

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
recherche scientifique

Université Badji Mokhtare Annaba

Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Mécanique



---

N° d'ordre : GM/...../2021

Département de Génie Mécanique

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

**KABOUS SALAH EDDINE**

**Thème :**

---

## **Contrôle Non Destructif des joints de soudure**

---

**Soutenu Devant le jury composé de :**

**Dr.Abd.Kallouche**

**Encadreur**

# REMERCIEMENT

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

Donc dans ce cadre nous adressons nos remerciements :

A monsieur **Dr KALLOUCHE Abdelkader** de m'avoir apporté toutes ces  
Compétences techniques, son esprit d'équipe, et d'avoir dirigé cette mémoire en  
ayant suivi son déroulement avec un très vif intérêt.

Nous remercions également :

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

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

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

A tous ceux que j'aime

## Dédicaces

Je dédie ce travail

A mon défunt père et a ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A tout mes sœurs et frères pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.

Je voudrais également adresser mes remerciements particuliers a :

-mes amis yousef.B ; SANA ZAALANI ;

- tout les étudiants de la classe génie mécanique option Génie des matériaux surtout.

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

A tous ceux que j'aime.

# Sommaire

## INTRODUCTION GENERALE

### Chapitre I : Etude bibliographique (Soudage)

I-1 INTRODUCTION	01
I-2 HISTORIQUE DU SOUDAGE	02
I-3 DEFINITION	03
I-4 PHENOMENES DU SOUDAGE	06
I-4-1 Les soudures autogènes	06
I-4-2 Les soudures hétérogènes	06
I.5. Procédé de soudage	06
I.5.1. Procédé de soudage MIG – MAG	08
I.5.2. soudage au gaz ou au chalumeau	09
I.5.3. soudage à l’arc avec électrode enrobée	10
I.5.4.Soudage à l’arc électrique type TIG Tungstène Insert Gas	11
I.5.5. Soudage par friction	11
I.5.6. Le soudage laser	11
I.6. Les cycles thermiques de soudage	12
I .7. Sécurité	13
I.8. Choix d’un procédé	14
I.8.1.Approche en fonction du domaine d’application	14
I -8. Conclusion	14

### Chapitre II : Etude bibliographique (Les défauts de soudure)

II.1. Introduction	16
II.2. Définition	16
II.3. Les fissures	16
II.3.1. Généralités	16
II.3.1. Orientation des fissures	17
II.3.1.1. Les fissures longitudinales	17

II.3.1.2 Les fissures transversales	17
II.4. Types des fissures	18
II.4.1. Fissures de Gorge (Throat Cracks)	18
II.4.2. Fissures de Racine	19
II.4.3. Fissures de Cratère	19
II.4.4. Fissures au raccordement	20
II.4.5. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)	20
II.5. Fissure à chaud (ou de solidification)	21
II.5.1 Définition	21
II.5.2.Causes possibles	21
II.5.3. Méthodes de détection	22
II.5.4. Méthode de réparation	22
II.5.5. Mesures préventives	22
II.6. Fissures à froid (fissures d'hydrogène)	22
II.6.1. Définition	22
II.6.2. Causes possibles	23
II.6.3. Méthodes de détection	24
II.6.4. Méthode de réparation	24
II.6.5. Mesures préventives	24
II.7. Qualités et défauts d'un cordon de soudure	24
II.8. Facteurs de défaillance des assemblages soudés	25
II.8.1. Facteurs technologique	25
II.8.2. Facteurs métallurgiques	25
II.8.3. Facteurs mécaniques	26
II.9. Les principaux défauts de soudures	26
II.9.1. Les inclusions gazeuses	26
II.9.2. Les inclusions solides	26
II.9.3. Les soufflures	27
II.9.4. Défauts de fusion (collage)	28

II.9.4. 1. Localisations possibles des manques de fusion	28
II.9.4. 2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure	29
II.9.4.2.1. Causes possibles	29
II.9.4.2.2. Mesures préventives	30
II. 9.4.3. Manque de fusion entre passes	30
II. 9.4.4. Manque de fusion à la racine de la soudure	30
II.9.5. Défauts de pénétration	31
II.9.6. Sillons aux caniveaux et morsures en surface	32
II.9.7. Retassures de cratère	33
II-9.8. Effondrement à la racine	33
II.10. Conclusion	33

### **Chapitre III : Etude bibliographique (Contrôle Non Destructif (CND))**

III.1. Introduction	36
III.2. Historique	37
III.3. Définition	37
III.3.1. Objectifs du CND	38
III.3.1.1. Rapidité d'exécution	38
III.3.1.2. Coût	38
III.3.1.3. Reproductibilité	39
III.3.1.4. Fiabilité	39
III.3.1.5. Sensibilité	39
III.3.1.6. Résolution	39
III.3.2. Principes De Détection Des Défauts	40
III.4. Différentes techniques du CND	40
III.4.1. Examen visuel et contrôle optique automatique	42
III.4.2. Ressuage	43
III.4.3. Magnétoscopie	46
III.4.4. Ultrasons	48
III.4.5. Radiographie	50

III.4.6. Thermographie	53
III.4.7. CND par courants de Foucault	54
III.5. Utilisation des procédés de (CND)	55
III.6. Conclusion	56

## **Chapitre IV : Partie Expérimentale Et Applications**

IV-1 INTRODUCTION	58
IV-2 Identification Du Matériau	59
IV-3 Application du Control Non Destructif par ressuage	60
IV-4 Application du Control Non Destructif par l'ultrason	62
IV-5 Interprétation des résultats	65
IV-6 Conclusion	66
IV-7 Perspectives	66

## **-Liste de figures-**

### **Liste de figures : chapitre I**

Figure (I-1) : les zones du soudage	3
Figure (I-2) : Cordon(joint) de soudure	5
Figure (I.3) : Classification des procédés de soudage	7
Figure (I.4) : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion	7
Figure (I.5) : Schématisation du soudage MIG-MAG	9
Figure (I.6) : Soudage au chalumeau	9
Figure (I.7) : Cycle thermique de soudage	12
Figure (I.8) : Répartition thermique Dans une soudure	12
Figure (I.9) : Sécurité Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail	13

### **Liste de figures : chapitre II**

Figure(II.1) :La fissure longitudinale	17
Figure(II.2) : La fissure transversale	18
Figure(II.3) : Les types de fissure	18
Figure(II.4) : Fissure de Gorge (Throat Cracks)	19
Figure (II.5) : Fissure à froid (fissure d'hydrogène)	23
Figure (II.6) : Les différents types de soufflure	27
Figure (II.7) : Exemple de soufflures	28
Figure (II.8) : Localisations possibles des manques de fusion	29
Figure (II.9) : Manque de fusion dans le flanc de la soudure	29
Figure (II.10) : Manque de fusion entre passes	30
Figure (II.10) : Manque de fusion à la racine de la soudure	31
Figure (II.11) : Défaut manque de pénétration	31
Figure (II.12) : Effondrement à la racine	33

### **Liste de figures : chapitre III**

Figure (III.1) : Les principales techniques du CND	41
Figure (III.2) : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel	43



Figure (III.3) : Principe de contrôle par ressuage	44
Figure (III.4) : Indication obtenues à l'aide de liquides pénétrants	44
Figure (III.5) : Principe de la magnétoscopie	46
Figure (III.6) : Indication obtenues à l'aide de magnétoscopie	47
Figure (III.7) : Principe des ultrasons	49
Figure (III.8) : Schéma de principe du CND par courant de Foucault	55

### **Liste de figures : chapitre IV**

Figure (IV.1) : Tôles après soudage	60
Figure (IV.2) : Matériel utilisés dans le ressuage	60
Figure (IV.3) : étape 1	61
Figure (IV.4) : étape 2	61
Figure (IV.5) : étape 3	61
Figure (IV.6) : étape 4	61
Figure (IV.7) : étape 5	62
Figure (IV.8) : étape 6	62
Figure (IV.9) : Le matériel utilisé	62

**-Liste des tableaux-**

**Liste des tableaux : chapitre I**

**Liste des tableaux : chapitre II**

Tableau. II.1 : Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention 32

**Liste des tableaux : chapitre III**

**Liste des tableaux : chapitre IV**

Tableau (IV.1) : Composition chimique du métal de base 59

Tableau (IV.2): Caractéristiques mécaniques du métal de base 60

## Résumé :

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

## ملخص :

هذا البحث عبارة عن كيفية مراقبة وتخفيف الاجتهادات المتبقية علي القطع الملحمة وجود القيود الأثرية العالية والمتجمعة وارتفاع درجة الحرارة ،ولوجودها السبب الفعال في إمكانية التآكل تحت القيود، عند أطراف التشققات داخل حبل التلحيم ويجب علينا التقليل من نسبة هذه القيود الأثرية والممثلة للسبب الرئيسي لانتشار التشققات وبهذا يكون الانكسار المفاجئ ولضمان الإنشاءات الميكانيكية الملحومة أثناء التشغيل يجب علينا ان نجري بعض المعالجات الحرارية ،لحبل التلحيم ولقد تطرقنا في بحثنا هذا الي بعض المراقبات علي قطعة ملحمة لكي نحدد ،المناسبة وفي مختلف مراحل التصنيع لقد بيننا الوسائل و التقنيات والطرق العملية المستخدمة خلال هذا التحليل الاعطاب او القيود الأثرية داخل حبل التلحيم .

الكلمات المفتاحية : التلحيم، وصلة التلحيم، قيود أثري انكسار ، معالجات حرارية

## Abstract:

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

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

***Introduction***  
***générale***

## **INTRODUCTION GENERAL**

---

### **INTRODUCTION GENERAL :**

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

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

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

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

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par méthodes non destructives des assemblages soudés , Notre étude est composée de quatre chapitres :

- 1- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- 2- Le deuxième chapitre est réservé aux défauts de soudage.
- 3- Le troisième chapitre contient une présentation des Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif
- 4- Le quatrième chapitre est une partie expérimentale sur les techniques d'application des CND sur le joint soudé, résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout sous forme de tôles fortes réalisé au niveau de l'entreprise GTP adrar.

***Chapitre I :***  
***Etude bibliographique***  
***(Soudage)***

**I-1 INTRODUCTION :**

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction comme par exemple : les bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

Le développement industriel est porté par le souci permanent de trouver de nouveaux procédés de fabrication pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le prix de revient et le temps d'exécution etc.

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

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

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

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

**I-2 HISTORIQUE DU SOUDAGE :**

Le soudage est né à la fin du 19ème siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique

oxyacétylénique, puis avec 20ème siècle a vu la naissance du soudage par Laser est aussi :

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

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

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

le soudage sous flux : 1935 – USA.

- le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.

- le soudage sous la protection gazeuse : 1950 –1960.

- le soudage avec fils fourrés : 1950 –1960.

- le soudage par explosion : 1950-1960.

- le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.

- le soudage par laser : 1965. [1]



### I-3 DEFINITION

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

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

Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels les visages, le sertissage, Le rivetage, le collage, l'agrafage. L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, des trains, des avions, des fusées, de L'automobile, des ponts tuyaux, des réservoirs et tant d'autres structures qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

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

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

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

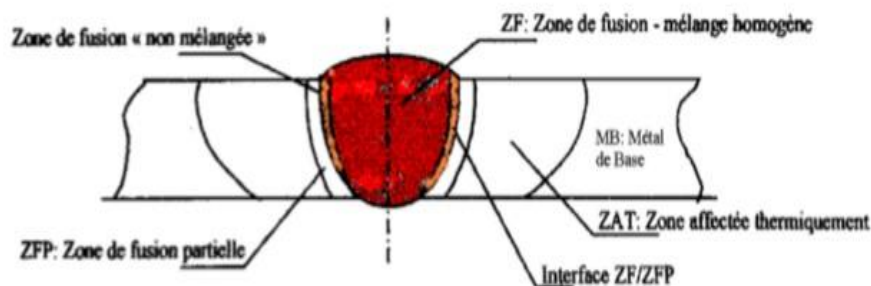


Figure (I-1) : les zones du soudage [3]

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

Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue.

Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

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

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

- **La zone de liaison :**

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

- **Le métal de base :**

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

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

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

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).

- Le faible temps de maintien de la température maximale.

- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties

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, ...

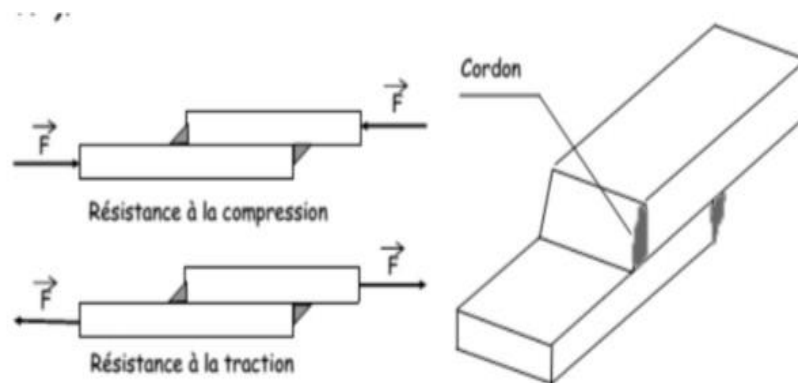
- Le couple métal d'apport

– 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.[5]**

**I-4 PHENOMENES DU SOUDAGE :**

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Dans le soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation de la température dans les pièces. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique (friction) ou optique (Laser). [6]

On distingue deux grandes classes de soudures :

**I-4-1 Les soudures autogènes :**

Ce sont des assemblages homogènes car les éléments sont assemblés soit sous le même métal d'apport soit avec un métal d'apport de même nature chimique. [7]

**I-4-2 Les soudures hétérogènes :**

Elles sont réalisées à l'aide d'un métal d'apport déposé par fusion et d'une nature chimique différent de celle des éléments soudés. [8]

**I.5. Procédé de soudage :**

Les différents types du soudage ne peuvent s'effectuer que selon l'un des deux modes suivants:

- En phase solide : la continuité atomique entre les bords à joindre est assurée par une déformation à froid ou à chaud. Cette déformation est due soit à une pression soit à une friction suivie d'une pression.
- En phase liquide : liaison par fusion localisée des joints des pièces à assembler ou par ajout de métal d'apport en fusion. La majorité des procédés de soudage s'opèrent selon ce mode.

La classification des multiples variantes du soudage peut être faite selon la source d'énergie utilisée. Cette classification est présentée dans la (Figure I.3.).

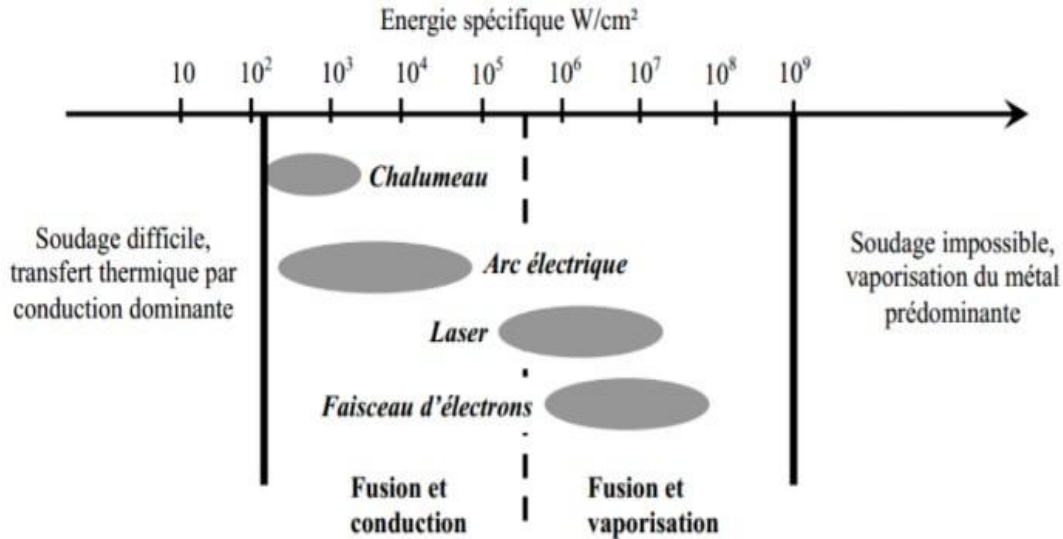


Figure (I.3): Classification des procédés de soudage.[9]

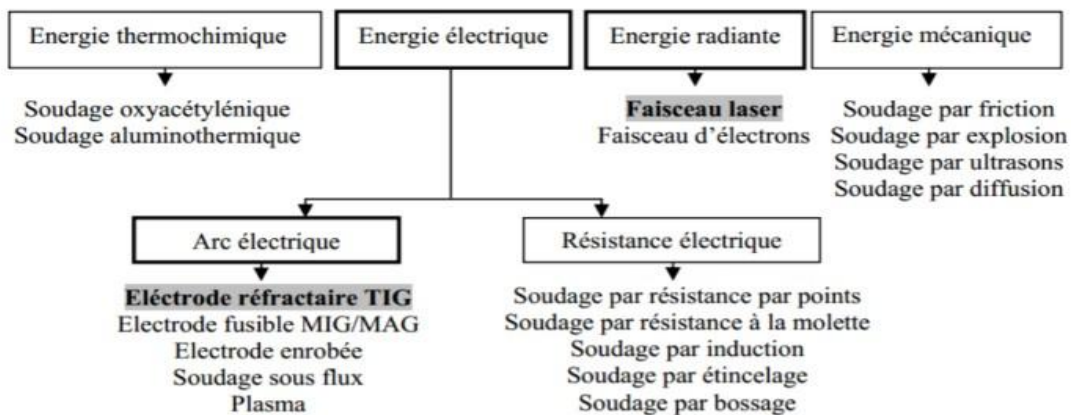


Figure (I.4) : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion. [10]

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (figure I.4). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

**I.5.1. Procédé de soudage MIG – MAG :**

Ce procédé est l'un des nombreux types de soudage utilisant l'arc électrique pour fournir la chaleur nécessaire à la fusion locale des pièces à assembler. L'arc électrique s'établit grâce aux déplacements des électrons entre l'électrode et le joint de soudure dans un gaz ionisé formant la colonne d'arc (plasma). Selon le cas, du gaz inerte (Argon, Hélium) ou actif (CO<sub>2</sub>) est utilisé pour protéger l'arc et le bain de fusion ce qui donne leur nom aux procédés : M.I.G. (Métal insert Gas) et M.A.G. (Métal Active Gas). Le procédé Est utilisé pour le soudage de l'aluminium et de ses alliages quant au procédé M.A.G. il est employé pour le soudage des aciers. Le métal d'apport se dévide automatiquement sous forme de fil à l'intérieur de la buse de la torche pour se déposer en fusion, par régime de court-circuit ou de pulvérisation, sur le métal de base. La dilution du métal d'apport avec le métal de base puis leur solidification constituera la liaison métallique visée par le soudage. Ce procédé (M.I.G. ou M.A.G.) est particulièrement adapté au soudage, en toutes positions, des tôles d'épaisseurs faibles ou moyennes (1 à 15 mm). [11]

**Domaines d'application :**

Les procédés MIG – MAG, de haute productivité, faciles à mettre en œuvre en atelier comme sur les chantiers, sont employés aussi bien en manuel qu'en automatique et avec robots. Ils sont utilisables en toutes positions sur des épaisseurs à partir de 0,6 mm On rencontre les procédés MIG – MAG dans de nombreuses industries : chaudronnerie, constructions navale et ferroviaire, off-shore, construction automobile, menuiserie métallique, etc.

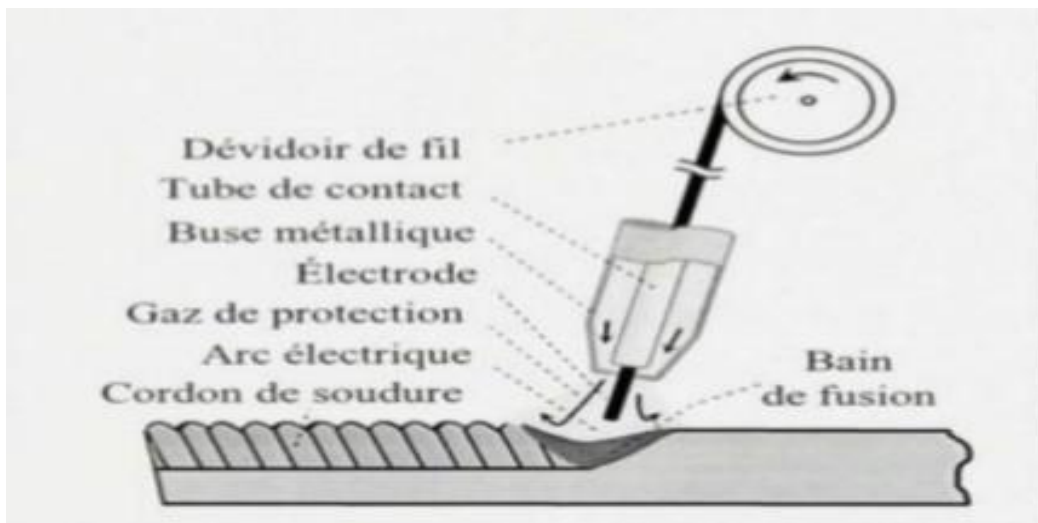
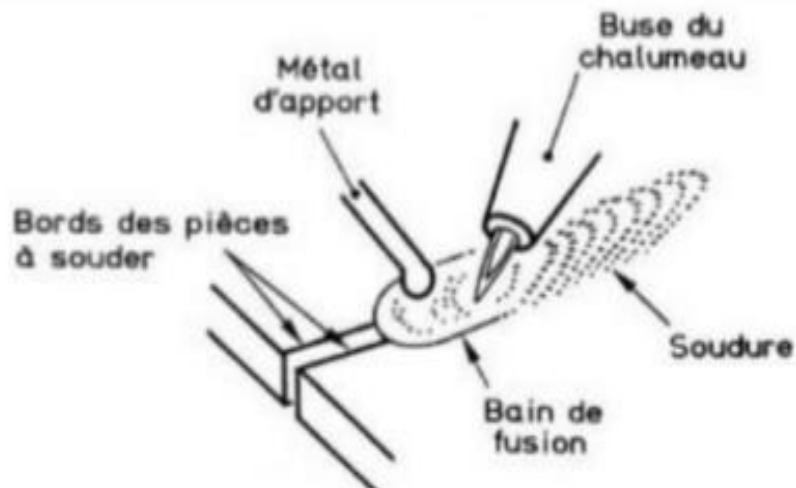


Figure (I.5) : Schématisation du soudage MIG-MAG.[12]

### I.5.2. soudage au gaz ou au chalumeau :

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau. Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques.[11]



Figure(I.6) : Soudage au chalumeau.[13]

**I.5.3. soudage à l'arc avec électrode enrobée :**

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement. [11]

**Source d'énergie :**

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler. [14]

**Métal d'apport :**

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

**Elément de protection :**

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc. La protection du métal déposé est assurée par la formation d'un laitier adhérent à la surface de ce métal.

**Matériaux concernés :**

Ce procédé est utilisable pour tous les métaux courants tels que l'acier, les aciers faiblement alliés, les aciers inoxydables, nickel, et éventuellement les cuivreux, l'aluminium et leurs alliages.

Le soudage à l'électrode enrobée ne convient pas pour la soudure des métaux très oxydables tels que le titane et le zirconium, car la protection du bain n'est pas suffisante.



#### **I.5.4. Soudage à l'arc électrique type TIG Tungstène Insert Gas :**

Le procédé de soudage TIG remonte aux années 1930 et son développement remonte à la deuxième guerre mondiale avec l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les alliages d'aluminium et de magnésium. [15]

#### **I.5.5. Soudage par friction :**

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. 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. Il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électro conducteurs tels le cuivre et ses alliages. [16]

#### **I.5.6. Le soudage laser :**

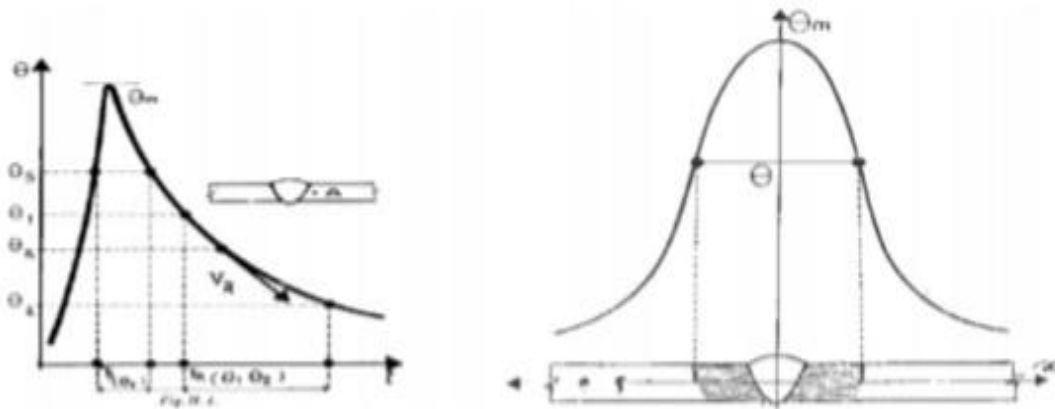
Le soudage laser est réalisé à l'aide d'une source laser émettant dans l'infrarouge. Le faisceau représente un réel danger pour la sécurité des travailleurs. En conséquence, le soudage est effectué par un robot (ou tout autre manipulateur) dans une enceinte fermée, étanche à la lumière. Il est possible de souder au laser selon deux modes : en conduction ou en trou de serrure (keyhole). Le soudage par conduction s'effectue à l'état liquide et requiert une densité d'énergie d'environ 105 W/cm<sup>2</sup>. Le soudage en trou de serrure, quand à lui, implique la vaporisation du métal sous l'action d'une énergie d'au moins 106 W/cm<sup>2</sup>

Le capillaire, petit « tube » de vapeur métallique se formant dans la pièce, permet l'obtention d'un joint présentant le profil étroit et profond typique au soudage laser, alors que le soudage

par conduction produit des joints plus larges que profonds. Sachant que le diamètre du faisceau laser frappant le matériel est de l'ordre du demi-millimètre, une source laser de plus de 1 kW est le plus souvent requise pour souder en trou de serrure. [17]

### I.6. Les cycles thermiques de soudage :

Pendant que la source de chaleur (arc ou flamme) se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale, puis se refroidit. L'apport localisé de la chaleur et l'écoulement de celle-ci engendre des cycles thermiques qui permettent de connaître l'importance des modifications locales créées, donc d'évaluer selon le milieu et les conditions de service, la tenue des constructions soudées dans les zones ainsi affectées. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance pendant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température  $\Theta$  en fonction du temps.



**Figure (I.7) : Cycle thermique de soudage .[18]      Figure (I.8) : Répartition thermique Dans une soudure. [19]**

La courbe correspondante  $\Theta = f(t)$ , tracée en un point A voisin d'une soudure (figure I.7) nous renseigne sur les grandeurs associées au cycle thermique.

- La température maximale atteinte  $\Theta_m$ .
- Le temps de séjour  $T_s$  au-dessus d'une température  $\Theta_s$ .
- Le temps de refroidissement entre deux température  $\Theta_1$  et  $\Theta_2$ .

- TR ( $\Theta_1$   $\Theta_2$ ), ou la vitesse de refroidissement  $V_r$  à une température  $\Theta_r$ . [20]

Si on veut accéder à la répartition topographique des modifications de structure aux alentours de la soudure, il faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe  $\Theta_m = f(x)$  (figure I.8) donnant la variation de la distance  $x$  parcourue de part et d'autre de la zone fondue. Chaque phénomène étant caractérisé, comme première condition, par la température  $\Theta$  atteinte, on peut situer grâce à la courbe  $\Theta = f(x)$ , la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire. Ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT). La variation de la température en fonction du temps renseigne sur la nature des phénomènes qu'engendrent les cycles thermiques de soudage en chaque point voisin de la soudure, la répartition thermique pour une bonne interprétation de l'étendue et la topographie de ces phénomènes.

### I-7. Sécurité :

#### Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail.



Figure (I - 9) : Sécurité Les éléments nécessaires pour de bonne condition de travail. [21]

### **I.8. Choix d'un procédé :**

Selon la situation, le choix d'un procédé s'effectuera :

- par une analogie ou une extrapolation à partir d'une expérience déjà acquise que l'on adaptera ; c'est le cas de ce que nous appellerons les assemblages conventionnels ;
- par nouvelle évaluation.

Dans certains domaines où le soudage et les soudures sont fortement réglementés, le choix du procédé n'est généralement pas libre.

On peut à l'opposé, comme c'est surtout le cas dans les constructions dites légères ou de pièces généralement peu sollicitées, disposer d'une grande liberté de choix de la méthode et du procédé de soudage. Il faut alors adopter une approche qui inclut nécessairement la connaissance de possibilités des différents procédés .[22]

#### **I.8.1.Approche en fonction du domaine d'application :**

On a coutume de distinguer trois grands domaines d'application du soudage :

- les produits semi-finis.
- les fabrications mécaniques en général.
- les composants de toutes sortes, se rapportant à deux sous-domaines relatifs
- respectivement aux pièces usinées et aux assemblages de tôles formées. [22]

### **I-8. Conclusion :**

#### **1-On distingue trois types de soudures :**

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

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

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

***Chapitre II :***  
***Etude bibliographique***  
***(Les défauts de***  
***soudure)***

## Chapitre II : Les défauts de soudage

### II.1. Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé.

### II.2. Définition :

Une discontinuité géométrique, par les conséquences qu'elle entraîne naturellement, par exemple sur la répartition des contraintes peut, au sens direct, être considérée comme un défaut défaut puisqu'elle provoque une situation inhabituelle par rapport à celle rencontrée, partout ailleurs, dans l'objet considéré mais alors, tout cordon de soudure, y compris le cordon bout à bout, constitue un défaut. En conséquence une définition possible de ce qu'on entend par défaut pourrait être «Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits »[36]

### II.3. Les fissures :

#### II.3.1. Généralités :

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

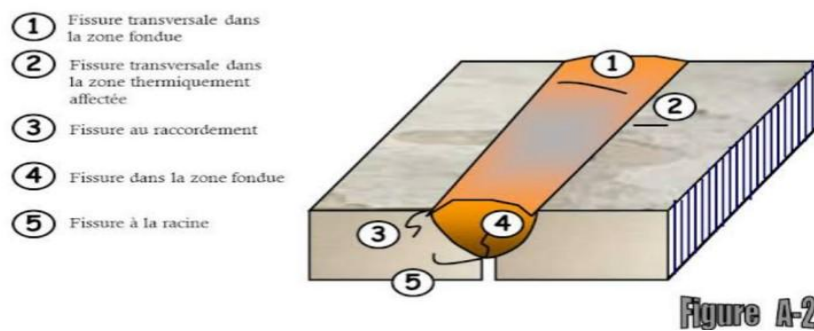
complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

### II.3.1. Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur.[37]

**II.3.1.1. Les fissures longitudinales :** dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage liées à élevées ou peuvent être des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure.[37]

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous.

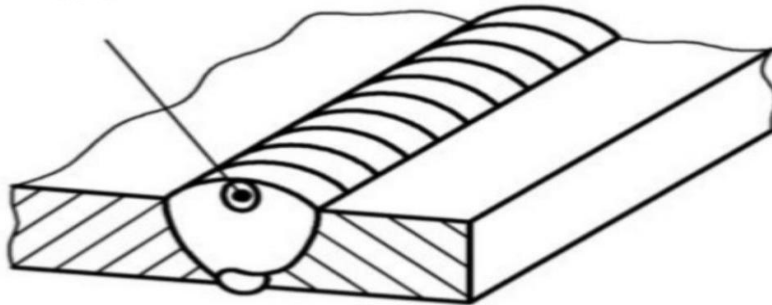


Figure(II.1) :La fissure longitudinale.[38]

**II.3.1.2 Les fissures transversales :** sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.



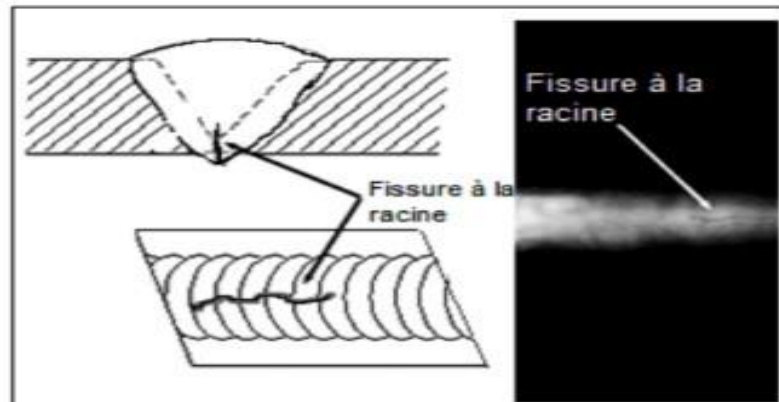
Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal.[37]



Figure(II.2): La fissure transversale.[39]

#### II.4. Types des fissures :

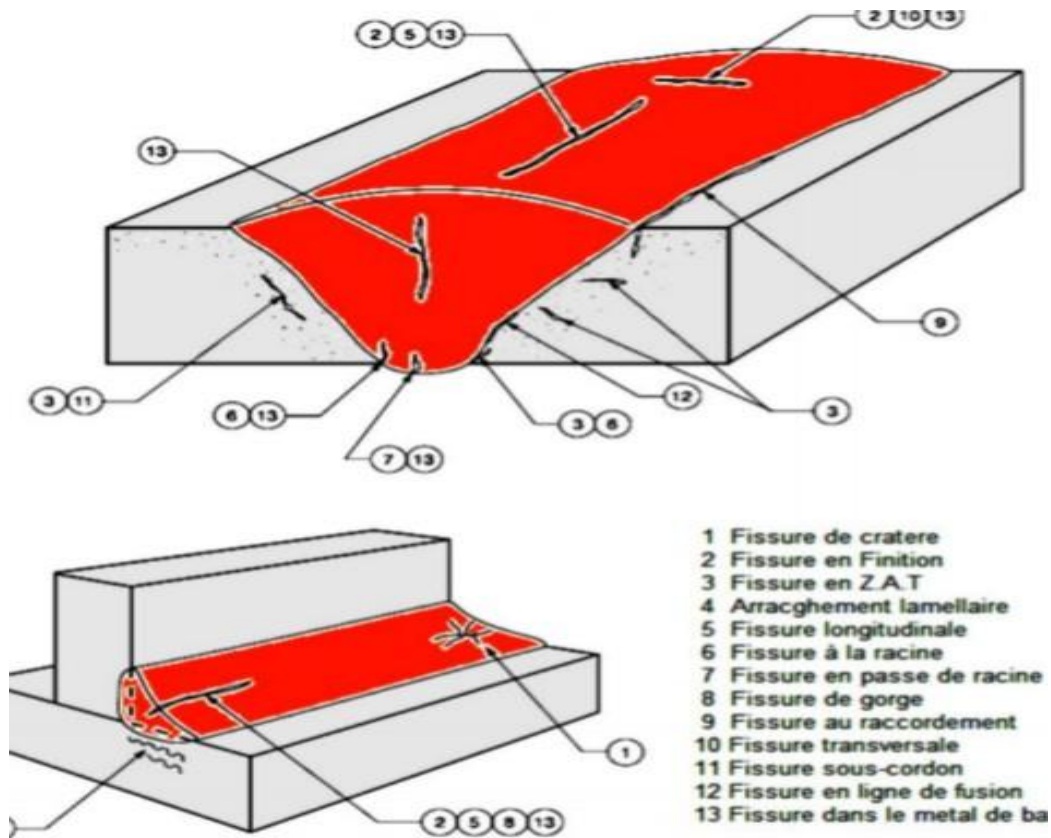
La Figure(II.3) résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :



Figure(II.3) : Les types de fissure.[40]

**II.4.1. Fissures de Gorge (Throat Cracks):** ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (II.4) Elles sont généralement, mais pas toujours, des

fissures à chaud.



Figure(II.4) : Fissure de Gorge (Throat Cracks).[40]

**II.4.2. 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 à chaud ou à froid.

**II.4.3. 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.[37]

**II.4.4. 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.[37]

**II.4.5. 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.[41]

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.

## **II.5. Fissure à chaud (ou de solidification) :**

### **II.5.1 Définition :**

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée.[41]

### **II.5.2.Causes possibles :**

- Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).
- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente. Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques: on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

**II.5.3. Méthodes de détection :**

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

**II.5.4. Méthode de réparation :**

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

**II.5.5. Mesures préventives :**

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.[41]

**II.6. Fissures à froid (fissures d'hydrogène) :****II.6.1. Définition :**

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage.[41]

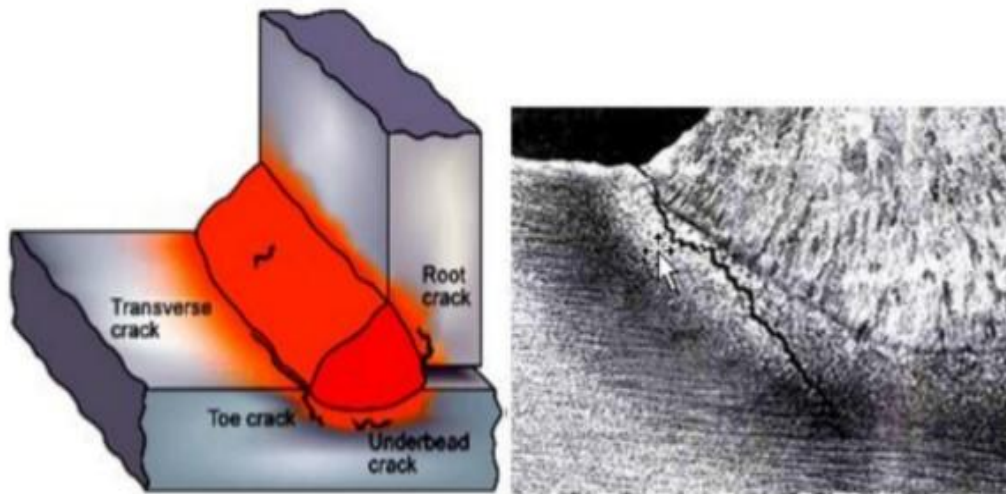


Figure (II.5) : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).[40]

### II.6.2. Causes possibles :

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

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

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

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

**II.6.3. Méthodes de détection :**

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

**II.6.4. Méthode de réparation :**

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.

**II.6.5. Mesures préventives :**

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.[41]

**II.7. Qualités et défauts d'un cordon de soudure**

- Il doit posséder un profil légèrement convexe.
- Sa surface doit être douce et régulière.
- Les stries doivent être également rapprochées les unes des autres.
- Ses côtés doivent être bien fusionnés à la surface du métal de base

## **II.8. Facteurs de défaillance des assemblages soudés :**

### **II.8.1. Facteurs technologique :**

Ce sont les conditions de réalisations des soudures qui provoquent l'application de défauts affectent le comportement mécanique de l'assemblage soudé. L'institut international de la soudure a proposé la classification suivante :

- Les fissures
- Les cavités
- Les inclusions solides
- Les manques de fusion et de pénétration
- Les défauts de formes
- Les autres défauts.

Les fissures sont dues souvent à l'effet thermomécanique du soudage ; les cavités sont dues au retrait du métal ou à la présence de gaz ou d'inclusions solides [36].

### **II.8.2. Facteurs métallurgiques :**

Les cycles thermiques associés à l'opération du soudage provoquent des modifications locales des propriétés mécaniques de l'assemblage soudé.

Ces facteurs sont principalement. [42-43-44]

- adoucissement
- La trempe
- Le vieillissement
- La surchauffe
- La structure de solidification



### II.8.3. Facteurs mécaniques :

Dans ce cas il s'agit d'erreurs de conception et non plus d'exécution. La géométrie du cordon de soudure, par exemple, joue un rôle important sur la concentration des contraintes, surtout au pied du cordon. [17]

## II.9. Les principaux défauts de soudures

Les défauts les plus importants qui risquent de donner lieu à une reprise du joint ou à mise en cause de la résistance de ces derniers sont :

### II.9.1. Les inclusions gazeuses

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- Utilisation d'aciers calmés.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- Séchage des pièces avant soudage.
- Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

### II.9.2. Les inclusions solides

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures.

Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder.

### II.9.3. Les soufflures :

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres.



**Figure (II.6) : Les différents types de soufflure.[45]**

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

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

Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

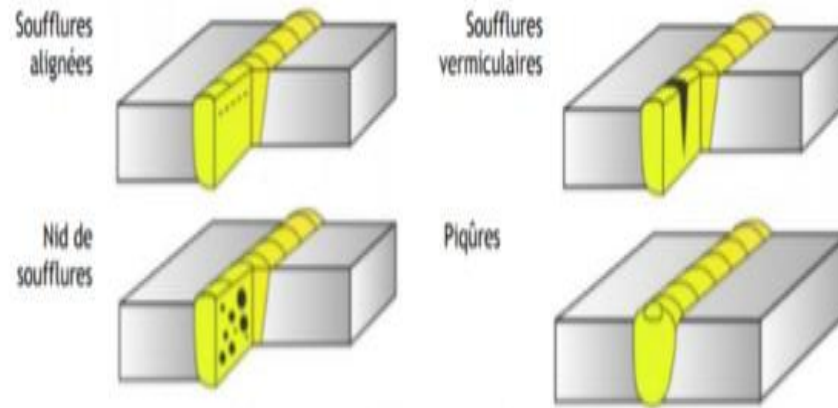


Figure (II.7) : Exemple de soufflures.[45]

#### II.9.4. Défauts de fusion (collage) :

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure ; vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal, Et L'angle d'inclinaison de l'électrode est incorrect. Pour les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de l'électrode. En plus L'angle de l'électrode doit permettre l'établissement de l'arc avec les parois du joint.

##### II.9.4. 1. Localisations possibles des manques de fusion :

Des manques de fusion peuvent apparaître (Figure. II.8) :

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

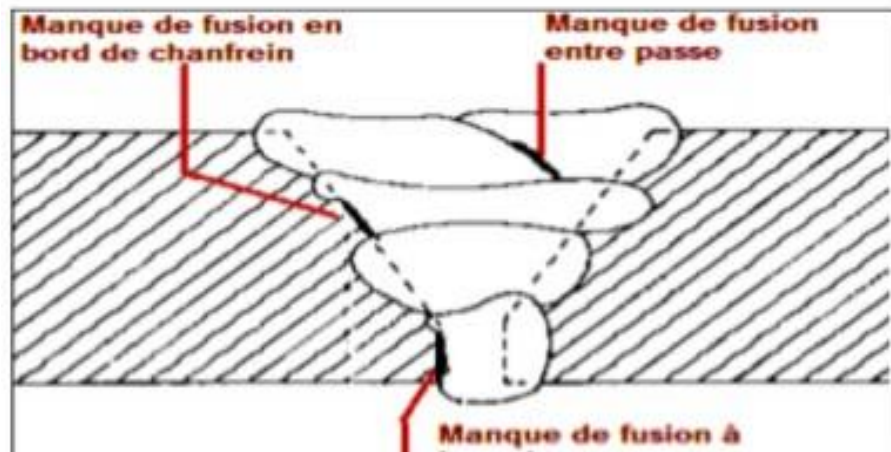


Figure (II.8) : Localisations possibles des manques de fusion.[45]

#### II.9.4.2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

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

(Figure. II.9).

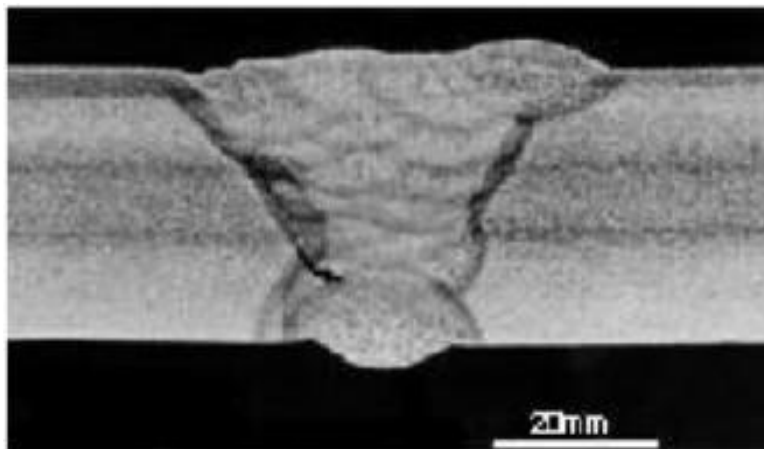


Figure. II.9 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.[45]

##### II.9.4.2.1. Causes possibles :

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

- Inductance trop importante en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.

#### II.9.4.2.2. Mesures préventives :

- Qualification de la procédure pour vérifier la fusion
- Eventuellement modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage
- Nettoyer suffisamment les bords à souder
- Diminuer une inductance trop élevée dans le soudage MAG, même si les projections sur le métal de base deviennent plus nombreuses.

#### II. 9.4.3. Manque de fusion entre passes :

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure. II.10).

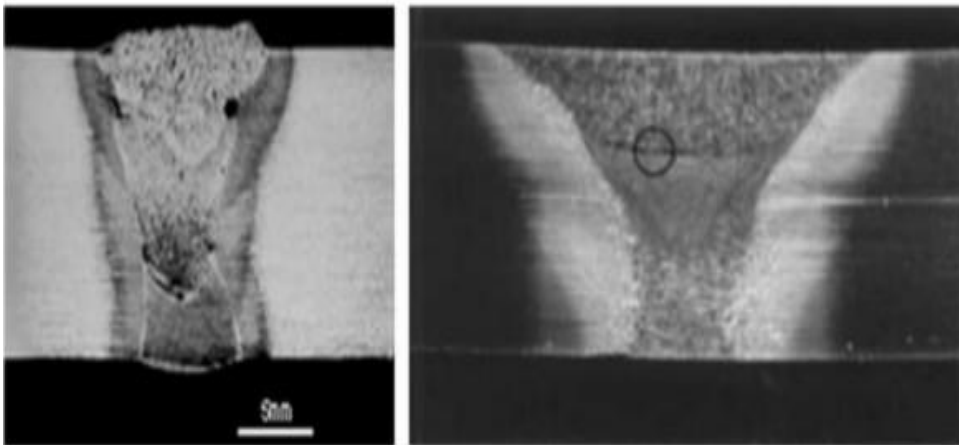


Figure (II.10) : Manque de fusion entre passes.[45]

#### II. 9.4.4. Manque de fusion à la racine de la soudure :

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Figure. II.10).

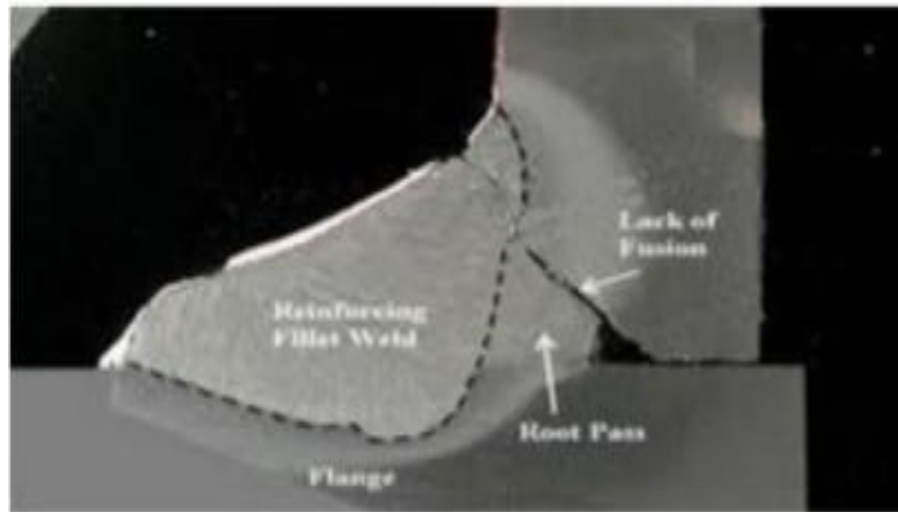


Figure (II.10) : Manque de fusion à la racine de la soudure.[45]

#### II.9.5. Défauts de pénétration :

Ils sont dus à une absence de métal à la racine des chanfreins, à cause d'utilisation d'électrode de diamètre trop important, intensité trop faible du courant de soudage, mauvaise préparation des pièces à souder. Pour les éviter, il faut un bon choix de l'intensité du courant de la vitesse d'avancement, et une préparation adaptée aux conditions de soudage.

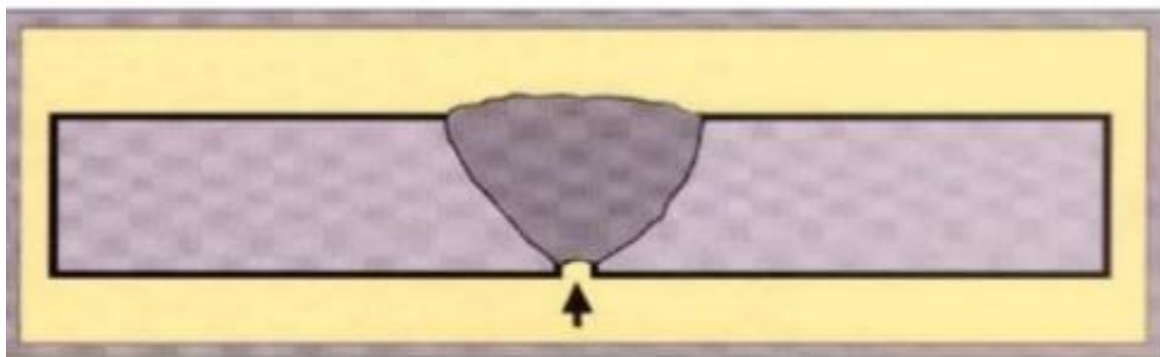


Figure (II.11) : Défaut manque de pénétration.[45]

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé Tableau (II.1).

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

Défaut de pénétration	Causes possibles	Moyens de prévention
<b>Excès de pénétration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitesse d'avance trop lente</li> <li>- Intensité du courant trop forte</li> <li>- Mauvaise préparation des bords</li> <li>- Trop de distance entre les pièces</li> <li>- Arc trop court</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmenter la vitesse.</li> <li>- Diminuer l'intensité.</li> <li>- Utiliser le joint approprié.</li> <li>- Rapprocher les pièces.</li> <li>- Éloigner la torche.</li> </ul>
<b>Manque de pénétration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitesse d'avance trop élevée</li> <li>- Intensité du courant trop faible</li> <li>- Chanfrein trop étroit ou absent</li> <li>- Métal de base trop épais et froid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuer la vitesse.</li> <li>- Augmenter l'intensité.</li> <li>- Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces.</li> <li>- S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.</li> </ul>

**Tableau. II.1 : Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention [46].**

#### **II.9.6. Sillons aux caniveaux et morsures en surface :**

Ce sont, des rainures ou des gorges à la surface des pièces, le long des bords des joints soudés. Ils sont le fait d'une énergie de soudage trop importante ou d'une mauvaise position du fil de l'électrode.

Pour les éviter, il faut un choix judicieux de l'énergie de soudage, de la position de

l'électrode, et de la température des pièces pendant le soudage.

### II.9.7. Retassures de cratère :

Ce sont des cavités à l'extrémité des cordons, souvent remplies de laitier et pouvant donner lieu à fissuration. Elles sont causées par une solidification rapide du métal après interruption de l'arc.

Pour les éviter, il faut un contrôle visuel pendant le soudage, interruption progressive de l'arc en fin d'exécution des cordons. [47]

### II-9.8. Effondrement à la racine :

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (Figure. II.12).

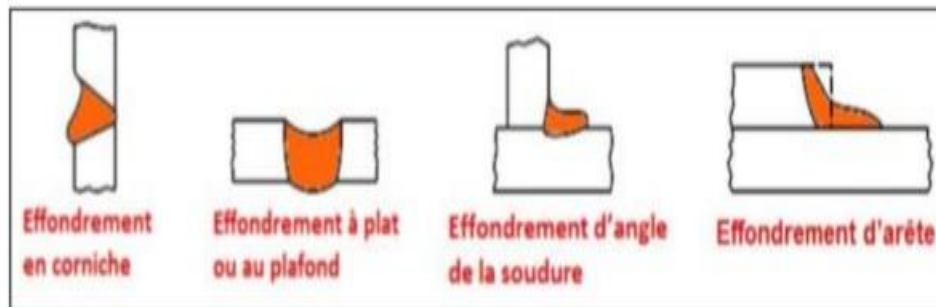


Figure (II.12) : Effondrement à la racine.[45]

### II.10. Conclusion :

La fissuration résulte généralement de tensions internes trop importantes dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée durant le soudage (ZTA). Les fissures peuvent apparaître très tôt (fissuration à chaud) ou des heures, voire des jours après le soudage (fissuration à froid). Les causes les plus fréquentes de fissuration sont un refroidissement trop rapide, un métal d'apport incompatible avec le métal de base ou une mauvaise préparation des joints.



En plus des fissures, il existe plusieurs types de défauts de soudure : les défauts dimensionnels (mauvaise dimension du cordon sur la largeur ou sur l'épaisseur), les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion.

Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

***Chapitre III:***  
***Etude bibliographique***  
***(Contrôle Non***  
***Destructif (CND)***

### III.1. Introduction

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours De la production, soit en cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance.

Les termes « Essais Non Destructifs » (END) ou « Examens Non Destructifs » évoquent aussi le diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient. Le même principe appliqué aux pièces industrielles consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour apprécier sans destruction leur état de santé et formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition de CND suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps, des lois générales de la mécanique de la rupture et, dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif sont plutôt confrontés à des problèmes d'interprétation de résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce.

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette ». L'exécution de cette tâche demande une bonne connaissance des méthodes d'investigation mises en œuvre, de leurs limites et surtout une adéquation parfaite entre le pouvoir de détection de chacune d'elle et les critères appliqués pour la mise en œuvre [23- 24].

### III.2. Historique

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, etc...

Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du (CND) ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates-formes offshores.

La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de (CND) qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques [27].

### III.3. Définition

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D) est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles (y compris des ponts par exemple), sans les dégrader, soit au cours de la production (par exemple : les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut).

Il faut donc déterminer (à la casse, de façon empirique) quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce, et la remplacer si besoin est.

On parle aussi d'Essais Non Destructifs ou d'Examen Non Destructifs (E.N.D).

Les Contrôles Non Destructif (CND) sont des essais physiques pour l'individuation de l'éventuelle présence de défauts dans une pièce sans l'abîmer ou la détruire en évitant ainsi de la rendre inutilisable.

Les CND ont pour but de localiser les défauts d'une certaine importance et de

consentir d'émettre un jugement d'acceptabilité sur les pièces examinées.

La possibilité d'étendre les contrôles à toutes les pièces d'une construction donnée permet de prévenir les incidents.

Voilà qui explique la grande importance et diffusion que les CND ont eue dernièrement.

Le contrôle d'un matériel ou d'un produit peut être effectué non seulement pour détecter des défauts, mais aussi pour la détermination des caractéristiques physiques, l'examen de la structure, l'analyse de la composition. [26]

### **III.3.1. Objectifs du CND**

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

#### **III.3.1.1. Rapidité d'exécution**

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'oeuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

#### **III.3.1.2. Coût**

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

### III.3.1.3. Reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

### III.3.1.4. Fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

### III.3.1.5. Sensibilité

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

### III.3.1.6. Résolution

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite. Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis.

Principes De Détection Des Défauts.

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault ; sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux. En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité. La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un

diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce. [26]

### **III.3.2. Principes De Détection Des Défauts**

Les méthodes de contrôle non destructif sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. Les phénomènes physiques comme l'atténuation ou diffraction des rayons X, réflexion ou diffraction des ultrasons, perturbation des courants de Foucault ; sont à la base des essais non destructifs où ils peuvent servir à caractériser les matériaux. En effet, par CND on sous-entend toujours qu'il ne s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité. La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce. [26]

### **III.4. Différentes techniques du CND**

Les techniques CND diffèrent généralement par l'énergie employée : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (magnétoscopie, courants de Foucault) ou thermique (thermographie infrarouge). Cependant, quelle que soit la méthode employée, un processus de détection de défauts est généralement mis en place. Il est constitué de deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts (décider que le système est en défaut ou non et déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification (estimer l'ampleur et le types des défauts).

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque

bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité.

En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-là. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

Du fait que les origines et les types des défauts sont multiples, plusieurs techniques du CND ont été développées pour répondre aux différentes problématiques rencontrées. Le choix d'une méthode du CND dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature des matériaux constituant les pièces à contrôler, la nature de l'information recherchée (détection ou mesure, position ou forme de défaut...), le type du contrôle à effectuer (contrôle en ligne sur pièce mobile, possibilité de contact ou non avec la pièce...) et les problèmes économiques.[26]

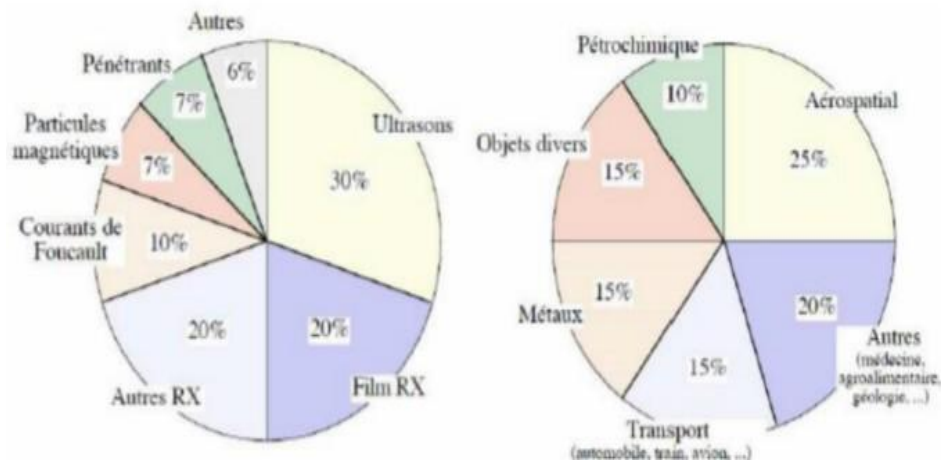


Figure (III.1) : Les principales techniques du CND.[28]



### III.4.1. Examen visuel et contrôle optique automatique

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non. L'examen visuel, contrôle ancestral le plus élémentaire, il est le plus ancien des contrôles non destructifs et la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision.

Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité. De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques, suivies de traitement d'images tel que le seuillage ou la reconnaissance de formes. Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières.

L'examen visuel est une méthode de contrôle non destructif dont la mise en œuvre est souvent simple mais qui est très riche d'enseignements car elle permet d'expliquer le mécanisme d'un contrôle.

Il s'agit d'observer la surface d'un objet pour y déceler d'éventuelles anomalies.

Cette observation nécessite une source de lumière d'intensité et de longueur d'onde compatibles avec l'aptitude naturelle de l'œil de l'opérateur exécutant l'examen.

Cette technique est essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. Cette technique est essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la

surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur. [26]

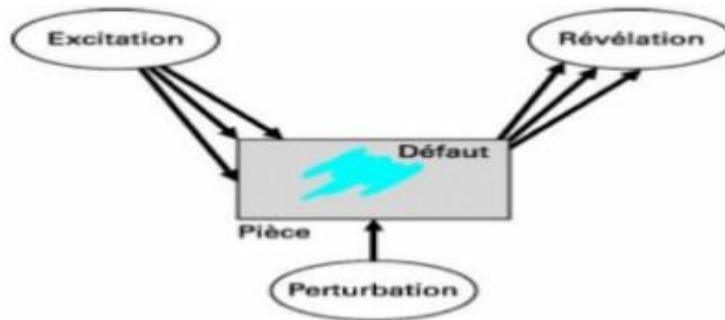


Figure (III.2) : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel.[29]

#### III.4.2. Ressuage

Cette méthode complète l'examen visuel en faisant apparaître des défauts de surface dans un contraste coloré ou fluorescent. Son principe est relativement simple et se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler.

Un liquide coloré ou fluorescent dit "pénétrant" est ensuite appliqué sur la surface à contrôler.

Il va s'infiltrer à l'intérieur des anomalies (fissures, porosités...).

L'excès de pénétrant est ensuite éliminé par un lavage adapté. La surface est alors recouverte d'une fine couche de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les anomalies et donne une tache colorée en surface plus large que l'anomalie, permettant ainsi de la localiser.

On dit alors que le révélateur fait "ressuer" le pénétrant. Ces indications sont alors visibles à l'œil nu. Dans certaines industries, on utilise un pénétrant fluorescent qui est révélé par un éclairage sous UV.

Le champ d'application du ressuage est très vaste car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur d'autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement avec le pénétrant.

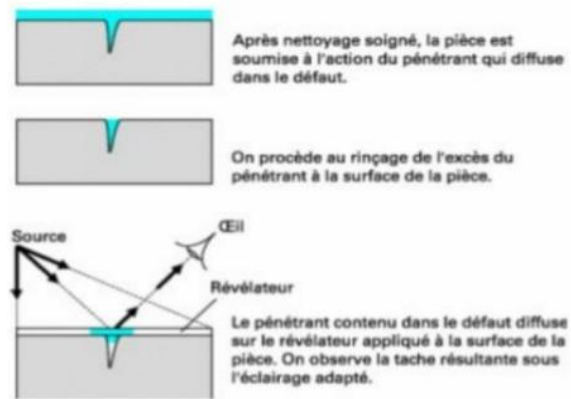
**La méthode (par ressuage) est basée sur la capacité de certains liquides de:**

- pénétrer par capillarité dans les défauts affleurant à la surface de la pièce examinée.
- possibilité de relever les endroits de la surface de la pièce où le liquide a pénétré.

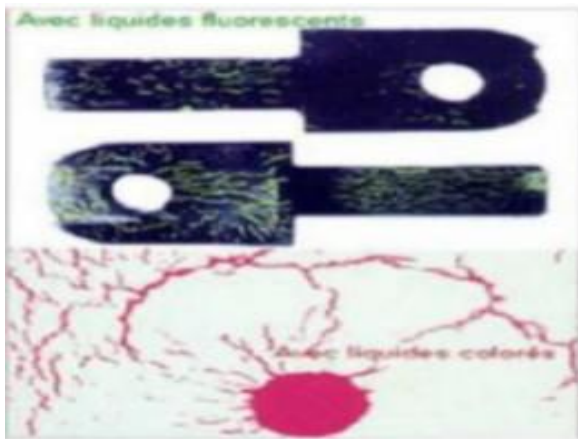
**Le principe de l'examen est le suivant :**

- sur la surface de la pièce on applique un liquide coloré particulier (pénétrant), qui s'insinue dans les discontinuités superficielles présentes.
- par la suite, après avoir nettoyé la surface de l'excès de pénétrant, on applique une substance (révélateur), qui absorbe le pénétrant lequel en s'insinuant dans les discontinuités, crée un signal porteur d'information sur la discontinuité elle-même.

Le contrôle non destructif par ressuage a pour objectif de détecter des défauts débouchant en surface sur des matériaux non absorbants.[26]



**Figure (III.3) : Principe de contrôle par ressuage[30]**



**Figure (III.4) : Indication obtenues à l'aide de liquides pénétrants.[31]**

La méthode requiert l'utilisation de:

- liquide pénétrant en mesure de pénétrer par capillarité dans les défauts affleurant à la
- surface de la pièce en examen (et non pas grâce à la force de gravitation);
- révélateur (substance qui, appliquée à la pièce après l'examen et l'élimination du pénétrant, permet la fuite du pénétrant resté dans le défaut).

**Les principaux avantages de la méthode sont:**

- elle est applicable à tous les matériaux (ferromagnétiques et non).
- elle peut être exécutée aussi sur pièces ou détails peu accessibles.
- elle est d'exécution et d'interprétation relativement faciles.
- elle nécessite d'un équipement de coût très réduit.

**Les principales limites de l'examen par ressuage sont:**

- Il détecte seulement des discontinuités aboutissant à la surface.
- Les discontinuités contenant des substances étrangères (saletés, oxydes, ...) ne sont pas décelées (car le liquide ne peut pas y pénétrer).
- La surface de la pièce doit être préparée plus soigneusement que les autres méthodes.

Les limitations du contrôle par ressuage sont liées au matériau lui-même : trop forte rugosité de surface, impossibilité d'employer les produits classiques qui endommageraient sa surface. Les défauts non débouchant ne peuvent être vus, de même que les fissures renfermant des corps susceptibles d'interdire l'entrée du pénétrant tels que peintures, oxydes.

Le procédé lui-même est relativement lent, coûteux en temps. Il faut enfin prendre en compte, dans le coût du contrôle, la consommation des produits de ressuage dont l'utilisation peut nuire à l'environnement.[26]

### III.4.3. Magnétoscopie

C'est une technique qui révèle les défauts débouchant ou sous-cutanés. Toutefois, elle ne s'applique qu'aux matériaux et alliages ferromagnétiques (fer, acier, fonte...).

L'examen par magnétoscopie consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Une poudre magnétique est ensuite projetée à la surface et se répartit de façon homogène si la pièce est saine. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques.

Lorsqu'un défaut est présent dans la pièce au voisinage de la surface, l'orientation du flux de l'induction magnétique est modifiée localement et son intensité augmente en surface. Il apparaît alors une concentration de particules magnétiques qui révèle la présence du défaut comme l'illustre la figure.[26]

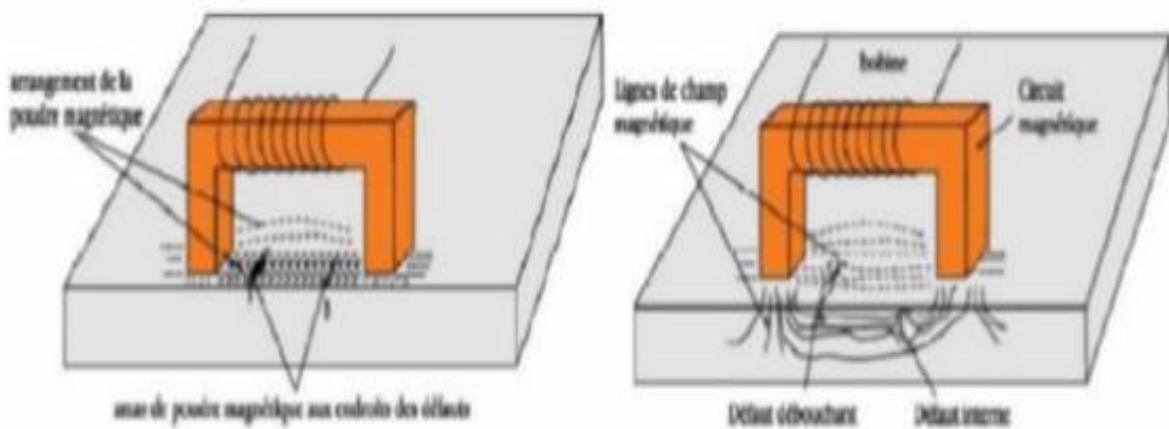


Figure (III.5) : Principe de la magnétoscopie. [32]

Le contrôle non destructif par magnétoscopie a pour objectif de détecter les défauts de surface ou sous-jacents.



**Figure (III.6) : Indication obtenues à l'aide de magnétoscopie.[33]**

Le contrôle non destructif par particules magnétiques est basé sur le fait que lorsque la pièce à examiner est magnétisée en coïncidence de discontinuités superficielles ou sub-superficielles on obtient une fuite de flux magnétique (flux dispersé).

Le flux dispersé a une intensité suffisante pour produire, en utilisant des révélateurs spéciaux, l'indication de la discontinuité elle-même sous forme d'une trace visible à l'œil nu. Grâce à cette méthode, des discontinuités qui généralement ont des surfaces très rapprochées, ou bien même en contact intime et donc difficilement perceptibles à l'œil nu, deviennent visibles grâce à l'accumulation du révélateur (particules magnétiques).

L'examen magnétoscopique, applicable seulement à des matériaux magnétisables, est basé sur les facteurs suivants:

- possibilité de magnétiser la pièce en examen.
- variations de champ magnétique générées par les discontinuités dans la pièce.
- possibilité de relever les variations superficielles et sub-superficielles du champ magnétique dans la pièce.

La méthode requiert l'utilisation de:

- appareils pour la magnétisation de la pièce.
- poussières (particules) magnétiques à pulvériser sur la pièce pour relever les variations de champ magnétique.

#### III.4.4. Ultrasons

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière. Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce). Les échos sont analysés sur un écran ou traités dans une chaîne de mesure. Le signal est maximal lorsque le défaut est perpendiculaire aux ondes émises.

Les ultrasons consistent en une onde de pression qui se propage dans le matériau. Il existe plusieurs types d'ondes, qui ont des déplacements et des propriétés différentes comme par exemple :

- ★ les ondes P (principales)
- ★ les ondes S (secondaires)
- ★ les ondes de Rayleigh

Les ondes principales sont les plus « classiques », ce sont avec elles que sont effectués les tests par écho. Les ondes secondaires, qui arrivent temporellement après, sont des ondes de cisaillements, conséquence des ondes principales. Les ondes de Rayleigh sont quant à elles des ondes n'existant qu'en surface des matériaux. Elles ont comme propriété d'avoir une vitesse de propagation proportionnelle au module de Young (le module de Young est la constante qui relie la contrainte de traction ou de compression et la déformation pour un matériau élastique isotrope).

Pour générer ces ondes ultrasonores, il existe plusieurs techniques :

- ★ les transducteurs mono élément
- ★ les transducteurs multiéléments
- ★ le laser
- ★ les EMAT (Electro Magnetic Acoustic Transducer)

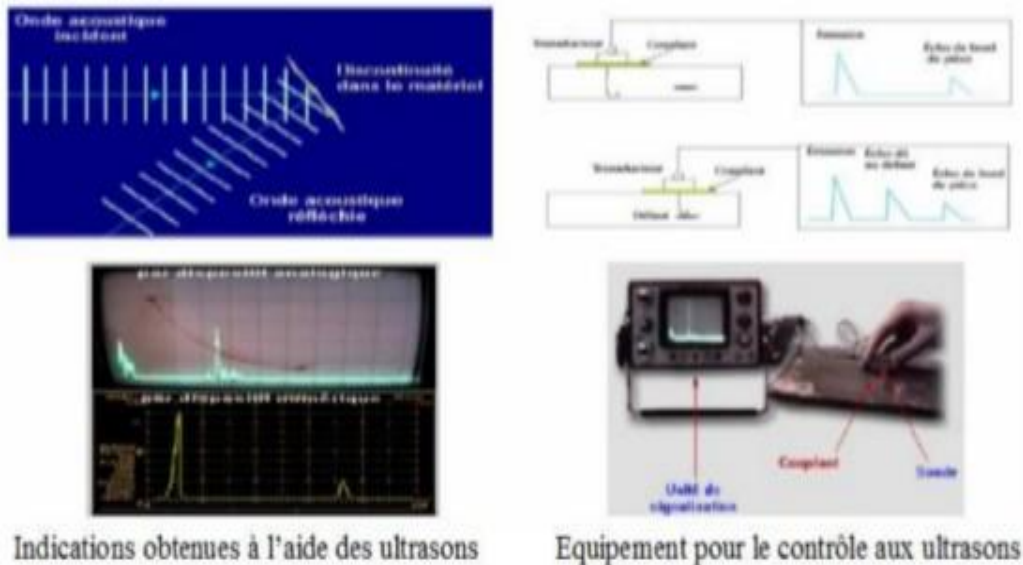
Les transducteurs mono élément sont souvent des piézoélectriques, dont la vibration crée l'onde ultrasonore. Pour la transmettre au milieu à contrôler, il faut un contact parfait entre le piézoélectrique et le matériau. Afin d'assurer ce contact, un liquide de couplage est

utilisé.

Les transducteurs multi éléments sont également des piézoélectriques. La combinaison des ondes de chacun des éléments permet de créer une nouvelle onde focalisée permettant une localisation plus précise. Comme dans le cas des mono éléments, un liquide de couplage est utilisé pour assurer un contact entre le matériau à inspecter et le transducteur.

Les ultrasons par laser est une technique de génération à distance. Le laser va chauffer en un point du matériau, provoquant une dilatation et créant ainsi l'onde sonore.

La technologie EMAT permet de générer des ondes ultrasonores au sein du matériau et de créer une onde sonore se propageant perpendiculairement à la surface du matériau. A priori c'est une technique sans contact, mais en pratique, afin de limiter les pertes liées à la distance, la sonde est placée en contact avec la pièce.[26]



**Figure (III.7) : Principe des ultrasons.[34]**

Le contrôle aux ultrasons est basé sur les phénomènes de la réflexion qu'une onde sonore subit quand, en voyageant à l'intérieur d'un matériau, elle rencontre un obstacle à sa propagation.

L'examen requiert l'utilisation d'un système de contrôle composé de:

- une sonde (émet les faisceaux sonores)
- une unité de signalisation (révèle sur écran la réflexion du faisceau)



Le faisceau d'ultrasons émis par la sonde traverse la pièce et, une fois atteint la paroi du fond, il se reflète, retourne à la sonde et l'écran le signale.

Si durant son trajet le faisceau rencontre une discontinuité, celle-ci est mise en évidence par la réflexion anticipée qui en résulte.[26]

La technique par ultrasons permet un examen immédiat de la pièce en des temps d'exécution extrêmement réduits.

Elle est de facile exécution et résulte particulièrement adaptée à la réalisation de systèmes automatiques ou semi-automatiques en ce que la discontinuité est décelée par la présence ou absence du signal des ondes réfléchies.

Les principaux désavantages du contrôle par ultrasons sont:

- requiert une bonne accessibilité à la pièce à contrôler.
- faible précision dans l'évaluation de la hauteur de la discontinuité.
- difficulté à repérer des discontinuités superficielles.
- non adaptée au contrôle de matériaux à haute atténuation acoustique.

#### **III.4.5. Radiographie**

La radiographie par transmission consiste à envoyer un rayonnement de haute énergie dans le matériau à étudier. La quantité de rayonnement absorbé dépend de la densité du matériau traversé. L'image de la zone radiographiée donne donc la densité totale traversée par le rayonnement. Un matériau étranger, une absence de matériau ou des inhomogénéités importantes seront donc révélés à travers ce système.

Le principe de la radiographie est le même que pour le domaine médical. La méthode met à profit l'absorption par la matière des rayonnements électromagnétiques ionisants.

L'examen de la structure ou de l'état interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X, ou  $\hat{U}$ ) et à recueillir le rayonnement résiduel non absorbé sur un récepteur approprié, un film

dans la plupart des cas ou capteur électronique du type amplificateur de brillance ou autre.[26]

#### **a- Principe de l'examen radiographique :**

L'examen à raide de radiations est basé sur les facteurs suivants:

- ✓ capacité des radiations de traverser la matière
- ✓ absorption différente des radiations de la part du corps en examen
- ✓ possibilité d'évaluer ces différences d'absorption.

L'examen comporte donc l'utilisation de:

- ✓ une source de radiations.
- ✓ un révélateur de radiations (pellicule, ..).

#### **b- Désavantages de la radiographie :**

Les principaux désavantages de la technique radiographique sont:

- requiert l'accessibilité de la pièce des deux côtés pour pouvoir mettre en position la source et la pellicule.
- non adaptée à mesurer la profondeur de la discontinuité et à repérer les discontinuités bidimensionnelles si elles sont obliques par rapport à l'axe du faisceau.
- la procédure du processus de développement résulte plutôt lente par rapport à la technique avec ultrasons.
- requiert des équipements complexes.
- problèmes de sécurité par la présence de radiations et sources radioactives.[26]

#### **c- Radioprotection :**

Les rayonnements ionisants sont susceptibles d'avoir des effets nocifs sur l'organisme et demandent d'autant plus d'attention que ces effets ne sont pas immédiats.

Les pouvoirs publics ont mis en place tout un dispositif réglementaire visant à protéger les personnes contre les dangers des rayonnements. En contrôle par radiographie, les risques

sont essentiellement liés à l'irradiation. En conséquence des précautions prises dans la fabrication des sources radioactives à base de radioéléments, les risques de contamination sont nuls. Les moyens de protection nécessitent la mesure des rayonnements par divers moyens.

#### **d- Appareillage individuel :**

Les personnes affectées à des travaux sous rayonnement ionisant doivent porter lorsqu'elles sont exposées, au moins un film dosimétrique au niveau de la poitrine et, dans certains cas, un second au niveau des poignets. Ce film doit être choisi en fonction des types de rayonnements auxquels le personnel est soumis. Ces films dosimétriques sont développés une fois par mois. Cela permet de comptabiliser les doses totales reçues par le personnel sur une longue période de temps mais il est clair que la sécurité exige de pouvoir disposer de moyens permettant de suivre les doses reçues avec une fréquence beaucoup plus rapprochée, notamment de faire le point à l'issue de toute utilisation importante. Pour ce faire, les constructeurs spécialisés proposent toute une gamme de dosimètres individuels permettant de mesurer les débits de dose instantanée, la dose reçue au cours d'une intervention, enfin, la dose journalière. Ces données peuvent être transférées via un lecteur approprié vers un micro-ordinateur pour exploitation et archivage.[26]

#### **e- Appareillage portatif :**

Ces appareils permettent de mesurer des débits de dose, ce qui, au-delà des besoins de la radioprotection, peut servir aussi au calcul des temps de pose. Les plus utilisés sont les appareils à base de chambres d'ionisation, dont le principe physique est la mesure du niveau d'ionisation d'un gaz, constituées en général par un volume de quelques dizaines à quelques centaines de centimètres cubes d'air ou d'un autre gaz contenus dans une cavité dont les parois sont équivalentes en absorption aux tissus humains. Il existe d'autres type d'appareils pour mesurer ces débits de dose basés soit toujours sur le principe d'ionisation d'un gaz (compteurs Geiger Müller, compteurs proportionnels), soit sur celui de la conversion photon

X ou J – photon lumineux (compteurs à scintillations).

#### **f- Tomographie X :**

De par son principe, la radiographie ne permet pas d'avoir d'information sur la localisation du défaut en profondeur dans la pièce examinée. Il faut pour cela réaliser plusieurs clichés sous des angles de tir différents, ce qui n'est pas toujours possible.

Un autre moyen est la tomographie industrielle. Elle a le même principe que le scanner médical. Elle consiste à reconstruire une coupe de la pièce par des algorithmes complexes à partir d'une succession d'acquisitions suivant des angles différents. La répétition de ce processus selon différentes hauteurs de tir permet d'obtenir une image 3D virtuelle complète de l'objet.

#### **III.4.6. Thermographie**

La thermographie repose sur l'étude de la diffusion de la chaleur dans la cible à contrôler.

Une quantité de chaleur est une quantité d'énergie stockée dans la matière et la température en est un indicateur mesurable. La thermographie consiste en l'interprétation des cartes thermiques (thermogrammes) des surfaces observées.

Une distinction est faite entre la thermographie passive qui résulte de la simple observation des gradients thermiques sur une pièce, et la thermographie active lorsqu'une perturbation thermique a été volontairement générée pour le contrôle (par une source laser par exemple). Les discontinuités dans la pièce se traduisent par des différences de température sur l'image. L'acquisition des images thermiques s'obtient alors à l'aide d'une caméra thermographique.[26]

La thermographie consiste à mesurer la répartition de température au sein d'une pièce.

En cela il existe deux principes : la thermographie passive, l'environnement fournit les variations de température et la thermographie active ou dynamique, où c'est l'utilisateur qui

génère l'excitation thermique. C'est la thermographie dynamique qui nous intéresse principalement. Alors que l'excitation optique ne touche que la surface du matériau, l'excitation par ultrasons permet d'élever la température des fissures par frictions, les mettant ainsi en évidence. L'excitation thermique par courant de Foucault permet, comme les ultrasons, de générer une source de chaleur au sein même du matériau, présentant un avantage non négligeable face à la méthode optique. [26]

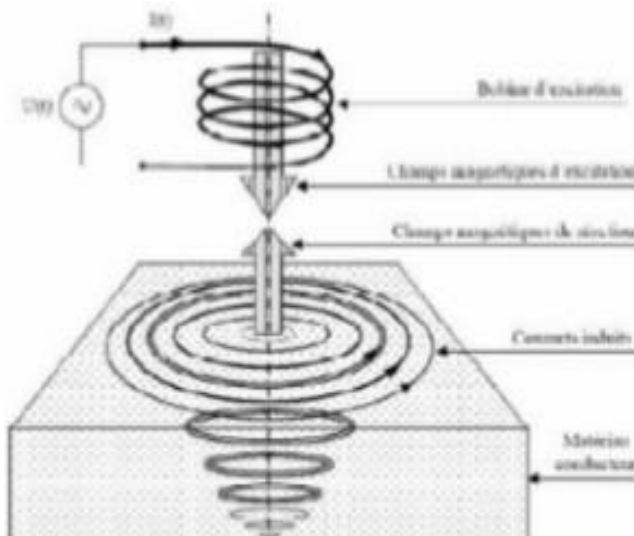
#### **III.4.7. CND par courants de Foucault**

Le CND par courants de Foucault n'est applicable que sur les pièces réalisées, du point de vue électrique, en matériaux conducteurs. L'élément essentiel est le capteur. Celui-ci est une bobine ou formé d'un ensemble de bobines. Ces dernières sont parcourues par un courant d'excitation variable dans le temps. Le capteur génère un champ magnétique d'excitation variable qui dépend de la géométrie et des caractéristiques électromagnétiques de son entourage. Si un matériau conducteur d'électricité baigne dans ce champ, il sera le siège des courants de Foucault.

Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique de réaction négative. Le champ résultant donnera l'image de la répartition et de la valeur des courants induits. La mesure de ce champ ou des courants induits n'est pas directement accessible à l'expérience.

On passe par la mesure d'une grandeur dérivée : l'impédance aux bornes du capteur.

Cette grandeur nous permettra de caractériser le matériau en ce qui concerne sa conductivité, sa perméabilité, sa géométrie et son état de santé. Suivant ces caractéristiques et les fréquences utilisées, les variations des champs créées par ces courants permettent d'examiner le matériau en surface ou en profondeur. [26]



**Figure (III.8) : Schéma de principe du CND par courant de Foucault.[35]**

### III.5. Utilisation des procédés de (CND) :

Au-delà de la mise en œuvre propre à chacun des procédés de contrôle décrits plus haut, un projet ou une réelle opération de contrôle implique un certain nombre de considérations et de facteurs dont l'ignorance pourra conduire à des échecs tels qu'une mauvaise fiabilité de la méthode, du matériel utilisé ou des résultats annoncés, ou encore une rentabilité économique insuffisante de l'opération de contrôle, ces deux aspects allant d'ailleurs souvent de pair. C'est ainsi qu'il s'agit en fait de prendre en compte, non seulement les paramètres physiques et techniques mais aussi l'importance du facteur humain et des procédures d'emploi, et la nécessité éventuelle d'avoir à financer des travaux préalables de mise au point ou de faisabilité du procédé retenu.

#### III.5. Les procédures d'emploi :

Des procédures précises et bien suivies doivent guider l'utilisation des procédés dans une opération de contrôle. Elles permettent de garantir l'objectivité, la reproductibilité, les performances limites, sinon la fiabilité totale d'un contrôle. Les procédures doivent être établies tant pour le matériel utilisé que pour les paramètres et conditions de son utilisation. Elles résultent généralement d'un accord commun entre les diverses parties concernées par le

contrôle ; elles sont nombreuses mais on cherche en fait à éviter la confusion en édictant des normes et spécifications à caractère plus général. Il en est ainsi, par exemple, pour les procédures de qualification des palpeurs ultrasonores, pour les étalons de certains défauts artificiels, pour le réglage des paramètres des appareillages de contrôle à ultrasons, à courants de Foucault (choix de la fréquence, du seuil de détection significatif, etc...). Les spécifications peuvent de même concerner le choix du procédé, de la méthode, de la préparation de la pièce à contrôler, de la façon d'effectuer les sondages lorsqu'il s'agit d'un contrôle purement manuel, enfin de la façon d'interpréter et de consigner les résultats obtenus. Le contrôle automatique n'exclut pas totalement la notion de procédure qui, dans ce cas, doit concerner plus spécialement les étalonnages et le réglage du matériel [27].

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en (CND), le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la technique des courants de Foucault, la thermographie.

***Chapitre IV :***  
***Partie Expérimentale***  
***Et Applications***



#### IV-1 INTRODUCTION :

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique. [16] 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. [14]

On a fait une application expérimentale dans l'entreprise GTP pour le contrôle des joints soudés de ses produits

Identification de l'entreprise GTP :



L'Entreprise nationale des grands travaux pétroliers (GTP) est une entreprise algérienne, spécialisée dans l'ingénierie et la construction d'installations industrielles destinées à la production, transformation, transport et distribution des hydrocarbures.

Elle est leader en Algérie en matière de construction des ouvrages et installations industriels. Elle est présente dans les principaux pôles industriels au Nord du pays et au niveau de l'ensemble des champs pétroliers et gazier au Sud. [4]

Les activités de GTP Unité Adrar (wad zin) :

- charpente métallique et technologique .
- chaudronnerie .
- équipements de cimenterie, sidérurgie, mines .
- équipements de briqueterie .
- équipement de travaux publics .
- équipement de sous traitance .
- équipements pour stations de traitement d'eau et d'épuration. Le soudage est le moyen le plus utilisé pour assembler ses pièces. Donc pour assurer la sécurité et la qualité des produits, le contrôle de soudage est très important [3]



#### IV-2 Identification Du Matériau :

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 [12]

Caractérisation du métal de base

#### Analyse chimique

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

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

Composition chimique du métal de base

Caractéristiques	$\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	A% min	Hv ( N/mm <sup>2</sup> )	Kv à -30°C (J/cm <sup>2</sup> )
Valeur	520 - 620	360- 420	16 -22	155 - 185	45 - 75

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

### IV-3 Application du Control Non Destructif par ressuage :

Le matériel d'essai:

➤ dans notre exemple nous utilisons :

- ✓ des tubes soudés et qui étaient soumis à un essai hydrostatique (control destructif) ;
- ✓ les produits d'application ;
- ✓ une loupe ;
- ✓ chiffon

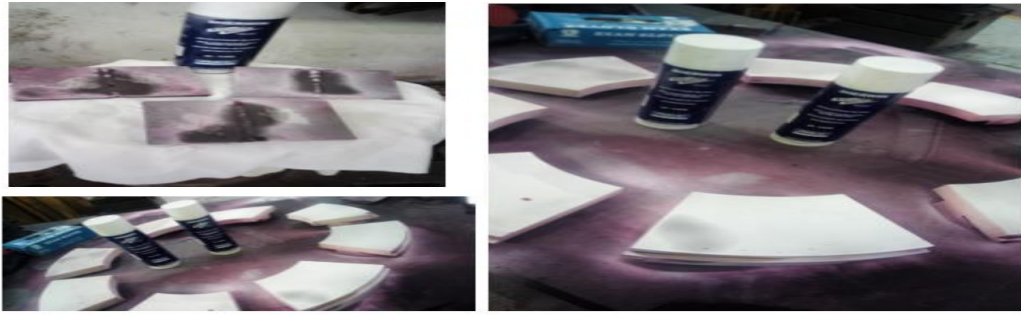


**Figure (IV.1) : Tôles après soudage**



**Figure (IV.2) : Matériel utilisés dans le ressuage**

Une inspection par pénétrant liquide se fait en six temps schématisés ci-après : -  
Premièrement nous avons appliqué le nettoyant pour nettoyer la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités. [7] (Figure 3)

**Figure (IV.3) : étape 1**

Ensuite nous appliquons le pénétrant sur toute la surface à examiner, laisser un Temps de pénétration de (15 a 20) min (Figure 4)

**Figure (IV.4) : étape 2**

Après on élimine le pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate: il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts). (Figure 5)

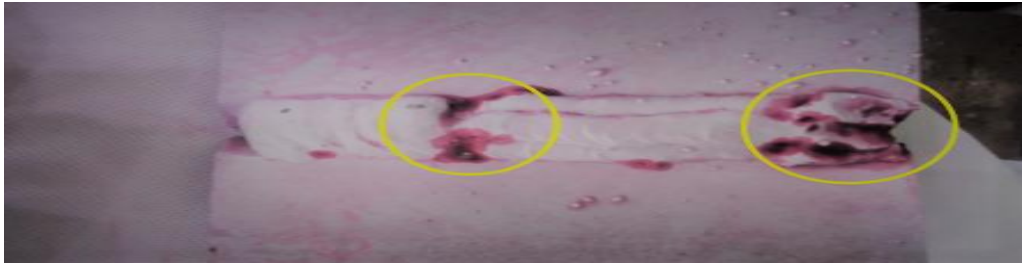
**Figure (IV.5) : étape 3**

Après le nettoyage et le séchage de la surface, on applique régulièrement le révélateur sur toute la surface à examiner

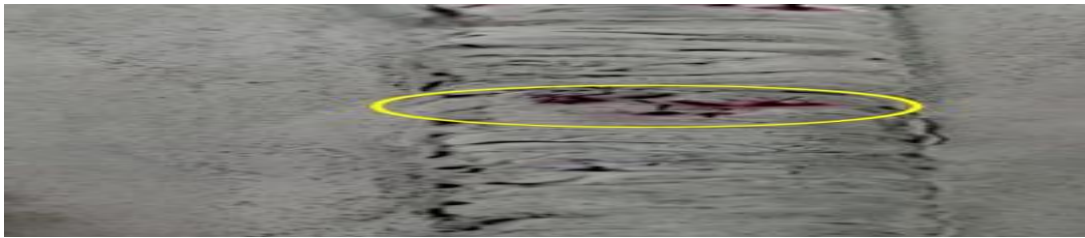
**Figure (IV.6) : étape 4**



Enfin nous nettoyons la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage. (Figure 7)



**Figure (IV.7) : étape 5**



**Figure (IV.8) : étape 6**

Après l'agrandissement de l'image de notre essai par une loupe on constate qu'il existe des micros fissures sur le cordon de la soudure. Donc on peut conclure que le joint de soudure est légèrement endommagé et qu'il est bon qualité car il a résisté mieux que le matériau de base. Ceci est valable pour les deux tubes [11] (Figure8)

#### IV-4 Application du Control Non Destructif par l'ultrason :

➤ Le matériel utilisé (Figure9)

- 1- Appareil à ultrasons EPOCH LT ;
- 2- palpeur Droit et Angle 45° et 70° technique Par réflexion (E/R)
- 3- Blocs d'étalonnages : ISO 2400 cales V1 ;
- 4- Milieu de couplage : Graisses ;
- 5- Métal de base Acier (A 42 CP) ép. 12 mm.



**Figure (IV.9) : Le matériel utilisé**

Caractéristiques de l'appareil de l'ultrason EPOCH LT : (Figure 10)

- Bande Passante analogique : 0,3 à 20 MHz a -3dB
- Capacité mémoire : 100 échos/ 2000 épaisseurs ;
- Fréquence de récurrence Réglable entre 60 et 360 Hz ;
- Calibration automatique ;
- Impulsion d'émission Type Dirac ;
- Batterie rechargeable ;
- Grand Ecran ; Plus Petit, plus Léger : 1 Kg ;



**Figure (IV.10) : l'appareil de l'ultrason EPOCH LT**

Les conditions du contrôle

Avant chaque examen de contrôle, on doit respecter quelques informations requises avant l'examen parmi eux on peut citer : • Méthode d'évaluation des indications : Méthodes par réflexion ou par écho ;

- Contrôle de matière de base : Etat de surface, dimensions et nettoyage et limite la plage de balayage ;
- L'étalonnage de l'appareillage : EPOCH LT ET palpeur ;
- Choix du type de palpeur : palpeur droit et Angle 45° et 70° technique par réflexion (E/R) ;
- Choix de milieux de couplage, Graisses. Exécution du contrôle Premièrement nous avons fait l'étalonnage de l'appareillage (EPOCH LT et palpeur), [6] (Figure 11)



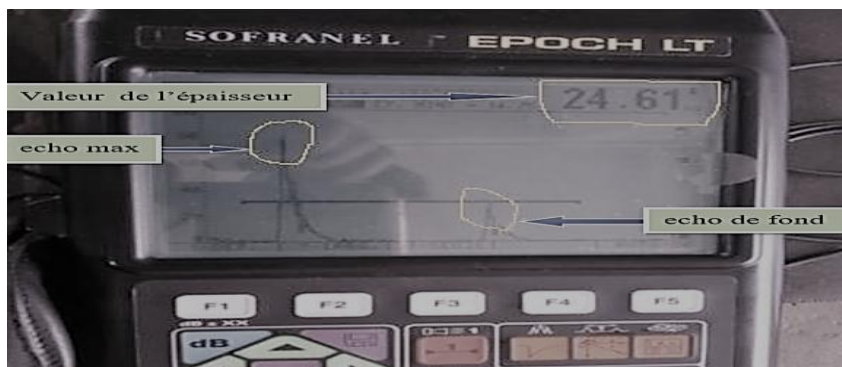
**Figure (IV.11) : étalonnage**

Deuxièmement on prend la pièce à examiner et on limite la plage de balayage, ensuite on dépose le couplant entre la pièce et le palpeur en suite a fait le mouvement de palpeur sur tout la longueur de la plage de balayage en deux mouvements avant /arrière et zig zag .(Figure 12)



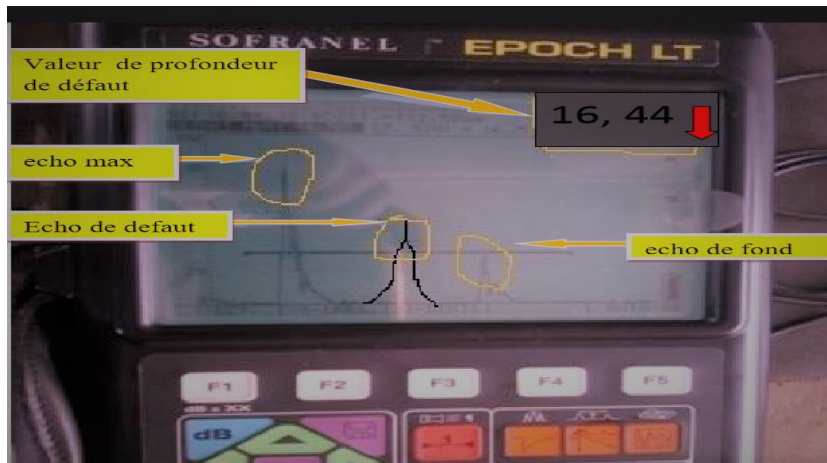
**Figure (IV.12) : balayage**

A travers l'écho visualisée sur l'écran on constate seulement deux échos un écho de surface et un seconde écho relatif au fond ce qui implique l'absence de défaut dans le cardan de soudure. (Figure 13)



**Figure (IV.13) : image d'un test sans défaut**

En cas de présence de défaut on remarque la présence d'un pic intermédiaire entre les deux pics (de la surface et du fond de la pièce) ce dernier est appelé le pic de défaut qui détermine la position, la taille et la profondeur de défaut. (Figure 14)



**Figure (IV.14): image d'un test avec pic de défaut**

#### IV-5 Interprétation des résultats :

- 1- Pour le contrôle visuel : Toute inspection commence par un contrôle visuel du joint de soudure, pour vérifier les défauts superficiels à l'aide des instruments optiques. 2- Contrôle par ressuage : le contrôle par ressuage a révélé quelques défauts de surface : 1- apparition de quelques souffleurs éparpillés ; sans incidences sur le joint de soudure on admet alors que la qualité de la soudure est bonne.
- 2- Présence d'une fissure débouchant pour la pièce en fonte.
- 3- Contrôle par Magnétoscopie Ce type de contrôle sert à l'Observation des défauts de surface sur le joint de soudure. Dans notre cas ce contrôle n'a révélé aucun défaut de surface pour la première pièce . il nous confirme la fissure détectée dans la pièce en fonte. Alors Le contrôle par magnétoscopie confirme le résultat du 1er contrôle par ressuage .
- 4- Résultats des essais aux ultrasons Le contrôle par ultrason nous a aidé à détecter des défauts de manque de fusion dans les deux types de soudure. L'ultrason contrôle les défauts internes des assemblages, en comparaison par les autres contrôles on peut juger que ces défauts peuvent être causés par : -Une intensité très faible du courant de soudure. - Une vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal. - un angle d'inclinaison de l'électrode incorrect. - bords à souder mal nettoyés.



**IV-6 Conclusion :**

La qualité d'une soudure dépend certainement du bon déroulement de l'opération de soudage, mais on n'aura aucune certitude sur l'état de la soudure si celle-ci n'est pas certifiée par un contrôle fiable et sûr. Les défauts de soudage probables sont nombreux, mais aussi les procédés de contrôle sont multiples, et avec des techniques différentes. Mais le plus difficile est la détection des fissures dans une soudure. En pratiquant l'analyse aux ultrasons, nous n'avons pas rencontré d'obstacles avec notre produit de soudage, [16] relatifs à la structure métallographique c'est à dire de déviation du faisceau ultrasonore à cause des hétérogénéités du métal, donc la structure ferritique est parfaitement perméable aux ultrasons. Cependant on a enregistré pas mal de difficultés relatifs aux signaux perturbateurs dus aux plans de solidifications ou aux poches de gaz superposées au bouts des défauts que nous avons créés. Parmi les difficultés entravant la mise en œuvre des contrôles ultrasonores sur les soudures, on peut citer la forme du joint qui n'est pas bien connue et la présence d'inclusions ou plans de solidifications plans ou volumiques au niveau des interfaces entre le métal fondu et le métal de base qui faussent les interprétations on peut attribuer d'autres difficultés liés au comportement du matériel (les sondes) vis-à-vis de la matière qui dépend de beaucoup de paramètres (rugosité, structure métallique) et d'autres sont relatifs à l'utilisateur (choix des palpeurs, calibrages, interprétations des signaux recueillis. [5]

**IV-7 Perspectives :**

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

**Références Bibliographiques**

- [1] Wikipédia l'encyclopédie libre / Procédés de soudage de pièces métalliques.
- [2] Bekouche, H., 2013. Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l' obtention du diplôme de: Master conception et productique/Optimisation de la vitesse de soudage a l' arc électrique des aciers.
- [3] [www.soudage.com](http://www.soudage.com)
- [4] [www.canstockphoto.fr](http://www.canstockphoto.fr)
- [5]- Varisllaz, R., 1987. « Soudage : éléments de conception et de réalisation ». p. 4-49 p.160-176.
- [6] [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [7] [www.pinterest.fr](http://www.pinterest.fr)
- [8] Hichem, B., 2013. « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers »
- [9] Québec, Inc., 2006.
- [10] [www.joho.p.free.fr](http://www.joho.p.free.fr)
- [11] Ensam Angers, C.E.R., Soudage à l' arc, -Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; [www.angers.ensam.fr](http://www.angers.ensam.fr).
- [12] Chehaïbou, A., 2004. Soudage laser : les bénéfices des procédés hybrides, Soudage et techniques connexes P33-38.
- [13] Roland, C., Ingénieur de l' École supérieure d' électricité ex-Directeur des recherches, Société Sciaky.
- [14] Blais, L., 2006. “ Introduction au soudage laser ” ; Centre spécialisé de technologie physique du Québec Inc.

[15] [www.memoireonline.com](http://www.memoireonline.com)

[16] [www.memoireonline.com](http://www.memoireonline.com).

[17] - Soudage et coupage au chalumeau. Conseils d'utilisation. Edition INRS ED 742. 2000.

[18] [www.fr.slideshare.net](http://www.fr.slideshare.net)

[19] -Roland, C., Ingénieur de l' École supérieure d' électricité ex-Directeur des recherches, Société Sciaky.

[20] Dumont-Fillon, J., "Contrôle non destructif (CND)", technique de l' ingénieur R1400, pp. (1-42).

[21] Bruno, G.,1991."Traitement des signaux Courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateurs de vapeur dans les centrales nucléaires REP", traitement du signal (vol. 8-n°5), pp. 373-381.

[22] Benarous, M.Y., 2013. Institute of Technology Introduction aux CND.

[23] Jacques, D.F., 2001. Ingénieur de l' École Centrale de Paris Ancien Directeur

[24] Technique de l' Institut de Recherches de la Sidérurgie (IRSID).

[25] [www.solostocks.ma](http://www.solostocks.ma)

[26] [www.metalblog.ctif.com](http://www.metalblog.ctif.com)

[27] [www.enact.dz](http://www.enact.dz)

[28] [www.g2metric.com](http://www.g2metric.com)

[29] [www.alticontrol.com](http://www.alticontrol.com)

[30] [www.fr.slideshare.net](http://www.fr.slideshare.net)

[31] [www.m.facebook.com](http://www.m.facebook.com)

- [32] Csmofmi : Soudage et assemblage-soudage « Défauts de soudure • Chapitre 6 ».
- [33] Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [34] [www.slideplayer.fr](http://www.slideplayer.fr)
- [35] [www.controle-visuel.com](http://www.controle-visuel.com)
- [36] [www.docplayer.fr](http://www.docplayer.fr)
- [37] Documents Yamani Institute of Technology
- [38] Seferian, D., 1959. *Métallurgie de la soudure* - DUNOD.
- [39] Mouchat, L. & Malek, S., 2002. *Mémoire d'ingénieur. Université de Blida " Mise en œuvre de classificateurs basés sur la notion de distance et classification statistique. Applications : Identification des défauts de joint de soudure sur les images radiographiques" .*
- [40] DELATRE, F., 1965. *Le soudage des aciers inoxydables* - DUNOD.
- [41] [www.tandems.free](http://www.tandems.free)
- [42] Barthelemy, B., 1980. *Notions pratiques de mécanique de la rupture* - Editions Eyrolles -Paris.
- [43] Laroze, S., 1982. *Résistance des matériaux et structures*, (Eyrolles, Masson ).
- [44] Apfel, A., 2005. *Modélisation de l'orientation cristalline des soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique: application au contrôle non destructif ultrasonore (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2).*
- [45] Rehouma, K., 2013. *Comportement structural et mécanique de soudures d'acier inoxydable austénitique du type 316l vieilles*. Diss. Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [46] Amaouche, S., 2012. *Caractérisation d'une soudure hétérogène réalisée par le procédé MAG (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).*

**[47] Salhi, E., 1994. Etude des fontes GS alliées traitées thermiquement et étude à l'aptitude à la soudure à l'arc électrique de la fonte GSC non alliée (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).**