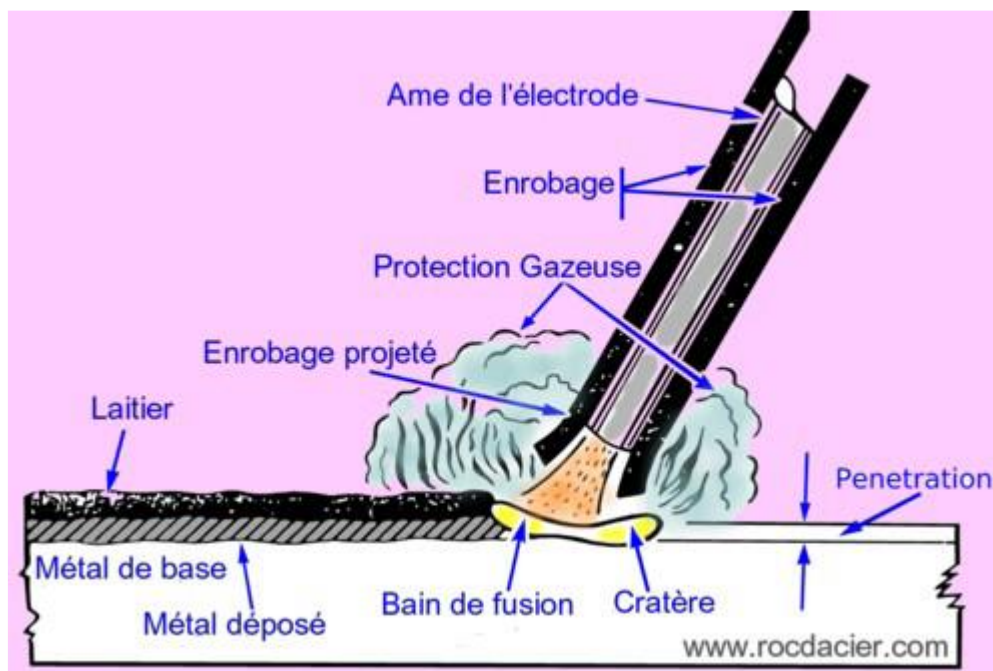


Figure I.6 :soudage à l'arc électrique

d. Soudage MIG (Métal Inerte Gaz)

La soudure MIG sous protection de gaz inerte est un procédé de soudage très utilisé de nos jours. Pour ce procédé, on crée un arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport (de \varnothing 0,6 à \varnothing 2,4 mm). Lorsque l'arc est obtenu, on dévide ce fil d'apport à vitesse constante et continu dans le bain de fusion généré par la puissante énergie de cet arc. On obtient un cordon de soudure par mélange du métal d'apport et du métal de base, en fusion pendant l'arc. Il est réalisé sous protection gazeuse. Les paramètres influant sur la réalisation du cordon sont :

La vitesse de fil (l'intensité)

Le débit en gaz

Le diamètre du fil électrode

La position de soudage

La préparation

La dimension et les matériaux à souder. [8]

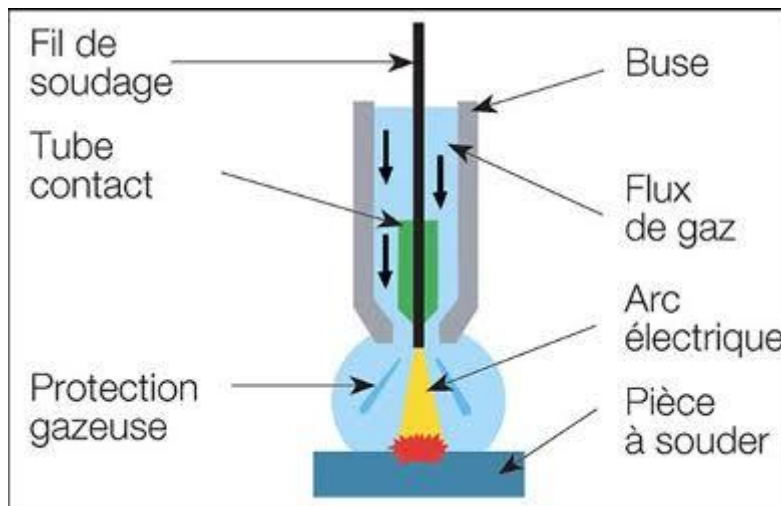


Figure I.7 : soudage MIG

e. Soudage MAG (Métal Active Gas) :

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO₂ et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone. (active pour le procédé de soudure MAG et inerte pour le procédé de soudure MIG). [6]

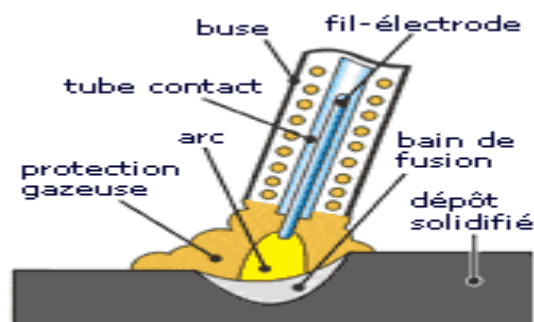


Figure I.8 : soudage MAG

✓ Principe des soudages MIG et MAG :

Soudage MIG et MAG selon si le gaz protecteur est inerte ou actif durant la fusion , et sont les memes paramètres dans l'operation de soudage :

Électrode infinie

Gaz protecteur ou active

Le fil électrode est l'anode en courant continu

Guidage automatique ou manuelle

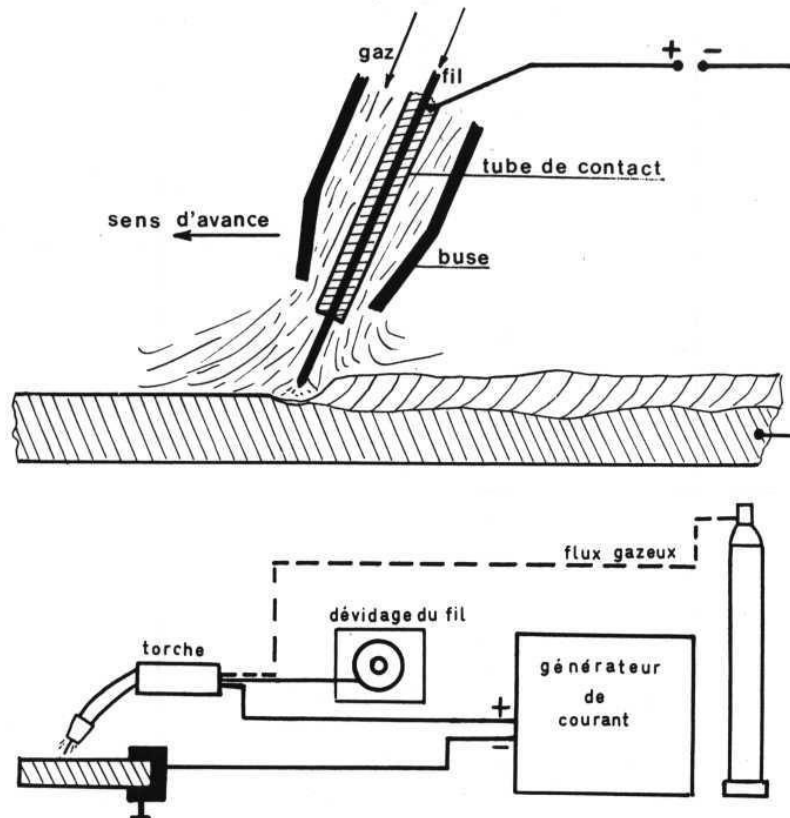


Figure I.9 : principe de soudage MIG /MAG

f. Soudage TIG (tungstène inerte Gas) :

Soudage sous gaz inerte avec électrode réfractaire ; Arc entre électrode en tungstène non fusible et les pièces à assembler.

Gaz inerte (Ar, Ar + He, Ar +He + H₂).

Métal d'apport: amené séparément.

Soudage haute qualité .

Aéronautique, alimentaire, chimique, pétrochimique, etc.

Aciers, inox, alu, cuivre, titane, à partir de 0,5 mm.

Manuel ou automatique.

Attention courants d'air .

✓ Principe de soudage TIG : [9]

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin, et voilà les paramètres :

Guidage manuelle

Électrode (cathode) réfractaire (non-consommable)

gaz inerte (Ar, He, H₂)

Soudage autogène ou métal d'apport additionnel

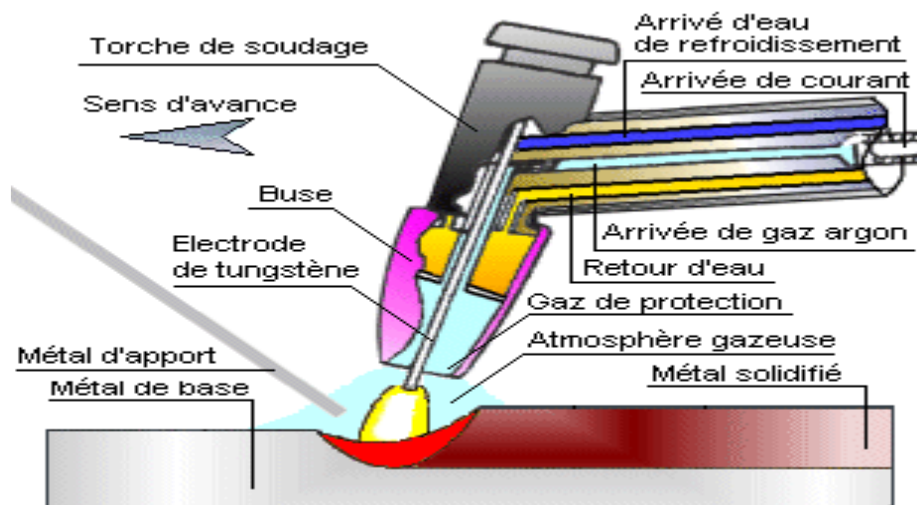


Figure I.10 : soudage TIG

g. Soudage par plasma :

Le soudage plasma est un procédé de soudage à l'arc. La source de chaleur nécessaire à la fusion est générée par l'arc plasma.

Le jet de plasma est obtenu par l'étranglement d'un arc électrique dans une tuyère de faible diamètre dans laquelle s'écoule un gaz plasmagène (généralement de l'argon ou un mélange d'argon/hydrogène). Le jet de plasma s'établit à l'amorçage sous haute tension à haute fréquence puis est transféré de l'électrode en tungstène vers la pièce, à une plus faible tension.

Dans le cadre du soudage plasma, un second gaz de protection inerte dit gaz annulaire est nécessaire. Il peut être un mélange de gaz (argon/hydrogène ou argon/hélium) ou argon pur, et protège ainsi le bain de fusion. Il a des effets sur certains critères : le mouillage, l'aspect du cordon, et la vitesse du travail de soudage.

De par les propriétés de ce procédé, on obtient de forte densité de puissance (haute énergie sur faible surface) permettant d'obtenir des géométries de cordons fins et pénétrants, de performances supérieures au procédé TIG.

Le soudage plasma nécessite donc l'utilisation de gaz (souvent approvisionné en bouteilles pour ces types de consommation). Le soudeur contrôle le procédé via un boîtier de commande qui pilote les cycles du poste de soudage plasma.

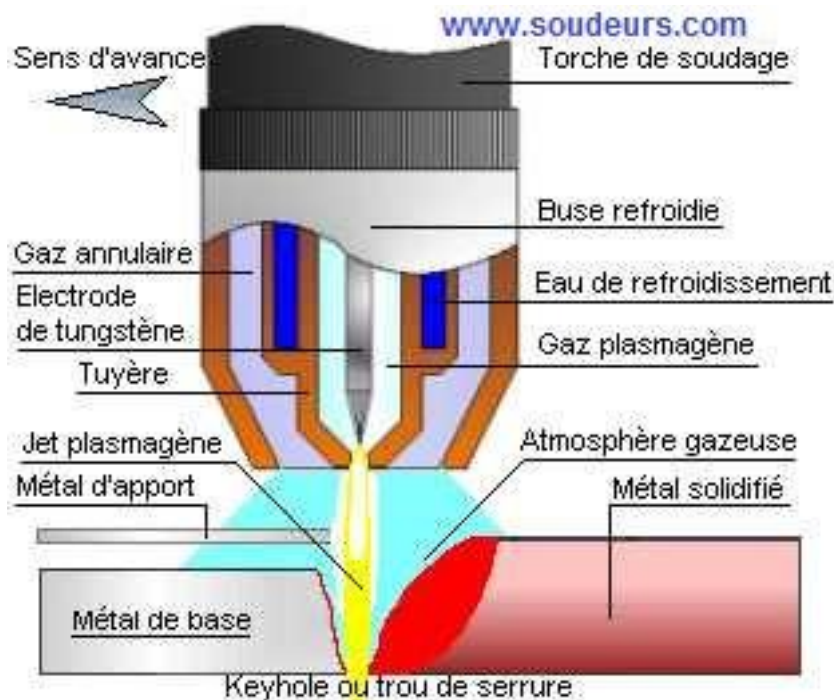


Figure I.11 : soudage plasma

h. Soudage par laser :

Le soudage LASER est un procédé à haute densité d'énergie utilisant une source d'énergie lumineuse. Il s'agit d'une technique d'assemblage extrêmement fine et particulièrement bien adaptée au soudage de petits éléments avec peu de déformations.

Applications : industries automobile, sidérurgique, de l'électroménager, pièces à usage médical,...[8]

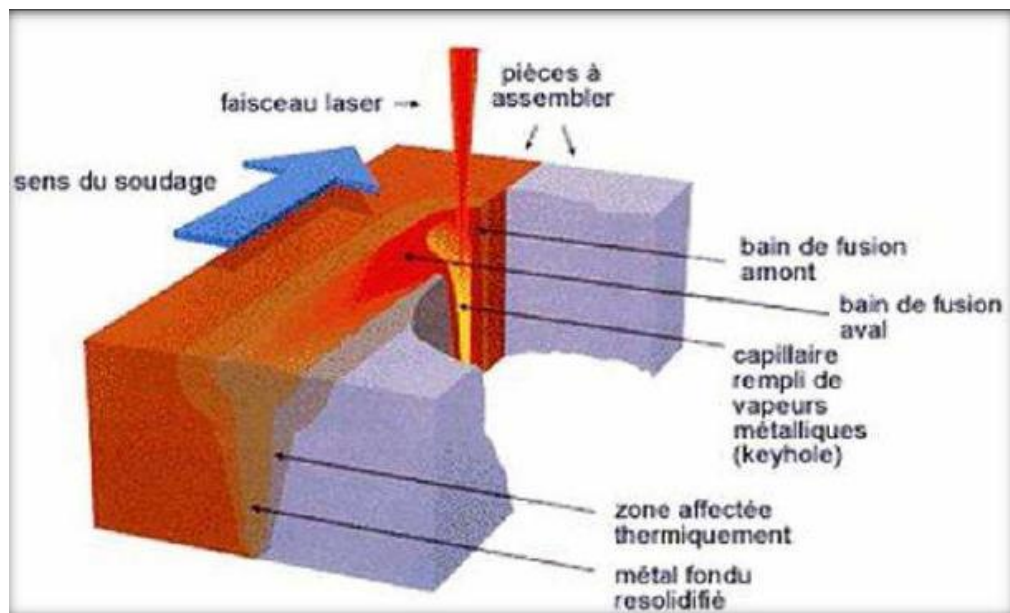


Figure I.12 : soudage par laser

i. soudage sans fusion :

✓ Soudage par résistance :

Le soudage par résistance utilise principalement comme phénomène physique l'échauffement du à la résistance de passage à un courant déterminé pendant un certain temps. Les paramètres principaux de ce procédé sont la résistance (indirectement la pression), le courant et le temps de passage de ce courant.[8]

Le métal est fondu par le passage d'un courant électrique qui traverse les pièces à assembler au moyen d'électrodes en cuivre.

Au moment où l'énergie traverse les pièces à souder, et que le métal est à température d'ignition, une pression de forgeage est exercée avec les électrodes, pour obtenir le "collage" du métal des deux pièces.

Une soudure par résistance se décompose en trois phases successives :

- 1) l'accostage (phase mécanique),
- 2) le soudage (phase électrique/thermique),
- 3) le forgeage (phase métallurgique).

Le soudage par résistance est aussi appelé soudage par point.

Il existe 3 types de poste à souder par résistance : [8]



Figure I.13 : machines à souder par point sur socle



Figure I.14 : machine à souder par résistance avec pinces



Figure I.15 : machine à souder par résistance à la molette

j. 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]

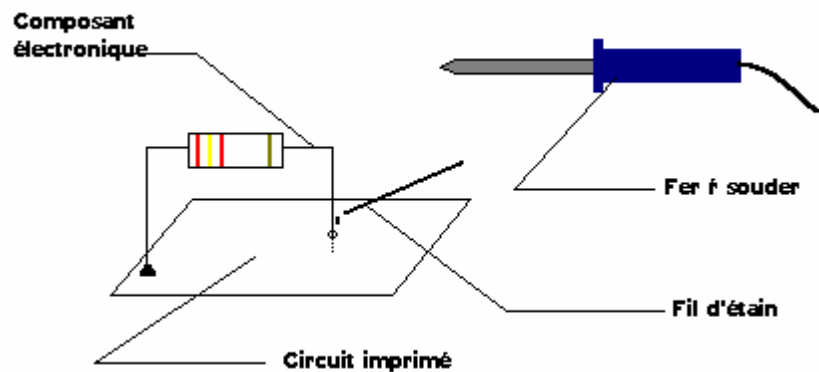


Figure I.16 : soudage au fer. [6]

✓ **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 [10].

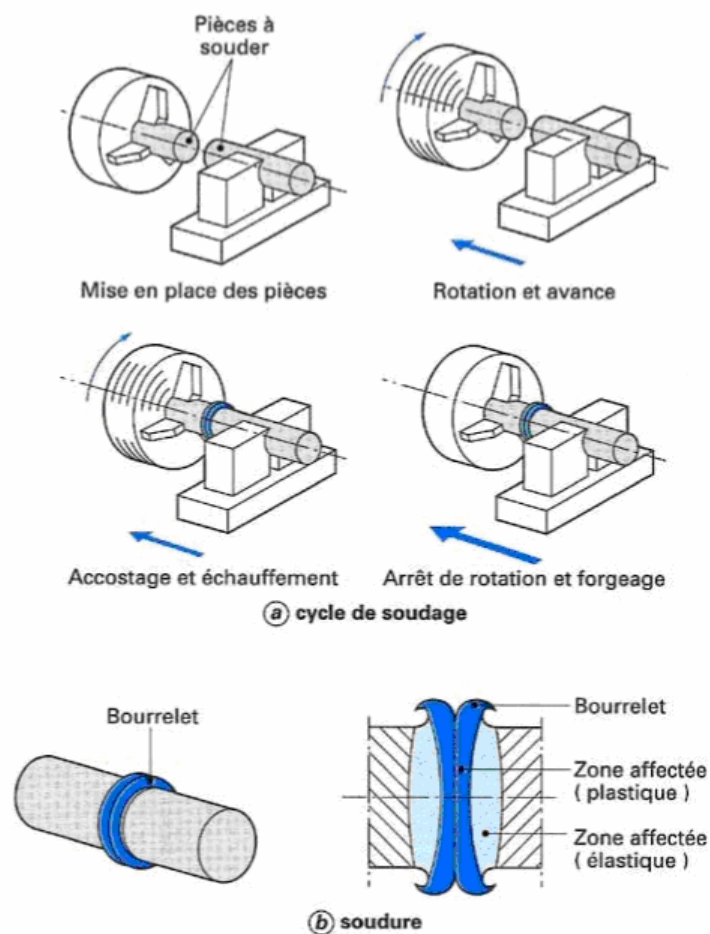


Figure I.17 : principe du soudage par friction [10].

k. Soudage par ultrason :

Le soudage par Ultrason est une technique d'assemblage rapide et économique pour les matériaux thermo-fusibles comme le plastique. Ce procédé s'applique facilement aux polymères organiques à point de fusion bas $<200^\circ$ (polyéthylène, PA6, PA11, fibres mélangées avec +60% de synthétiques...). Et pour les polymères à point de fusion plus haut $>200^\circ$ (Acrylique, PE, fibres thermostables...) l'assemblage des pièces demande plus de paramètres techniques (temps de soudure plus long, Profil et type de sonotrode, puissance et gamme de fréquence d'utilisation).[8]

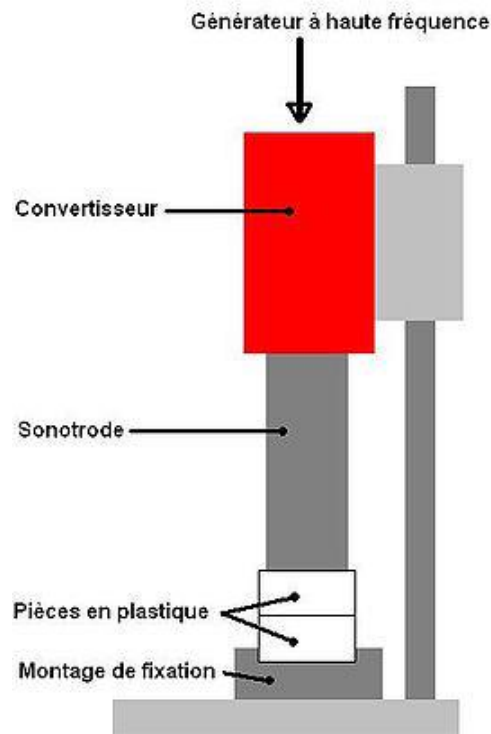


Figure I.18 : soudage par ultrason[8]

I. Soudage par brasage (sud-brasage) :

Brasage et sud-brasage : l'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle des matériaux à souder qui peuvent être de natures différentes.

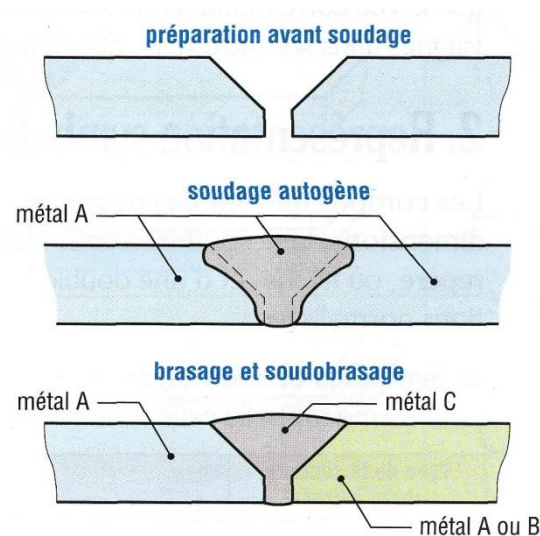


Figure I.19 : brasage et sud-brasage

I.6. Types de joints :

a. Généralités :

Sur les structures, on se 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.

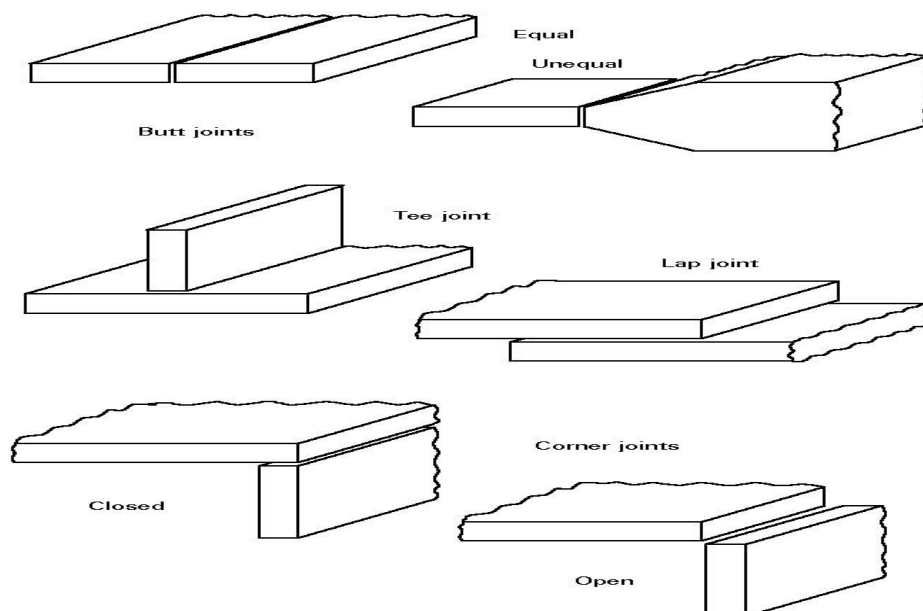


Figure 1 Types of joint

Figure I.20 : différents de joint soudé

b. Représentation symbolique, normes internationales

Les cordons ne sont pas dessinés ; seule la ligne du joint est représentée. La forme et les dimensions de la soudure sont indiquées sous forme d'une cotation composée d'une ligne repère, ou flèche, et d'une double ligne de référence portant une série de symboles et indications normalisées.

c. Symboles élémentaires

Leur forme rappelle celle de la soudure et ne préjuge pas du procédé de soudage utilisé.

Tableau I.1 Type se soudure (bout à bout) :



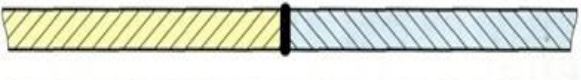

















Type de la soudure (bout à bout)	Représentation simplifiée	Symbole
Sur bords relevés complétement fondu		
Sur bords droits		
En V		

Tableau I.2 Symboles élémentaires normalisés pour soudure bout à bout.

Type de la soudure (bout à bout)	Représentation simplifiée	Symbole
En demi V		
En Y		
En demi Y		
En U (ou en tulipe)		
En demi U (ou en J)		
En V à flancs droits		
En demi V à flancs droits		

d. Assemblages entre pièces d'épaisseurs différentes

En règle générale, il faut s'efforcer de réduire les différences entre épaisseurs. L'assemblage (a) convient aux épaisseurs peu différentes. Les assemblages (b), (d) et (h), réalisables à l'arc, ne sont souhaitables qu'en présence de charges statiques, ; ils engendrent des concentrations de contraintes.

S'il existe des efforts alternés ou des phénomènes de fatigue, utiliser les assemblages des autres types : (f), (g), (j) et (k) sont les plus performants mais aussi les plus coûteux.

Les assemblages (f), (j), (m) et (n) permettent de souder des épaisseurs très inégales.

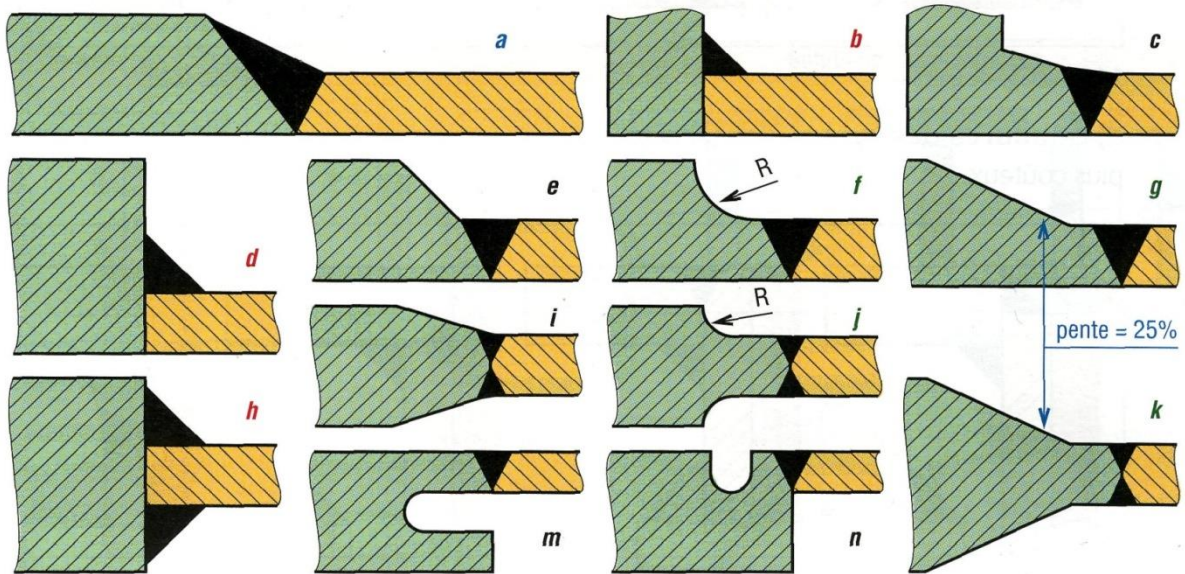


Figure I.21 : préparations et soudures usuelles entre pièces d'épaisseurs différentes.

e. Soudures en angle

Les cordons concaves transmettent mieux les efforts que les cordons convexes. Ils sont à préférer lorsqu'il existe des efforts alternés ou des phénomènes de fatigue.

f. Soudures en T

Les assemblages (a) et (b) avec préparation utilise un seul cordon, (c) est bon et (d) est le plus résistant, (e) permet de souder une tôle mince sur une tôle plus épaisse. (f) utilisant une soudure bout à bout est celui qui engendre le moins de déformation.

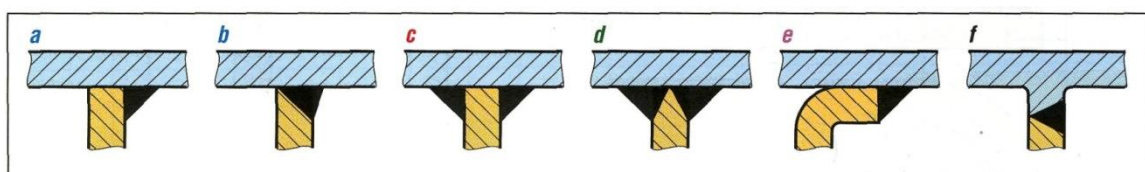


Figure I.21 : soudures en angle ou en T. Pour c et d, soudage des deux côtés.

g. Soudures en L

L'assemblage en L est relativement fragile ; il est interdit dans certains cas. Les préparations (a), (b) et (h) sont les plus rationnelles (surtout h) ; (c) et (e) ont une faible résistance en flexion ; (f) et (g) sont utilisés avec des tôles minces.

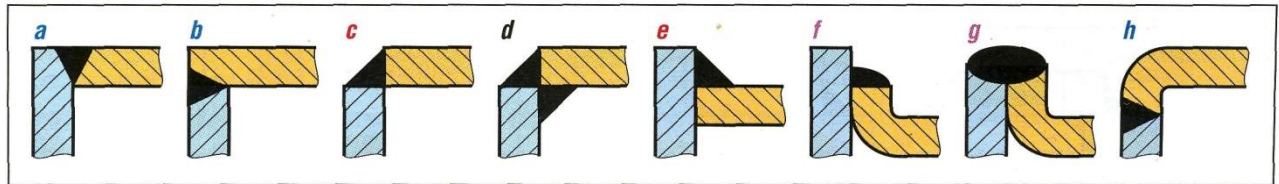


Figure I.22 : soudures en angle ou en L. Pour d soudage des deux côtés.

h. Soudures des paliers :

(a) et (c) sont les plus simples .

(b) simplifie la fabrication .

(d) meilleure en fatigue exige une pièce moulée.

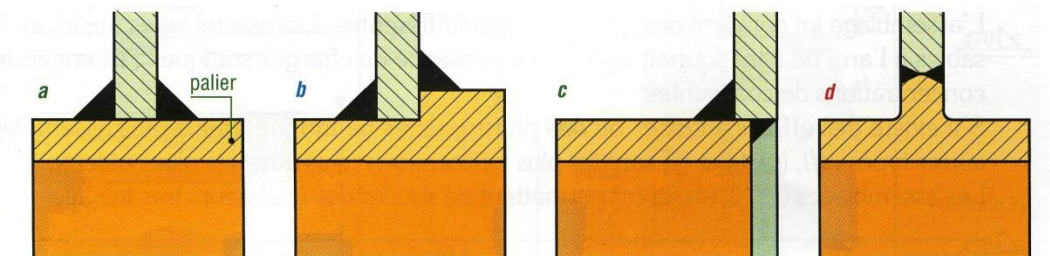


Figure I.23 : soudage de paliers.

i. Soudures des brides :

(a), (b) et (c) ont une bonne résistance ; (d) est encore meilleure, mais plus coûteux.

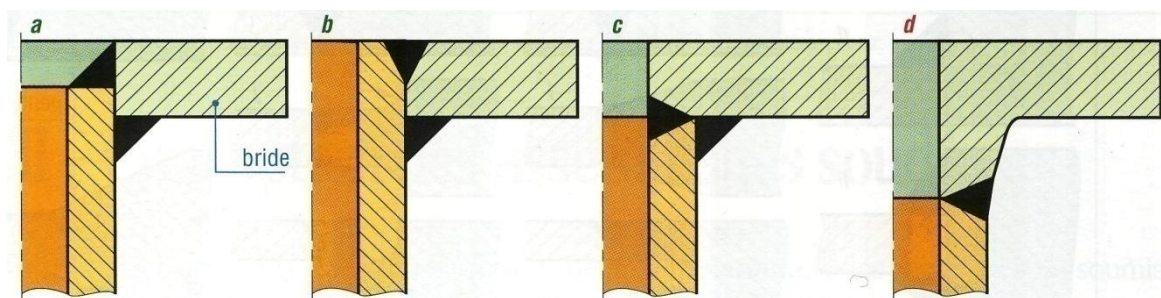


Figure I.24 : soudage de brides.

I.7 Sécurité :

Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail dans l'opération de soudage .



Figure I.25 : élément nécessaire pour une bonne condition de travail.

Conclusions :

Dans ce chapitre 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.

On distingue les 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

Défauts 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. Défauts de soudages :

- **Définition :**

Il existe une grande variété de défauts caractérisés par leur nature (solide, gazeuse) leur forme et par leur origine. Lors du contrôle, la distinction entre différents types de défauts se relève cruciale car elle permet souvent d'estimer les risques de fracture de matériau.

Un « défaut » est une anomalie de la matière risquant de provoquer « la ruine » de l'ensemble soudé.

En soudage « un défaut » : discontinuité dans la soudure ou écart par rapport à la géométrie volume.

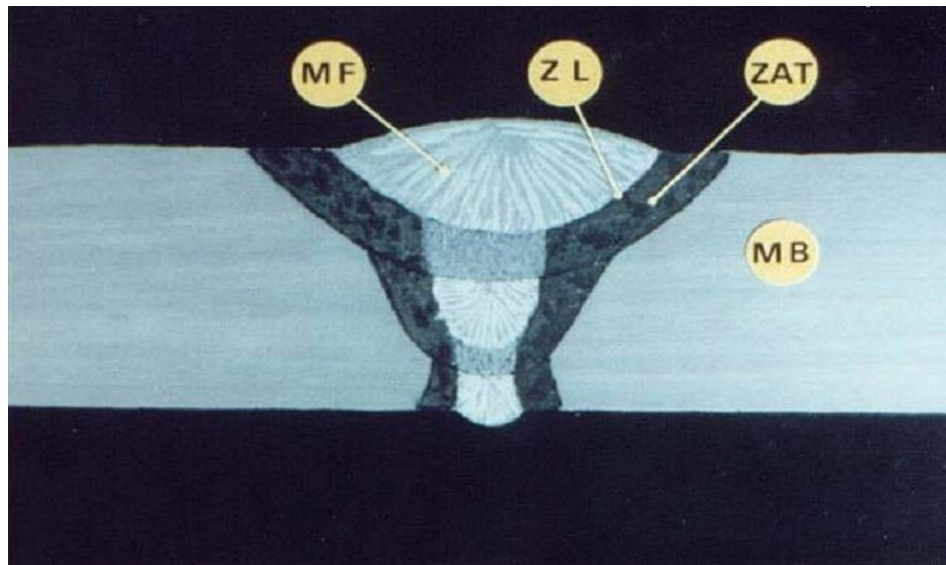


Figure II.1 : différentes zones de soudure

MF : métal fondu. **ZL** : zone de liaison. **ZAT** : zone affectée thermiquement. **MB** : métal de base.

- **Principaux défauts de soudure :**

La classification des défauts de soudure conformément à la norme **NF EN 26250**.

- a- Groupe 1 : Fissures.
- b- Groupe 2 : Cavités.
- c- Groupe 3 : Inclusion solide.
- d- Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- e- Groupe 5 : Défauts de forme.

II.3 Fissures :

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur / largeur. 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 .4 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.

a. Fissures longitudinales et transversales.

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.

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.

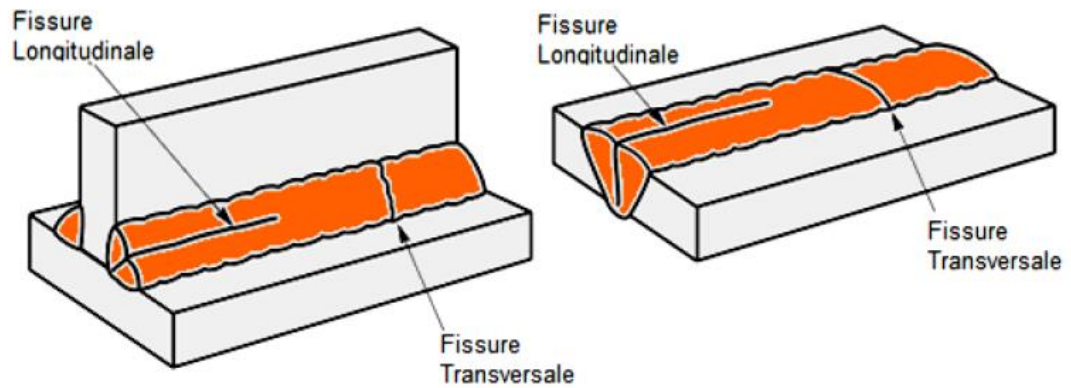


Figure II.2 : fissures longitudinales et transversales.



Figure II.3 : fissure transversale.

II.5 Types de fissures :

On a plusieurs types de fissures :

a. 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.

b. 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.

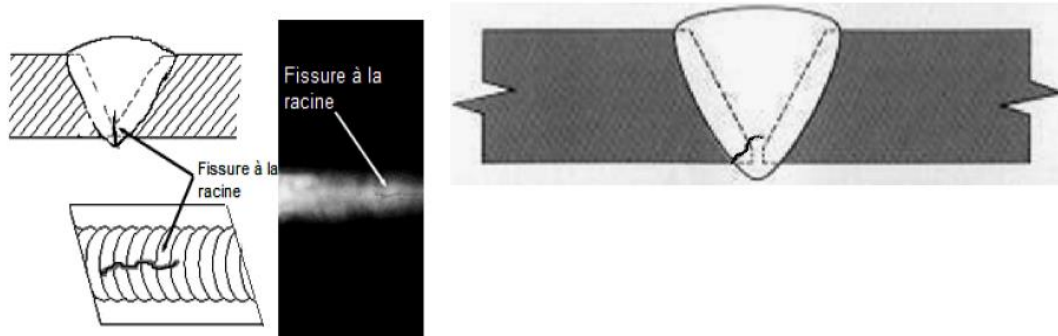


Figure II.4 : fissure à la racine.

c. 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.

d. 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.

e. 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]

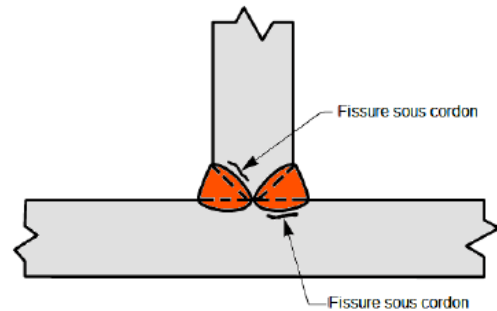


Figure II.6 : fissures Sous –Cordon.

f. Fissures à Chaud (ou de Solidification) :

✓ Définition :

Elle est due à la présence de ségrégations. Au moment de la solidification, les impuretés seront rejetées dans l'axe du cordon qui pourra fissurer sous l'effet des contraintes.

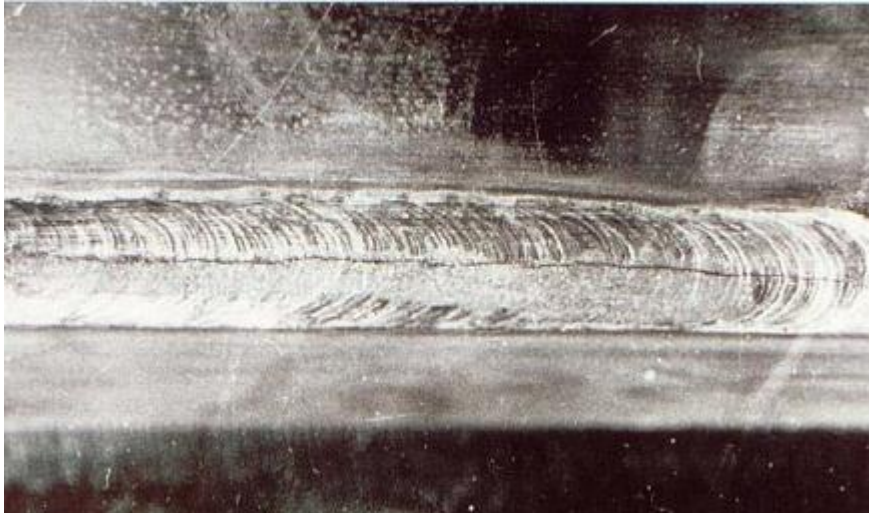


Figure II.7 : fissure à chaud.

✓ **Précautions :**

Eviter les joints étroits et profonds.

Eviter le bridage.

Modifié la vitesse d'avance.

Utiliser des matériaux de bonne qualité

g. Fissures à Froid (ou d'Hydrogène) :

✓ **Définition :**

C'est un phénomène dû à la présence combinée de trois facteurs:

- Hydrogène
- Contraintes
- Structure métallurgique sensible (trempe martensitique)

Ce type de fissure peut apparaître vers la fin du refroidissement ($0^\circ < 250^\circ$) ou de façon différée, plusieurs heures après l'exécution de la soudure.



Figure II.8: fissure à froid

✓ **Précaution :**

Pré et / ou post chauffage.

Etuvage des électrodes.

h. Fissures de Réchauffage « Reheat Cracking » :

✓ **Définition :**

La forme des fissures qui se produit dans les aciers Va ou Mo, a des niveaux suffisamment élevés, se traduit par un durcissement important de la zone affectée thermiquement suivi d'une ductilité de fluage aux joint de grains de cette zone affectée thermiquement, apparaissant ainsi lors d'un fonctionnement à température élevée.

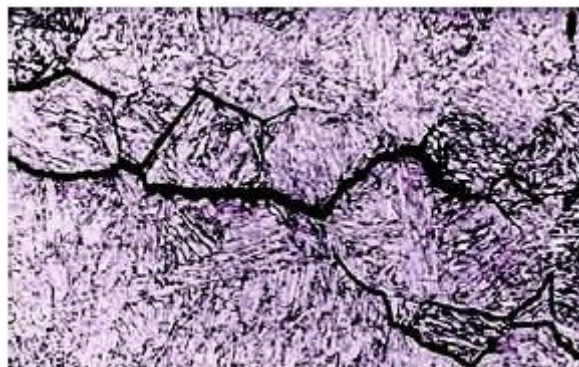


Figure II.9 : fissures de Réchauffage.

✓ **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.

i. Fissures aux orteils :

Les fissures aux orteils sont généralement des fissures froides, comme le montre l'image ci-dessous qui apparaît au niveau des orteils de soudure. Ils s'amorcent et se propagent à partir du pied de soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Ces types de fissures commencent approximativement à partir de la zone du métal de base. Les fissures se produisent en raison de l'effet des contraintes thermiques de soudage travaillant sur la ZAT. Peu de fissures Tor s'amorcent en raison du manque de ductilité du métal de base.



Figure II.10 : fissures aux orteils

j. Fissure de cratère :

Lors de l'exécution de procédés de soudage par fusion tels que le soudage à la baguette ou MIG ou TIG et si l'extrémité de la soudure n'est pas correctement terminée, cela peut entraîner la formation de fissures en réseau en forme d'étoile, comme le montre l'image ci-dessous. La fissure apparaissant à l'extrémité du cratère lors du soudage est appelée Cratère Crack ou étoile appelée comme on l'appelle parfois. Les fissures de cratère sont un type de fissure à chaud car la fissuration se produit pendant la phase de solidification. Les matériaux qui présentent un coefficient thermique élevé tels que l'acier inoxydable austénitique ou l'aluminium sont plus sujets aux fissures de cratère car la chaleur sera dissipée très rapidement et il y aura des contraintes élevées dans le cratère sous-rempli. La prévention des fissures de cratère ou des fissures de cratère peut être évitée en :

1. Remplissage du cratère final adéquat.
2. Utilisation de la technique du pas en arrière lors de la fin de la soudure.
3. Assurer une forme légèrement convexe à l'extrémité de la soudure par soudage.
4. Utilisation d'arc court.



Figure II.11 : fissure cratère.

II.6 Manque de fusion :

✓ Définition

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé, il constitue une entaille aigüe susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue.

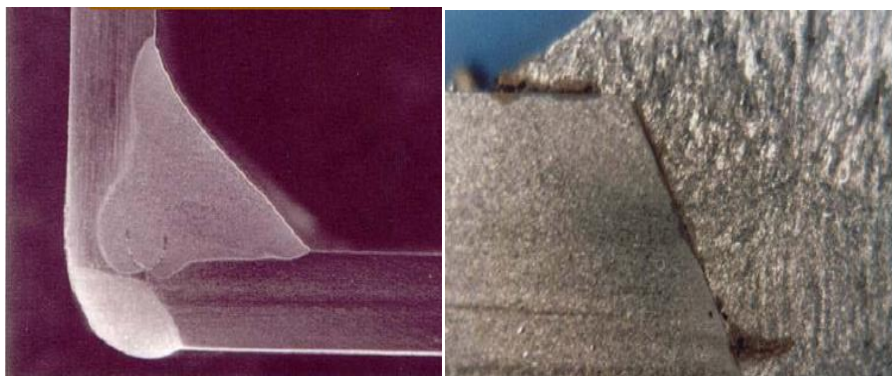


Figure II.12 : manque de fusion de la soudure

✓ Causes possibles :

Mauvaise tenue de l'électrode.

Intensité trop faible.

Electrode de diamètre trop faible.

Vitesse d'avance élevée.

Mauvaise préparation.

II.7 Manque de pénétration :

✓ Définition

On dit qu'il y a manque de pénétration lorsque la soudure ne traverse pas complètement les tôles de part en part. Ce défaut est le plus courant et aussi le plus grave parce qu'il diminue fortement la résistance du joint en créant une amorce de rupture.

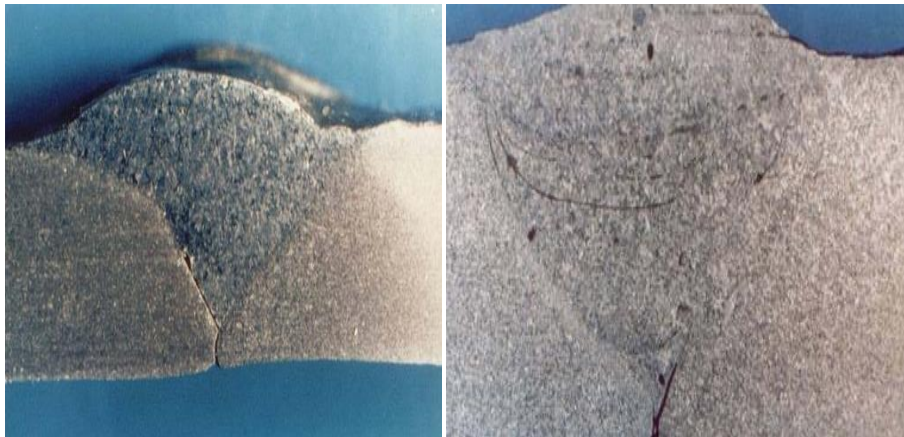


Figure II.13 : manque de pénétration

✓ Causes possibles :

Mauvaise préparation des bords.

Energie de soudage insuffisante.

Vitesse d'avance trop élevée.

Reprise envers sans grugeage préalable.

II.8 Manque de pénétration :

✓ Définition

On dit qu'il y a manque de pénétration lorsque la soudure ne traverse pas complètement les tôles de part en part. ce défaut est le plus courant et aussi le plus grave parce qu'il diminue fortement la résistance du joint en créant une amorce de rupture.

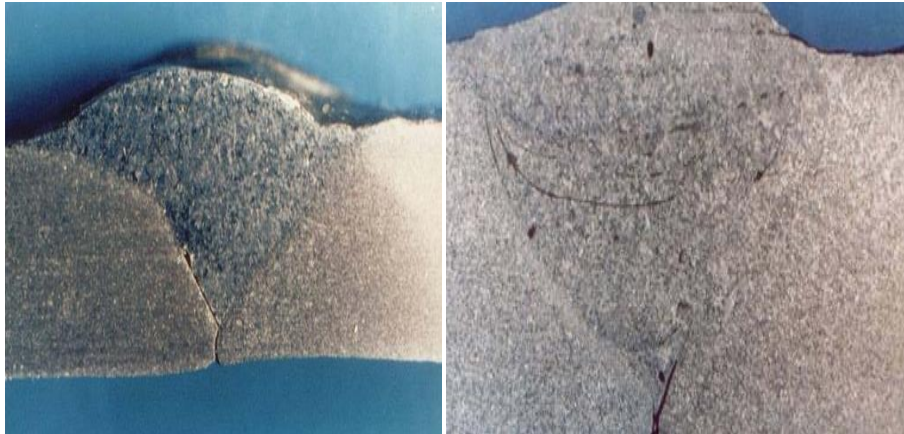


Figure II.14 : manque de pénétration

✓ **Causes possibles :**

Mauvaise préparation des bords.

Energie de soudage insuffisante.

Vitesse d'avance trop élevée.

Reprise envers sans grugeage préalable.

✓ **Les défauts dans le joint soudés :**

Manque de fusion et pénétration dans différents pièces s soudés

Manques de fusion des bords



Manques d'interpénétration



a. Les cavités :

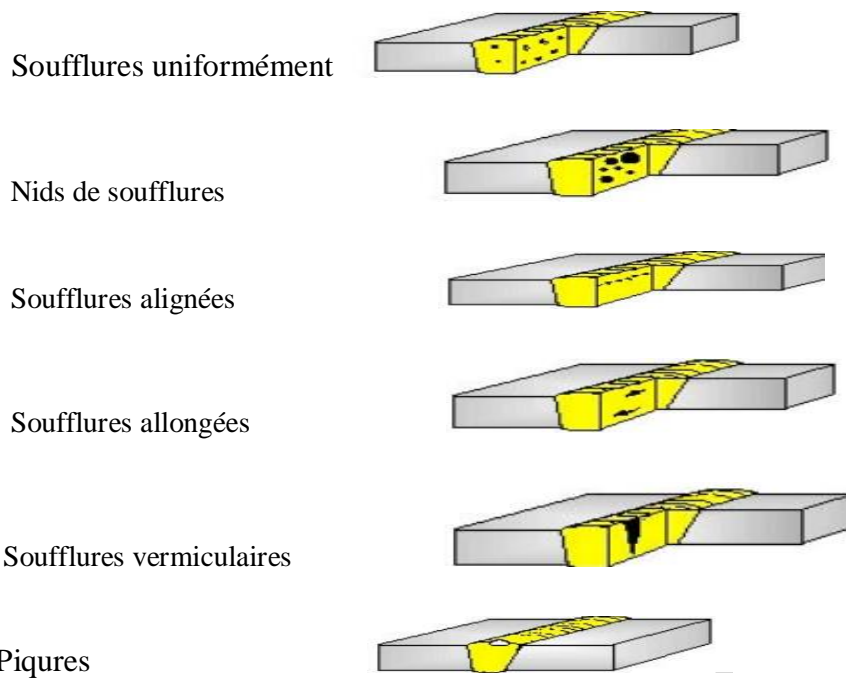
- b. Ce sont des défauts volumiques, elles comprennent .
- c. les retassures (retrait du métal) qui apparaît souvent les cratères.
- d. les soufflures qui sont des bulles de gaz réparties ou isolées et de formes diverses.
- e. les inclusions (laitier).

b. Les défauts dans le joint soudés :

Les soufflures dans les joints soudés avec différents pièces :

Soufflures sphéroïdales





c. Inclusion de laitier :

En soudure le laitier provient de la fusion des éléments non métalliques de l'enrobage, celui-ci était moins dense que le métal fondu, doit normalement flotter à la surface.

Lorsque reste inclus dans le cordon, cela peut provenir :

- Chanfreins trop étroits.
- Mauvaise décroissance entre passes.
- Choix de l'électrode.
- Mauvaise intensité.



Figure II.15 : inclusion de laitier décelée par radiographie.

d. Les défauts dans le joint soudés :

Les Inclusions dans les cordons soudés

Inclusions de laitier



Inclusions de flux



Inclusions d'oxydes



Inclusions métalliques



II.9 Défauts de forme :

a. Caniveaux :

C'est un manque de métal en forme de sillon en bordure du cordon, ils sont dus à un courant de soudage trop intense et à une technique opératoire défectueuse, ils sont fréquents lors du soudage en position verticale lorsque l'électrode est animée d'un balancement à cordon trop rapide et ne comportant pas un temps d'arrêt de part et d'autre à la surépaisseur. Leur présence peut compromettre la résistance à la fatigue.



Figure II.16 : caniveau.

b. Effondrements :

C'est un affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive, il entraîne une mauvaise répartition des contraintes et un risque de rupture différé dans le temps.



Figure II.17: effondrement et excès de pénétration

c. Défaut d'alignement :

Une dénivellation provient d'un montage incorrect des éléments à assembler ou de la rupture du pointage avant soudage.

Elle est assez fréquente lorsque l'on soude des tôles d'épaisseurs différentes. Dans ce cas certains codes ou spécification fixent la valeur de la pente des débardages qui permettent un raccordement progressif.

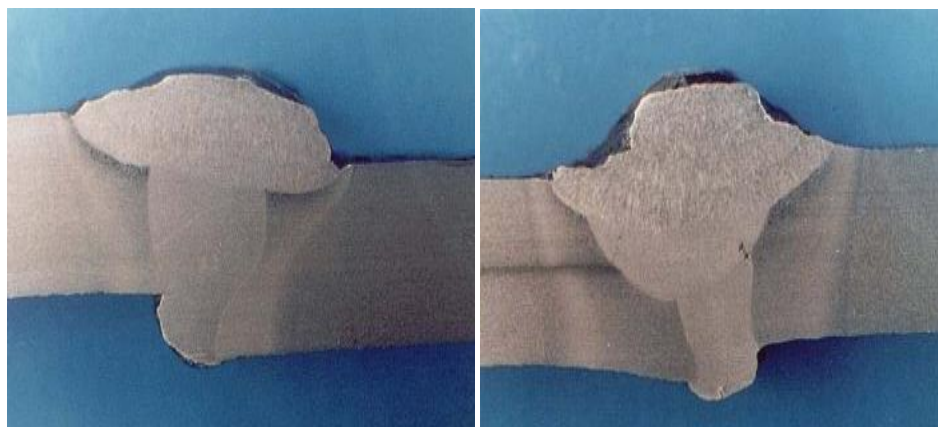


Figure II.18 : alignement.

d. Retassures :

C'est une cavité qui se forme lors du retrait dû à la solidification de tels défauts sont fréquents en fin de passe, et doivent être éliminés avant reprise.

e. Soufflures :

Les soufflures sont des inclusions de gaz à l'intérieur du métal fondu. Elles peuvent être dues à diverses causes ; Lors d'un arrêt en pleine soudure, il se forme en général une retassure au centre du dernier bain de fusion.

Les gaz emprisonnés peuvent être produits par des réactions chimiques qui naissent au sein du métal en fusion dans certains cas, ces réactions sont assez rapides pour que les gaz se dégagent en bouillonnant au cours du soudage.

Ce phénomène, qui porte le nom de (ROCHAGE) conduit à des soudures ayant l'aspect d'une mousse métallique. Des soufflures peuvent être mises en évidence par des examens radiographiques.

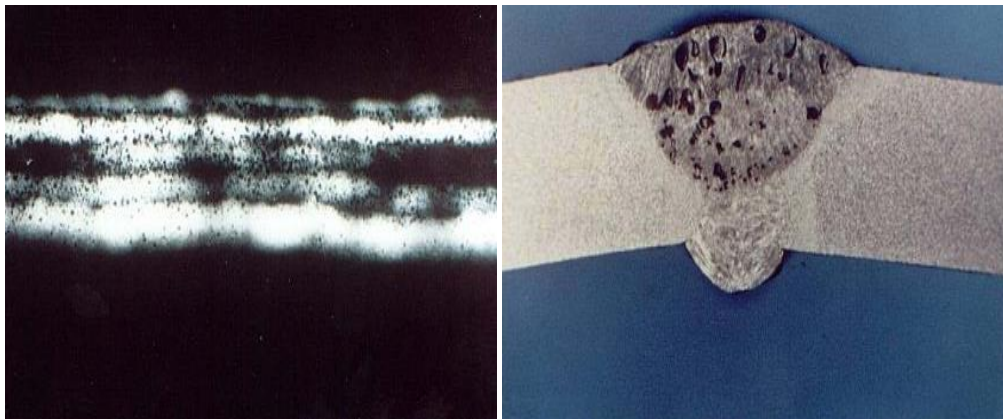


Figure II.19 : soufflures

✓ Précaution :

Décapage, dégraissage, séchage des bords.

Etuvage des électrodes.

Bon réglage de l'énergie de soudage.

I.1. Inclusion gazeuse :

a. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités :

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

Porosités vermiculaires.

Porosités de reprise.

Porosités uniformes.

b. Porosités vermiculaires :

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).

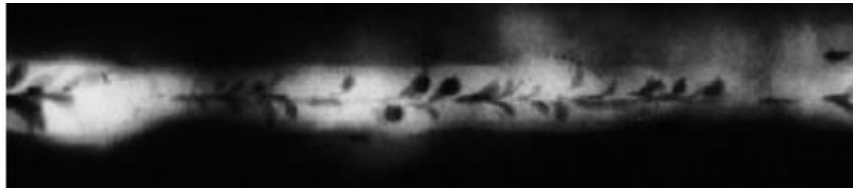


Figure II.20 : porosités vermiculaires.

✓ 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.

✓ 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.

Eviter des préparations de soudage qui causent des cavités.

c. Porosités uniformes :

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).

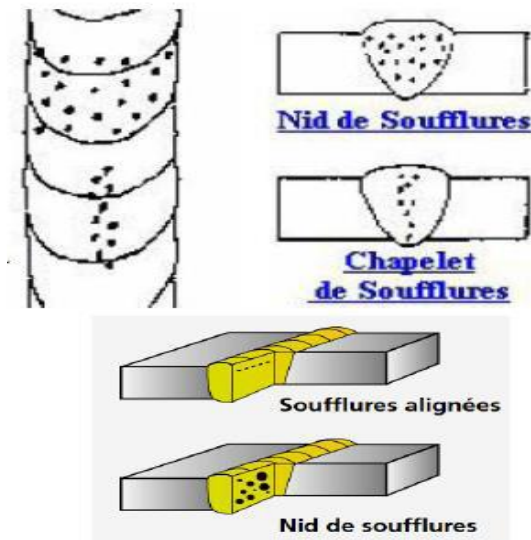


Figure II.21 : porosités uniformes.

d. Mesures préventives :

Sécher les électrodes et le métal de base.

Dégraissier 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.

Rechercher les fuites d'eau.

Ajouter des éléments désoxydants aux électrodes et aux baguettes.

Conclusion

Les opérations de soudage font parties des procédés spéciaux qui peuvent produire des défauts et des fissures longitudinale et transversale et d'autres types ; cavités ; inclusion solide ; manque de fusion et défauts de formes. Afin d'assurer la qualité des soudures, il est nécessaire de mettre en place un suivi avant, pendant et après soudage.

Chapitre III

Techniques de contrôle de soudage

III .1. 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 :

a. 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.

b. 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.

c. 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.2. Contrôles destructifs:

Les principaux essais utilisés sont les essais de texture, les essais mécaniques, les essais de Corrosion, 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.2.1. 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.2.1.1 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 oeuvre 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).

III.2.1.2 Principe de l'essai mécanique :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux (mécaniques des milieux continus). la loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression =force/surface) et les contraintes (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais.

III.2.2 Essais de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette de section cylindrique ou prismatique à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts et les allongements. L'essai permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile. La norme de référence est la **NF EN 10002-1 Octobre 1990**.

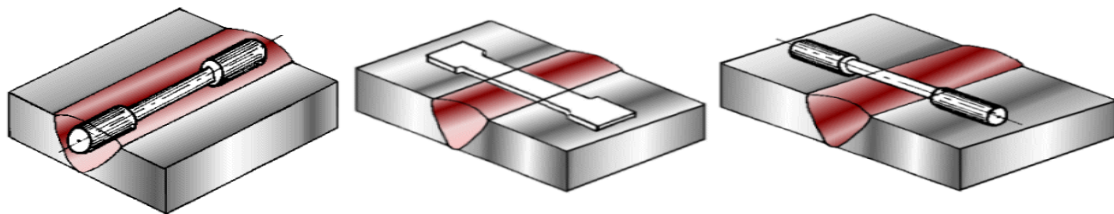


Figure III.1 : différents types d'éprouvettes de traction

- **Dimensions des éprouvettes de traction :**

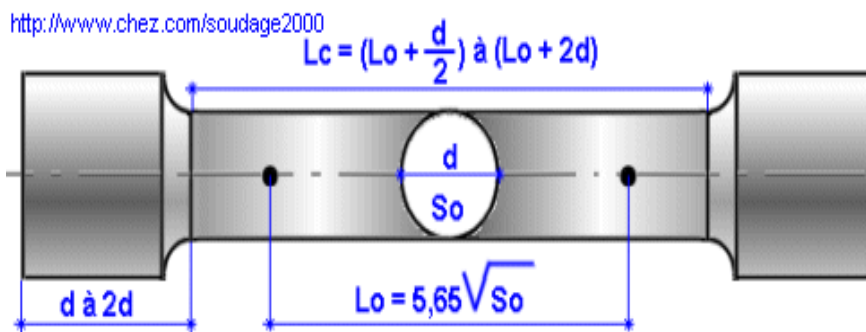


Figure III.2 : éprouvette de traction cylindrique

- **Éprouvette de traction prismatique**

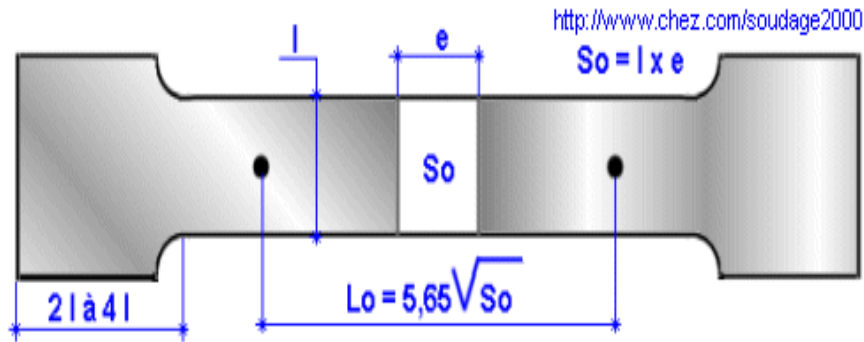


Figure III.3 : éprouvette de traction prismatique

Tableau III .1 Caractéristiques mécaniques de la traction

Caractéristique traction	Formules de calculs
Limite élastique apparente –Re	$Re (N/mm^2) = Fe (MPa \text{ ou } N) / So$
Résistance à la rupture – Rm	$Rm (N/mm^2) = Fm (MPa \text{ ou } N) / So (mm)$
Allongement en % - A%	$A(\%) = ((Lu- Lo)/Lo) . 100$
Striction en % -Z%	$Z(\%) = ((So - Su)/So) .100$
Allongement de striction en %	$Zu (\%) = ((So - Su)/Su) .100$

- **Diagramme conventionnel de traction :**

La phase élastique est représentée par la ligne OB. L'éprouvette se déforme sous l'action de la charge et revient approximativement à sa longueur initiale si la charge est supprimée.

La phase plastique est représentée par la ligne BC . Les déformations de l'éprouvette sont permanentes et irréversibles.

La phase de striction est représentée par la courbe entre Fm et D. La rupture de l'éprouvette est représentée par la lettre D.

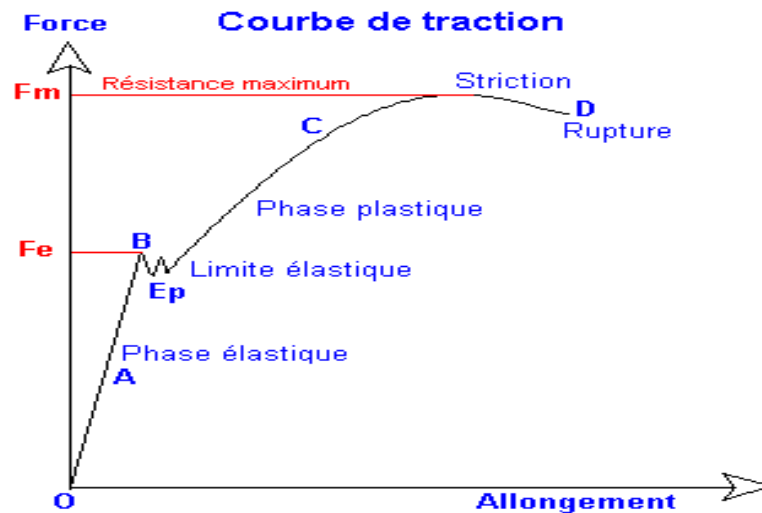


Figure III.4 : courbe de traction

- **Remarques générales :**

Dans le cas des matériaux fragiles comme les aciers bruts de trempe et les fontes dites grises, il n'y a pas de déformation plastique, R_e et R_m sont confondus et l'allongement est nul.

- **Valeurs de résistance mécanique ou charge de rupture :**

La valeur de résistance mécanique d'un matériau peut varier de 80 N/mm^2 pour certains aluminiums à 2000 N/mm^2 pour certains aciers spéciaux.

$$\text{Rappel : } 1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 0,102 \text{ Kgf/mm}^2$$

III.2.3 Essais de résilience :

L'essai de flexion par choc (essai de résilience ou essai de rupture fragile) consiste à mesurer le travail nécessaire pour rompre, à l'aide d'une masse pendulaire, un barreau usiné de forme carré de 1 cm^2 de section, entaillé en son milieu par une encoche et reposant sur deux appuis. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale appelé mouton pendule rotatif qui enregistre l'énergie absorbée par la rupture. L'essai permet de caractériser les propriétés de résistance d'un matériau aux chocs. La norme de référence est la NF EN 10045-1 Octobre 1990 et la NF EN 875 Novembre 1995 .

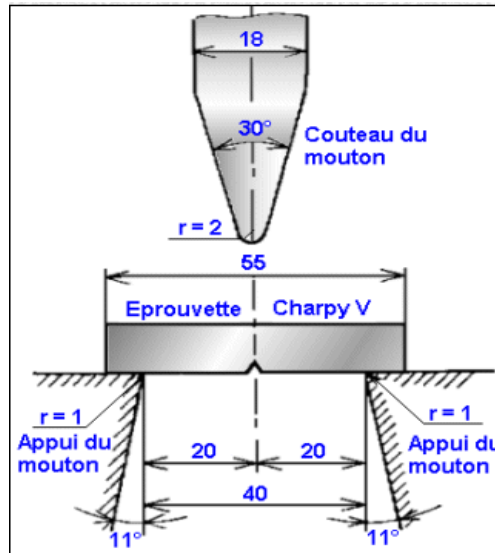


Figure III.5 : essai de résilience

- Localisation des éprouvettes de résilience dans un joint soudé :

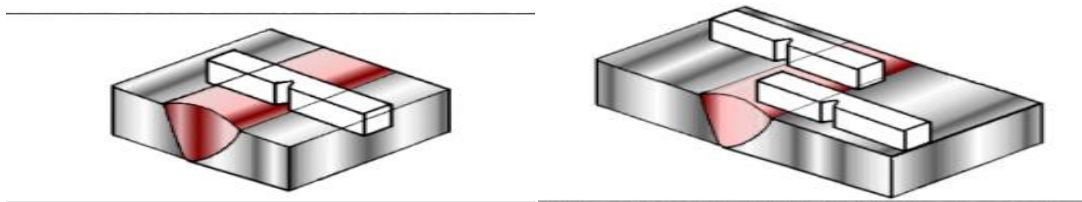


Figure III.6 : éprouvettes de résilience dans un joint soudé

- Les types et dimensions des éprouvettes de résilience :

Tableau III.2 : dimension des éprouvettes de résilience

Différents types d'éprouvettes de résilience	
Type d'éprouvette	Observation
<p>Eprouvette Charpy V</p>	CHARRY-ISO entaille en V profondeur d'entaille = 2 mm Angle de vé = 45° Rayon du fond entaille = 0.25 mm
<p>Eprouvette DVM</p>	DVM profondeur d'entaille = 3 mm Rayon du fond entaille = 1 mm
<p>Eprouvette MESNAGER</p>	MESNAGER profondeur d'entaille = 2mm Rayon du fond entaille = 1 mm

- **Températures d'essais des résiliences :**

Les essais de résiliences sont réalisés principalement à la température ambiante et à des températures inférieures à 0° Celsius (de - 20° C à - 196° C) Les liquides réfrigérants utilisés pour abaisser la température des éprouvettes sont :L'alcool jusqu'à - 80° C

Le fréon jusqu'à - 155° C

L'azote liquide de - 155° C à - 196° C

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

- **Courbe de transition ductile - fragile :**

Cette courbe est déterminée par l'exécution de 3 séries d'éprouvettes de résiliences à différentes températures. Cette courbe permet de mettre en évidence, si elle existe, une zone de transition ductile-fragile de l'acier. Les faciès des surfaces des éprouvettes rompues sont :

- faciès à grains ou cristallin à 100% dans la zone de rupture fragile
- faciès mixte dans la zone de transition ductile - fragile
- faciès sans grains dans la zone de rupture ductile

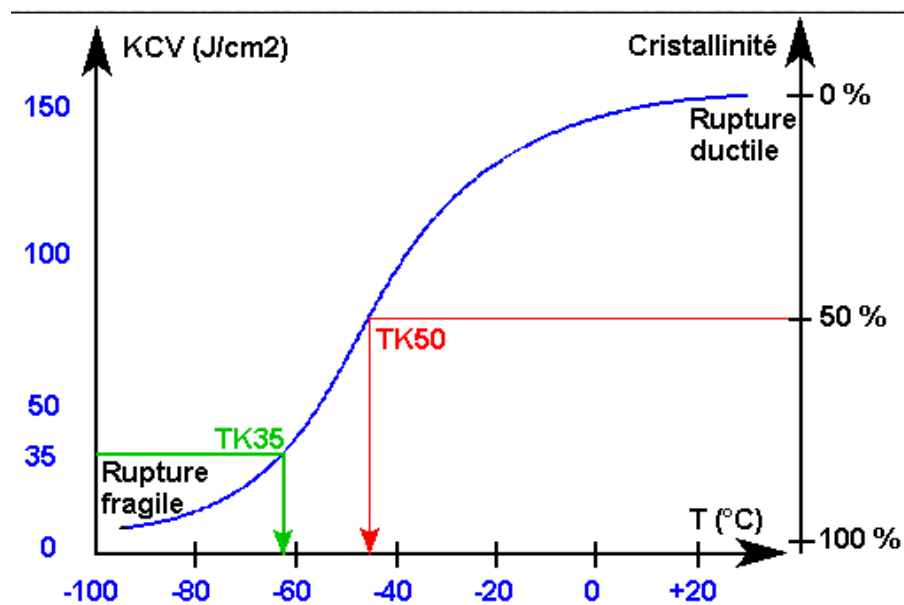


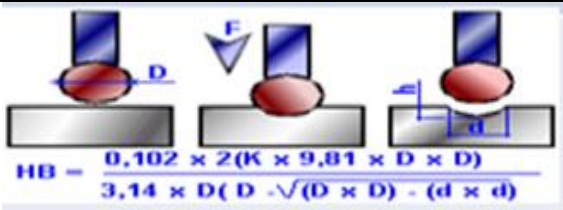
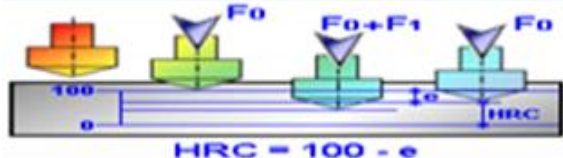
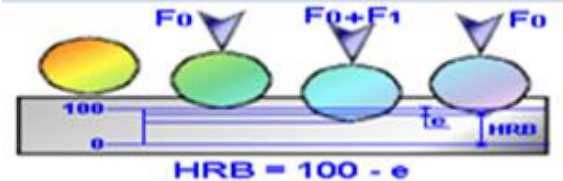
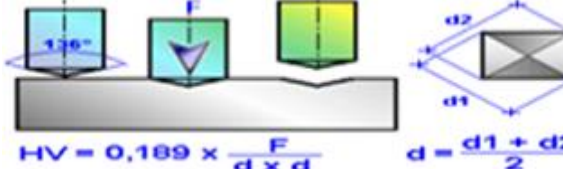
Figure III.7 : courbe de transition ductile – fragile

III.2.4 Essais de dureté :

L'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur sous une charge d'appui F donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions de l'empreinte du pénétrateur laissée sur la surface du matériau contrôlé. L'empreinte est d'autant plus importante que le matériau est mou. Les essais de dureté caractérisent la résistance qu'offre un matériau à la pénétration.

- Les différents types d'essais de dureté :

Tableau III.3 : types d'essais de dureté

Différents types d'essais de dureté	
Type d'essai	Observation
 $HB = \frac{0,102 \times 2(K \times 9,81 \times D \times D)}{3,14 \times D(D - \sqrt{(D \times D) - (d \times d)})}$	<p>Essai Brinell – HB</p> <p>Le pénétrateur est une bille en acier trempé ou carbure de tungstène de ØD sous une charge F en newtons maintenue 5 seconde . on mesure le (D) de l'empreinte (d doit être compris entre 0.2 à 0.5 .D) . K= 30 pour les aciers</p>
 $HRC = 100 - e$	<p>Essai Rockwell C –HRC</p> <p>Le pénétrateur est un cône de diamant de 120°d'angle et de charge égale à 1373 N. on mesure l'accroissement (e) en profondeur ou enfoncement rémanent .</p>
 $HRB = 100 - e$	<p>Essai Rockwell B-HRB</p> <p>Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1.6 mm de diamètre et de charge égale à 883N. on mesure l'accroissement e en profondeur ou enfoncement rémanent</p>
 $HV = 0,189 \times \frac{F}{d \times d}$ $d = \frac{d1 + d2}{2}$	<p>Essai Vickers – HV</p> <p>Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F. on mesure les diagonales (d) de l'empreinte .</p>

III.2.5 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.

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.

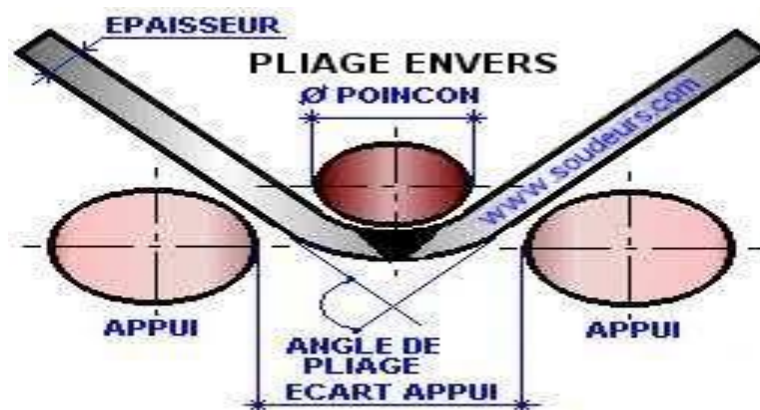


Figure III.8 : essai de pliage

III.2.6 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.3. Contrôles non destructifs :

Le Contrôle Non Destructif a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'état de la pièce, le (CND) a pour but de rechercher les défauts internes ou superficielle des structures, matériaux, pièce et assemblage.

Les techniques de CND sont nombreuses. Citons:

- le visuel
- le ressuage
- les ultrasons
- la magnétoscopie
- les courants de Foucault
- la radiographie

III.3.1 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.

✓ **Principe** : observation de la surface apparente de la pièce

Lecture directe : pas d'interruption du parcours optique entre l'œil et la pièce examinée

Lecture indirecte : interruption du parcours optique

Lecture assistée : utilisation d'accessoires



Figure III.9 : examen visuel

✓ **Avantages et inconvénients :**

Méthode simple, rapide, peu coûteuse

La surface doit être propre.

Détection limitée aux défauts visibles

Dimensionnement incertain en longueur, pas de dimensionnement en profondeur

Pas d'enregistrement (sauf par photo ou vidéo).

III.3.2 Contrôles par ressuage:

Cette méthode est la plus utilisée et la plus ancienne, son intérêt réside dans la simplicité de sa mise en œuvre et touche tout types de matériaux sauf poreux et rugueux . Elle permet de rendre nettement visible des discontinuités débouchant en surface.

✓ **Principe de ressuage :**

Après avoir bien préparé la surface à contrôler, on y applique un liquide qui va pénétrer dans les discontinuités par capillarité. Après un temps de pénétration, on enlève l'excès de pénétrant de la surface et on applique une fine couche de révélateur. Ce révélateur absorbe le pénétrant resté dans les discontinuités et forme ainsi une image bien perceptible.

✓ **Etape de ressuage :**



Figure III.10: première étape de ressuage



Figure III.11 : deuxième étape de ressuage

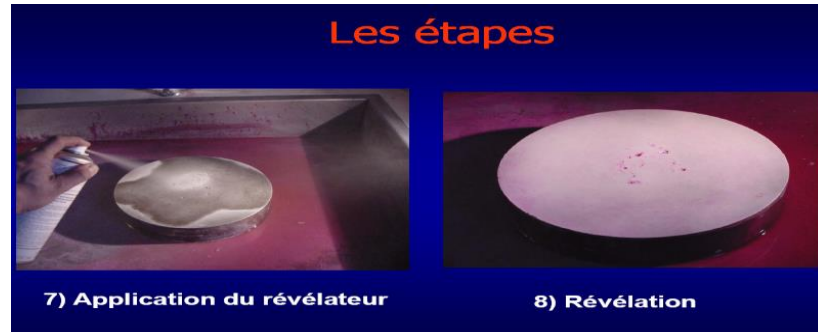


Figure III.12 : troisième étape de ressuage

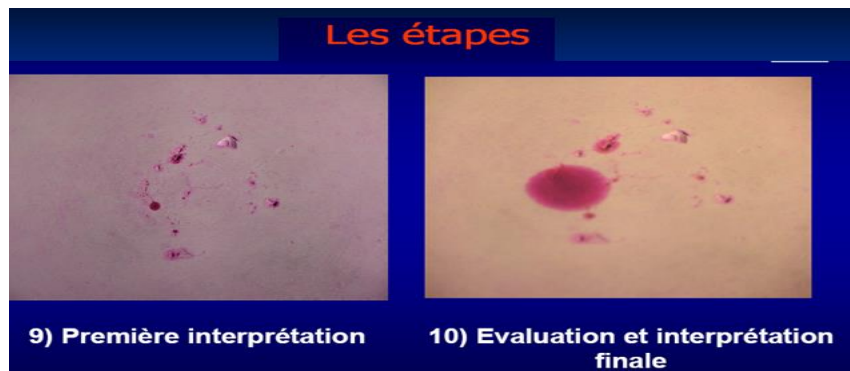


Figure III.13 : quatrième étape de ressuage



Figure III.14 : cinquième étape de ressuage

a. Pénétrants

Les propriétés.

Bonne capillarité.

Bonne perceptibilité.

Peu volatil.

Point d'éclair élevé.

Faible toxicité.

Bon marché.

b. phénomène de surface

Définition de la tension superficielle: est un phénomène d'augmentation de l'énergie à la surface d'un fluide et qui en augmente localement la cohésion. Cet effet permet par exemple aux insectes de marcher sur l'eau, à un objet léger de se maintenir à la surface d'un liquide, le liquide au contact d'un solide.

Tension superficielle

Élément	Tension Superficielle
Mercure	0,470 N/m
Eau	0,075 N/m
Alcool	0,025 N/m
Acétone	0,023 N/m
Pénétrants	0,029 N/m

Figure III.15 : tension superficielle

Dans la plupart des cas, les liquides ont tendance à l'étaler sur une surface solide.

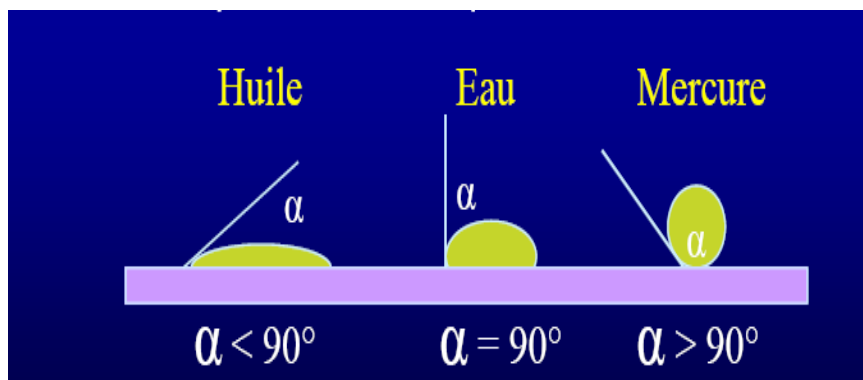


Figure III.16 : mouillage

C'est la propriété pour un liquide de s'étaler à la surface d'un solide ou d'un liquide. On dit que l'huile a un bon pouvoir de mouillabilité car son étalement est important. Plus l'angle α est petit, plus le pouvoir mouillant est élevé.

c. Procédure

La surface est préparée.

Un liquide pénétrant est appliqué en surface.

les discontinuités (fissures, porosité, ...) débouchant en surface.

Le surplus de liquide est retiré de la surface.

Un révélateur est appliqué.

La pièce est inspectée visuellement sous un éclairage approprié.

La pièce est nettoyée à nouveau.

d. Préparation de la surface

Pour effectuer une inspection fiable, les pièces doivent être propres (absence de poussière, de rouille, d'huile, d'écaillage, ...). L'étape de pré-nettoyage doit éliminer les contaminants de la surface sans obstruer les orifices des défauts.

e. Application du pénétrant

Par immersion

Au pinceau

Par pulvérisation

Bombes aérosol

Pistolet à air comprimé



Figure III.17 : application du pénétrant

f. Temps de pénétration

Le temps de pénétration est généralement de 20 minutes. Des temps jusqu'à une heure peuvent être utilisés dans le cas de recherche de plus petits défauts. Pour la technique par immersion, le temps de pénétration équivaut au temps de trempage + le temps d'égouttage.

- Enlèvement de l'excès de Pénétrant :



Figure III.18 : enlèvement de l'excès de pénétrant

- **Elimination de l'excès de pénétrant par eau**

On utilise un jet d'eau inférieur à 2 bar puis un chiffon sec blanc propre et non pelucheux.

- **Elimination de l'excès par solvant**

Faire essuyer par un chiffon sec blanc propre et non pelucheux imbibé de solvant.

- **Enlèvement de l'excès de Pénétrant Emulsifiant lipophile**

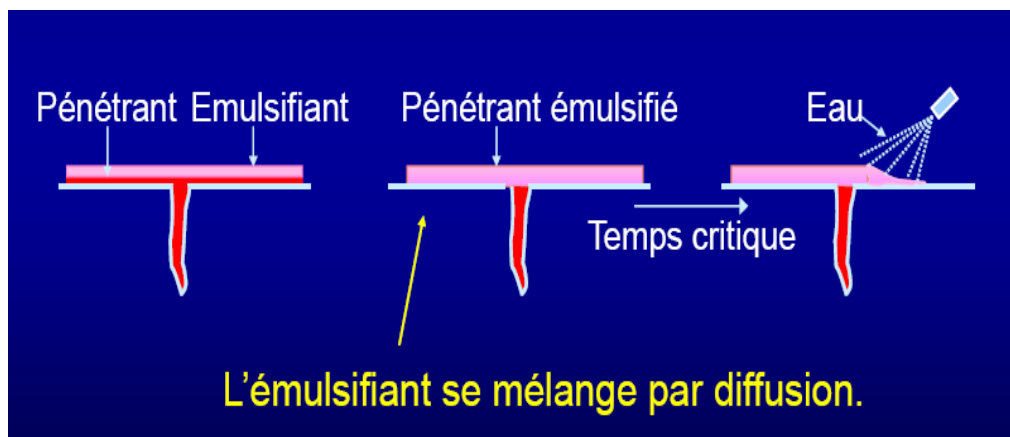


Figure III.19 : l'émulsifiant se mélange par diffusion

- Enlèvement de l'excès de Pénétrant Emulsifiant hydrophile

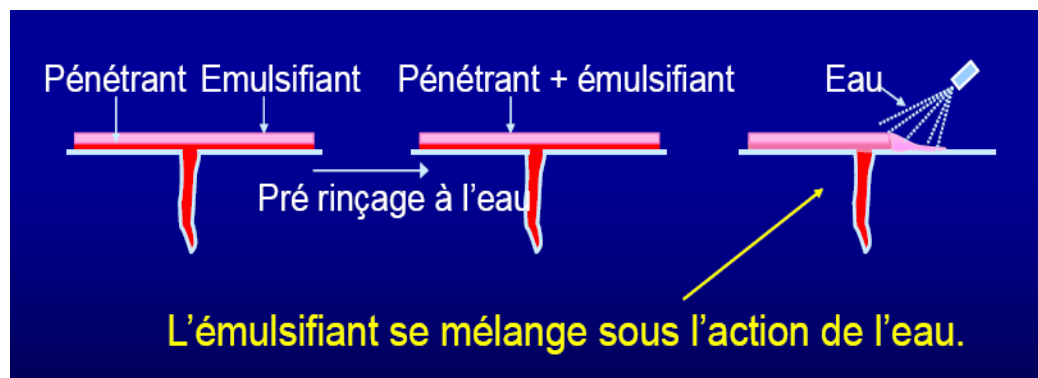


Figure III.20 : l'émulsifiant se mélange sous l'action de l'eau

g. Le séchage de la pièce :

Avant d'appliquer le révélateur, la pièce doit être séchée dans un séchoir à recirculation d'air chaud.

Le séchage dans un four dont la température inférieure à 80 c.

h. Application du révélateur :

✓ **Rôles du révélateur :**

Faire suinter à la surface tout pénétrant retenu dans les discontinuités et l'étaler autour du défaut pour en augmenter la perceptibilité.

Produire un bon contraste entre le pénétrant et le révélateur.

✓ **Application du révélateur**

Le révélateur est appliqué par saupoudrage (Révélateur sec).

La poudre doit être agitée régulièrement pour homogénéiser la solution (Révélateur humide aqueux).

La poudre en suspension dans une solution volatile nécessite un séchage de la pièce avant l'application (Révélateur humide non aqueuse).

✓ Temps de révélation

Pendant ce temps, il convient de suivre l'apparition d'éventuelles indications.

Ce temps est d'environ 20 à 30 minutes.

✓ Evaluation et interprétation

L'interprétation et la détermination du type de l'indication et la comparer avec les critères d'acceptation.

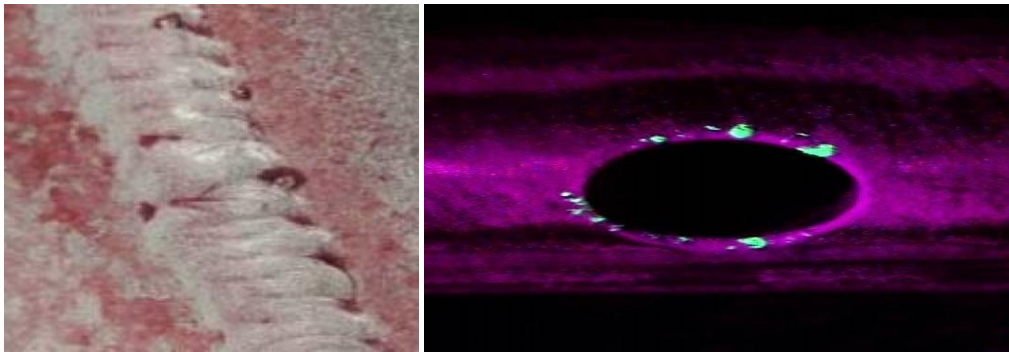


Figure III.21 figure III.22 : évaluation et interprétation

i. Rapport

✓ Le rapport doit au moins comprendre:

La dénomination et l'identification des pièces contrôlées.

L'identification des zones contrôlées.

L'état de surface (rugueuse, meulée, sablée, ...).

L'identification des produits utilisés.

Les temps de pénétration et de révélation.

L'identification des pièces inacceptables avec leurs défauts.

La date du contrôle .

Le nom et qualification de l'opérateur.

j. 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.

k. 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.

III.3.3 Ultrasons

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

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

Le phénomène initial du son ou d'un ultrason est toujours produit par un corps élastique animé de vibrations mécaniques dues par exemple à un choc (diapason), à une impulsion électrique (tonnerre) ou à un jet gazeux interrompu (sirène).

Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques. Elles ne se diffèrent entre eux que par leurs fréquences.

Tableau III.4 fréquences des ultrason .

0 à 16 Hz	16 Hz à 16.103 Hz	16.103Hz à 150.106 Hz	≤ 150.106 Hz
Infrasons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 105 Hz et 20.106 Hz. On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période.

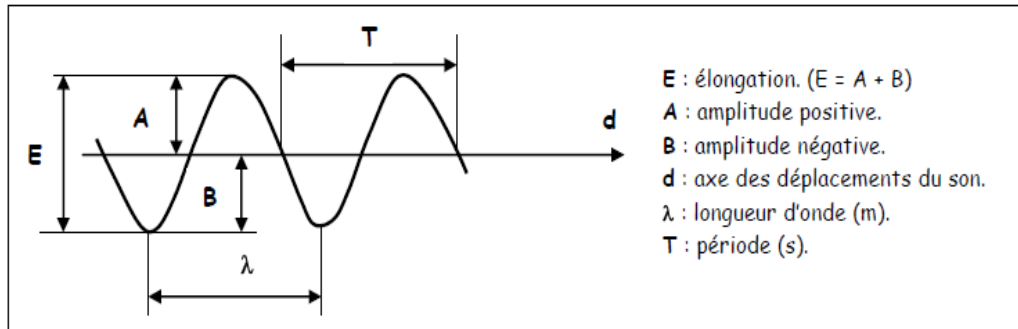


Figure III.23 : représentation des vibrations du son (sinusoïde)

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

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

- L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde :

$$\lambda = v T = v / f \text{ (\lambda en m, v en m/s et f en Hz)}$$

On distingue trois types d'onde :

- Onde longitudinale ou de compression** : la direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

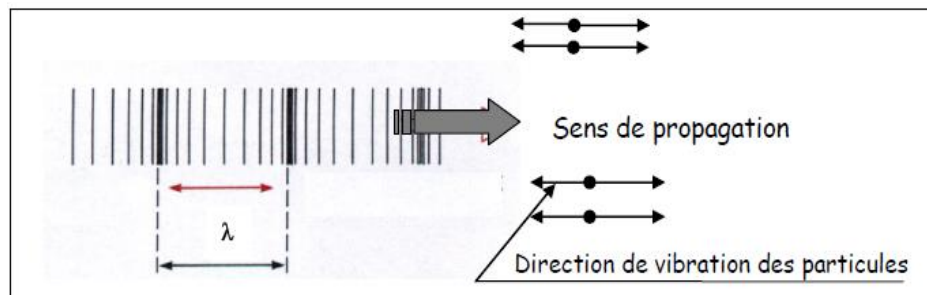


Figure III.24 : onde longitudinale

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

Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.

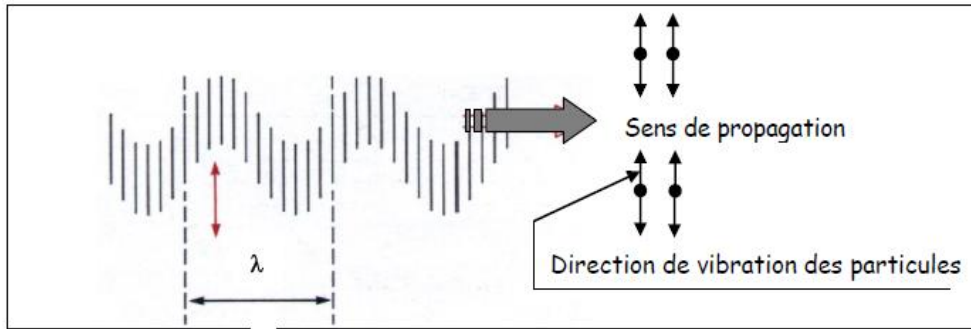


Figure III.25 : onde transversale

- c. **Onde de surface** : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide.

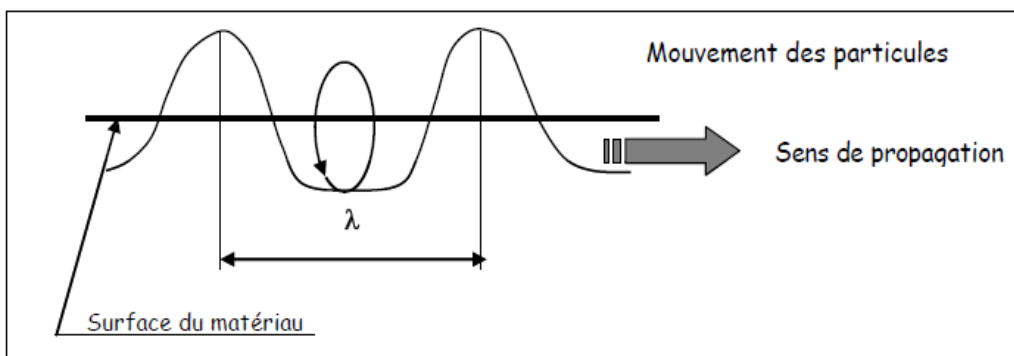


Figure III.26 : onde de surface

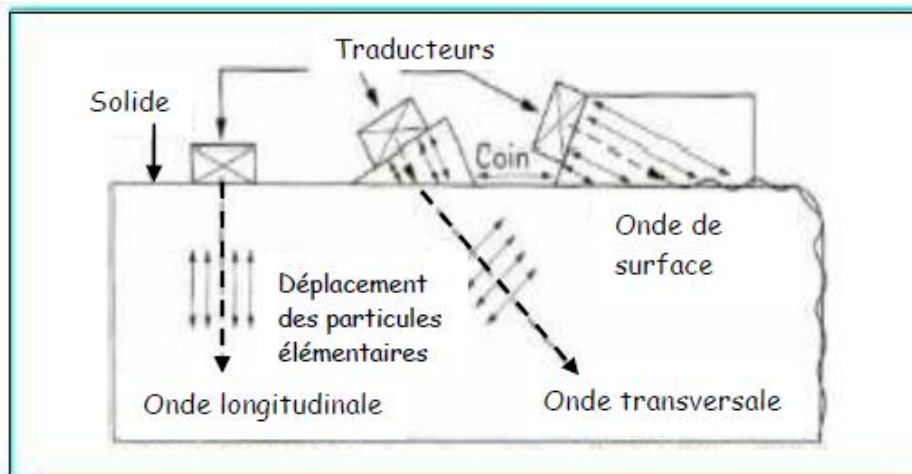


Figure III.27 : types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide

- d. **Vitesse de propagation**

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

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

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

Onde longitudinale :

$$V_l = \frac{\sqrt{E} \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

Onde transversale :

$$V_t = \frac{\sqrt{E}}{2\rho(1 + \nu)} \quad (2)$$

E : Module d'Young du matériau N/m² ;

p : masse spécifique du matériau (Kg/m³) ;

v: coefficient de Poisson.

e. Matériel mis on ouvre

Postes U.S. analogiques ou numériques.

Transducteurs OL, OT et à angles variables.

Mesureurs d'épaisseurs.

Logiciels de saisi et de suivi des mesures d'épaisseurs.



Figure III.28 :appareil de contrôle par US



Figure III.29 : transducteurs



Figure III.30 : mesureur d'épaisseur

f. Palpeurs piézoélectriques :

En règle générale, un palpeur est constitué autour d'une pastille piézoélectrique circulaire ou rectangulaire taillée dans le matériau piézoélectrique choisi, dont les faces parallèles sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est placée sur un bloc amortisseur dense et très absorbant. L'ensemble de ces deux éléments et une bobine d'accord sont placés dans un boîtier.

Métallique complété par un connecteur électrique et une face de protection devant la pastille piézoélectrique. Cette face avant joue le double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité. Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résine, carbures non métalliques...). L'épaisseur de cette face de protection n'a pas d'influence sur l'énergie transmise si elle multiple entier de la demi-longueur d'onde dans ce matériau.

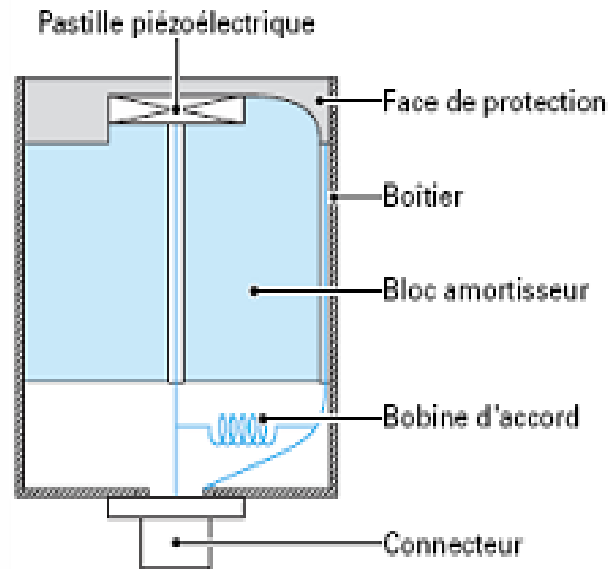


Figure III.30 : structure d'un palpeur ultrasonore

g. Déterminations des défauts internes

Défaut de soudage : porosité, manque de fusion, défaut de pénétration, inclusions de laitier, fissures sur les bords, fissures en racines.

Contrôle des pièces moulées.

Mesures d'épaisseurs...

Recherche de fissures sur les installations en service.

h. Contrôle de serrage

Il consiste à mesurer l'allongement des vis ou des goujons sous l'effet de la tension de serrage. Le transducteur ultrasonore posé sur la tête de la vis ou du goujon agit comme émetteur d'ondes ultrasonores qui se propagent longitudinalement dans le matériau et comme un récepteur qui recueille l'onde réfléchi sur le fond de la vis. Cette opération est répétée plusieurs centaines de milliers de fois par seconde.

L_i : longueur de la vis au repos (mesurée par les ultrasons) ;

L_f : longueur de la vis après serrage (mesuré par ultrasons) ;

$L_f - L_i$: allongement ultrasonore : due à l'allongement mécanique de la vis et à la diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores due à la tension induite dans le matériau. (Généralement l'effet de la vitesse est dominant).

Ces deux effets sont proportionnels à la tension, ainsi que leur combinaison.

T (daN) = K . Allongement ultrasonores (ns).

i. 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.

j. 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.

III.3.4 Magnétoscopie

a. Principe du contrôle par magnétoscopie :

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant (obstrués ou non) et sous-jacents (de 1 à 2 mm) sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique important ($> 2400 \text{ A / m}$) traverse la pièce à contrôler jusqu'à saturation magnétique avec l'application simultanée en surface d'une liqueur magnétique colorée ou fluorescente constituée de traceurs comme produit indicateur. En présence d'un défaut plan ou volumique, les lignes de force du champ sont déviées et accumulent la poudre magnétique au droit du défaut pour le rendre visible à l'œil nu. La perpendicularité du défaut par rapport aux lignes du champ magnétique accentue la sensibilité de détection du contrôle.



Figure III.32 : principe de contrôle par magnétoscopie

b. Rappel de quelques notions de magnétisme :

Le **champ magnétique (H)** est exprimé en Ampère par mètre (A / m) ou en Oersted (1 Oe = 80 A / m).

L'**induction magnétique (B)** est exprimée en Tesla (T) ou en Gauss (1 Gauss = 10^{-4} Tesla).

B (Tesla) = $\mu_0 \times \mu_r \times H$ (A / m) ou $B = \mu \times H$ avec $\mu = \mu_0 \times \mu_r$

- μ : perméabilité absolue du matériau (exprimée en Henry / mètre ou H / m)
- μ_0 : perméabilité du vide ($4 \times 3,1416 \times 10^{-7}$ H / m)
- μ_r : perméabilité relative du matériau

Le **flux magnétique (ϕ)** est exprimé en Weber (Wb) ou en Maxwell (M) (1 Wb = 10^8 Maxwell).

$$\phi = B \times S \times \cos\alpha$$

c. Méthodes d'aimantation

Deux méthodes de magnétisation sont possibles :

- ✓ **Aimantation par passage de champ magnétique**

Deux méthodes de magnétisation par passage de champ magnétique sont réalisables :

- ✓ **Par circuit magnétique fermé**

Un électro-aimant fixe ou portatif à pièces polaires fixes ou articulées est utilisé au contact de la pièce à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à l'axe Nord-sud et à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

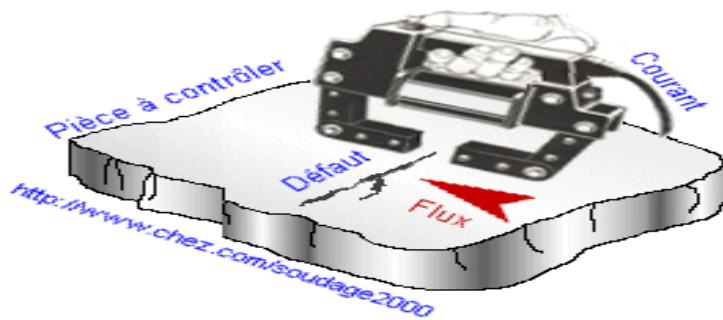


Figure III.33 : circuit magnétique fermé

Des spires sont enroulées sur la paroi de la pièce annulaire à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

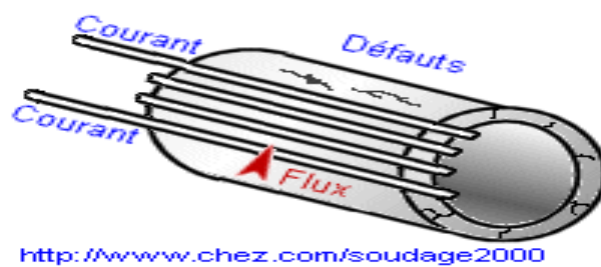


Figure III.34 : paroi de la pièce annulaire à contrôler

Un conducteur central traversé par un courant est placé au centre de la pièce annulaire à contrôler. L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

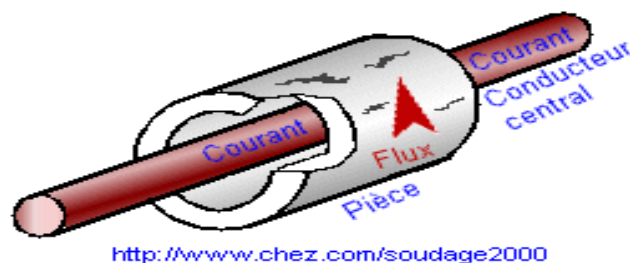


Figure III.35 : conducteur centrale

✓ Par circuit magnétique ouvert

Un solénoïde ou des bobines fixes ou mobiles sont utilisés et traversés par un courant. La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen.

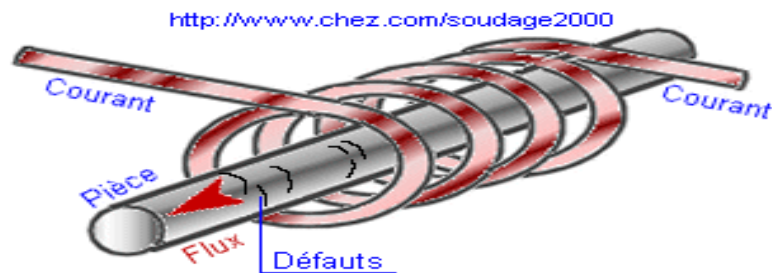


Figure III.36 : circuit magnétique ouvert

d. Aimantation par passage direct de courant électrique :

L'aimantation est réalisée par passage direct de courant dans la pièce à contrôler soit avec un appareil fixe ou banc d'aimantation, soit avec un système à deux électrodes (contrôle à la touche). L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés.

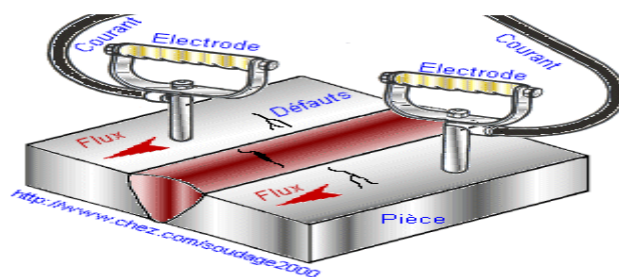


Figure III.37 : aimantation par passage direct de courant électrique

Le courant électrique utilisé peut être :

Courant alternatif (effet de self) .

Courant redressé monophasé une alternance .

Courant redressé monophasé deux alternances.

Courant continu (pas d'effet de self).

Courant pulsé .

e. Produits détecteurs magnétiques

✓ Liqueur magnétique

La détection des défauts fins est réalisée avec une liqueur magnétique constituée de poudres magnétiques très fines colorées ou fluorescentes (de 0,1 micron à 2 microns) en suspension dans de l'eau avec un agent mouillant, un anti moussant, un agent bactéricide et un inhibiteur de corrosion ou bien dans un produit pétrolier à base d'huile légère. Cette liqueur est régulièrement brassée par agitation pour conserver une concentration uniforme. La concentration est de l'ordre de 2 à 10 grammes de poudre colorée par litre et de 0,5 à 2 grammes de poudre fluorescente par litre.

✓ Poudre sèche magnétique

La détection des défauts plus grossiers est réalisée avec une poudre sèche constituée de grains de spinelle de fer $Fe_3 O_4$ - $Fe O$ et de fer oxydé finement divisés (de l'ordre de 10 à 30 microns)

f. Contrôle de la qualité de l'aimantation

La vérification de l'intensité du champ magnétique qui doit être supérieure à 2 400 A / m est faite au moyen d'un mesureur de champ tangentiel.

L'opérateur contrôleur peut éventuellement utiliser un témoin d'aimantation pour vérifier la qualité de la détection magnétique.

Témoin AFNOR .

Croix de BERTHOLD.

Témoin ASME.

g. Mode d'examen

Le contrôle est réalisé :

- soit en lumière blanche (500 lux minimum à la surface de la pièce) en utilisant des traceurs colorés et des fonds blancs contrastants (en bombe aérosol).
- soit en lumière ultraviolette avec lampe de Wood (100 à 150 Watts) en utilisant des traceurs fluorescents (l'intensité lumineuse U.V. doit être supérieure à 8 W/ m²).

h. Avantages

Facilité de détection des défauts débouchant et sous-jacents (à 2 mm maxi).

Les défauts peuvent être matés ou obstrués.

Rapidité relative d'obtention des résultats.

Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

i. Inconvénients

Contrôle exclusivement réservé aux matériaux ferromagnétiques.

Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (> 2 mm de profondeur).

Les opérateurs doivent être formés et expérimentés

Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)

Risque électrique par passage direct de courant.

Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.

Démagnétisation obligatoire après contrôle.

Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

III.3.5. Radiologie Industrielle

La radiographie industrielle est un essai de contrôle non destructif qui permet de mettre en évidence des hétérogénéités physiques (criques, retassures, inclusions, etc....) par absorption différentielle de rayons X ou γ qui impressionnent une émulsion photographique.

La lecture des différences de noircissement au négatoscope permet de détecter et identifier les défauts.

a. Principe :

Le principe du contrôle radiographique est de placé l'objet à contrôlé entre une source de rayonnement (X ou Gamma) et une émulsion photographique (Films Radiographique).

Le noircissement du film (après développement) dépend de la quantité de rayonnement reçu par le film.

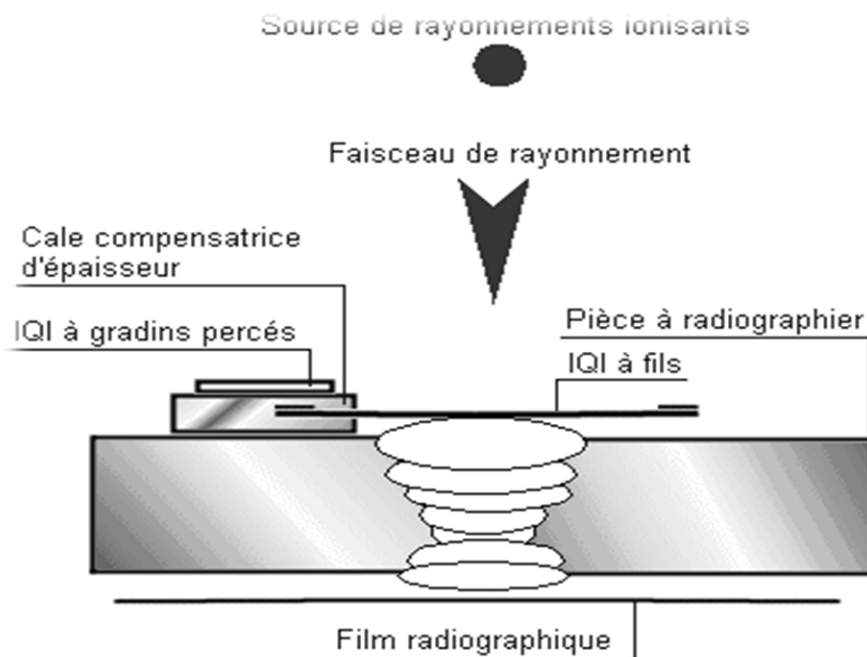


figure III.38 : principe de la radio industrielle .

b. domaine d'application :

Eprouvette d'homologation (cas de soudage)

Aux cours d'élaboration du produit (contrôle intermédiaire).

Produit brut (moulage et contrôle avant usinage).

Maintenance (pièce ayant fonctionnée).

Après réparation

c. Sources de rayonnements ionisant

Les sources de rayonnements ionisants sont choisies en fonction de la nature des matériaux à contrôler, de l'épaisseur traversée, de la qualité d'image demandée et des conditions techniques de réalisation.

d. Rayons X

Industriellement, les rayons X sont produits par bombardement d'une cible métallique appelée **anticathode**, par un faisceau d'électrons accélérés sous une tension élevée. Un appareil à rayons X comprend essentiellement deux parties :

- Le tube à rayons X.
- Le générateur de haute tension.



Figure III.39 : tube à rayons X



figure III.40 générateur de haute tension

e. Appareillage rayons X

Le tube radio gène ou tube de Coolidge est un tube en verre dans lequel règne un vide poussé.

Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament en tungstène de la cathode (potentiel négatif).

Ce faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers la cible de l'anode ou anticathode (potentiel positif).

L'impact des électrons sur la cible ou foyer thermique génère 99% de chaleur et 1% de rayons X.

f. Cuve

La cuve contient le tube à rayons X, la transformatrice haute tension et le fluide isolant (Gaz ou huile).

Ce fluide est éventuellement utilisé pour le refroidissement de l'anode.

Les cuves à l'huile sont d'abord vidées d'air puis remplies par de l'huile.



Figure III.41 : cuve

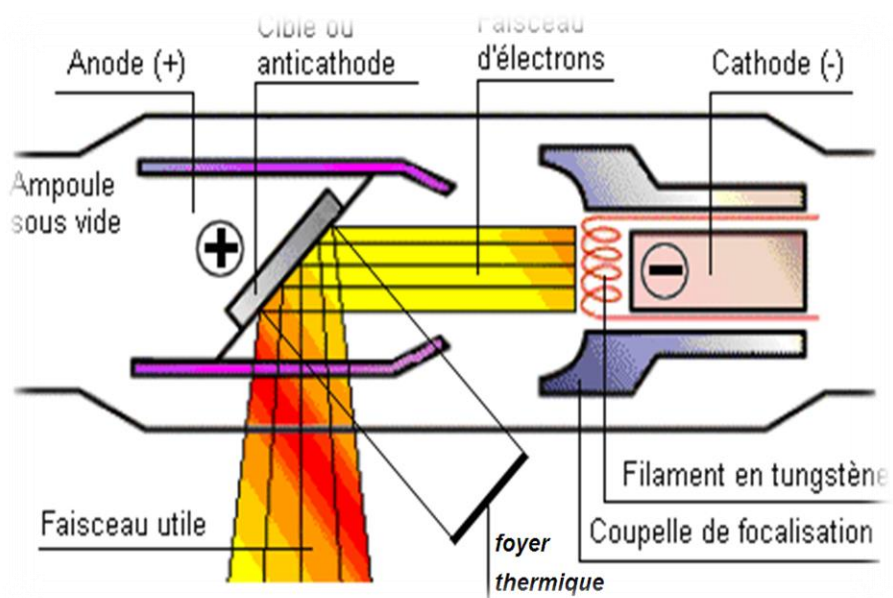


Figure III.42 : fonctionnement de cuve

g. Principe de production des rayons X

Lorsque l'on chauffe un métal, ses électrons atomiques migrent vers les couches périphériques par absorption d'énergie.

Lorsqu'une lamelle ou un filament métallique est porté à incandescence, l'agitation thermique est telle que les électrons des couches externes sortent du métal. En appliquant une différence de potentiel (U) entre une cathode portant le filament et une anode portant une anticathode, on accélère ces électrons vers l'anticathode.

Lorsqu'un électron incident heurte l'anticathode (l'électron pénètre dans le champ électrique intense qui règne au voisinage du noyau atomique), il subit un brusque freinage et il y a émission d'une radiation électromagnétique.

h. Description

Les tubes à rayon X utilisés en radiologie industrielle, se composent d'une enveloppe en verre ou céramique scellée et sous vide, et de deux électrodes, une cathode de charge négative générant les électrons et une anode de charge positive (tube bipolaire) ou de charge nulle (tube unipolaire) comportant la cible.

✓ Cathode

La cathode comporte deux parties distinctes :

✓ Filament

Fil de tungstène (température de fusion d'environ 3400°C) de 0,2 mm à 0,3 mm de diamètre, bobiné en hélice (tubes directionnels) ou en spirale (tube panoramiques).

Une transformatrice basse tension alimente le filament dans lequel circule un courant réglable.

La cupule de concentration :

C'est la pièce qui entoure le filament et permet grâce à sa forme la création de lignes de forces qui dirigent et concentrent le faisceau d'électrons vers la cible.

✓ Anode

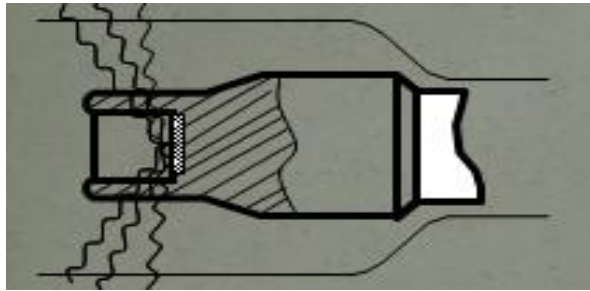
Electrode constituée de deux parties :

La cible ou anticathode :

C'est dans cette pièce que se forment les rayons X après freinage des électrons du faisceau. Les photons X sont émis dans toutes les directions à partir de la zone bombardée appelée foyer. Dans les tubes de radiologie industrielle la cible est toujours en tungstène, car le transfert d'énergie cinétique en énergie calorifique est très important.

Il existe différentes formes de cibles.

- Cibles coniques ou planes pour les tubes panoramiques.
- Cibles inclinées de 15 à 25 ° pour les tubes directionnels.



figureIII.43 : émission panoramique non orthogonale

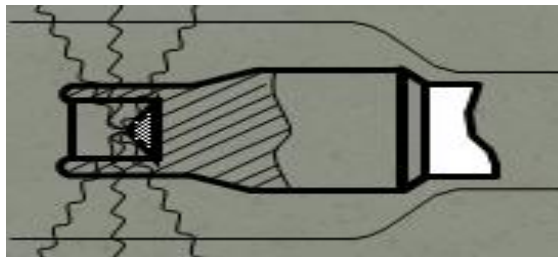


Figure III.44 : émission panoramique orthogonale

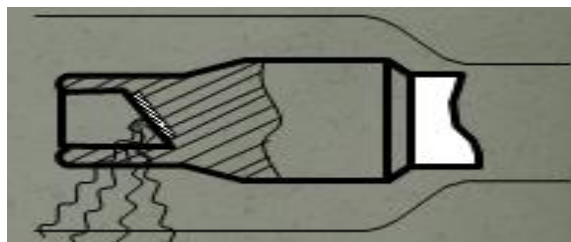


Figure III.45 : émission directionnelle

✓ **Refroidisseur :**

Partie massive en cuivre acheminant la chaleur dissipée dans la cible vers l'extérieur du tube.

✓ **Isolant**

Il est courant d'isoler électriquement les tubes et les transformateurs en les montant noyés dans de l'huile minérale ou du gaz sous pression (Hexafluorure de soufre SF₆).

✓ **Fenêtre du tube**

La fenêtre du tube est l'élément qui sépare l'intérieur de l'extérieur d'un appareil, elle est en béryllium pour les tubes à basse énergie (tension inférieures à 100 kV), et en plastique (aridité) ou métalliques pour les tubes qui travail à des énergies plus élevées.

✓ **Filtration inhérente**

Atténuation de l'intensité du rayonnement X par les obstacles (parois en verre, isolant, fenêtre, etc.....) se trouvant à l'intérieur même d'un appareil, la filtration inhérente est exprimée en épaisseur équivalente aluminium ou cuivre.

✓ **Protection**

Pour éviter le rayonnement de fuite ou pour le maintenir en dessous des limites maximales admissibles, on entoure le tube radio gène d'une gaine en plomb qui limite par la même occasion le faisceau utile :

- Par un trou circulaire (tubes directionnels).
- Par une ceinture en alliage d'aluminium (tubes panoramiques).

i. Système de refroidissement du tube

Le dégagement de chaleur qui accompagne l'émission de rayons X est considérable. C'est le problème de refroidissement des tubes qui limite pratiquement leur puissance. Ce refroidissement doit donc être réalisé avec soin.

Plusieurs systèmes sont utilisés :

- Refroidissement à l'air ou au gaz.
- Refroidissement au moyen de liquides.
- Tubes à anode tournante.

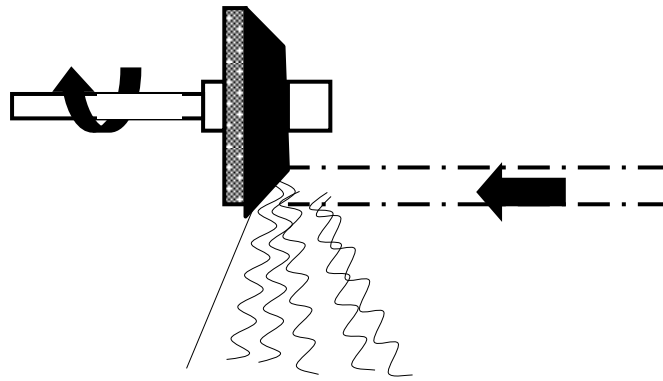


Figure III.46 : système de refroidissement du tube

j. Accessoires du générateur

L'utilisation du générateur de rayons X requiert contient un certain nombre d'appareils de réglage et de contrôle qui sont placés sur un pupitre de commande qui comprend ordinairement :

- un **kilovolt mètre** qui indique la valeur de la haute tension.
- un **milliampèremètre** qui donne le débit électronique du tube.
- une **minuterie** qui permet de régler le temps d'exposition.
- une **prise de câble d'alimentation**.
- une **prise de câble de liaison** poste de commande – transformateur.
- une **prise de câble de liaison** des dispositifs de détection et balisage.
- des **voyants lumineux**.

La **qualité** du rayonnement est déterminée par la tension d'accélération en kV.

La **quantité** de rayonnement est définie par l'intensité du courant en mA.

Les alimentations électriques des générateurs à rayons X sont de plusieurs types :

- **Circuit auto - redresseur**
- **Circuit à une soupape (Kénotron)**
- **Redressement à double alternance**
- **Circuit Villard**

- Circuit Greinacher

- k. Anticathode et le foyer

La surface de l'anticathode bombardée par le faisceau d'électrons s'appelle le foyer thermique. La puissance reçue par unité de surface de foyer thermique s'appelle charge focale (exprimée en watts/mm²). Le faisceau de rayons X qui sort du tube est généralement perpendiculaire au faisceau d'électrons qui frappe l'anticathode. Dans un tube directionnel, l'anticathode est inclinée par rapport à la direction des électrons d'un angle de 60 à 70°. La projection du foyer thermique sur un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau de rayons X est appelée foyer optique.

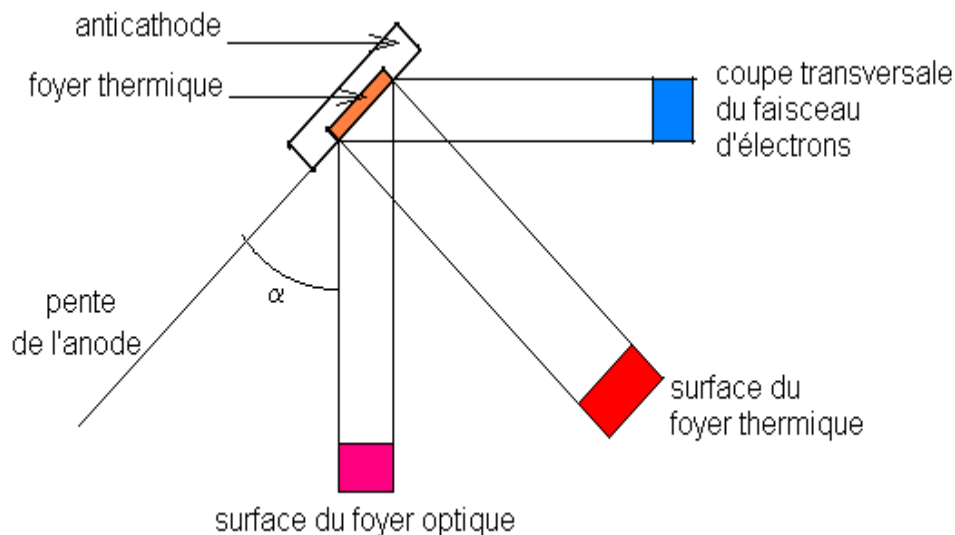


Figure III.47 : l'anticathode et le foyer

- l. Méthode du sténopé

C'est une méthode qui est définie pour déterminer les dimensions du foyer optique.

Description de la méthode :

Un film enfermé dans une cassette sans écran renforceur, est placé à une distance d'environ 1 mètre du foyer. Une plaque de plomb, percée en son centre d'un trou de diamètre aussi petit que possible (inférieur à 0.5mm) est interposée entre le foyer et le film. La distance entre le foyer et la plaque est choisie beaucoup plus petite que la distance entre la plaque et le film, par exemple dans le rapport de 1 à 4 (20cm et 80cm).

La plaque et le film doivent être perpendiculaires à l'axe du cône de rayonnement et le trou bien centré par rapport à cet axe. Après une exposition de courte durée mais qui permet de donner une image bien visible de la forme et éventuellement des défauts du foyer sur le film on mesure cette image qui est normalement agrandie de quatre fois par rapport aux dimensions réelles du foyer. (Aucune correction n'est nécessaire si le diamètre du trou est inférieur à 0.5mm et si les dimensions du foyer sont supérieures ou égales à 4mm).

- (1) : foyer
- (2) : flux d'électrons
- (3) : plaque de plomb percée d'un trou (sténopé)
- (4) : film
- (5) : image du foyer

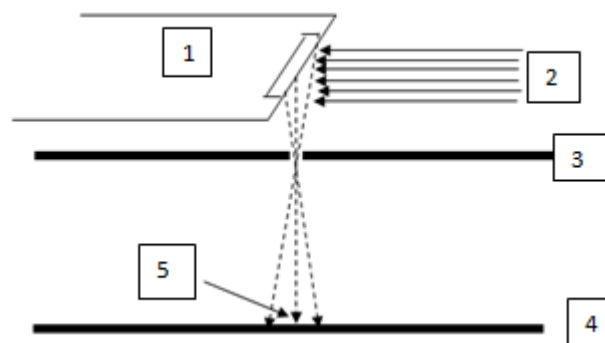


Figure III.48 : méthode de sténopé

m. Mode d'examen

La radiographie est définie comme étant un examen qui utilise un faisceau de rayonnements ionisants X et γ pénétrants, dirigés vers la pièce à inspecter. Suivant la nature et la géométrie de la pièce, une partie du faisceau est absorbée par la matière et/ou déviée.

Derrière la pièce, un film sensible à ce type de rayonnement est placé afin de mettre en évidence le phénomène d'absorption. Une image est ainsi créée à partir de l'intensité de la radiation et les variations d'intensité sont donc observées. Ces variations donnent une représentation de la constitution de la structure (interne et externe) de la pièce inspectée.

Cette méthode présente l'avantage de fournir des images directement exploitables, toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part des inspecteurs. De

plus, cette méthode impose des conditions de sécurité pour les travailleurs et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie difficile.

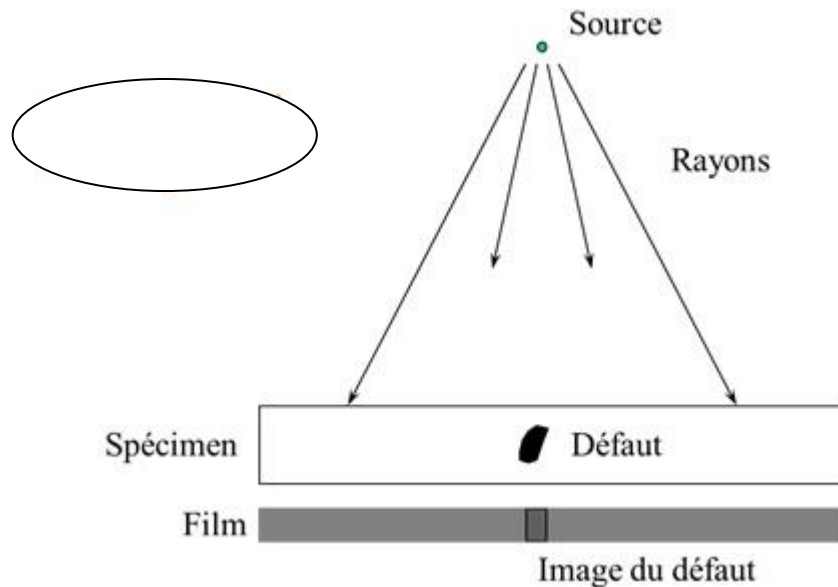


Figure III.49 : mode d'examen de radiographie

n. Avantages

Détection des défauts dans le volume de la pièce.

Bonne définition des défauts avec détection de leur nature.

Archivage aisé des résultats.

o. Inconvénients

Méthode coûteuse en investissement et développement des films.

Nécessite le respect de règles de sécurité importantes.

Pénétration des rayons limitée par l'épaisseur et la puissance de la source.

Localisation du défaut dans la section non garantie.

III.4. Descriptif de mode opératoire de soudage : (DMOS)

a. définition :

Le DOMS est le document de référence du coordonnateur en soudage , du soudeur , de l'inspecteur et de contrôleur lors de l'exécution , du suivi et du contrôle d'un joint soudé .Le DMOS est obligatoire et doit être présenté lors d'une qualification de mode opératoire de soudage et d'une qualification de personnel soudeur.

Tableau III.5 : récapitulatif des paramètre à vérifier sur le DMOS .

récapitulatif des paramètre à vérifier sur le DMOS .									
	Intensité ampères	Tension volts	Avance Cm/min	Produit d'apport Nuance et Ø	Nature courant et polarité	Vitesse dévidage fil cm/min	Nature et débit gaz	Electrode tungstène	Flux solide en poudre
111	X	X	X	X	X	NON	NON	NON	NON
114	X	X	X	X	X	X	NON	NON	NON
141 M	X	X	X	X	X	NON	X	X	NON
141 A	X	X	X	X	X	X	X	X	NON
142	X	X	X	X	X	NON	X	X	NON
143	X	X	X	X	X	NON	X	X	NON
145	X	X	X	X	X	NON	X	X	NON
15	X	X	X	X	X	X	X	X	NON
131	X	X	X	X	X	X	X	NON	NON
135	X	X	X	X	X	X	X	NON	NON
136	X	X	X	X	X	X	X	NON	NON
137	X	X	X	X	X	X	X	NON	NON
138	X	X	X	X	X	X	X	NON	NON
121	X	X	X	X	X	X	NON	NON	X

b. Comment rédiger un descriptif de mode opératoire de soudage :

La norme européenne NF EN ISO 15609 ET NF EN ISO 15614-1 DE2005 avec l'amendement A1 de 2008 e l'amendement A2 de 2012 précisent les modalités de rédaction du descriptif de mode opératoire de soudage.

La rédaction du DMOS est réalisée ; soit après exécution d'un essai préliminaire représentatif dans les condition de la fabrication , soit à partir d'une qualification de mode opératoire de soudage déjà obtenu .

c. préparation géométrique du joint à souder :

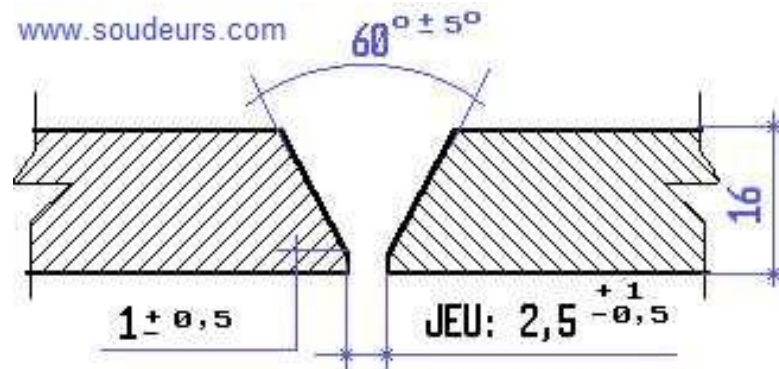


Figure III.50 : préparation géométrique du joint soudé

Un croquis de la préparation du joint soudé doit être réaliser sur le formulaire de DMOS . des tolérances doivent être précisées pour les dimensions des différents éléments ayant une importance opératoire notable (jeu, ouverture d'angle de chanfrein, talon, ect..)

De dessin doit indiqué les éléments suivants :

- Epaisseur de la pièce 1 et de la pièce 2
- Diamètre de la pièce 1 et de la pièce 2
- Angle d'ouverture du chanfrein en degré
- Rayon en fond de chanfrein type tulipe
- Jeu de soudage entre les deux pièces
- Talon ou méplat en millimètre
- Angle d'inclinaison des pièces

d. réparation des passes de soudage :



Figure III.51 :réparation des passes de soudage

Un seconde croquis de réparation des passes de soudure doit être réaliser sur le formulaire de DMOS .

De dessin doit représenter le plus fidèlement possible les éléments suivants :

Le nombre totale de passes ou de série des passes .

Le numéro de chaque passe ou de série des passes.

La répartition de chaque passe de soudure pour chaque procédé de soudage.

L'orientation de chaque passe de soudure pour chaque procédés .

La séquence de soudage.

La dimension de la section soudée .

La gorge de soudure ou apothème .

e. méthode de préparation de l'assemblage

La méthode utilisée de préparation des chanfreins doit être indique :

Par découpage sous eau avec abrasif.

Par découpage laser.

Par oxycoupage.

Par cisailage .

Par meulage .

Par usinage .

Par fraisage.

Par grignotage.

f. méthode de nettoyage préalable de l'assemblage :

La méthode utilisée de nettoyage préalable des chanfreins doit être indiquée :

Par meulage

Par brossage

Par sablage

Par dégraissage

Par décapage chimique

g. symbolisation des types d'assemblage de qualification:

Le type d'assemblage du joint soudé est indiqué suivant la codification du cahier des charges applicable. vous trouverez ci-dessous la codification des types d'assemblage suivant la NF EN ISO 15614-1.

Tableau III.6 : Symbolisation des types d'assemblage

Symbolisation des types d'assemblage	
Variable /lien	Définition du types d'assemblage de soudage
P	Essai sur une tôle / plate
T	Essai sur une tube / pipe
BW	Essai sur un assemblage bout à bout / buttweld
FW	essai sur un assemblage en angle / filletweld
P-BW	Essai sur une tôle / plate sur un assemblage bout à bout / buttweld
T-BW	Essai sur un tube / pipe sur un assemblage bout à bout / buttweld

P-FW	Essai sur une tôle / plate sur un assemblage en angle / filletweld
T-FW	Essai sur un tube / plate sur un assemblage en angle / filletweld
T/P-FW	Essai de tube sur une tôle / pipe sur un assemblage en angle / filletweld
T	Epaisseur de matériau de l'assemblage de qualification
S1	Epaisseur déposer de métal fondu pour le procédé de soudage 1
S2	Epaisseur déposer de métal fondu pour le procédé de soudage 2

h. symbolisation des procédés de soudage de qualification :

Le procédés ou les procédés de soudage sont indiqués pour chaque passe ou série de passes . la codification du procédés est réalisée suivant le chaire des charges applicable . vous trouverez ci-dessous la codification des procédés suivant la NF EN 24063(ISO 4063)

Tableau III.7 symbolisation des procédés de soudage de qualification



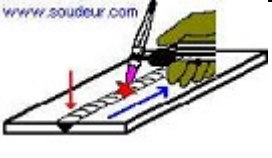
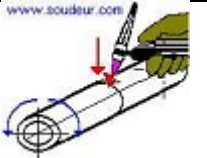
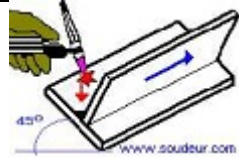
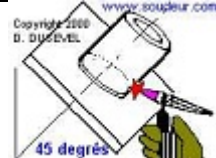
symbolisation des procédés de soudage de qualification	
Variable / lien	Définition du procédé de soudage
111	Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée
114	Soudage à l'arc électrique avec fil électrode fourré sans gaz
121	Soudage à l'arc électrique sous flux solide en poudre avec fil plein électrode
125	Soudage à l'arc électrique sous flux solide en poudre avec fil fourré électrode
121	Soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil électrode fusible
125	Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil électrode fusible

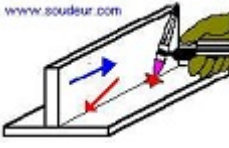
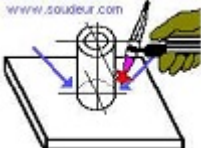
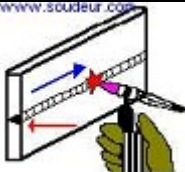
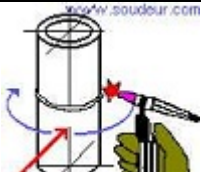
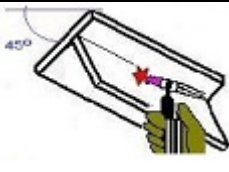
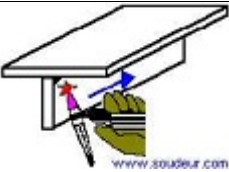
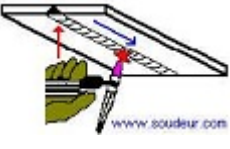
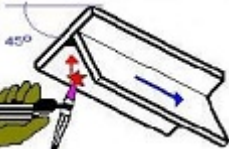
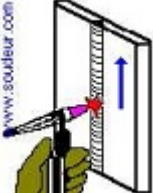
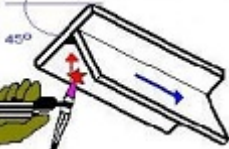
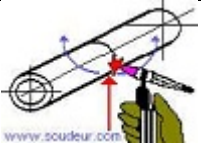
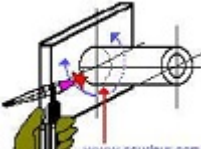
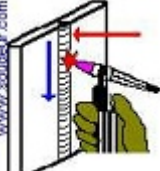
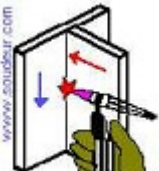
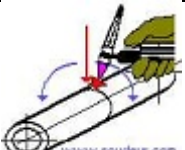
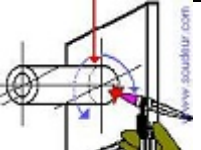
136	Soudage MAG sous protection de gaz actif avec fil fourré électrode
138	Soudage MAG avec fil fourré poudre métallique
141	Soudage TIG avec métal d'apport
142	Soudage TIG autogène
143	Soudage TIG avec fil fourré ou baguette fourré
145	Soudage TIG avec métal d'apport et gaz réducteur
15	Soudage à l'arc plasma
311	Soudage oxyacétylénique

i. Symbolisation de position de soudage :

La ou les position de soudage sont indiqués pour chaque passe ou série de passes. La codification de la position de soudage est réalisée suivant le cahier des charges applicable. vous trouvez ci-dessous la codification des positions fondamentales de soudage suivant la EN ISO 6947 .

Tableaux III.8 Symbolisation de la position de soudage

Symbolisation des positions de soudage				
Variable /lien	Bout tôle	Bout tube	Angle tôles	Angle tube
Position JL045	Néant		Néant	Néant
Position HL045	Néant		Néant	Néant
Position PA				

Position PB	Néant	Néant		
Position PC				Néant
Position PD	Néant	Néant		Néant
Position PE		Néant		Néant
Position PF		Néant		Néant
Position PH	Néant		Néant	
Position PG		Néant		Néant
Position PJ	Néant		Néant	

j. métal d'apport – produit consommable :

La ou les métaux d'apport utilisé ainsi que les produit consommable sont précisés pour chaque passe ou série de passes .la désignation normalisée de réception du métal d'apport est

indiquée suivant le cahier des charges applicable. La marque et la désignation commerciale permet de guider le soudeur lors de l'approvisionnement.

k. dimension des métaux d'apport :

La ou les dimension des métaux d'apport utilisés sont précisées pour chaque passe ou série de passes. Le diamètre du fil ou de l'électrode est précisé. Lors de l'utilisation d'un anneau fusible ; l'épaisseur et la hauteur de l'insert est précisé.

l. Gaz industriel de soudage :

La désignation commerciale et les pourcentages de la composition du gaz sont précisés pour chaque passe ou série de passes avec procédé de soudage avec gaz de protection (141, 131,135,136,137,15,311) .

- Gaz de protection endroit , annulaire ou à la torche
- Gaz de protection envers
- Gaz plasmagène
- Gaz trainard

m. flux de protection en poudre :

La désignation normalisée est précisées pour chaque passe ou série de passes avec procédé de soudage avec flux en poudre.

n. nature du courant de soudage :

La nature du courant de soudage est indiqué dans le descriptif :

- Courant continu (CC ou DC)
- Courant lisse ou courant pulsé
- Courant alternatif (CA ou AC)

o. polarité de l'électrode ou du fil :

La polarité de l'électrode ou du fil à utiliser est indiqué dans le descriptif pour le courant continu :

- Polarité positive (+)
- Polarité négative (-)

p. Paramètre de soudage :

Les valeurs de l'intensité en ampère , de la tension en volte , de la vitesse de soudage en centimètre / minute, du dévidage du fil en centimètre ou mètres/ minute, l'énergie de soudage en joules/ centimètre sont indiquées pour chaque passe ou série de passe dans le formulaire.

q. température de préchauffage :

La température de préchauffage avant soudage doit être indiqué en degrés Celsius dans le formulaire principalement pour les aciers faiblement alliés et les aciers sensibles à la trempe.

r. température maximale entre passes :

La température maximale entre passes à ne pas dépasser (vérifier avant chaque nouvelle passe de soudure) doit être indiquée en degrés Celsius dans le formulaire .

s. nettoyage à réaliser entre passes :

La méthode utilisée de nettoyage entre passes doit être indiqué :

- Meulage
- Brossage
- Dégraissage
- Burinage

t. température de poste chauffage :

La température de poste chauffage après soudage doit être indiquée en degré Celsius avec le temps de maintien dans le formulaire .

u. traitement thermique après soudage :

Les condition de réalisation des traitement thermique âpres soudage sont indiquée dans le formulaire .

- Vitesse de montée en C°/heure ou minutes
- Température maximale atteinte
- Durée de maintien en minutes ou heure
- Vitesse de refroidissement en C°/ heure ou minutes

v. information complémentaire :

Toute information complémentaire nécessaire à la réalisation du soudage doit être consignée dans le formulaire :

- Inclinaison de la torche de soudage en automatique
- Distance tube de contact / pièce
- Diamètre de la buse céramique ou métallique
- Largeur de balayage en automatique, temps d'arrêt
- Temps de pulsation , fréquence de pulsation , rapport cyclique
- Etuvage des produits d'apport .

Welding Procedure Specification (WPS) _ acc.to EN ISO 15609-1

BHI
 WPS No. : PEN-BHIJV-FC1212-001
 WPQR No. : N/A
 Manufacturer : BHI Algeria
 Mode of metal transfer : Globular & Spray
 Joint Type and Weld Type : Butt "V"

Method of Preparation and Cleaning : Brushing + Grinding
 Parent Material Designation : S355JR(1.2) + S355JR(1.2)
 Material thickness (mm) : 25mm + 25mm
 Outside Diameter (mm) : N/A
 Welding Position : PC (2G)

Weld Preparation Details (Sketch)

Joint Design

A : 60°±5°
 F : 1.6±0.8
 R : 2.4±0.8
 T : 25mm
 L : 500mm

Welding Sequences

1. After "n" welding, back gouging / Groove / Groove to dotted line
 2. After back gouging, (n+1, n+2) welding on the back surface

Run	Welding process	Size of Filler Material (Φ,mm)	Current A	Voltage V	Type of Current /Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Travel Speed (mm/sec)	Heat Input (KJ/mm)
1	FCAW	Φ1.2 or Φ1.4	150~400	20~40	DCEP	-	2.0~4.0	0.60~6.40
2~n	FCAW	Φ1.2 or Φ1.4	150~400	20~40	DCEP	-	2.0~4.0	0.60~6.40
n+1	FCAW	Φ1.2 or Φ1.4	150~400	20~40	DCEP	-	2.0~4.0	0.60~6.40
n+2	FCAW	Φ1.2 or Φ1.4	150~400	20~40	DCEP	-	2.0~4.0	0.60~6.40

EN ISO 17632-A:T42 2 P C 1 H5 / (Esab France SAS / 6702)

Filler Material Designation and Make :	N/A
Any special Baking or Drying :	ISO 14175-C1-C
Designation Gas/Flux: - Shielding :	N/A
- Backing :	20~25 liter/min
Gas Flow Rate - Shielding :	N/A
- Backing :	N/A
Tungsten Electrode Type/Size :	Back gouging or Ceramic backing
Details of Back Gouging/Backing :	Min 75°C
Preheat Temperature :	Max 250°C
Interpass Temperature :	N/A
Post-Heating :	N/A
Pre-Heat maintenance temperature :	N/A
Post-Weld Heat treatment and/or Ageing :	N/A
(Time, Temperature, Method) :	N/A
Heating and Cooling Rates :	N/A
Other information	
Weaving (maximum width of run) :	10~20 mm
Oscillation : amplitude, frequency, dwell time :	N/A
Pulse welding details :	N/A
Distance contact tube/work piece :	10~25 mm
Plasma welding details :	N/A
Torch angle :	60°
Nozzle Diameter :	13~20 mm
Number of wire electrodes :	1
Additional filler material :	N/A

이드리스 또는 무스타파 / 서명 / 날짜

Manufacturer : BHI Algeria
 (Name, Signature, Date) :

Figure III.52 : exemple de fiche DMOS (WPS)

III.5.la QMOS qualification de mode opératoire de soudage :

Toute opération de soudage par fusion sur acier utilisé pour la fabrication d'un appareil à pression doit être qualifiée par un mode opératoire de soudage correspondant à la norme

EN ISO 15614-1.

On n'impose pas tel ou tel procédé de soudage, mais des résultats compatibles avec un cahier des charges donné. D'où la nécessité, en amont de la fabrication, de vérifier la pertinence des procédés de soudage choisis ; c'est la phase de qualification, on définira notamment le choix du ou des procédés de soudage, de la position de soudage de base et métaux d'apport, les gaz de soudage etc....

Document à joindre : PV de qualification DMOS (organisme d'examen + fabrication) ; assemblage de qualification ; résultat des contrôles ; examen et essais.

Procédure de soudage Welding procedure specification		M.O.S W.P.S	QMOS support Supporting PQR	Page Sheet	Revision Révision
		CI			B
Type d'assemblage Joint type <input checked="" type="checkbox"/> Bout à bout Butt <input type="checkbox"/> Tubes Tubes <input type="checkbox"/> Tôles Sheets <input type="checkbox"/> Plaque Plate <input checked="" type="checkbox"/> Pénétration Full penetration <input type="checkbox"/> Angle Fillet		<input type="checkbox"/> Support envers Backing strip <input type="checkbox"/> Permanent <input type="checkbox"/> oui / Yes <input type="checkbox"/> non / No <input type="checkbox"/> Nature Type <input type="checkbox"/> Coupage du trousseau envers Back gouging or bevel		Nuance Grade S 355 K2 Norme de spécification Designation of specification EN 10025-2 N° de coude Bend no 601176 Groupe Soud groupe Class / Subgroup 1.2 Épaisseur (mm) Thickness 10 Norme ext. (mm) Excess demand	
Schéma de préparation / Joint design 			Disposition des passes / Welding sequence 		
Matériau support Filler metal Appellation commerciale / trade name SAFDUAL 200 Désignation normalisée / std designation T48 S MM 1 HS Diamètre / diameter (mm) 1.2		Matériau support Filler metal Appellation commerciale / trade name SAFDUAL 200 Désignation normalisée / std designation T48 S MM 1 HS Diamètre / diameter (mm) 1.2		Matériau support Filler metal Appellation commerciale / trade name SAFDUAL 200 Désignation normalisée / std designation T48 S MM 1 HS Diamètre / diameter (mm) 1.2	
Gaz de protection Shielding gas Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18		Gaz de protection Shielding gas Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18		Gaz de protection Shielding gas Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18	
Electrode Electrode Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18		Electrode Electrode Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18		Electrode Electrode Type de composition normalisée / type Arco 21 Désignation normalisée / std designation M 21 Débit / flow rate (l/min) 18	
Nature du courant / type of current (A.C., D.C., pulvé) Electrode tungstène / tungsten electrode (type & Ø) Pointe de l'électrode du ou de la / electrode point Intensité I / current (A) Tension à l'arc U / voltage (V) Vitesse d'av. v / rate of advance (mm/min) Apport de chaleur / heat input (kJ / m ²) / v ₁ (kJ/mm) T ¹ interval entre passes / interpass temperature (°C)		Nature du courant / type of current (A.C., D.C., pulvé) Electrode tungstène / tungsten electrode (type & Ø) Pointe de l'électrode du ou de la / electrode point Intensité I / current (A) Tension à l'arc U / voltage (V) Vitesse d'av. v / rate of advance (mm/min) Apport de chaleur / heat input (kJ / m ²) / v ₁ (kJ/mm) T ¹ interval entre passes / interpass temperature (°C)		Nature du courant / type of current (A.C., D.C., pulvé) Electrode tungstène / tungsten electrode (type & Ø) Pointe de l'électrode du ou de la / electrode point Intensité I / current (A) Tension à l'arc U / voltage (V) Vitesse d'av. v / rate of advance (mm/min) Apport de chaleur / heat input (kJ / m ²) / v ₁ (kJ/mm) T ¹ interval entre passes / interpass temperature (°C)	
Matériel de soudage / welding equipment Préchauffage / preheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Postchauffage / postheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Durée du maintien / hold time : Traitement thermique après soudage / heat treat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température de maintien / holding temp : °C Vitesse de refroidissement / cooling rate : °C/h Durée du maintien / hold time : °C/h		Matériel de soudage / welding equipment Préchauffage / preheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Postchauffage / postheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Durée du maintien / hold time : Traitement thermique après soudage / heat treat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température de maintien / holding temp : °C Vitesse de refroidissement / cooling rate : °C/h Durée du maintien / hold time : °C/h		Matériel de soudage / welding equipment Préchauffage / preheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Postchauffage / postheat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température : °C Durée du maintien / hold time : Traitement thermique après soudage / heat treat : <input checked="" type="checkbox"/> Non / No <input type="checkbox"/> Oui / Yes Température de maintien / holding temp : °C Vitesse de refroidissement / cooling rate : °C/h Durée du maintien / hold time : °C/h	
Autres informations / other information : Apport de chaleur / Heat input suivant EN 1011-1 : 136 k ± 0.6. Vitesse de soudage (v ₁) : 2 mm/s - (v ₂) : 5 mm/s - (v ₃) : 9.2 mm/s					
Signature du représentant de l'organisme d'examen Signature of examining body's representative				N° de Record No : EN - SE - 11 - 001	

Figure III.53 : exemple de QMOS

Conclusion

Dans ce chapitre on distingue. Le but et le domaine d'application du contrôle non destructif, nous avons tout d'abord évoqué les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance. Nous avons ensuite décrit plus en détail les principes physiques « les essais mécanique » essai de dureté, essai de traction de résilience et en fin essai de pliage, et la réalisation et la mise en œuvre des cinq principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : les procédés optiques, le ressuage, les ultrason , magnétoscopie , et en fin les procédés radiographiques . et pour finir le chapitre nous avons abordé le concepts de « DMOS » description de mode opératoire de soudage en anglais « WPS » welding procedure specification .et la qualification mode opératoire de soudage « QMOS » en anglais « PQR » procedure qualification record.

Chapitre IV

Etude expérimentale

IV.1 Présentation de l'entreprise :

L'unité chaudière industrielle a été affectée en tant que projet en 1983 à l'ENCC. Elle a démarrée part qu'unité en avril 1985 .

L'unité est spécialisée dans la fabrication de chaudières de différentes capacités.

Les principaux produits et prestation que livre l'unité actuellement sont :

- Chaudière à eau chaude
- Chaudière à vapeur
- Chaudière domestiques
- Usinage mécanique
- Rénovation des chaudières

Pour réaliser ses plans de production. L'unité dispose de moyens techniques et industriels de production se répartissant entre deux grands ateliers :

1-un atelier corps de chaudières dote d'équipements et installation techniques dont notamment des équipements de chaudronnerie sous pressions, la construction des éléments essentiels du corps de la chaudière tel que la virole, le foyer, les plaques tubulaires et un faix eau de tubes.

Le montage de ces ensembles est exécuté au niveau de même atelier selon un plan pré établi.

2-un atelier mécanique usinage équipe des machines outils assure l'usinage d'une partie des accessoires de la chaudière se la politique de développement économique qui à été déployée en Algérie à été dominé par deux axe principaux – l'indépendance - cet économique et par l'intégration industrielle.

La mise en œuvre d'une telle stratégie de développement industrielle impliquant la création de moyens en vue de sa réalisation notamment dans les secteurs qui devaient jouer un rôle prépondérant dans la mise en place de cette infrastructure industrielle, les secteurs qui ont été les plus concernés sont la sidérurgie et la métallurgie la société nationale de construction métallique (SNMETAL) a été crée le 09.11.1967 et a du déployé de nouveaux investissement pour couvrir la demande national en charpente métallique et chaudronnerie ...

L'ENCC issue de la restructuration de la SNMETAL a été créée par décret 83.49 du 01.01.1983 au journal officiel du 25.01.1983 l'entreprise dispose de moyens d'études de fabrication de montage sur site et de maintenance industrielle.

L'unité chaudière a été créée par décision du secrétaire d'état 074.607DI

Du 14.08.1974 elle s'étend sur 38 hectares a été individualisé et sa configuration initiale prévoyait des ateliers pour la fabrication industrielle et domestique ainsi que la chaudronnerie lourde pour les appareils à pression période de mise en route des principaux équipement et installation 80/84 – mise en route 84/85

A partir du 1^{ère} trimestre 1999 l'unité de Relizane est appelée à se filialiser à se constituer en entreprise autonome et le 06.02.2002 la direction générale de chaudral a vu le jour avec comme dénomination sociale *CHAUDRAL*font le siège sociale est fixé à Relizane commune de Bendaoud route national N°04 B P 267 ainsi que son site d'exploitation.

Son capitale sociale fixé à la somme 100.000.000 de dinars devisé en 1000 action de 100.000 dinars chacune numérotée de 1 à 1000 représentatives d'apports en nature

Sa superficie globale est de 20 hectares repartis comme suit :

- ✓ sa superficie couverte : 4.6 hectares
- ✓ superficie couverte : 15.4 hectares dont 1.2 hectares de stockage

CHAUDRAL emploie actuellement 210 travailleurs dont 26 cadres, 55agents de maîtrise et 129 agents d'exécution son personnel est spécialisé dans la fabrication de différentes capacités et utilisations

- ✓ Chaudières industrielles
- ✓ Chaudières domestiques
- ✓ Chaudières eau chaude normal et eau sur chauffés
- ✓ Chaudières à vapeur
- ✓ Générateurs

La direction générale de CHAUDRAL est constituée d'une direction générale de CHAUDRAL sise à ORAN à sa tête un PDG et une direction générale d'usine sise à Relizane à sa tête un DGU

IV.2 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.3 Identification du matériau :

a. 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.

b. Caractérisation du métal de base

✓ **Analyse chimique**

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

Elément	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

✓ **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)
Valeurs	520-620	360-420	16-22	155-185	45-75

✓ **Identification du métal d'apport**

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

Elément	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.

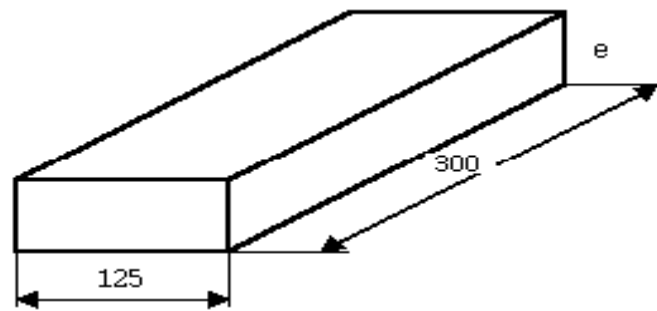


Figure IV.1 : dimension des tôles

a. Préparation des tôles :

La première partie consiste en la préparation des tôles à assembler ; pour notre nuance de 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.

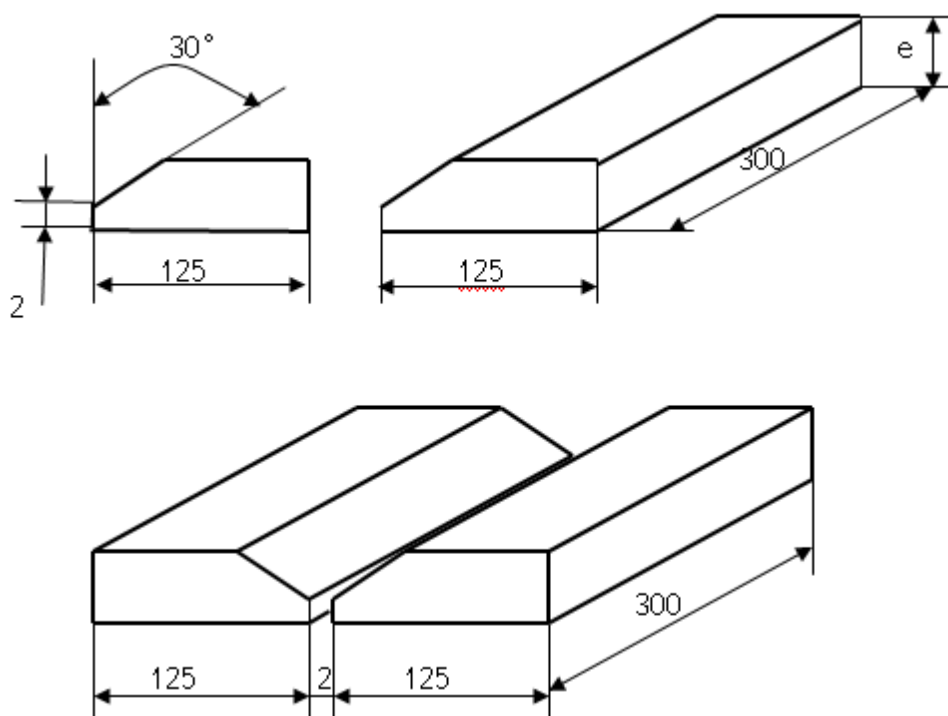


Figure IV.2 : différentes épaisseurs .



Figure IV.3 : tôle 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.

b. 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.

c. 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.4).

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

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	625	23.65
Type c 10 x 10	32	130	8.7	41	210	18

**Figure IV.4 :tôle après soudage**

IV .5 Contrôle les tôles soudées :**✓ Généralités :(contrôles non destructifs « CND »)**

le Contrôle Non Destructif a pour objectif de mettre en évidence les défauts, tout en préservant l'état de la pièce, le (CND) a pour but de rechercher les défauts internes ou superficielle des structures, matériaux, pièce et assemblage.

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

- contrôle visuel.
- contrôle par ressuage« PT».
- Contrôle par magnétoscopie «MT».

a. 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 l'aspect suivant :

- Etat de surface
- Défauts visible à l'œil
- Conformité au document 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.

b. Examen Contrôle visuel :**✓ 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 Contrôle.



Figure IV.5 : pièce après le soudage

IV .6. Contrôle par ressuage « pt » :

a. Conditions d'examen

✓ Condition de la surface

Préparation de la surface :

La pièce doit être propre.

Les polluants peuvent colmater les défauts donner de fausses indications augmenter le bruit de fond.

Les nettoyages mécaniques sont à proscrire.

Seuls les nettoyages “chimiques” sont à employer.

Les méthodes de nettoyage :

Au contact (pinceau ou chiffon non pelucheux imprégnés).

Au trempé (avec ou sans agitation, à froid ou à chaud).

À chaud en phase vapeur (le plus efficace).

✓ Application du pénétrant - durée d'imprégnation

Immersion (au moins une minute).

Pulvérisation électrostatique bombe aérosol.

Brosse ou pinceau (bouteilles plastiques).

Aspersion (type “pompe à sulfater”).

Les **durées d'imprégnation** sont typiquement comprises **entre 10 et 30 minutes**

c. 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



Figure IV.6 : produit de ressuage

d. Mode opératoire :

✓ Pré-nettoyage :

Toutes les surfaces à examiner doivent être propres et secs avant l'application du pénétrant. La surface doit être exempte de toute irrégularité qui peut nuire aux résultats d'examen (graisse, rouille, peluches, flux de soudage, projections de soudure, peinture, huile, etc.).

✓ Séchage après nettoyage :

- le seuil de séchage requis est atteint quand l'humidité superficielle commence à disparaître.

- chiffons secs non pelucheux (on tamponne la pièce).
- circulation d'air chaud ($T_{\text{maxi}} = 50^{\circ}\text{C}$).
- évaporation naturelle (si rapide).



Figure IV.7.8 :nettoyage les pièces.

✓ **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.







Figures IV.9.10.11 : Application du pénétrant.

✓ **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.

✓ **Application du révélateur**

Il joue le rôle de buvard :

Révélateur à support volatil (le plus courant).

Bombes aérosol, pistolet pneumatique, électrostatique.

Révélateur sec.

en brouillard (petites pièces) , pulvérisation (grandes pièces).

Révélateur en suspension aqueuse.

Sur pièce humide (pulvérisation au pistolet, immersion 1 à 2 min à $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$).





Figure IV.12.13 : application de révélateur.

✓ **Conditions d'observation**

Observation en lumière blanche .

Au moins 500 lux nécessaires.

✓ **Observation**

Présence de quelques soufflures Sur Le Joint Soudure.

Le contrôle par ressuage a révélé des quelques soufflures sur Le Joint Soudure.





Figure IV.14. 15 : résultat de Contrôle par ressuage.

✓ **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 maître 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 maître de l'ouvrage après l'achèvement et dont une copie tenu par un pour la documentation.

✓ **Nettoyage final :**

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

IV .7 Contrôle par magnétoscopie :

L'instar du ressuage, la magnétoscopie complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté. Parfois même si les anomalies débouchant, le milieu ne permet pas d'avoir recours au ressuage (pièces immergées par exemple).

Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes: passage de courant électrique, passage de flux magnétique.

Les procédés magnétiques de contrôles non destructifs permettent la détection des défauts superficiels débouchant ou non débouchant dans les matériaux ferromagnétiques (forgés, moulés, soudés, laminés...).

Le contrôle par magnétoscopie permet la détection de défauts superficiels débouchant ou sous-jacents dans les matériaux ferromagnétiques. C'est à dire aux matériaux qui sont soumis à un champ de 2 400 A/m, présentent une induction d'au moins 1 T.

Ils ne permettent pas de déterminer avec précision l'importance dimensionnelle du défaut, mais d'en définir la position et souvent la nature.

a. Technique d'aimantation :

La magnétoscopie nécessite d'aimanter les pièces à contrôler. Plusieurs techniques d'aimantation sont disponibles, certaines d'entre elles utilisant diverses formes d'ondes électriques.

b. Technique traditionnelles :

- ✓ Aimantation transversale par passage de courant :

Pour réaliser l'aimantation transversale, la technique d'aimantation par passage de courant est habituellement utilisée, générant un champ magnétique circulaire autour de la pièce.

L'aimantation transversale permet de mettre en évidence les discontinuités longitudinales.

- ✓ Aimantation longitudinale par têtes magnétiques ou solénoïde :

Pour réaliser l'aimantation longitudinale, on utilise généralement un système de têtes magnétiques disposées aux deux extrémités de la pièce ou un solénoïde entourant la pièce.

L'aimantation longitudinale permet de mettre en évidence les discontinuités transversales.

c. Technique alternatives :

Il existe un grand nombre de techniques alternatives permettant l'aimantation des pièces. Ces techniques peuvent chercher à supprimer le risque d'amorçage d'arc important, présent lors d'un passage direct de courant, en utilisant un système d'aimantation sans contact. Elles

peuvent également rechercher à améliorer les cadences de contrôle en utilisant un champ magnétique tournant. On citera les deux exemples suivants :

- ✓ Aimantation à l'aide d'une broche constituée d'un conducteur traversant et d'un noyau magnétique du transformateur de courant induit Aimantation par champ tournant en :

Cette technique utilisée avec des courants alternatifs sinusoïdaux permet les aimantations transversale et longitudinale de la pièce sans que celle-ci soit en contact avec le système d'aimantation. Si l'on utilise des courants déphasés, les aimantations transversale et longitudinale peuvent être appliquées simultanément pour générer un champ tournant sur la pièce. La chambre d'aimantation par champ tournant permet de générer, sur toute la surface à contrôler de la pièce, un champ magnétique de direction variable dans le temps, sans que la pièce soit en contact avec le système d'aimantation. Cette technique est seulement utilisable avec des courants alternatifs sinusoïdaux et possède un certain nombre de limitations.

Dans le cas où les courants alternatifs sinusoïdaux ne sont pas autorisés, il est toujours possible d'utiliser un conducteur traversant ou un solénoïde pour aimanter une pièce sans contact, mais dans ce cas il n'est pas possible de générer un champ tournant.

D'autres techniques moins courantes, tels que l'aimantation rémanente ou l'utilisation d'aimants permanents, peuvent être également intéressantes dans certains cas particuliers.

Cependant, ces techniques ne sont pas préconisées dans les normes ISO.

d. Principales formes du courant d'alimentation :

Dans la majorité des cas, le courant électrique est utilisé pour créer le champ magnétique qui permettra d'aimanter les pièces. Les principales formes utilisées de courant électrique sont :

- Le courant alternatif sinusoïdal.
- Le courant alternatif monophasé redressé 1 alternance (R1A) ou courant pulsé.
- Le courant alternatif monophasé redressé 2 alternances (R2A).
- Le courant triphasé sinusoïdal redressé 2 alternances ou courant alternatif trihexaphasé.
- Le courant continu.

Le courant alternatif sinusoïdal convient bien pour la détection de discontinuités débouchâtes en surface, alors que le courant continu et les courants redressés pourront permettre, sous certaines conditions, la détection de discontinuités sous-jacentes. Plus la composante continue d'un courant redressé sera importante, plus la détection de défauts profonds sera possible.

Cependant, il est impossible de déterminer précisément la profondeur de détection car celle-ci dépend également grandement de la taille du défaut et de la valeur du champ magnétique auquel il est soumis.

e. vérification des conditions d'aimantation

La vérification de l'aimantation est effectuée en mesurant l'intensité du champ magnétique tangentiel. Les spécifications applicables stipulent les valeurs requises. Il peut s'agir de valeurs crêtes, comme cela peut être le cas en aéronautique, ou de valeurs efficaces, comme cela peut être le cas pour l'automobile, le nucléaire, etc.

D'où la nécessité d'utiliser des mesureurs numériques étalonnés de champ magnétique tangentiel affichant les valeurs crêtes et les valeurs efficaces .



Figure IV.16 : Mesureur numérique de champ magnétique tangentiel affichant simultanément les valeurs : moyenne, crête vraie et efficace vraie

f. Mode opératoire :

✓ 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).



Figure IV.17 : 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.





Figure IV.18.19.20 : l'examen magnétoscopique (MT).

✓ **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 .

Le contrôle par magnétoscopie a révélé des fissures sur Le cordon Soudure.



Figure IV.21 : résultat 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.

Conclusion :

La soudure et le contrôle sont parmi les activités de production tel que SOMIZ et BHI . lors du stage qui s'est déroulé au sien de l'entreprise BHI , une étude expérimentale est faire, on a soudé deux tôles en métal de base E36 et on à contrôle ces pièces visuellement , par ressuage et par magnétoscopie .

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

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.

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

Après avoir rappelé brièvement la nature, le but et le domaine d'application du contrôle non destructif, nous avons tout d'abord évoqué les grands principes de détection des défauts et les bases physiques qui gouvernent les procédés et leur performance.

Nous avons ensuite décrit en détail les principes physiques, la réalisation et la mise en œuvre des six principales familles de procédés du contrôle non destructif, à savoir : le procédé visuel ; le ressuage ; la magnétoscopie, les ultrasons, et en fin les procédés radiographiques.

Bibliographie de mémoire

Bibliographie

- [3] mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master : conception et productique/ optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers / HICHEM BEKOUICHE.2013
- [8] école nationale d'ingénieur de Tunis cours assemblage thermique par soudage.
- [9] livre de matériaux inorganiques et amélioration des procédés industriels (Olivier Dezellus . claud bernad université Lyono 1)
- [10] techniques de l'ingénieur traité Génie Mécanique B(7745) (article soudage par friction).
- [11] techniques de l'ingénieur traité Génie Mécanique B (7745) (article soudage par friction)
- [12] CSMOFMI / soudage et assemblage – soudage / métallique. (Ce guide à été produit par le Comité sectoriel de la main-d'œuvre - comité perform)

Webographie

- [1] <https://www.promeca.com>
- [2] wikipédia l'encyclopédie libre / procédés de soudage de pièces métallique.
- [4] Wikipédia l'encyclopédie libre / procédés de soudage de pièces métallique .
- [5] www.soudage.com
- [6]www.soudage.com Résistance des matériaux et structures , tome3
- [7] <https://www.researchgate.net/publication/337088999>

Annexe

Liste des symboles

Normalisation

ISO organisation internationale de normalisation

NF EN 10002-1 Octobre 1990 la présente norme définit la terminologie relative à l'essai de traction.

NF EN 10045-1 Octobre 1990 matériaux métalliques – essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy – partie 1 : méthode d'essai.

NF EN 875 Novembre 1995 essais destructif des soudures sur matériaux métalliques – essais de flexion par choc – position de l'éprouvette, orientation de l'entaille et examen.

NF A 89-203 assemblages plans et tubulaires soudés bout à bout par fusion, essai de pliage transversal (endroit envers de cote).

NF A 89-204 soudage et techniques connexes – aptitude au brassage- définition et emploi éprouvette à jeu variable

NF EN ISO 15069 le titre générale descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métallique .

NF EN ISO 15614 DE 2005 spécifie comment un descriptif de mode opératoire de soudage préliminaire est qualifié par une épreuve.

NF EN ISO 15614-1 Définit les conditions d'exécution des épreuves de qualification du mode opératoire de soudage.

NF EN 24063 Soudage , brassage fort , brassage tendre et soudobrassage des métaux – liste des procédés et des numérotations pour la représentation symbolique des dessin .

EN ISO 6947 soudage et techniques connexes – position de soudage.