

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux

THEME :

**Inspection et contrôle des assemblages soudés par
CND**

Présenté par : Boukra Mohamed

Soutenu publiquement, le 24/09/2020 devant les jurys composé de :

<i>Mr. MANGOUCI Ahmed</i>	<i>MAA</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Président</i>
<i>Mr. GUEZZEN Samir</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr. HADJOUI Fethi</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. Tlemcen</i>	<i>Examineur</i>

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

*Je remercie **ALLAH** Le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je tiens à remercier les membres de jury de mon mémoire notamment Monsieur « **Mr MANGOUCI AHMED** » le président du jury et Messieurs « **Mr HADJOUI FETHI** » d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je remercie mon encadreur Monsieur « **Mr GUEZZEN SAMIR** » pour l'effort déployé et le temps alloué afin que je mène à bien mon mémoire de Master et acquérir son expérience dans la conduite d'un projet de recherche expérimental.*

*Je remercie encore toutes les personnes qui ont contribué à ma formation de Master et je mentionne particulièrement Monsieur « **SEBAA FETHI** » qui m'a beaucoup aidé dans la partie expérimentale.*

Dédicaces

Je dédier ce mémoire à:

Mes chers parents qui par leur amour, leur précieux conseil, leur compréhension et leur soutien m'ont guidé vers la voie de la réussite.

Ma petite famille et grande famille.

Résumé :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment. Il consiste à assembler deux ou plusieurs corps métalliques en créant une liaison permanente entre eux.

Cependant, cette liaison contient des défauts sur le comportement de ces assemblages, il faut faire des contrôles non destructif (CND) sur les pièces à assembler, pour le but vérifier la qualité de matériaux sans l'endommager.

Pour l'étude expérimentale, j'ai utilisé le procédé de ressuage sur 3 pièces différentes épaisseurs (15mm, 18mm, 20mm) avec le même matériau (totales en acier) soudés avec le procédé de soudage à l'arc. Cette opération a révélé quelques défauts sur les pièces soudées est spécialement pour la pièce (15mm) à cause de faible épaisseur.

الملخص:

من بين عمليات التجميع، يحتل اللحام مكاناً مهماً في جميع فروع الصناعة والبناء؛ ويتكون من تجميع جسمين أو أكثر من الأجسام المعدنية في رابطة دائمة بينهما.

ومع ذلك، يحتوي هذا الاتصال على عيوب في سلوك هذه التجميعات، فمن الضروري إجراء اختبار غير إتلافي (CND) على الأجزاء المراد تجميعها، وذلك للتحقق من جودة المواد دون الإضرار بها.

بالنسبة للدراسة التجريبية، استخدمت عملية PT على 3 أجزاء مختلفة سماكة (15 مم ، 18 مم ، 20 مم) مع نفس المادة (الفولاذ الكلي) الملحومة بعملية اللحام بالقوس الكهربائي كشفت هذه العملية عن بعض عيب في الأجزاء الملحومة خاصة للجزء (15 مم) بسبب السماكة المنخفضة.

Abstract:

Among the assembly processes, welding occupies an important place in all branches of industry and construction; it consists of assembling two or more metal bodies in a permanent bond between them.

However, this connection contains defects in the behavior of these assemblies, it is necessary to carry out non-destructive testing (NDT) on the parts to be assembled, in order to check the quality of materials without damaging it.

For the experimental study, I used the PT process on 3 different thickness parts (15mm, 18mm, 20mm) with the same material (total steel) welded with the arc welding process this operation revealed some defect on the welded parts is specially for the part (15mm) because of low thickness.

List d'abréviation:

- OXW/OA: Soudage oxyacétylénique.
- SMAW: Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.
- GTAW: Soudage TIG.
- GMAW: Soudage MIG –MAG.
- SAW: Soudage à l'arc submergé.
- CND: contrôle non destructif.
- VT: contrôle visuel.
- PT : contrôle par ressuages.
- RT: contrôle par radiographie.
- UT : contrôle par ultrasons.
- ET : contrôle par courants foucault.
- MT : contrôle par magnétoscopie.
- TT : contrôle par thermographie infrarouge.
- AT : contrôle par émission acoustique.
- AFNOR : Association française de normalisation.
- DIN : L'institut allemand de normalisation.
- AISI: Norme américaine basée sur 3 chiffres et un suffixe en option (L pour low carbone).
- S235JR: acier non allier pour d'usage générale avec une limite minimal d'élasticité en MPA (N/mm^2) avec un indice JR est la résultante d'un test mesurant une caractéristique mécanique qu'est la ténacité (résilience).

- E24 : équivalent à un A37 qui est un acier de construction soudable.
- ST37-2 : est un acier doux de construction.

List des symboles:

- RE : limite minimal d'élasticité en MPA (N/mm^2).
- R : La résistance en MPA (N/mm^2).
- A : Allongement en %.
- C : Carbone.
- Mn : Manganèse.
- Si : Silicium.
- P : Phosphore.
- R_m : Résistance à la traction.
- N : Azote

Liste des figures:

Figure 1: Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....	05
Figure 2: Post chalumeau.....	07
Figure 3: Le chalumeau	08
Figure 4: Flamme chalumeau normal – Réglage parfait	08
Figure 5: Flamme chalumeau oxydante – Mauvais réglage – excès d’oxygène	09
Figure 6: Flamme chalumeau comburante – Mauvais réglage – excès d’acétylène / propane	09
Figure 7: Soudure à l’arc électrode	10
Figure 8: Schéma du soudage à l’arc (électrode enrobée)	10
Figure 9: l’arc électrique	11
Figure 10: Principe de soudage à l’arc	11
Figure 11: Coupe d'une électrode enrobée.....	12
Figure 12: Marquage d'une électrode " Castolin".....	13
Figure 13: Transfert du métal	14
Figure 14: Installation manuelle pour soudage TIG	14
Figure 15: Description de la torche TIG	15
Figure 16: Buses utilisées en soudure TIG	16
Figure 17: Soudage MIG – MAG GMAW	18
Figure 18: Schéma d’installation manuelle pour soudage MIG – MAG	18
Figure 19: Le transfert du métal	19

Figure 20: Le transfert par court – circuit (short – arc)	19
Figure 21: Le transfert globulaire (grosse – goutte)	20
Figure 22: Le transfert par pulvérisation axiale (spray- arc)	20
Figure 23: Choix du gaz et influence du gaz sur le cordon	21
Figure 24: Soudage à l’arc submergé SAW	22
Figure 25: Schéma du soudage sous flux	23
Figure 26: Figure de cycle de soudage	26
Figure 27: Défauts de soufflures ou cavités	26
Figure 28: Défauts de fissures	26
Figure 29: Défauts d’incursions	27
Figure 30: Défauts de manque de fusion (collage)	26
Figure 31: Défauts d’excès de pénétration	26
Figure 32: Défauts d’effondrement	27
Figure 33: Défauts retassures et criques	28
Figure 34: Défauts morsures et caniveaux	28
Figure 35: Défauts géométriques des cordons	28
Figure 36: Défauts d’alignement	29
Figure 37: Défauts angulaires	29
Figure 38: Défauts du au rochage	30
Figure 39: L’examen visuel	37

Figure 40: Examen par éclairage	38
Figure 41: Exemple d'une pièce contrôlé avec le ressuage	39
Figure 42: Schéma de principe de ressuage	40
Figure 43: Schéma contrôle par ultrasons	44
Figure 44: Schématisation principe de courant foucault.....	46
Figure 45: Schéma de principe de contrôle par magnétoscopie	47
Figure 46: Principe de contrôle par thermographie infrarouge	50
Figure 47: Mise en œuvre de la méthode	53
Figure 48: Ressuage, nettoyage et dégraissage des pièces	56
Figure 49: Ressuage , application du pénétrant	57
Figure 50: Ressuage , rinçage du pénétrant	57
Figure 51: Ressuage , application du révélateur	58
Figure 52: Ressuage , apparition des défauts	58
Figure 53: Dessin définition de pièce 1.....	69
Figure 54: Dessin définition de pièce 2.....	70
Figure 55: Dessin définition de pièce 3.....	71
Figure 56: Dessin 3D de pièce 1	72
Figure 57: Dessin 3D de pièce 2	72
Figure 58: Dessin 3D de pièce 3	72
Figure 59: Forme de l'échantillon avant le soudage	73
Figure 60: Forme de l'échantillon après le soudage	73
Figure 61: Fe principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée	75
Figure 62: Les produits utilisés dans opération de ressuage	76

Figure 63: Nettoyage des pièces	77
Figure 64: Application du produit de ressuage « pénétrant ».....	78
Figure 65: Elimination du pénétrant	79
Figure 66: Application du produit de ressuage « révélateur ».....	80
Figure 67 : Les défauts détectés dans les pièces après ressuage	81

Liste des tableaux:

- **Tableau 01** : Les principaux procédés de soudage.....06
- **Tableau 02** : Les principaux risques liés au soudage30
- **Tableau 03** : Tableau ISO 3452.....41
- **Tableau 04** : Ressuage coloré58
- **Tableau 05** : Ressuage fluorescent60
- **Tableau 06** : Ressuage haute température (50°C – 200 °C).....61
- **Tableau 07** : Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier68
- **Tableau 08** : Propriétés mécaniques moyennes68
- **Tableau 09** : Composition chimique %....68
- **Tableau 10** : Composition chimique et mécaniques du métal d'apport74
- **Tableau 11** : Caractéristiques chimiques : selon la norme EN ISO 6847.....74
- **Tableau 12** : Caractéristiques mécaniques : selon la norme AFNOR NF 159...74

Sommaire :	
Remerciements	II
Dédicaces	III
Résumé :	IV
List d’abréviation:	I
List des symboles:	III
Liste des figures:	IV
Liste des tableaux:	VIII
Sommaire :	IX
Introduction générale :	1
Chapitre 1 : Généralité sur le soudage	3
Introduction :	3
1- définition de soudage :	3
2- Brève histoire du soudage :	3
3 - Les différents types de soudage :	3
4- Procédé de soudage:.....	4
5- Les principaux procédés de soudage:	4
5-1- Soudage Oxyacétylénique OXW :	5
5-1-1- Définition du soudage chalumeau :	5
5-1-2- principe du soudage OA :	5
5-1-3- Description du poste de soudage OA :	5
5-1-4- le chalumeau :	7
5-1-5- la flamme :	7
5-2- Soudage à l’arc à l’électrode enrobée SMAW :.....	8
5-2-1- Définitions du soudage à l’arc (électrode enrobée) :	8
5-2-2 - schéma du soudage à l’arc (électrode enrobée) :	9
5-2-3- L’arc électrique :	9
5-2-4- Principe de soudage à l’arc :	10
5-2-5- Réglage du poste :	10
5-2-6- L’électrode enrobée :	11
5-2-7- Rôle de l’enrobage :	12
5-3- Soudage TIG GTAW :.....	13
5-3-1- Définition de soudage TIG :	13
5-3-2- Principe du procédé TiG :.....	13
5-3-3- Transfert du métal :	13
5-3-4- Installation manuelle pour soudage TIG :	13
5-3-6- Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG :	14
5-3-7- Applications de la soudure TIG :	15
5-3-8- Gaz utilisés en procédé TIG :.....	15
5-3-9- Buses utilisées en soudure TIG :.....	15
5-3-10- Les avantages et les inconvénients de procédé TIG :	16
5-4- Soudage MIG – MAG GMAW :.....	16
5-4-1- Définition de soudage MIG – MAG :	16

5-4-2- Principe du procédé MIG – MAG :.....	17
5-4-3- Schéma d'installation manuelle pour soudage MIG – MAG :.....	17
5-4-4- Le transfert du métal :.....	18
5-4-5- La différence entre le soudage MIG et MAG :.....	18
5-4-6- Les transferts d'arc :.....	18
5-4-7- Choix du gaz et influence du gaz sur le cordon :.....	20
5-4-8- Choix des diamètres du fil d'apport :.....	20
5-4-9- Les avantages et les inconvénients du soudage MIG- MAG :.....	21
5-5- Soudage à l'arc submergé SAW :.....	21
5-5-1- Définition de soudage à l'arc submergé :.....	21
5-5-2- Principe du procédé :.....	22
5-5-3- Schéma du soudage sous flux :.....	22
5-5-4- Domaines d'applications :.....	22
5-5-5- Les flux et leurs rôles :.....	22
5-6- Soudage laser :.....	23
5-6-1- Définition de soudage laser :.....	23
5-6-2- Le matériel de soudage au laser :.....	23
5-6-3- Principe de soudage :.....	23
5-6-4- Les avantages et les inconvénients :.....	23
6- Le cycle thermique de soudage :.....	24
7- les défauts de soudage :.....	24
8- Les principaux risques liés au soudage :.....	28
Conclusion :	29
Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif	31
Introduction:	31
1- Historique de (CND):.....	31
2-définition de contrôle non destructif :.....	31
3- Domaine d'utilisations des méthodes de (C.N.D) :.....	32
4- Principe de contrôle non destructif :	32
5- Classification des défauts détectés :.....	33
5-1 Les défauts de surface :.....	33
5-2 Les défauts internes :.....	33
6- Les techniques de contrôle non destructif :.....	33
6-1 Examen visuel (VT):.....	34
6-1-1 Principe de contrôle visuel :.....	34
6-1-2 Mise en œuvre du contrôle :.....	34
6-1-3- les moyens à mettre en œuvre :.....	35
6-1-4- les défauts décelables en contrôle visuel :.....	35
6-1-5- les avantages et inconvénients :.....	36
6-2- contrôle par ressuage (PT) :.....	36
6-2-1- définition du ressuage :.....	36
6-2-2-Schéma de principe de ressuage :.....	37
6-2-3- Domaine d'application :.....	37

6-2-4- Les normes pour l'essai de ressuage :	37
6-2-5- Les avantages et inconvénients :	38
6-3- Contrôle par radiographie (RT) :	38
6-3-1- Définition de radiographie :	38
6-3-2- Principe de la méthode :	39
6-3-3- Domaine d'application :	39
6-3-4- Intérêts de la méthode radiographie :	39
6-3-5- Les avantages et inconvénients :	39
6-4-1- Définition de contrôle par ultrasons :	40
6-4-2- Principe de contrôle par ultrasons :	40
6-4-3- Les avantages et inconvénients :	41
6-4-4- Domaine d'application :	41
6-5- Le contrôle par courants Foucault (ET) :	42
6-5-1- Définition de de contrôle par courants Foucault :	42
6-5-2- Principe de contrôle par courants Foucault :	42
6-5-3- Domaine d'application :	43
6-5-4- Les avantages et inconvénients :	43
6-6- Le contrôle par magnétoscopie (MT):	43
6-6-1- Définition de contrôle par magnétoscopie :	43
6-6-2- Schéma de principe de contrôle par magnétoscopie :	43
6-6-3- Domaines d'application de la magnétoscopie :	44
6-6-4- Les avantages et inconvénients :	45
6-7- Contrôle par la thermographie infrarouge (TT) :	45
6-7-1- Définition de la thermographie infrarouge :	45
6-7-2- Principe de contrôle par thermographie infrarouge :	45
6-7-3- Les avantages et inconvénients :	45
6-8- Contrôle par émission acoustique (RT):	46
6-8-1- Définition de contrôle par émission acoustique :	46
6-8-2- Principe de l'émission acoustique	46
6-8-3- Domaines d'application :	46
6-8-4- les intérêts de la méthode :	47
Conclusion :	47
Chapitre 03 : Le ressuage	49
Introduction :	49
1- Définition de ressuage :	49
2- Mise en œuvre de la méthode (Figure 47) :	50
3- Objectifs de la méthode :	51
4- Principe de la méthode :	51
5- Les intérêts de la méthode :	52
6- Schématisation de ressuage :	52
7- Les différents produits de ressuage :	54
8- Domaine d'application :	57
9- Le choix du révélateur :	58

10- Caractéristiques des matériaux traités par le ressuage :	58
11- normes et directives spécifiques :	58
12- Interprétation des défauts :	59
13- Les avantages et inconvénients :	59
Conclusion :	60
Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »	62
Introduction :	62
1- Présentation du matériau acier ordinaire S235 JR (E24) :	62
1-2- Domaines d'utilisation :	62
1-3 Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier (Tableau 07):	63
2 - Les dessins techniques des pièces soudées :	64
3 - Préparation des échantillons :	67
4- Présentation du métal d'apport :	68
4-1- Domaines d'utilisation :	68
4-2- Composition chimique et mécaniques du métal d'apport (Tableau 10):	69
5- Le procédé du soudage utilisé :	69
6- Contrôle par ressuage :	70
6-1- Mode opératoire du ressuage :	70
6-1-1- Les produits de ressuage :	70
6-1-2- Nettoyage des pièces :	70
6-1-3- Application du pénétrant :	71
6-1-4- Rinçage du pénétrant :	72
6-1-5- Application du révélateur :	73
7- L'interprétation des résultats obtenus :	74
Conclusion :	75
Conclusion générale :	76
Liste des références :	77

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale :

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs: aéronautique; automobile; transport pétrolier ; agroalimentaire ... etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans les matériaux utilisés, 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.

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par des méthodes non destructives des assemblages soudés.

Le contrôle non destructif est réalisé sur un cordon de soudure bout à bout pour les 3 assemblages:

* Le premier assemblage de 2 tôles en acier avec une épaisseur de 20 mm, assemblage est réalisé à l'arc électrique avec baguette de rutile 6013.

* Le deuxième assemblage de 2 tôles en acier avec une épaisseur de 18 mm, assemblage est réalisé à l'arc électrique avec baguette de rutile 6013.

* Le troisième assemblage de 2 tôles en acier avec une épaisseur de 15 mm, assemblage est réalisé à l'arc électrique avec baguette de rutile 6013.

Le plan de mémoire est composé de quatre chapitres :

* Le premier chapitre est une généralité sur le soudage

* Le deuxième chapitre contient les concepts généraux sur les techniques de contrôle non destructif.

* Le troisième chapitre contient une présentation de ressuage

* Le quatrième chapitre est une étude expérimentale par la technique de CND : ressuage appliquées sur les joints soudés, résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout.

Chapitre 01 :

Généralité sur le soudage

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

Introduction :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [1].

1- définition de soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage ; soit par intervention par pression ; soit par l'un ou l'autre, avec ou sans métal d'apport dans la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle de matériaux de base [1].

2- Brève histoire du soudage :

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est intervenue à la fin du XIXe siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder. Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la première guerre mondiale [2].

3 - Les différents types de soudage :

Il existe 3 types de soudures :

- * **La soudure homogène** : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- * **La soudure hétérogène de type A** : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- * **La soudure hétérogène de type B** : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes [3].

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

4- Procédé de soudage:

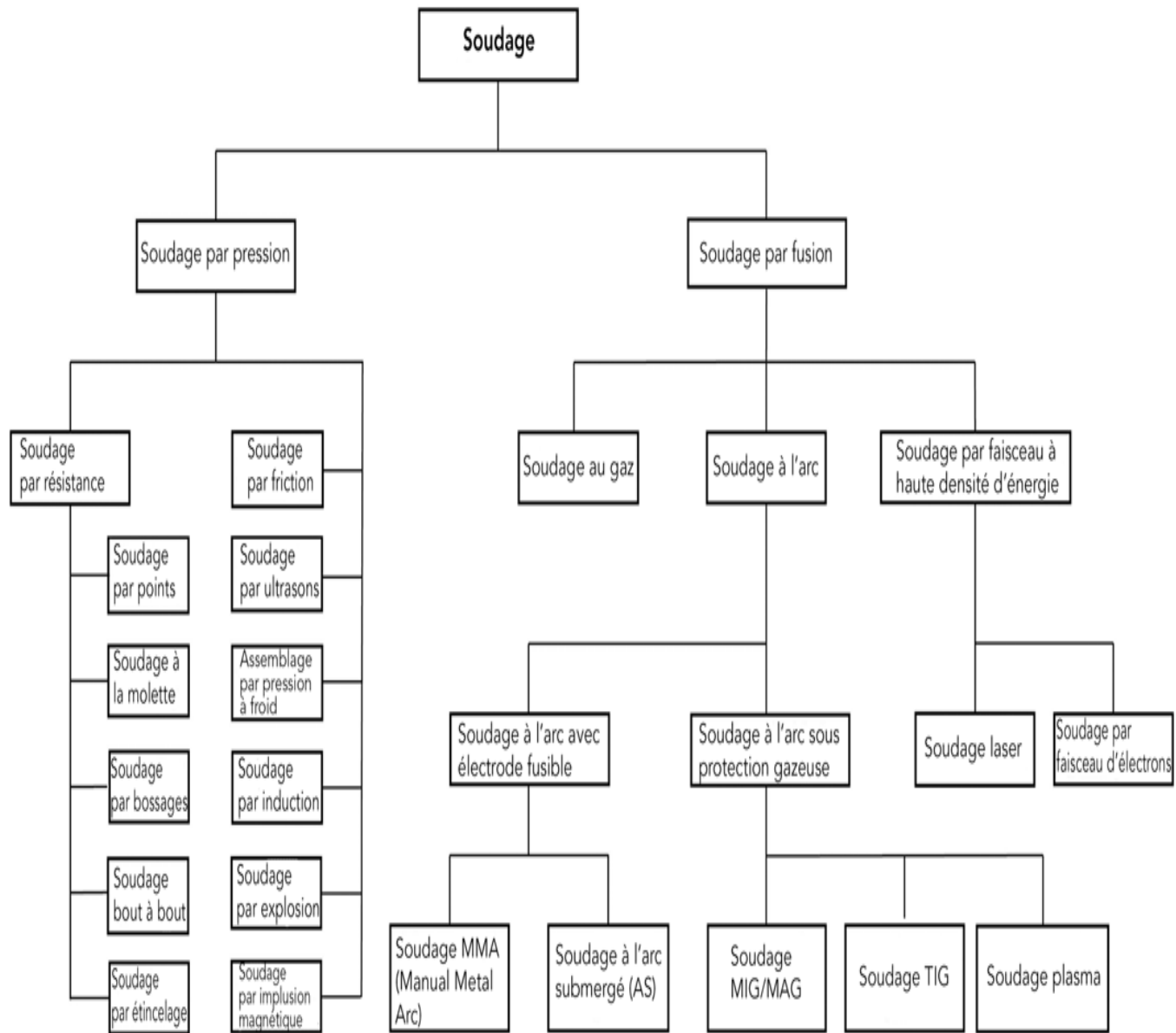


Figure 1: Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

5- Les principaux procédés de soudage:

Il existe beaucoup techniques de soudage, j'ai cité quelque type:

Procédé	Numéro	de
---------	--------	----

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

	référence
Soudage à l'arc avec électrode enrobée	111
Soudage à l'arc avec fil fourré sans gaz de protection	114
Soudage à l'arc submerge	12
Soudage MIG	131
Soudage MAG	135
Soudage MAG avec fil fourré	136
Soudage TIG	14
Soudage à l'arc plasma	15
Soudage oxygaz	311

Tableau 01 : Les principaux procédés de soudage[3]

5-1- Soudage Oxyacétylénique OXW :

5-1-1- Définition du soudage chalumeau :

Le soudage OA (oxygène et acétylène) est un procédé d'assemblage thermique qui s'applique aux tôles et aux tubes de même matière dont l'épaisseur reste inférieure ou égale à 2mm.

5-1-2- principe du soudage OA :

- On mélange deux gaz, l'oxygène et l'acétylène.
- On enflamme le mélange.
- On obtient alors, après réglage une flamme nous permettant de souder.

5-1-3- Description du poste de souage OA :

Le soudage chalumeau (OA) est constitué d'un :

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

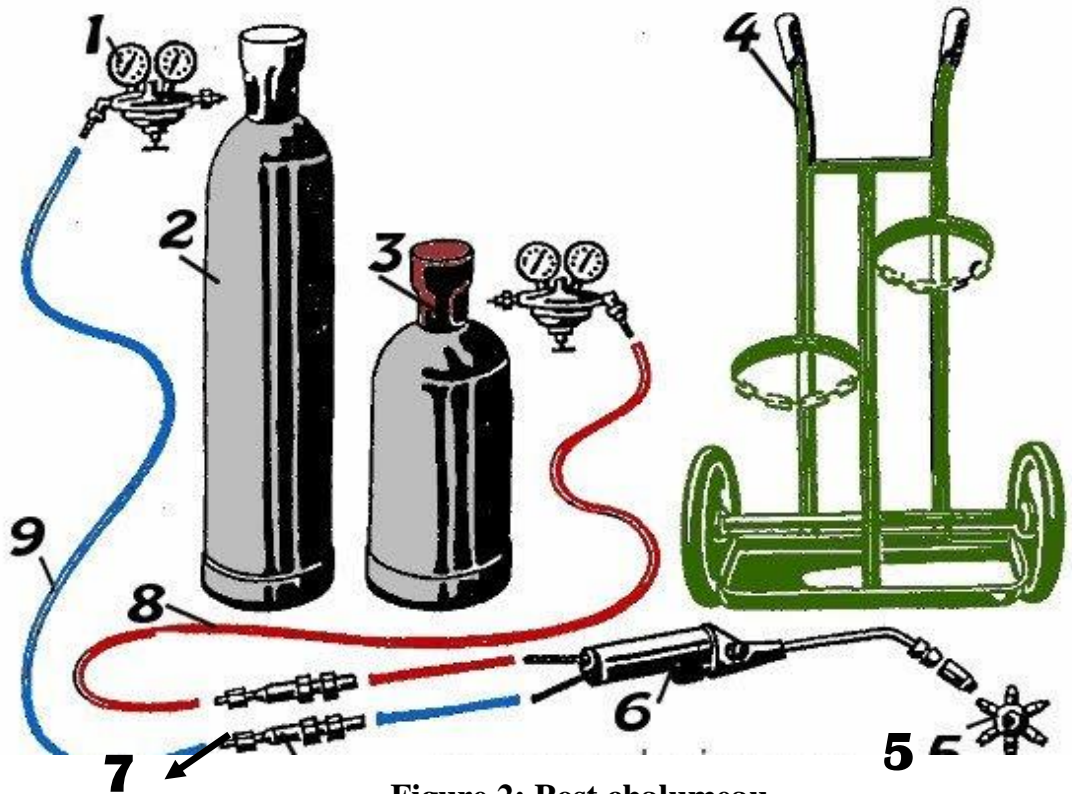


Figure 2: Post chalumeau

- * 1 – Manomètre
- * 2 – Bouteille d' oxygène
- * 3- Bouteille d'acétylène
- * 4 – Chariot de transport
- * 5 – Buses
- * 6 – Chalumeau
- * 7 – Raccord anti – retour
- * 8 – Tuyau acétylène de couleur rouge
- * 9 - Tuyau oxygène de couleur bleu

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

5-1-4- le chalumeau :



Figure 3: le chalumeau

- 1 – Bouton permettant le réglage de l'acétylène (0.5 Bars)
- 2 – Bouton permettant le réglage de l'oxygène (1.5 Bars)
- 3 – la lance
- 4 – la buse
- 5 – Raccord acétylène (tuyau rouge)
- 6 – Raccord oxygène (tuyau bleu)

5-1-5- la flamme :

* Flamme normale :



Figure 4 : Flamme chalumeau normal – Réglage parfait

* flamme oxydante :



Figure 5: Flamme chalumeau oxydante – Mauvais réglage – excès d’oxygène

* flamme comburante :



Figure 6: Flamme chalumeau comburante – Mauvais réglage - excès d’acétylène / propane / ... [4]

5-2- Soudage à l’arc à l’électrode enrobée SMAW :

5-2-1- Définitions du soudage à l’arc (électrode enrobée) :

Le soudage à l’électrode enrobée est souvent appelé « soudage à l’arc », il utilise des baguettes comme métal d’apport.

La soudure autogène à l’électrode enrobée consiste à mettre en fusion l’acier des pièces à souder et de les assembler grâce à un métal d’apport (l’âme de l’électrode).

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

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage



Figure 7: Soudure à l'arc électrode

La « baguette » fond dans le bain de fusion formant ainsi la soudure, l'enrobage de l'électrode (laitier) fond à la température de l'arc et protège la soudure contre l'oxydation.

5-2-2 - schéma du soudage à l'arc (électrode enrobée) :

Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort effet calorifique provoquant la fusion de l'électrode.

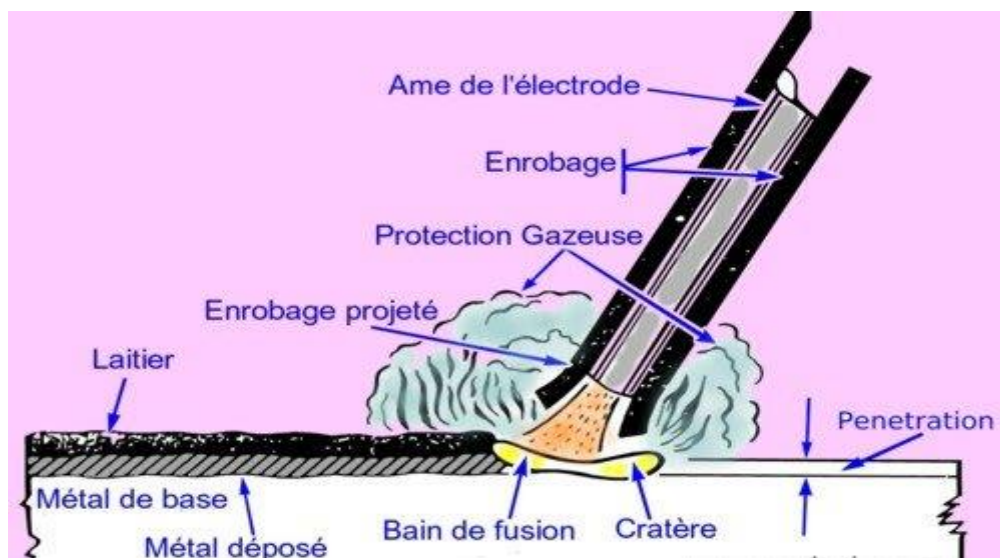


Figure 8: schéma du soudage à l'arc (électrode enrobée)

5-2-3- L'arc électrique :

Pour qu'il y ait un arc électrique, il faut :

- * La présence d'une tension suffisante entre les électrodes
- * Le maintien d'une intensité minimale

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

* Un milieu suffisamment ionisable



[5]

Figure 9: l'arc électrique

5-2-4- Principe de soudage à l'arc :

Dans le soudage à l'arc, la chaleur est fournie par l'arc électrique qui se produit entre une baguette de métal d'apport appelée électrode et la pièce à souder.

Le passage du courant de soudage à travers l'intervalle qui sépare l'électrode de la pièce s'accompagne d'un dégagement intense de lumière et de chaleur. La température atteinte est de l'ordre de 600°C [6].

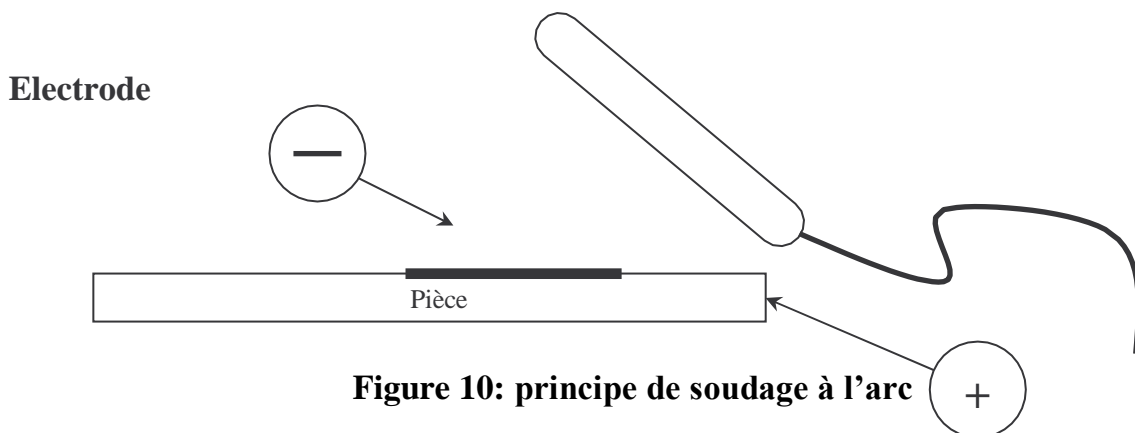


Figure 10: principe de soudage à l'arc

5-2-5- Réglage du poste :

C'est l'intensité du courant que l'on règle, elle est donnée par la formule :

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

$$\text{Intensité} = (\varnothing \text{ de l'électrode} - 1) \times 50$$

A mm

Exemple : électrode Ø3,15

$$I = (3,15 - 1) \times 50 = 107 \text{ A}$$

5-2-6-L'électrode enrobée :

Une électrode enrobée est **constituée** par :

- **une âme métallique** de forme cylindrique ;
- un revêtement ou **enrobage** de composition **chimique** très variée.

Les diamètres des électrodes enrobées sont mesurés sur l'âme nue. La longueur de l'électrode est la longueur totale comprenant :

- la longueur de la partie enrobée et
- la longueur de la partie dénudée, destinée à être pincée dans le porte-électrode.

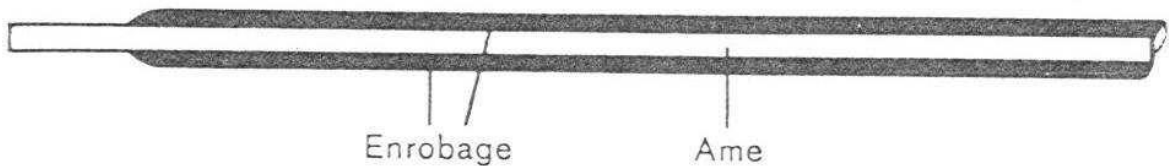


Figure 11: Coupe d'une électrode enrobée

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

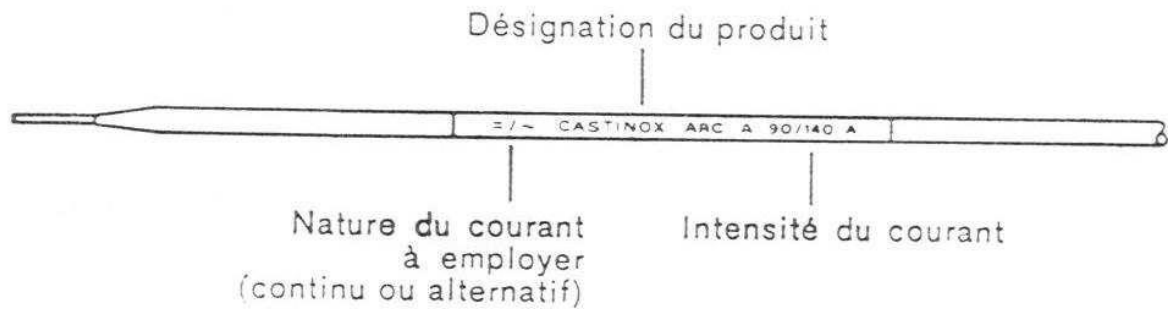


Figure 12: Marquage d'une électrode " Castolin"

5-2-7- Rôle de l'enrobage :

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

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

En outre, les corps contenus dans l'enrobage peuvent modifier la forme du dépôt. Ainsi une électrode déterminée pourra fournir des cordons de soudure ayant la forme désirée : bombés, plats ou concaves. D'autre part, dans le soudage en position, le laitier soutient par action physique, le métal en fusion. Il retarde ainsi le refroidissement du dépôt [6].

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

5-3- Soudage TIG GTAW :

5-3-1- Définition de soudage TIG :

Le procédé de soudage TIG permet d'obtenir des soudures de très haute qualité, et répond parfaitement aux besoins des applications les plus exigeantes, notamment la chaudronnerie, la pose de pipelines, ou la fabrication de réservoirs pour l'industrie agroalimentaire et l'aviation. [7]

5-3-2- Principe du procédé TiG :

Le soudage TIG exploite la chaleur générée par un arc électrique entre les métaux à assembler et utilise une électrode tungstène, située au niveau de la torche de soudage. La zone de l'arc est ensuite entourée d'une enveloppe de gaz inerte afin de protéger le bain de fusion et l'électrode tungstène.

Le soudeur apporte directement à la main le métal d'apport, sous forme de baguette, dans le bain de fusion.

Le soudage TIG est parfaitement adapté aux plaques métal d'une épaisseur comprise entre 8 et 10mm. [7]

5-3-3- Transfert du métal :

Le transfert de métal dans le soudage Tig basé sur un arc électrique est établi entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder

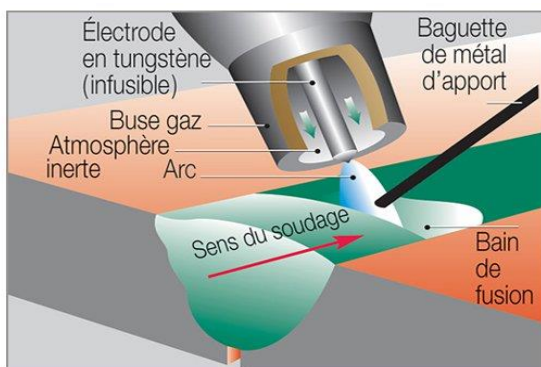
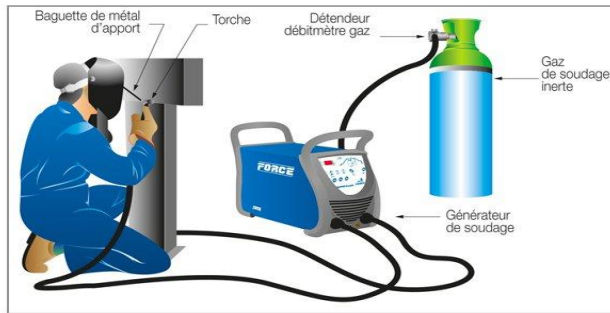


Figure 13: Transfert du métal

5-3-4- Installation manuelle pour soudage TIG :

Le procédé TIG nécessite une protection gazeuse à l'argon (100%) gaz neutre, avec une polarité directe pour le courant continu, il faut reliée l'électrode de tungstène au pôle négatif (-) et la pièce au pôle positif (+)

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage



[7]

Figure 14: Installation manuelle pour soudage TIG

5-3-5- Description de la torche TIG :

La torche de soudage Tig se compose de:

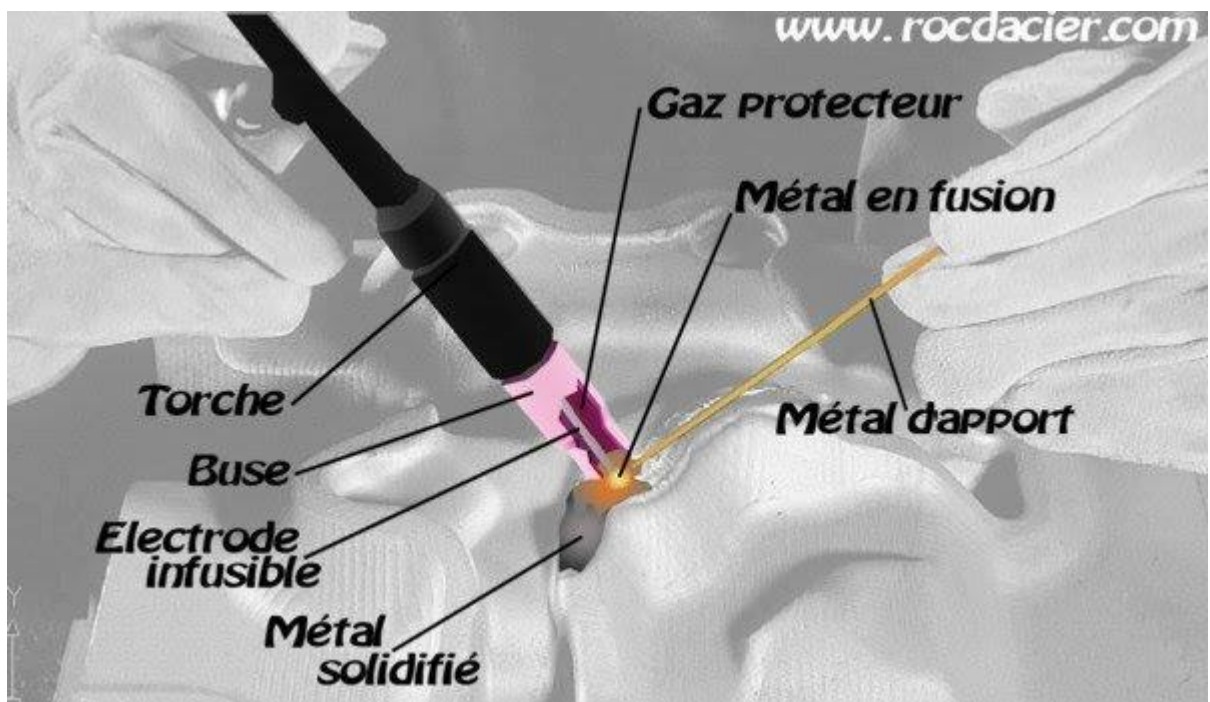


Figure 15: Description de la torche TIG

5-3-6- Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG :

- * La vitesse de soudage (avance du soudeur)
- * Le choix et le débit du gaz
- * le choix et le débit du métal d'apport
- * Le choix, l'affûtage et le diamètre de l'électrode réfractaire
- * La position de soudage
- * La préparation
- * La dimension et la nature des matériaux à souder

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

5-3-7- Applications de la soudure TIG :

- * La réalisation d'ouvrages alimentaires
- * La chaudronnerie d'acier inoxydable
- * L'industrie aéronautique et spatiale
- * La carrosserie
- * Plus généralement, les entreprises travaillant des matériaux à bases d'aciers inoxydables et d'alliages légers. [8]

5-3-8- Gaz utilisés en procédé TIG :

- * L'argon pur est le plus couramment utilisé en soudage TIG. (bon amorçage de l'arc)
- * L'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait de la vitesse plus grande. le cout du soudage et plus important cependant. (alliages légers, cuivre ...)
- * L'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc une vitesse de soudage améliorée. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect plus esthétique du cordon de soudure.
- * l'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex. Utilisé aussi en protection envers. [8]

5-3-9- Buses utilisées en soudure TIG :

Les buses utilisées seront soit en céramique (beige) , en oxydes d'aluminium (rose clair) , en nitrite de silicium (gris) , pyrex (transparent) et auront un diamètre qui pourra varier de 6 mm à 20 mm suivant l'intensité de soudage .

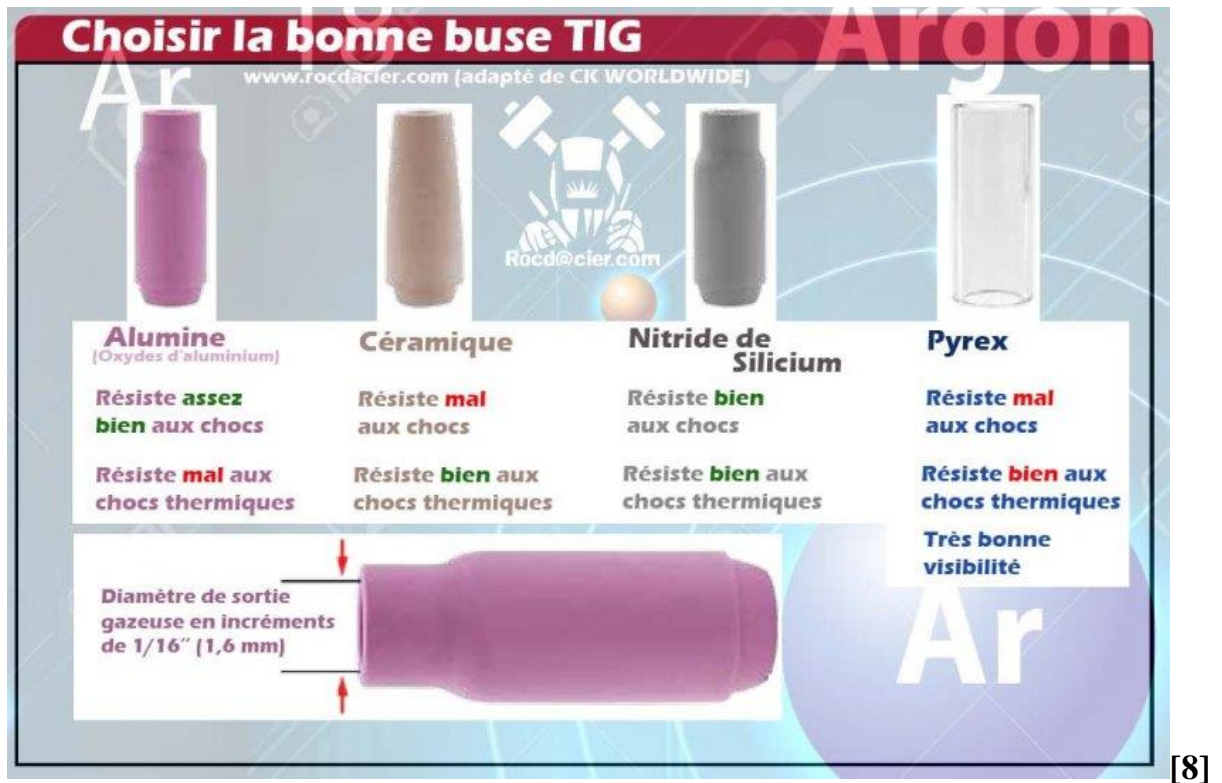


Figure 16: Buses utilisées en soudure TIG

5-3-10- Les avantages et les inconvénients de procédé TIG :

- * Projections minimales
- * Soudures de qualité élevée
- * Toutes les positions de soudage sont réalisables
- * Très grande qualité des soudures
- * Nécessite une grande technicité
- * Faibles vitesses de soudage
- * Lors de la préparation de la soudure , la rouille doit impérativement être éliminée
- * Ne convient pas aux pièces de grande épaisseur [9]

5-4- Soudage MIG – MAG GMAW :

5-4-1- Définition de soudage MIG – MAG :

Le soudage MIG (sous gaz inerte) ou MAG (sous gaz actif) est un procédé semi – automatisé, largement répandu dans de nombreux secteurs industriels, notamment la construction de navires, de chemins de fer, ou encore la fabrication d'équipements lourds ou d'usine. [10]



Figure 17: soudage MIG – MAG GMAW

5-4-2- Principe du procédé MIG – MAG :

Ce procédé implique la fusion des métaux au moyen d'une chaleur intense générée par un arc électrique entre les métaux à assembler et un fil d'apport (massif ou fourré). Le fil entre progressivement en fusion selon une vitesse identique à sa vitesse d'apport depuis la tête de soudage, et contribue en partie à la formation du bain de fusion.

L'arc et le bain de fusion sont protégés des agents contaminants présents dans l'atmosphère au moyen d'un gaz inerte (non réactif). [10]

5-4-3- Schéma d'installation manuelle pour soudage MIG – MAG :

La figure si déçu représente la schéma de fonctionnement de soudage MIG – MAG

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

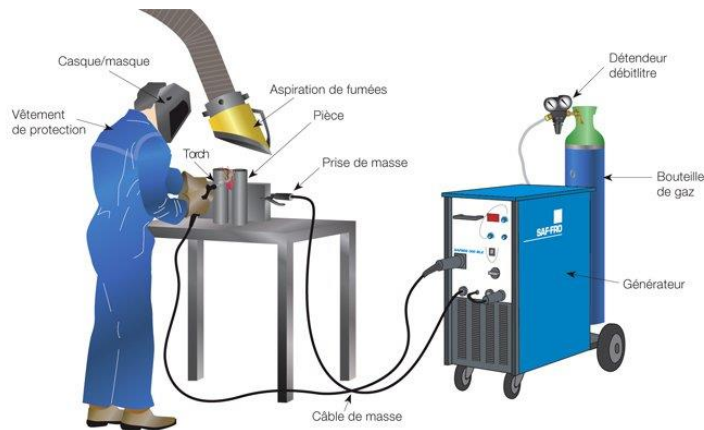


Figure 18: schéma d'installation manuelle pour soudage MIG – MAG

5-4-4- Le transfert du métal :

Le soudage MIG-MAG est un procédé dans lequel la chaleur nécessaire à l'exécution du soudage est fournie par un arc électrique maintenu entre la pièce à souder et le fil-électrode.

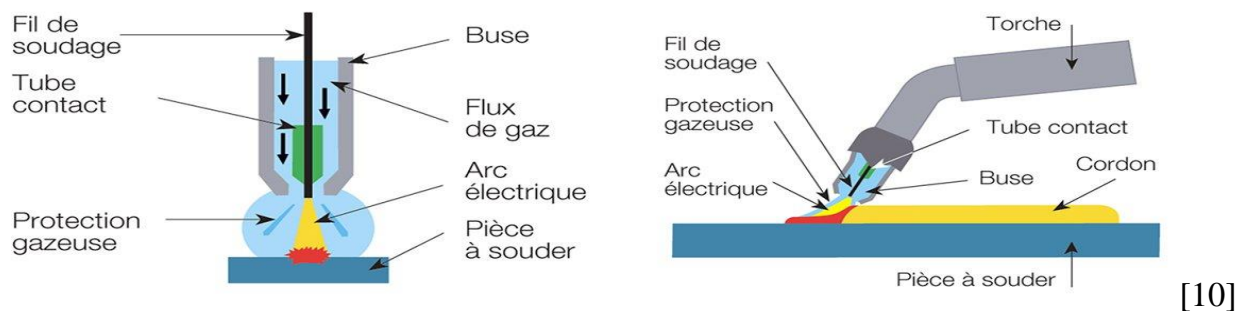


Figure 19: le transfert du métal

5-4-5- La différence entre le soudage MIG et MAG :

La différence entre les deux procédés tient à la composition du gaz. le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium) , contrairement au procédé MAG (mélange d'argon et de dioxyde de carbone ou dioxygène en proportions variables selon les métaux à souder [11]).

5-4-6- Les transferts d'arc :

* Le transfert par court – circuit (short – arc)

L'intensité et la tension sont basses ($I < 200 \text{ A}$ et U entre 14 et 20 V) , la pénétration est bonne .

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

Le métal se dépose par gouttes dans le bain de fusion par une série de courts – circuits (50 à 200 environ par seconde) entre le fil d’apport et le métal à souder. Cette méthode de transfert permet une bonne précision dans les passes de pénétration. l’arc est cependant instable (peu régulier) et les projections de gouttes autour du cordon sont nombreuses. En passe de pénétration, le tube contact doit être sorti de 5 à 10 mm à l’extérieur de la buse. Il est placé au niveau de la buse pour les autres passes.

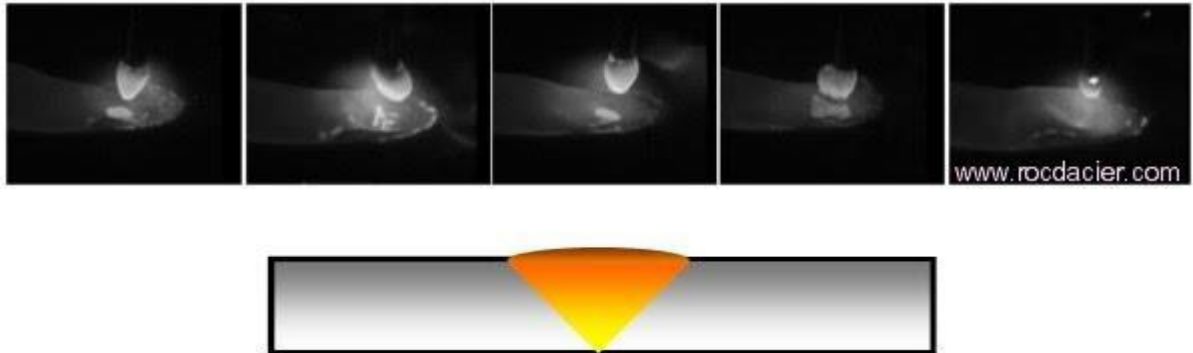


Figure 20: Le transfert par court – circuit (short – arc)

*** Le transfert globulaire (grosse – goutte)**

Il s’agit d’un régime intermédiaire entre le régime par court – circuit et le régime par pulvérisation axiale. Les projections sont difficiles à éviter. Les intensités et les tensions sont de valeurs moyennes. la pénétration est moins prononcée qu’en court – circuit.

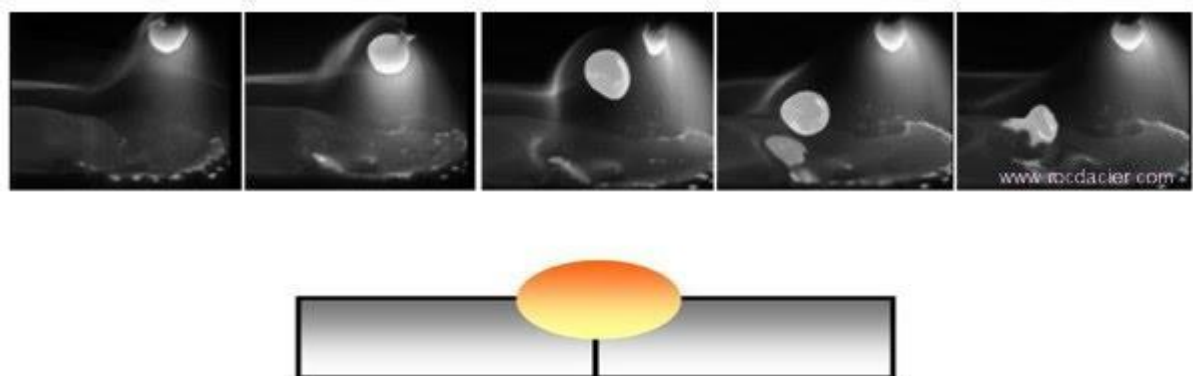


Figure 21: Le transfert globulaire (grosse – goutte)

*** Le transfert par pulvérisation axiale (spray- arc) :**

L’intensité et la tension sont élevées ($I > 200 \text{ A}$ et U entre 20 et 40 V).

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

L'extrémité du fil fond en très fines gouttelettes projetées dans le bain de fusion. L'arc est long et stable et le taux de dépôt est important. on constate peu de projections sur les bords du cordon. le tube contact est en retrait à l'intérieur de la buse. [12]

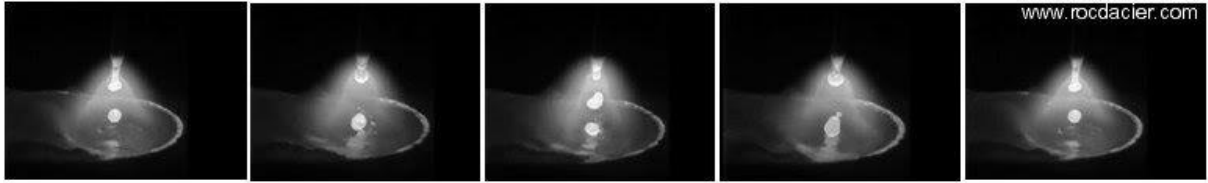


Figure 22 : Le transfert par pulvérisation axiale (spray- arc)

5-4-7- Choix du gaz et influence du gaz sur le cordon :

Le choix du gaz de soudage se fera en fonction du régime de soudage choisi, par exemple :

Pour un régime en court – circuit, on choisira de préférence une protection gazeuse de CO₂ ou argon + CO₂. Mais on évitera l'argon pur.

Pour un régime par transfert globulaire, qui est un régime intermédiaire on pourra utiliser les 3 gaz.

Pour un régime à pulvérisation axiale, on évitera le CO₂, en préférant l'argon pur et le mélange argon + CO₂.

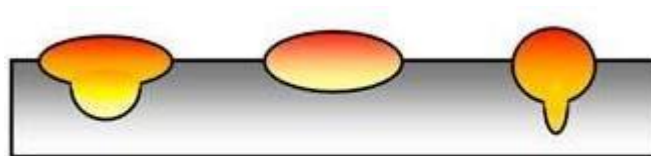


Figure 23: Choix du gaz et influence du gaz sur le cordon

5-4-8- Choix des diamètres du fil d'apport :

Le diamètre du fil s'effectue suivant les travaux de soudage à réaliser :

Exemples :

- carrosserie : Ø 0.6 mm (40 à 100 A environ)
- Tuyauterie de faible épaisseur et tôlerie fine : Ø 0.8 mm (60 à 180 A environ)

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

- Soudage d'épaisseurs 6 – 8 mm : Ø 1,2 mm (150 à 350 A environ)
- Soudage d'épaisseurs de 10 mm environ : pour Ø 1,6 mm (200 à 700 A environ) [12]

5-4-9- Les avantages et les inconvénients du soudage MIG- MAG :

- * Facile à apprendre
- * Vitesse de soudage élevée
- * Vitesse de dépôt élevée
- * Faibles coûts de matériau d'apport
- * Convient bien aux applications de soudage mécanisées (par ex. avec dispositif de déplacement) ou robotisées
- * Amorçage facile de l'arc électrique
- * En plein air ou en cas de courants d'air, il peut être compliqué de maintenir le gaz de protection
- * Sensible à la rouille et à l'humidité [13]

5-5- Soudage à l'arc submergé SAW :

5-5-1- Définition de soudage à l'arc submergé :

Le soudage à l'arc submergé est généralement utilisé dans les applications industrielles impliquant des plaques d'acier épaisses ou des soudures longues. Ce procédé consiste à créer un joint de soudure entre les composants en acier à l'aide d'un arc électrique submergé par une couche de flux en poudre.



Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

Figure 24: Soudage à l'arc submergé SAW

5-5-2- Principe du procédé :

Le soudage à l'arc submergé (AS) repose sur la formation d'un arc entre un fil à distribution permanente et la pièce à souder. Un couvert de flux en poudre permet d'obtenir une protection et constituer un laitier pour la zone à souder. Ce procédé ne nécessite aucun gaz de protection. L'arc est submergé en dessous du couvert du flux, et reste la plupart du temps invisible durant le soudage.

Le soudage AS s'effectue normalement en mode automatique ou semi – automatique. Ce procédé est généralement limité aux soudures d'angle à plat ou soudures d'angle en gouttière. [14]

5-5-3- Schéma du soudage sous flux :

La figure ci déçu représente le principe de fonctionnement du soudage sous flux

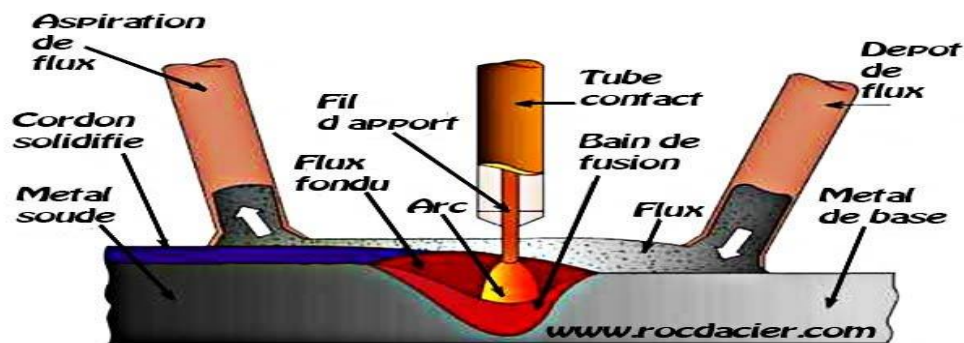


Figure 25: Schéma du soudage sous flux :

5-5-4- Domaines d'applications :

Essentiellement utilisé en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 200/300 mm et apporte à la fois en usine et sur chantier, une grande vitesse de soudage et des taux de dépôt élevés. On rencontre ce procédé , avec un ou plusieurs fils dans beaucoup d'industries , notamment charpente métallique , chantier naval , chaudronnerie (appareils sous pression) , tuyauteries industrielles , off – shore , industrie chimique / pétrochimique , rechargement cylindres de laminoirs , etc...

5-5-5- Les flux et leurs rôles :

Acides ou basiques, ils sont obtenus par fusion ou four électrique, puis broyés, ou encore par agglomération de poudres. Ils contiennent des éléments désoxydants (silicium,

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

manganèse, aluminium). Leurs rôles s'apparentent à ceux des enrobages des électrodes déjà examinés en soudage manuel à l'arc.

Les éléments d'alliage que l'on désire apporter au métal fondu sont incorporés dans le fil, mais peuvent être également apportés par le flux. Une granulation fine permet un meilleur aspect du cordon de soudure, ainsi qu'un soutien efficace du métal fondu en angle positionné.

Une granulation à gros grains facilite le dégazage du bain et éloigne le risque de porosité du métal fondu. [15]

5-6- Soudage laser :

5-6-1- Définition de soudage laser :

Le soudage laser est réalisé à l'aide d'une source laser émettant dans l'infrarouge. Le faisceau est donc invisible et 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 sécurisée. [16]

5-6-2- Le matériel de soudage au laser :

Le soudage laser utilise obligatoirement une machine d'atelier qui doit être capable de générer et de piloter un faisceau laser puissant sur une ligne de soudage d'épaisseur capillaire.

Il n'existe donc pas de torche manuelle pour le soudage laser.

Le soudage laser détient le record de vitesse de soudage en permettant jusqu'à 8 mètres de soudage à la minute. [17]

5-6-3- Principe de soudage :

Durant l'opération de soudage à l'aide d'un procédé à haute densité d'énergie, la concentration énergétique sur la pièce est suffisamment intense pour vaporiser le métal se trouvant sous le faisceau sur lequel le faisceau va se concentrer grâce au système d'optique.

Après focalisation, son éclairement peut atteindre 108 W / cm^2 à 109 W / cm^2 .

Il suffit de quelques microsecondes pour obtenir la fusion et la vaporisation du matériau à souder.

5-6-4- Les avantages et les inconvénients :

* Rapidité du procédé, absence de métal d'apport.

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

- * Précision et propreté.
- * Possibilité de joindre des matériaux différents.
- * Bonne résistance mécanique du joint soudé.
- * Coût d'acquisition et de maintenance très élevés.
- * Précision requises pour la préparation des joints.
- * Niveau important de formation des opérateurs. [18]

6- Le cycle thermique de soudage :

Le cycle thermique dépend du rapport de force qui s'établit entre la quantité de chaleur apportée et celle qui est absorbée par la pièce.

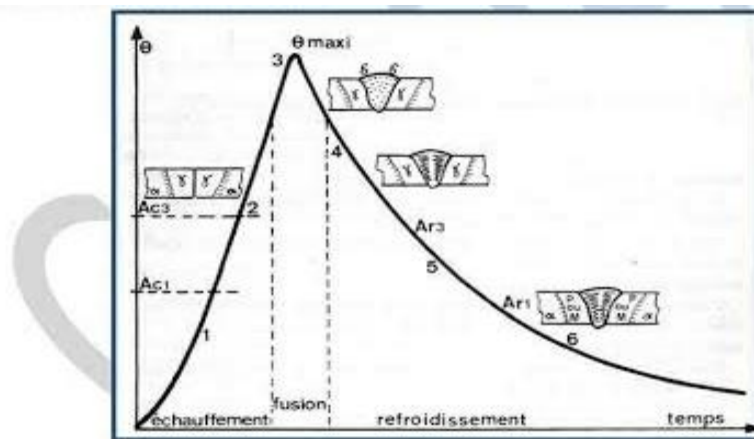
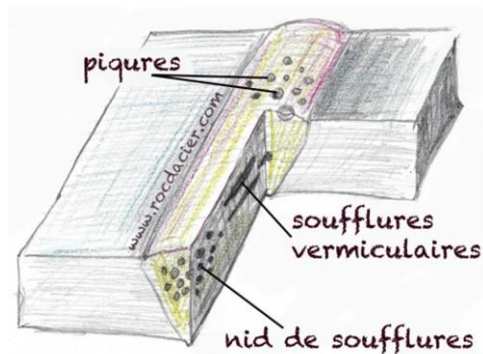


Figure 26: Figure de cycle de soudage [19]

7- les défauts de soudage :

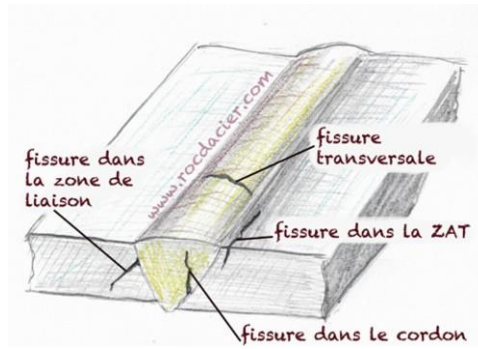
Parmi les défauts du soudage en troue :

- * Défauts de soufflures ou cavités (Figure 27):

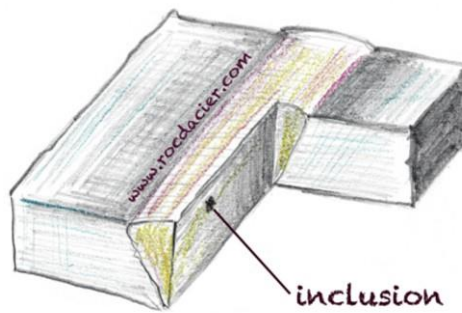


Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

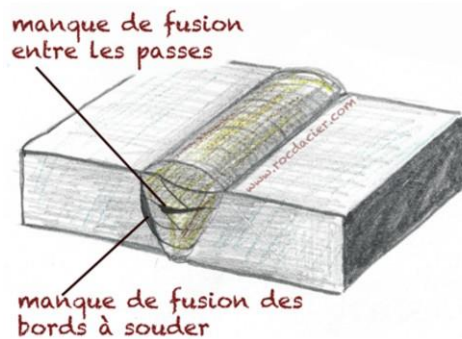
* Défauts de fissures (Figure 28):



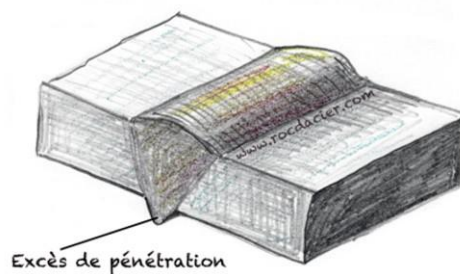
* Défaut d'inclusions (Figure 29):



* Défaut de manque de fusion « collage » (Figure 30):

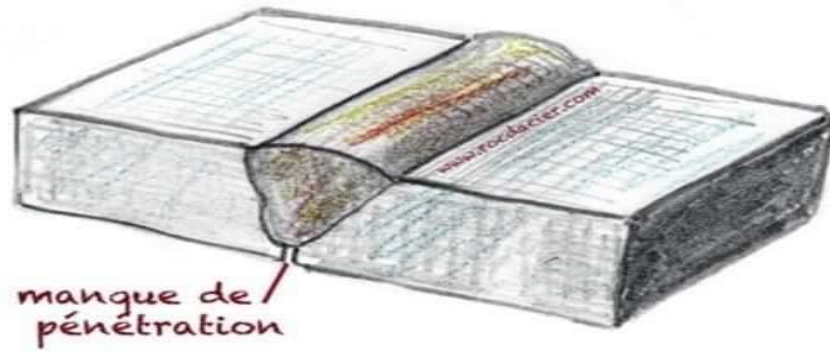


* Défaut d'excès de pénétration (Figure 31):



* Défauts de manque de pénétration (Figure 32):

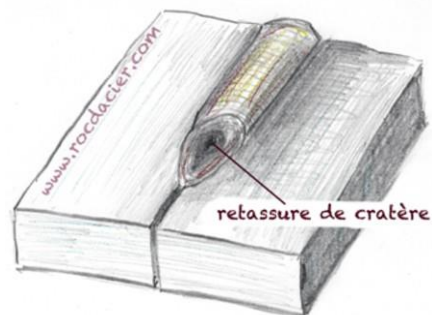
Chapitre 1 : Généralité sur le soudage



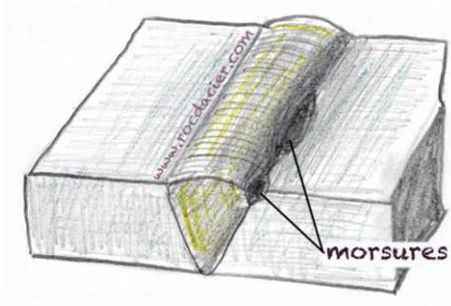
* Défaut d'effondrement (Figure 33):



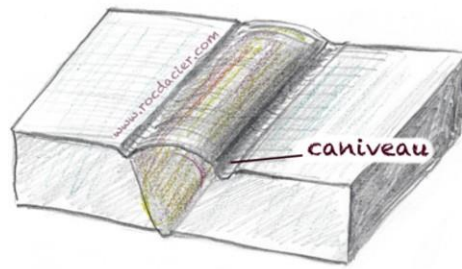
* Défauts retassures et criques (Figure 34):



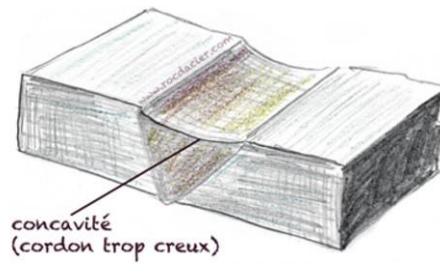
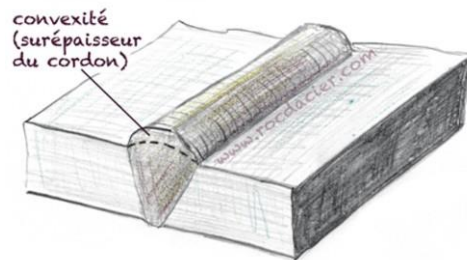
* Défauts morsures et caniveaux (Figure 35):



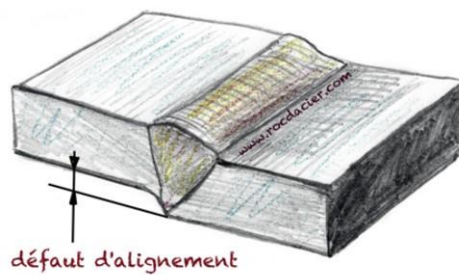
Chapitre 1 : Généralité sur le soudage



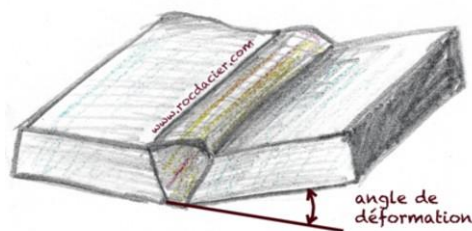
* Défauts géométriques des cordons (Figure 36) :



* Défaut d'alignement (Figure 36):



* Déformations angulaires (Figure 37):



Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

* Défaut du rochage (Figure 38):



[20]

8- Les principaux risques liés au soudage :

L'opération de soudage comporte de nombreux risques, qui dépendent de la technique utilisée :

- * Risque liés aux fumées et aux gaz : la fusion des métaux donne naissance à des fumées et gaz toxiques.
- * Risque d'incendie et d'explosion.
- * Risque d'électrification : danger présent lors de la création d'arc électrique.
- * Risques pour la peau et les yeux : production d'UV nocifs.
- * Risques liés à l'exposition au bruit :

Procédé de Soudage	Niveau de bruit
Soudage avec électrode de tungstène	50 à 60 dB
Soudage avec fil fourré	55 à 85 dB
Soudage avec électrode enrobe	60 à 80 dB
Soudage au plasma	80 à 90 dB
Soudage avec fil plein	70 à 80 dB

Tableau 02 : Les principaux risques liés au soudage [21]

Chapitre 1 : Généralité sur le soudage

Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre nous allons vous présenter une vue générale sur les principaux procédé de soudage.

Dans une deuxième partie, nous allons vous présenter les défauts de soudage et les risques liés au soudage.

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 au cours de soudage.

Chapitre 02 :

Généralité sur le Contrôle non destructif

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

Introduction:

L'objectif des méthodes d'examen et de contrôle est de faire la distinction entre les méthodes d'essais destructifs et non destructifs et de décrire différentes méthodes d'essais non destructifs pour identifier les défauts.

Les méthodes d'examens non destructifs incluent les méthodes d'examen ainsi que les méthodes de contrôle. Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier la qualité du matériau (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager, soit au cours de la production, soit au cours de la maintenance.

1- Historique de (CND):

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 (CND) commence – telle 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 CND s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électrique nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates – formes offshore.

La dernière décennie enfin voit l'émergence 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 automatique et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique , comme les contrôle optique [22].

2-définition de contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (C.N.D) est ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. [23]

3- Domaine d'utilisations des méthodes de (C.N.D) :

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- * L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- * L'aérospatiale et l'armée.
- * L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- * L'industrie navale (contrôle des coques).
- * L'inspection alimentaire.
- * L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbine, ..).
- * L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage ...).
- * Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- * La chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication.
- * La sidérurgie.
- * La fonderie.
- * Le génie civil et le bâtiment. [23]

4- Principe de contrôle non destructif :

Sous le vocabulaire « essai non destructif » ou encore contrôle non destructif (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) est regroupé un ensemble de techniques et / ou de procédés aptes à fournir des informations concernant la santé d'une pièce ou d'une structure, tout en préservent l'intégrité des produits contrôlés. le terme santé s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide médicale, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôle non destructif qui la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et / ou plus généralement la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. Le CND apparait comme un élément majeur dans le contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physique [24].

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

5- Classification des défauts détectés :

Le terme défaut est 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 –ci. Les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes [25].

5-1 Les défauts de surface :

Accessibles à l'observation directe, mais pas toujours visibles à l'œil nu. Ils peuvent être classés en deux catégories distinctes :

a) Les défauts ponctuels

Correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqures, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelque un) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixième de millimètre ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons [25].

b) les défauts d'aspect :

C'est une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) qui rend le produit inutilisable. Ici le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [25].

5-2 Les défauts internes :

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler [25].

6- Les techniques de contrôle non destructif :

Diverses techniques ont été développées pour rechercher des défauts dans différents types de structures et de matériaux. Leurs performances respectives peuvent éventuellement être évaluées voire comparées à l'aide des critères précités. Toutes les techniques ne sont cependant pas comparables, chacune étant appropriée à l'inspection d'une certaine catégorie de matériau.

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

Dans ce qui suit, nous allons traiter quelques techniques de CND classiques et rappeler leurs principales caractéristiques [26].

6-1 Examen visuel (VT):

6-1-1 Principe de contrôle visuel :

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci : des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes). Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peuvent être une indication de défaut plus grave à l'intérieur, la Figure (1) montre le principe de contrôle visuel [27].

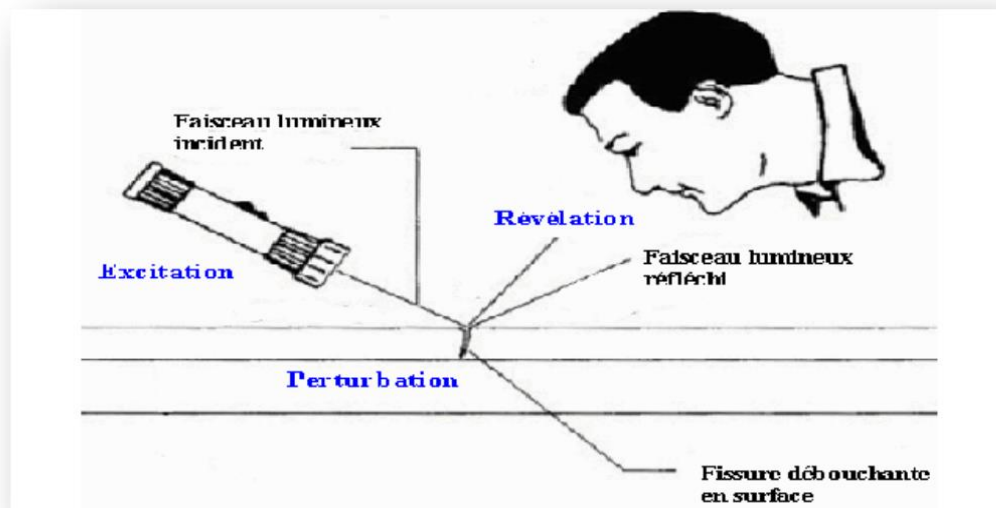


Figure 39: L'examen visuel [27]

6-1-2 Mise en œuvre du contrôle :

□ Eclairage :

Dans tous les cas d'observation d'un objet, les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Il s'agit d'abord de se placer dans les conditions énergétiques, luminosité et longueur d'onde permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité ; ainsi un éclairage de plus de 300 lux en lumière vert-jaune à $0,55 \mu\text{m}$ est optimal. Il s'agit ensuite d'adapter le type et l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts en vue d'améliorer le contraste. L'éclairage diffus,

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

fourni par exemple par un ensemble de sources lumineuses placées derrière un écran dépoli, est utilisé dans la recherche de défauts variés, sans orientation définie.

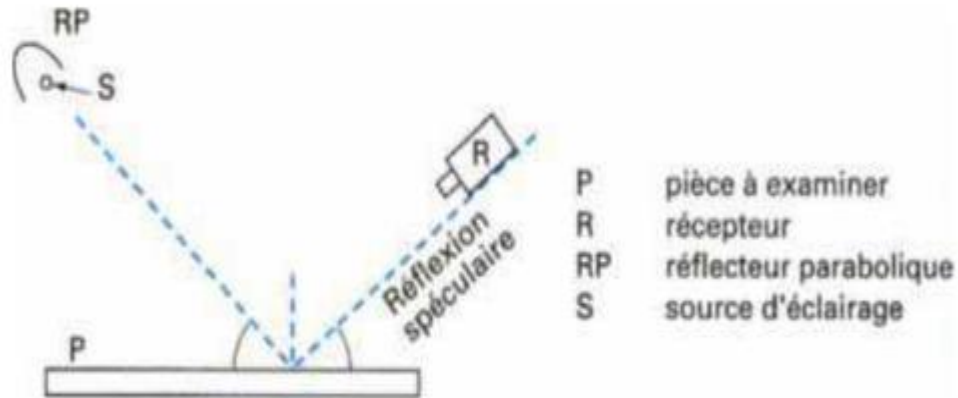


Figure 40 Examen par éclairage [28]

□ L'œil et ses limitations :

L'œil est un capteur optique certes remarquable à bien des points de vue mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif [28].

6-1-3- les moyens à mettre en œuvre :

Pour être pertinent, le contrôle visuel nécessite un minimum de moyens à mettre en œuvre :

- * Brosse métallique (pour enlever les éclats de peinture)
- * Chiffon et dégraissant
- * Miroir pour observer une zone qui n'est pas directement visible
- * Loupe pour améliorer l'analyse d'un défaut
- * Lampe d'appoint [29]

6-1-4- les défauts décelables en contrôle visuel :

Le contrôle visuel permet de mettre en évidence plusieurs types de défauts :

- En fabrication :

- * Les défauts de soudage : caniveau , fissure longitudinale ou transversale , les cratères , les piqûres et nids de piqûres (soufflures débouchantes) , les inclusions , les manques de fusion ou collage , les manques ou excès de pénétration , les défauts d'alignements (désacostage) , les morsures , ...

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

* Sur pièce usinée : défaut d'état de surface, arrachement de matière ...

* En coulée : piqure, ride de peau, écaille, incrustation.

* En fonderie : ride de peau, inclusion, malvenue, peau d'orange.

- En maintenance :

* Pièce usinée : usure, corrosion, filetage détérioré.

* Sur soudure : fissure de fatigue, défauts évolutifs.

* Sur pièce : traces de chocs, frottement, usure, corrosion, fissure de fatigue.

* Sur massif béton : fissure, épaufrure, éclatement, délitement, affouillement.

* Sur boulonnerie : écrou desserré, manque de vis, rupture de rivets, corrosion [29]

6-1-5- les avantages et inconvénients :

* Mise en œuvre très rapide

* Coût très peu onéreux

* Il ne permet pas de contrôler les défauts d'aspect

* Il ne permet pas les dimensions, les trous et les fissures apparentes [30]

6-2- contrôle par ressuage (PT) :

6-2-1- définition du ressuage :

Le ressuage est une technique de contrôle surfacique qui permet de détecter les défauts débouchant sur tous types de matériaux non poreux. C'est une technique simple à mettre en œuvre, qui nécessite une mise en œuvre rigoureuse pour garantir une sensibilité optimale.

Le ressuage exploite les propriétés de capillarité des produits utilisés.



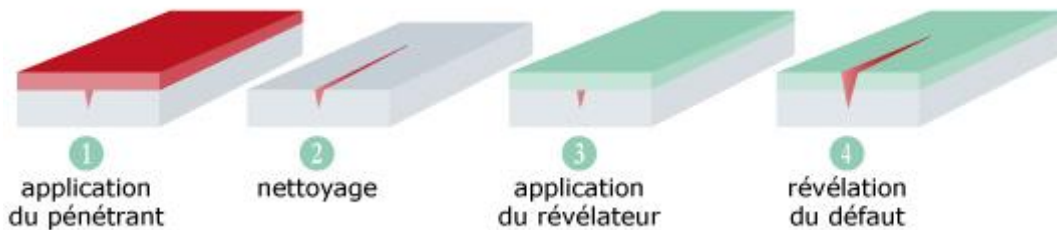
[31]

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

Figure 41: Exemple d'une pièce contrôle avec le ressuage

6-2-2-Schéma de principe de ressuage :

Le ressuage consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré ou fluorescent qui va pénétrer par capillarité dans les défauts débouchant, et pour faire cette opération de ressuage nous allons suivre les étapes ci déçu:



[31]

Figure 42: Schéma de principe de ressuage

6-2-3- Domaine d'application :

Le ressuage est utilisé pour détecter d'éventuels défauts débouchant. Le ressuage peut s'utiliser dans de nombreux domaines, et pas seulement en chaudronnerie et en soudage. Le procédé est utilisé dans l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, la fonderie, la mécanique, la tuyauterie ...

Des pièces soudées, usinées, moulées, brutes, peuvent être soumises à ce moyen de contrôle.

6-2-4- Les normes pour l'essai de ressuage :

De nombreuses normes régissent le contrôle par ressuage. La norme ISO 12706, prépare au vocabulaire du ressuage. les normes ISO3452 (parties 1,2,3,4,5,6), concernent respectivement , les principes généraux , les produits de ressuage , les pièces de référence , l'équipement , l'examen à des températures supérieures à 50°C et la partie n°6 concerne l'examen à des températures inférieures à 10°C.

La norme ISO 3452-1 permet de classier un examen de ressuage. Par exemple, on désignera IDA4 les produits utilisés pour un ressuage avec un pénétrant fluorescent, de sensibilité N°4, qui est éliminé à l'aide d'un émulsifiant hydrophile, puis révélé avec de la poudre sèche.

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

ISO 3452-1	
	Type de pénétrant
Fluorescent	I
Coloré	II
Mixte (fluorescent et coloré)	III
	Méthode d'élimination du pénétrant
Eau	A
Emulsifiant lipophile	B
Solvant (liquide)	C
Emulsifiant hydrophile	D
Eau et solvant	E
	Forme du révélateur
Sec	a
Hydrosoluble	b
Suspension dans l'eau	c
A base de solvant (non aqueux pour type I)	d
A base de solvant (non aqueux pour types II et III)	e
Application spéciale	f

Tableau 03 : Tableau ISO 3452

6-2-5- Les avantages et inconvénients :

- * Coût faible
- * Facilité de mise en œuvre
- * Facilité de lecture du défaut
- * Fiabilité de l'analyse
- * Impossibilité de détecter les défauts non débouchant [32]

6-3- Contrôle par radiographie (RT) :

6-3-1- Définition de radiographie :

La radiographie industrielle est un contrôle non destructif qui consiste à traverser le composant à contrôler avec un faisceau de rayonnement électromagnétique ionisant (rayons gamma ou X). ce rayonnement sera plus ou moins absorbé par les défauts internes de la pièce, pour arriver jusqu'à l'autre côté de cette pièce, avec une intensité de

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

rayonnement différent et s'incruster sur un film radiographique. Une fois développé, celui-ci révélera la localisation des défauts. [33]

6-3-2- Principe de la méthode :

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

La radiographie par rayons X : les rayons X sont produits dans un tube radiogène par freinage d'un faisceau d'électrons rapides.

La radioscopie par rayons gamma :

Les rayons gamma sont émis par les noyaux radioactifs des sources d'iridium 192, d'ytterbium 169 ou de cobalt 60. [34]

6-3-3- Domaine d'application :

La radiographie est utilisée industriellement pour contrôler la santé interne d'une pièce. Elle permet de détecter tout type de cavité ou de matériaux étrangers inclus dans la pièce. Les discontinuités planes sont révélées lorsque le rayonnement est parallèle au plan de l'indication. La taille des discontinuités détectables dépend de l'épaisseur traversée. La sensibilité de la méthode est plus limitée pour des matériaux denses et épais.

La radiographie est utilisée pour le contrôle des soudures ainsi que pour rechercher des imperfections de fonderie. Elle est également très utilisée pour vérifier l'intégrité des structures composites.

6-3-4- Intérêts de la méthode radiographie :

L'intérêt majeur de la radiographie réside dans l'obtention d'une image bien définie de l'uniformité de matière d'une pièce. La détection des indications contrastées est facile et une distinction des différents types d'indications est possible. Par rapport aux méthodes ultrasonores, elle est relativement tolérante aux états de surface et à la structure interne du matériau. Elle est applicable à tous les types de matériaux (aluminium, acier, alliages cuivreux, titane, composites,...). Les limites de la méthode sont liées aux coûts des installations et des consommables ainsi qu'aux dangers des rayonnements ionisants imposant une réglementation et des consignes strictes. [35]

6-3-5- Les avantages et inconvénients :

* Détection de surface ou volumique dans toutes les matériaux

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

- * Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm
- * Dimensionnement et identification possibles des défauts
- * Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques
- * Sensibilité de détection de l'ordre de quelques micromètres avec grossissement
- * Difficulté de localiser des défauts en profondeur
- * Coûts de fonctionnement élevés (source de rayonnement, entretien matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection ...)
- * L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi que d'une grande expérience. [36]

6-4- Contrôle par ultrasons (UT) :

6-4-1- Définition de contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrasons se repose sur la propagation d'une onde vibratoire engendrée par un palpeur piézoélectrique. Elle est réfléchi dès lors qu'elle rencontre un milieu différent de la nature du milieu de propagation.

6-4-2- Principe de contrôle par ultrasons :

Les ultrasons sont des ondes élastiques, tout comme les sons audibles ; ils ne diffèrent de ceux – ci que par leur domaine de fréquence. Si ces ondes ultrasonores sont envoyées perpendiculairement à surface d'une pièce à faces parallèles, ces ondes vont se réfléchir sur la paroi opposée et revenir vers le cristal qui va transmettre le signal à l'appareil à ultrasons.

Un défaut se signale par l'apparition d'un écho intermédiaire et / ou par une atténuation de l'écho de fond.

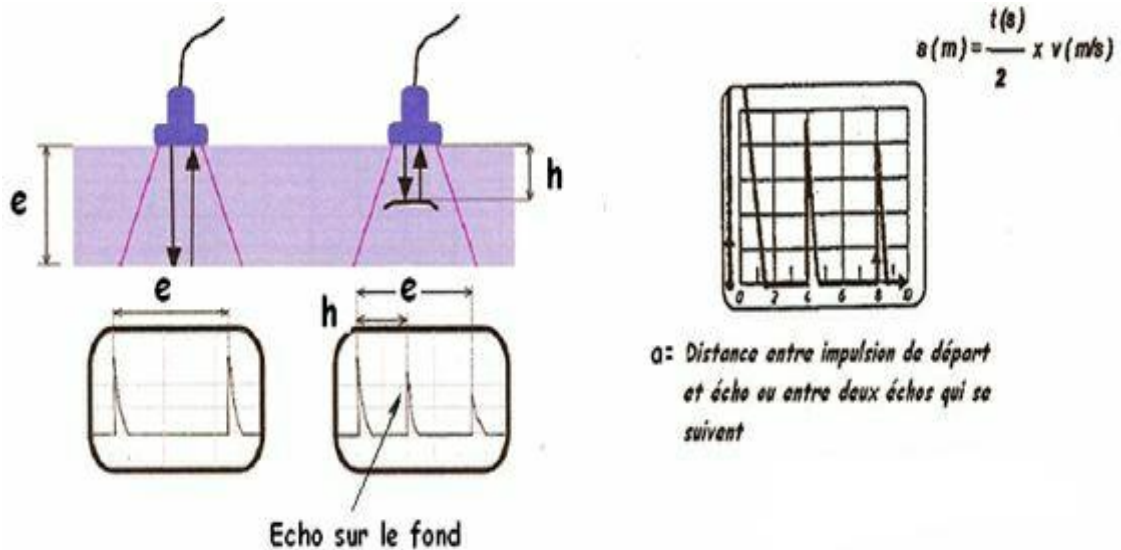


Figure 43: Schéma contrôle par ultrasons [37]

6-3-3- Les avantages et inconvénients :

- * Contrôle possible de compacité de la totalité d'un volume donné
- * Positionnement des indications détectées dans l'épaisseur
- * Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans.
- * Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation
- * Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle)
- * Nécessite absolument l'utilisation de blocs de référence difficiles à fabriquer.
- * Méthode impliquant un très haut niveau de technicité
- * Sensible à la géométrie (formes, rugosité, zones mortes) [37]

6-4-4- Domaine d'application :

Le contrôle par ultrasons est applicable à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent pas une trop forte atténuation. Les matériaux métalliques, thermoplastiques, composites, céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé.

Le contrôle ultrasonore est notamment utilisé pour le contrôle :

- * Des pièces moulées : retassures, vermiculaires, variations locales de structure, ségrégations, porosités.
- * Des pièces forgées : retassures, criques, repli de forge.
- * Des produits laminés et étirés : dédoubleurs, ségrégations.
- * En service : les défauts apparaissant en service tels que fissures ou corrosions

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

* Des soudures avant et après traitement thermique. le contrôle par ultrasons peut être appliqué avec profit aux soudures réalisées sur les aciers non alliés et faiblement alliés de nuance ferritique ainsi que sur les alliages légers.

Le contrôle des soudures sur aciers austénitiques est réalisable, mais nécessite la mise au point d'une procédure particulière. [38]

6-5- Le contrôle par courants Foucault (ET) :

6-5-1- Définition de de contrôle par courants Foucault :

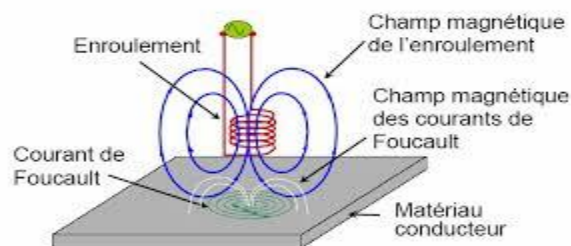
Le contrôle par courants de Foucault est largement utilisée dans la sidérurgie, l'aéronautique, l'automobile ou encore dans nucléaire. C'est l'une des nombreuses méthodes d'essais électromagnétiques utilisées en contrôles non destructifs (CND) faisant usage de l'induction électromagnétiques pour détecter et caractériser les défauts de surface et de sous surface dans les matériaux conducteurs et dans les métaux plus spécifiquement. [39]

6-5-2- Principe de contrôle par courants Foucault :

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur la création des courants électriques dans le matériau à contrôler et sur l'observation de leur comportement.

Par application d'un champ magnétique variable situé près d'un matériau conducteur, les courants de Foucault sont créés, ils sont des boucles fermées de courants induits circulant dans des plans perpendiculaires au flux magnétique qui leur a donné naissance. Ils circulent parallèlement aux spires de la bobine et au plan de la surface.

Les courants de foucault produisent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose au champ d'excitation. Le champ d'équilibre est alors affaibli, ce qui provoque un changement de l'impédance de la bobine. [40]



Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

Figure 44: Schématisation principe de courant foucault

6-5-3- Domaine d'application :

Cette méthode de CND est souvent utilisée pour détecter des défauts superficiels car les courants de foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau) ; elle est donc appliquée au contrôle de tôles. Mais elle s'avère très performante pour le contrôle de structures cylindriques (barres, tubes).

Les courants de foucault permettent également de déceler les variations de composition d'un alliage et même de mesurer des épaisseurs de revêtements. il s'agit ainsi d'une méthode présente dans l'ensemble des industries mais en particulier dans celles de la fabrication de tubes et de la maintenance. [41]

6-5-4- Les avantages et inconvénients :

- * Une préparation minimale des pièces est nécessaire.
- * Peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface.
- * La méthode peut être utilisée pour plus d'application que la seule détection de défauts.
- * La sonde d'essai n'a pas besoin d'entrer en contact direct avec la pièce testée.
- * Des normes de références sont nécessaires pour la configuration.
- * La finition et la rugosité de la surface peuvent interférer.
- * L'inspection des matériaux ferromagnétiques peut être influencée par la perméabilité magnétique.
- * Méthode restreinte aux matériaux conducteurs. [42]

6-6- Le contrôle par magnétoscopie (MT):

6-6-1- Définition de contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie est une technique de contrôle par aimantation qui s'applique par l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif sur les matériaux ferromagnétiques comme les aciers (sauf austénitiques), les fontes ...

6-6-2- Schéma de principe de contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie (MT) est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à soumettre un matériau à l'action d'un champ magnétique (soit par passage d'un champ magnétique, soit par passage de courant)

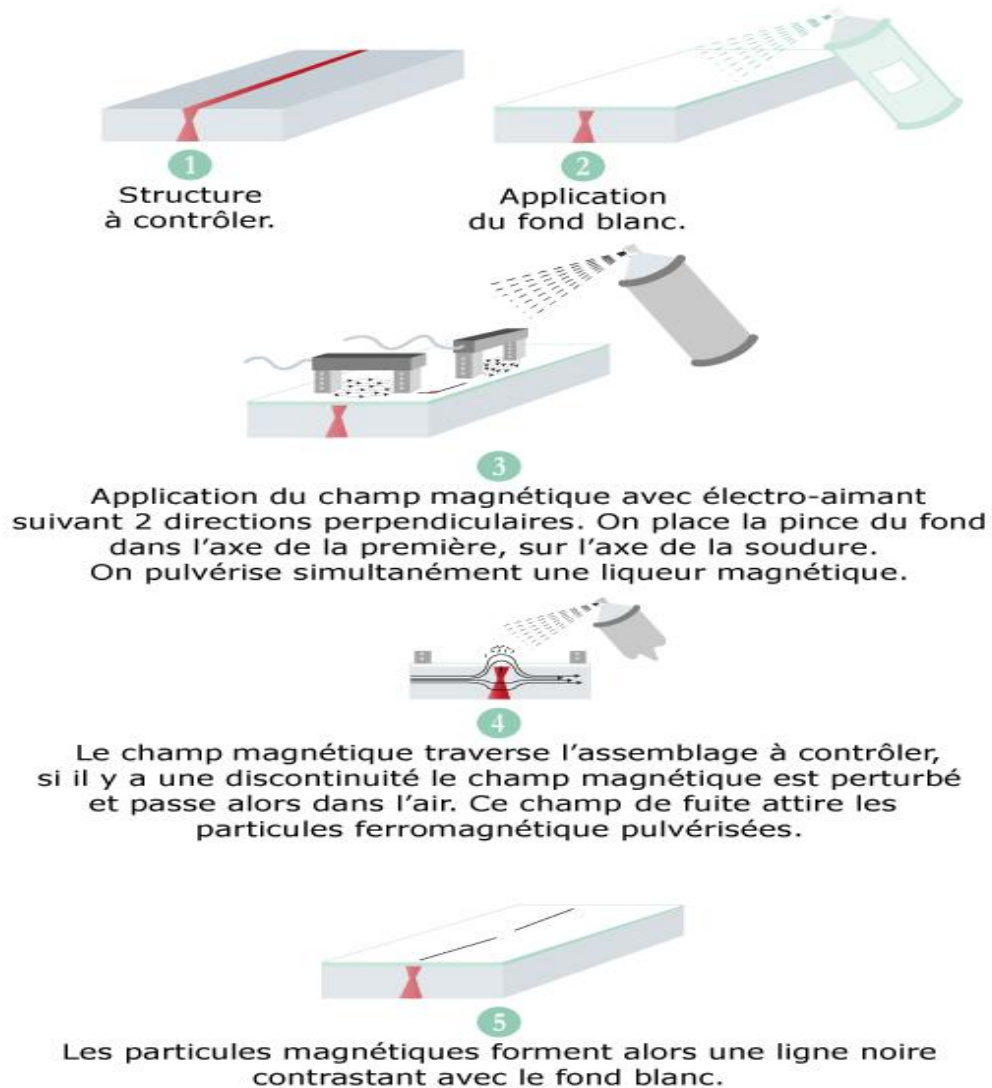


Figure 45 :le principe de contrôle par magnétoscopie

6-6-3- Domaines d'application de la magnétoscopie :

Le contrôle par magnétoscopie est utilisée pour :

- * des produits laminés et étirés (dédoublures débouchantes ,repliures , fissures sur les peaux tendues des produits emboutis ou cintrés)
- * des pièces moulées (criques dans les congés d'accordement, réseaux de fissures superficielles ...).
- * des soudures bout à bout ou d'angle
- * des pièces forgées (criques correspondant à des déchirures superficielles, tapures ou fissures comportant des fissures de décohésion ...) [43]

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

6-6-4- Les avantages et inconvénients :

- * Les indications de particules magnétiques sont produites directement sur le surface de la pièce où se trouve la faille.
- * La préparation de la surface est moins critique que dans l'inspections par ressuage
- * Des défauts de surface ou sous la surface peuvent être détectée.
- * Les grandes surfaces des pièces complexes peuvent être inspectées rapidement
- * Les pièces doivent être démagnétisées et nettoyées après inspection
- * Les surfaces doivent être relativement lisses
- * Les courants importants peuvent être nécessaires pour des pièces très imposantes
- * Seuls les matériaux ferromagnétiques peuvent être inspectés avec cette méthode. [44]

6-7- Contrôle par la thermographie infrarouge (TT) :

6-7-1- Définition de la thermographie infrarouge :

Le contrôle par thermographie infrarouge est une méthode d'essai non destructif basée sur la mesure des températures de surface qui met essentiellement en œuvre les transferts de chaleur par conduction et rayonnement thermique [45]

6-7-2- Principe de contrôle par thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge peut détecter grâce à des excitations thermiques et les observations des différentes températures de surfaces qui en découlent, des défauts en profondeur sur la cible visée la thermographie infrarouge devient alors un outil performant pour détecter les délaminages, les bulles d'air et la présence d'eau dans les matériaux composites. [46]

6-7-3- Les avantages et inconvénients :

- * Obtention de températures fiable des surfaces contrôlées pour les matériaux de forte émissivité (proche de 1)
- * Facilite de mise en œuvre
- * Conservation des clichés (fichiers informatiques)
- * Rapidité de mise en évidence des défauts (pendant le contrôle)
- * Températures peu fiables des surfaces pour les matériaux de faible émissivité
- * Contrôle possible uniquement sur des équipements déjà « alimentés » en chaleur (impossible à mettre en œuvre sur une pièce non raccordée ou pendant un arrêt de production)

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

* Fiabilité des contrôles dépendant fortement des conditions météorologiques (contrôle pendant la nuit ou par temps couvert et en l'absence de fortes chaleurs)

[47]

6-8- Contrôle par émission acoustique (RT):

6-8-1- Définition de contrôle par émission acoustique :

L'émission acoustique est une méthode prometteuse pour garantir la qualité des soudures. Cette technique non destructive peut être mise en œuvre pendant un processus de production pour tester la qualité des soudures. Le contrôle de qualité par émission acoustique en tant que méthode d'essai non destructif et comparative a été développé sur base du fait que chaque matériau présente des vibrations naturelles et que toutes les machines et les processus émettent des sons.[48]

6-8-2- Principe de l'émission acoustique

Les signaux d'émission acoustique sont des ondes élastiques transitoires générées par la libération rapide de l'énergie à partir de sources localisées dans un matériau de référence : ASTM E 1316

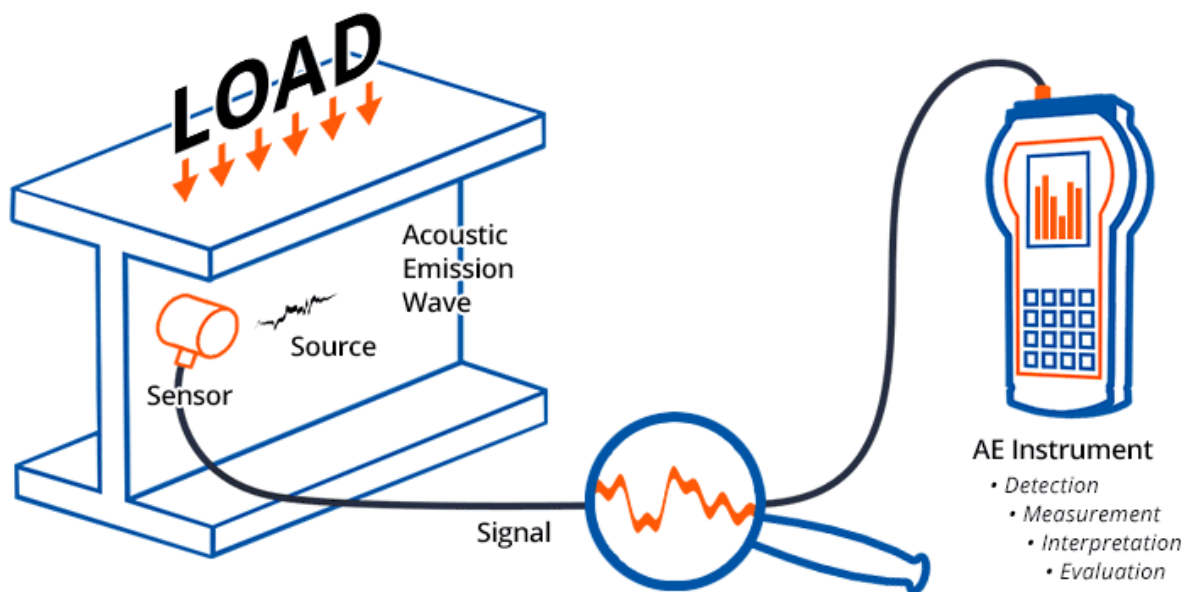


Figure 46: Principe de contrôle par thermographie infrarouge [49]

6-8-3- Domaines d'application :

Les champs d'applications de l'émission acoustique sont multiples :

Chapitre 02 : Généralité sur le contrôle non destructif

- * Contrôle de l'intégrité des équipements sous pression. L'émission acoustique est une alternative à l'épreuve hydraulique pour la requalification des équipements sous pression
- * Contrôle des structures industrielles telles que les réacteurs nucléaires
- * Contrôle en ligne des procédés de fabrication des matériaux
- * Surveillance des installations en fonctionnement
- * Détection des fuites
- * Détection de la corrosion
- * Applicable sur de nombreux matériaux (aciers, composites, céramiques, etc.)

6-8-4- les intérêts de la méthode :

L'émission acoustique présente de nombreux avantages parmi lesquels :

- * Le contrôle global de la structure (volumique)
- * La détection et localisation des défauts évolutifs
- * Le contrôle dynamique en temps réel dans les conditions de service ou de sollicitation.
- * Le suivi dans le temps
- * La prévention des risques industriels
- * Le contrôle des structures en service
- * la minimisation du temps d'intervention et d'immobilisation des installations

[50]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit les principes des techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel. Ces méthodes sont utilisables pour n'importe quel type de joints de soudures quel que soit le procédé de soudage utilisé, les contrôles non destructifs sont nécessaires pour qualifier les pièces à assembler.

Chapitre 03 :

Le ressuaqe

Chapitre 03 : Le ressuage

Introduction :

Le contrôle par ressuage apparut à la fin du XIX^e, fait constamment l'objet de nouveaux développements portant sur l'accroissement de la probabilité de détection des discontinuités et l'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité et de protection de l'environnement.

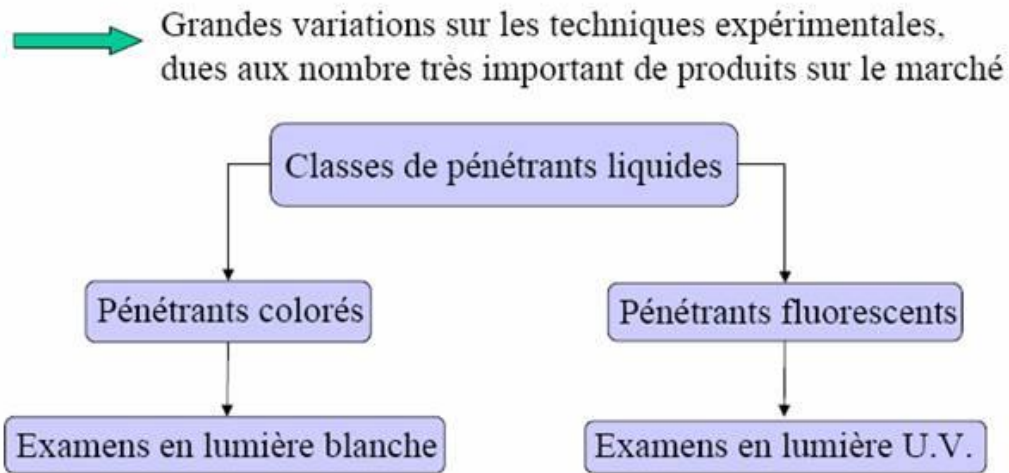
Le ressuage est la méthode d'essai non destructif (END) la plus largement utilisée sur les alliages métalliques et certain nombre de matériaux non métalliques pour la détection et la localisation des discontinuités ouvertes et débouchant à la surface de pièce à examiner .[51]

1- Définition de ressuage :

Le ressuage est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de pièces métalliques, essentiellement, mais aussi en céramique. Elle consiste à badigeonner (par immersion ou par pulvérisation électrostatique , parfois mais rarement , au pinceau) la cible avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge , qui pénètre dans les discontinuités .Après nettoyage de la cible , un révélateur est appliqué et , en faisant « ressuage » le liquide resté dans les fissures , va les révéler .[2]

2- Mise en œuvre de la méthode (Figure 47) :

Mise En Œuvre De La Méthode



- Pénétrants pré-émulsifiés, rinçables à l'eau
- Pénétrants à post-émulsification
- Pénétrants éliminables à l'aide d'un solvant approprié

[51]

Un contrôle par ressuage se décompose en plusieurs phases, qui peuvent être automatisées lorsque les pièces constituent de grandes séries notamment.

* **Nettoyage :**

La pièce contrôlée doit être propre afin que les porosités recherchées ne soient pas obstruées, et qu'il n'y ait pas d'incompatibilité dans l'utilisation des produits de ressuage et la surface du matériau. Par exemple les résidus d'huiles d'usinage doivent être éliminés ; mais sur les pièces en aluminium, les oxydes qui se forment au contact de l'air peuvent aussi poser des problèmes ainsi, cette phase qui paraît simple nécessite une grande rigueur car elle conditionne grandement la détection des anomalies.

* **Pénétrant :**

Un liquide pénétrant est appliqué sur la pièce. L'objectif de ce liquide est de pénétrer les anfractuosités (porosités, fissures, criques) par capillarité. Ce liquide est soit coloré (rouge vif), soit fluorescent. Le choix de ce liquide est primordial car il doit s'effectuer selon les caractéristiques du matériau et les dimensions des anomalies recherchées. De même le temps de pénétration doit être judicieusement établi.

A noter qu'il existe 2 grandes familles de pénétrants :

- lavables à l'eau ou éliminables par un solvant ;

Chapitre 03 : Le ressuage

- et ceux dits « post – émulsion » (qui deviennent lavables ou éliminables après émulsification grâce à un émulsifiant).

* Révélateur :

Le surplus de pénétrant restant à la surface est supprimé. Puis une couche mince d'un produit dit « révélateur » est appliquée. Ce révélateur agit comme un buvard qui absorbe le pénétrant qui était dans les anomalies. On dit que le révélateur fait « ressuer » le pénétrant, faisant ainsi apparaître en surface les anomalies.

Il existe quelques grandes catégories de révélateurs :

- ceux dit « secs » : il s'agit d'une poudre très fine blanche utilisable dans le cas d'un pénétrant fluorescent ;

*Observation puis nettoyage :

L'observation peut se faire sous lumière naturelle (ou artificielle) si le pénétrant est coloré, ou sous rayonnement ultraviolet (UV-A) si le pénétrant est fluorescent.

Les conditions d'éclairage sont essentielles à une bonne détection des anomalies, mais également au confort de travail de l'opérateur. Ainsi l'ergonomie du poste de travail doit être pensée pour permettre au contrôle d'assurer un contrôle dans de bonnes conditions !

Un nettoyage est généralement nécessaire pour faire disparaître les traces de pénétrant ou de révélateur. [52]

3- Objectifs de la méthode :

Cette méthode de contrôle non destructif permet la détection de discontinuités superficielles débouchant apparues lors de la fabrication, la réparation ou l'exploitation du produit sur tout type de matériaux non poreux. elle peut être mise en œuvre sur des soudures ou des composants constitutifs relatifs aux équipements sous pression , réservoirs de stockage , canalisations de transport , charpentes métallique et ouvrages d'art , aux appareils et accessoires de levage , aux véhicules et composants ferroviaires [53]

4- Principe de la méthode :

Le ressuage consiste à appliquer un pénétrant (liquide coloré ou fluorescent) sur la surface à contrôler.

Chapitre 03 : Le ressuage

Le liquide pénètre à l'intérieur des défauts débouchant (craques, fissures, porosités, piqûres). Après élimination par lavage de l'excès de pénétrant, la surface est recouverte d'une fine couche de révélateur qui, agissant comme un buvard, « aspire » le pénétrant contenu dans les défauts et donne une tache colorée.

5- Les intérêts de la méthode :

- * Peut – être effectué sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux, de géométrie et de dimensions quelconques
- * Facilité de mise en œuvre
- * Bonne sensibilité de détection des défauts avec appréciation de leur longueur
- * Ordre de grandeur de la sensibilité de détection d'une fissure : longueur minimale 0.5 millimètres, largeur 10 micro mètre
- * Méthode globale autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce (l'orientation des défauts est sans influence) [54]

6- Schématisation de ressuage :

- * **Nettoyer, dégraisser et sécher les pièces à traiter.**

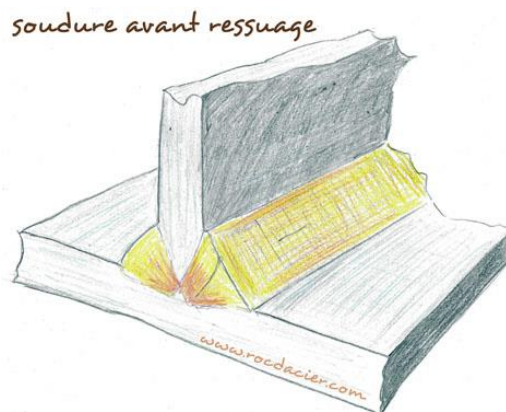


Figure48: Ressuage, nettoyage et dégraissage des pièces

* Application du pénétrant

Appliquer un produit pénétrant. Le produit pénétrant peut être coloré ou fluorescent. Ce produit a pour particularité de pouvoir s'insérer par capillarité dans les interstices les plus fins. Beaucoup de produits pénétrants sont de couleur rouge. Au niveau de la sécurité, il est important de rappeler que ce produit est inflammable et parfois nocif (prendre des dispositions de sécurité pour effectuer un contrôle avec cette méthode : masque, s'éloigner des poste à souder, ...). Les produits fluorescents sont utilisés sous rayons

Chapitre 03 : Le ressuage

ultra – violets pour la détection. Certains pénétrants sont à post – émulsion et auront une opération supplémentaire d'émulsifiassions avant le rinçage.

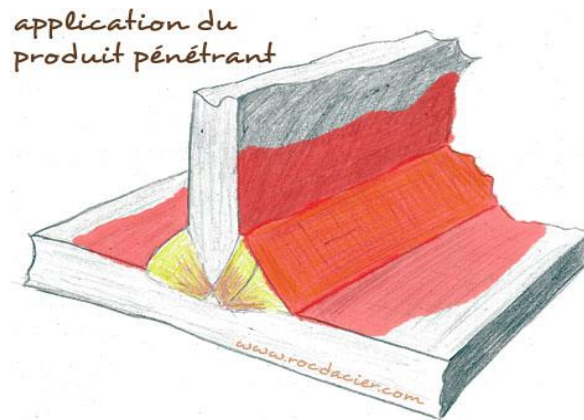


Figure 49: Ressuage, application du pénétrant

* Rinçage du pénétrant

Laver la pièce à l'eau ou à l'aide d'un solvant pour enlever les surplus de pénétrant. Le pénétrant prisonnier dans les défauts ne partira par l'eau du fait de sa densité plus importante. Il ne faut pas utiliser de jet d'eau trop puissant pour rincer la pièce, ce qui pourrait chasser le pénétrant.

Sécher la pièce

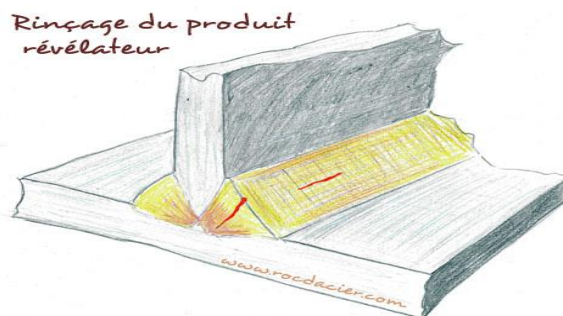


Figure 50: Ressuage , rinçage du pénétrant

* Application du révélateur

Application un produit révélateur, celui – ci sera un révélateur sec, si un pénétrant fluorescent a été utilisé, sinon on utilisera un révélateur à base de solvant (révélateur humide non aqueux). Les révélateurs sont des poudres très fines, blanches, qui fonctionnent comme une éponge

Chapitre 03 : Le ressuage

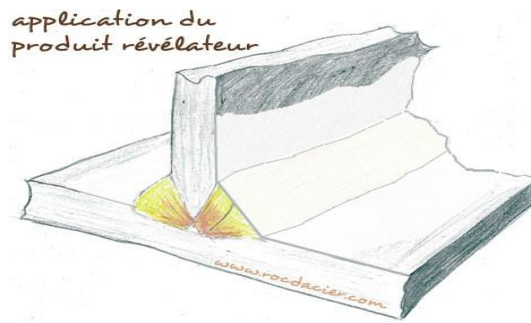


Figure 51: Ressuage, application du révélateur

* Apparition des éventuels défauts

Une fois appliqués, les révélateurs vont faire ressortir le pénétrant qui avait été infiltré dans les défauts. si celui – ci était rouge, une tache rouge bien visible sur fond blanc fera son apparition rapidement. [55]

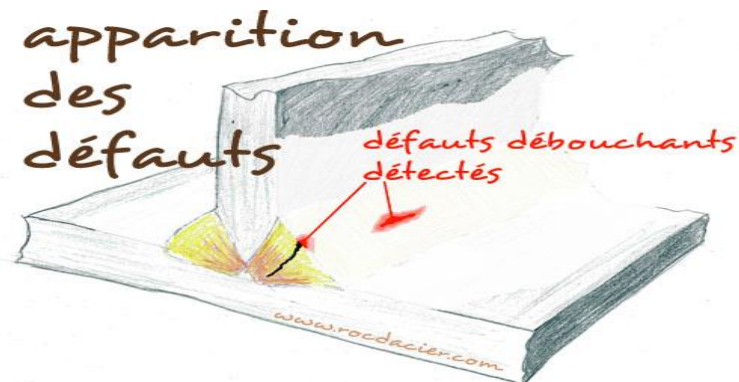


Figure 52: Ressuage, apparition des défauts [56]

7- Les différents produits de ressuage :

* Ressuage coloré (Tableau 04):



Produit	Caractéristiques	conditionnement
---------	------------------	-----------------

Chapitre 03 : Le ressuage

FLUXO P125	Pénétrant coloré PMUC- sensibilité 2 très bonne lavabilité, idéal états de surface rugueux	Aérosol 300 ml et 500ml – bidon 5 et 10l – fût 200l
FLUXO P139	Pénétrant coloré – sensibilité 2 bonne accroche , idéal états de surfaces lisses ou parois verticales	Aérosol 500 ml – bidon 5 l
FLUXO P172	Pénétrant coloré biodégradable – sensibilité 2	Aérosol 500 ml – bidon 5 l
FLUXO R175	Révéléateur blanc PMUC	Aérosol 300 ml – et 500 ml – bidon 5 et 10 l
FLUXO R180	Révéléateur blanc basses températures jusqu'à – 10°C ou température ambiante, séchage très rapide	Aérosol 500 ml
FLUXO S190	Solvant de dégraissage PMUC	Aérosol 300 ml – et 500 ml – bidon 5l – fût 200 l
FLUXO N130	Nettoyant / émulsionneur PMUC	Aérosol 500 ml

* ressuage fluorescent (Tableau 05):

Chapitre 03 : Le ressuage



Produit	Caractéristiques	Conditionnement
FLUXO 8702	Pénétrant fluorescent – sensibilité 2	Aérosol 500 ml – bidon 5 l – fût 200 l
FLUXO P502	Pénétrant fluorescent base aqueuse – sensibilité 2	Bidon 1 et 10 l – fût 200 l
FLUXO P501	Pénétrant fluorescent base aqueuse – sensibilité 1	Bidon 10 l – fût 200 l
FLUXO RD1	Révélateur poudreux	Pot 1 kg
FLUXO R175	Révélateur blanc PMUC	Aérosol 300 ml et 500 ml – bidon 5 et 10 l
FLUXO R180	Révélateur blanc , basses températures jusqu'à - 10° c ou température ambiante , séchage très rapide	Aérosol 500 ml
FLUXO R190	Solvant de dégraissage	Aérosol 300 ml et 500 ml – bidon 5 l – fût 200 l
FLUXO N130	Nettoyant / émulsionneur	Aérosol 500 ml

* Ressuage haute température « 50°C – 200 °C » (Tableau 06):

Chapitre 03 : Le ressuage



Produit	Caractéristiques	Conditionnement
FLUXO PHT	Pénétrant coloré haute température	Aérosol 300 ml
FLUXO PHT	Révéléateur haute température	Aérosol 300 ml
FLUXO NHT	Nettoyant haute température	Aérosol 300 ml

[56]

8- Domaine d'application :

Le ressuage permet de détecter des défauts de compacité débouchant en surface sur des matériaux non poreux. le ressuage est utilisé pour le contrôle des pièces moulées, des pièces forgées, après rectification et / ou traitement thermique de pièces mécaniques, sur produits laminés ou étirés en service.

Les fissures de fatigue et de corrosion peuvent si les conditions sont favorables être mises en évidence par ressuage.

Avant soudage, il peut être utilisé pour effectuer un contrôle de toutes les surfaces devant recevoir des soudures (face des chanfreins par exemple) revêtements ou rechargements.

Pendant soudage, il peut être mis en œuvre par exemple : lors d'une reprise envers pour s'assurer de l'élimination complète de défauts pouvant subsister à la racine du joint

Chapitre 03 : Le ressuage

(manque de pénétration, fissures ...), entre passes : dans ce cas, le contrôle peut être effectué après la 1 ère passe, puis toutes les passes, ou toutes les trois passes par exemple (température < 200 °c)

Après soudage, il permet la détection des défauts suivants pourvu qu'ils débouchent à la surface : fissures, piqûres, retassures, certains manques de fusion, et les débordements. [57]

9- Le choix du révélateur :

Il existe deux familles de révélateur :



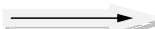

* **Sec (poudre) ou liquide non aqueux**

- Surface rugueuse
- Pièces de formes complexes : filetage, rainure
- Pièces de grandes dimensions

* **Humide : Liquide à support aqueux ou hydrosoluble**

- Surface polie et lisse
- Grand nombre de petites pièces
- Pour la recherche de discontinuités larges et peu profondes

10- Caractéristiques des matériaux traités par le ressuage :

- Sensibilité, défauts recherchés  Très fins
- Nature du matériau  Uniquement non poreux
- Dimension des pièces  Grande dimension
- Géométrie des pièces  Géométrie complexe

11- normes et directives spécifiques :

Différentes normes décrivent et codifient le contrôle par ressuage, notamment (liste non limitative) :

- * EN ISO 12706 – Essais non destructifs – terminologie – termes utilisés en contrôle par ressuage
- * EN ISO 3452-2 – Essais non destructifs – examen par ressuage – partie 2 : essai des produits de ressuage
- * EN ISO 3452-3- Essais non destructifs – examen par ressuage – partie 3 : pièces de référence
- * EN ISO 3452-4- Essais non destructifs – examen par ressuage – partie 4 : équipement

Chapitre 03 : Le ressuage

- * EN 10228-2- Essais non destructifs des pièces forgées en acier – partie 2 : contrôle par ressuage
- * EN 10246-11- Essais non destructifs des tubes en acier – partie 11 : contrôle par ressuage des tubes en acier sans soudure et soudés pour la détection d'imperfections de surface
- * EN 1289 – Contrôle non destructif des assemblages soudés – contrôle par ressuage des soudures
- * EN 1371-1- fonderie – contrôle par ressuage – partie 1 : pièces moulées au sable, en coquille , par gravité et basse pression
- * EN 1371-2- fonderie – contrôle par ressuage – partie 2 : pièces en moulage de précision (cire perdue)
- * De plus , certaines directives émanant de gros donneurs d'ordre de l'industrie , constituent les bases de ce contrôle , comme L'EN4179- série aérospatiale – qualification et agrément de personnels pour les contrôles non destructifs , qui édites les exigences qui sont reprises par les NANDTB (national authority non destructive testing board) européennes et américaines (les USA utilisent la norme NAS 410 dans le secteur aéronautique et spatial) .

12- Interprétation des défauts :

Quel que soit le type de ressuage (coloré ou fluorescent) les indications qui peuvent être décelées sont soit :

- * de forme arrondie
- * de forme linéaire

En ressuage coloré, l'indication se manifeste à l'œil. dans le cas d'un ressuage fluorescent, une lampe ultraviolette est nécessaire.

L'importance du défaut est caractérisée par la grosseur de l'indication. [58]

13- Les avantages et inconvénients :

- Avantages :

- * Facilité de mise en œuvre avec les produits pré émulsionnés
- * Facilité de mise en œuvre sur les chantiers avec les produits pré – émulsionnés
- * Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant

Chapitre 03 : Le ressuage

- * Contrôle relativement économique et rapide
- * Contrôle complémentaire aux autres techniques de contrôles

- Inconvénients :

- * Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués
- * Impossibilité d'évaluer la profondeur des défauts
- * Impossibilité de contrôler les matériaux poreux
- * Nettoyage et dégraissage rigoureux des pièces avant le contrôle
- * Les opérateurs doivent être expérimentés pour certaines techniques
- * Produits inflammables, volatils et nocifs
- * Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout
- * Difficilement automatisable

[59]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous allons vous parler de contrôle non destructif par ressuage, ce procédé utilisé pour détecter des défauts débouchant ou des défauts de surface, le ressuage utilise dans des nombreux domaines tel que : l'automobile, la fonderie, la mécanique, tuyauterie ... à cause de :

- * coût faible
- * facilité de mise en œuvre
- * facilité de lecture du défaut

Chapitre 04 :

Étude expérimentale : Contrôle par ressuage des joints soudés

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

Introduction :

Par opposition aux autres méthodes de contrôle non destructif, le ressuage peut être considéré comme une méthode « globale » pour tous les défauts débouchant en surface, quelle que soit la nature des matériaux.

L'objectif du contrôle est de :

Garantir la bonne exécution de l'assemblage des pièces à soudé il s'applique à :

- * La prévention des défauts
- * La détection et localisation des défauts
- * L'évaluation du degré de gravité des défauts
- * L'acceptation ou le refus de la pièce, suivant l'interprétation des défauts

Le contrôle doit s'exercer à trois moments bien distincts :

- * Avant soudage
- * Pendant soudage
- * Après soudage

Le contrôle après soudage a pour but de vérifier que le joint exécuté est bien conforme aux exigences de la construction.

Il portera sur :

- * La mise en œuvre des contrôles appropriés en conformité avec la réglementation
- * L'analyse des résultats des divers contrôles effectués

1- Présentation du matériau acier ordinaire S235 JR (E24) :

Acier de construction non allié d'usage générale, non destiné aux traitements thermiques pièces mécaniques peu sollicitées et ne nécessitant pas de ténacité spéciale.

1-2- Domaines d'utilisation :

Eléments de fixation, axes, arbres de transmission, construction métallique ... éléments mécano – soudés, bâtis de machine.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

1-3 Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier (Tableau 07):

AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027 - 1
E24	ST37 – 2		S 235 JR

* Propriétés mécaniques moyennes (Tableau 08):

R Mpa N/mm ²	Re Mpa N/mm ²	A %	Dureté HB
340/510	≥ 175 / 235	17/26	

* Composition chimique % (Tableau 09):

C	S	Mn	P	N
0.17 Maxi	0.045 Maxi	1.40 Maxi	0.045 Maxi	0.009 Maxi

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

2 - Les dessins techniques des pièces soudées :

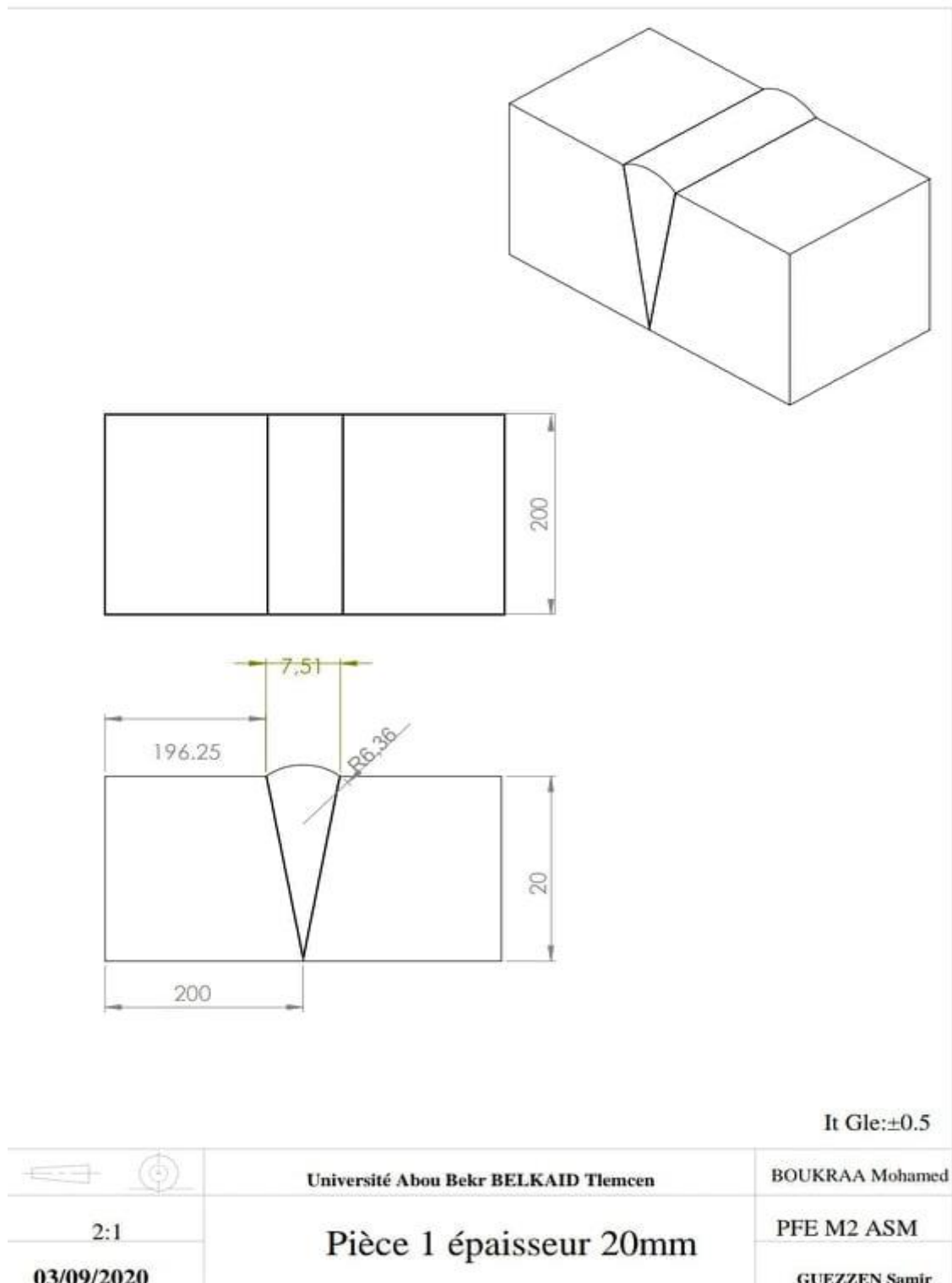


Figure 53 : Dessin de définition de la pièce 1

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

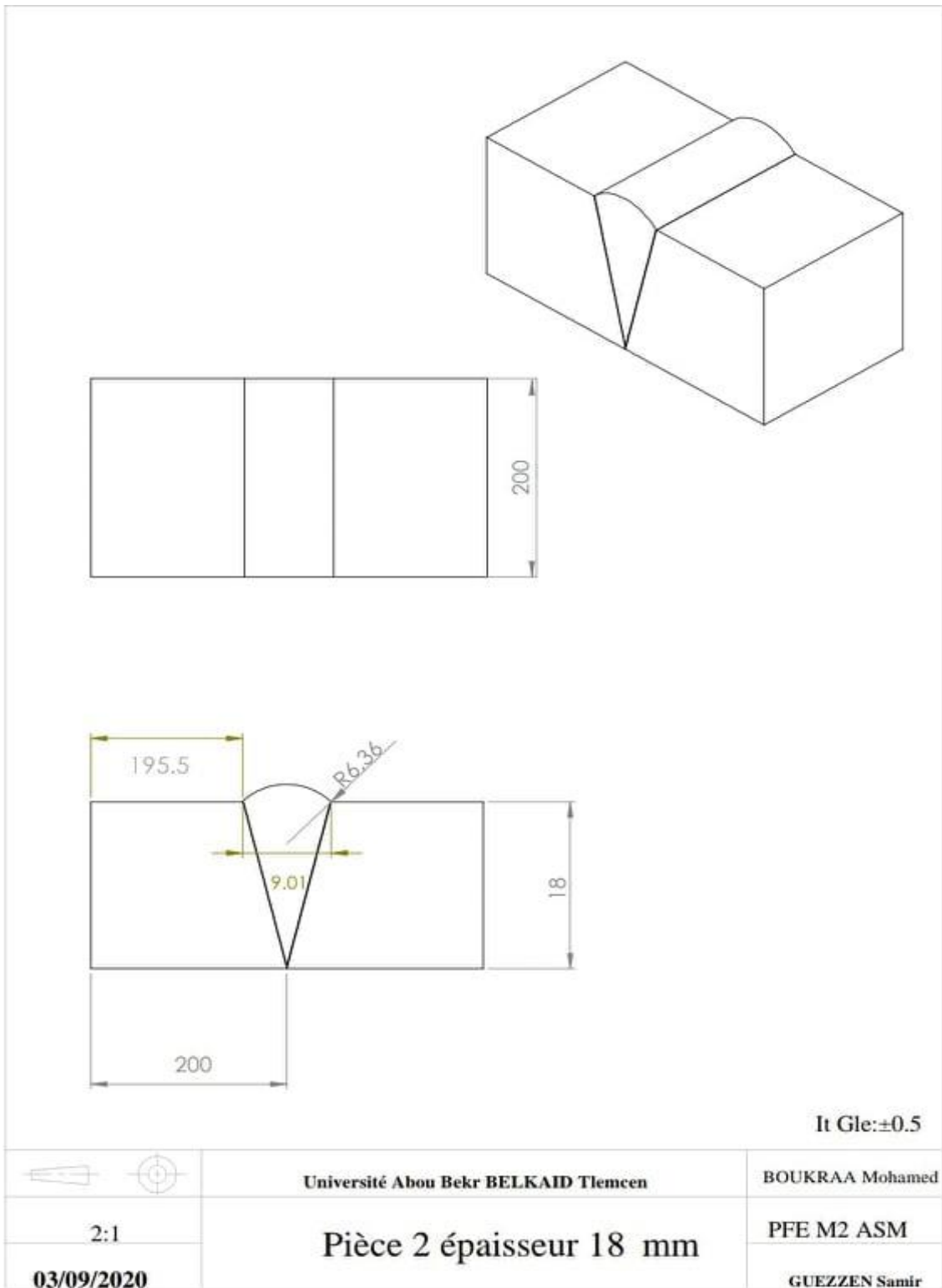


Figure 54 : Dessin de définition de la pièce 2

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

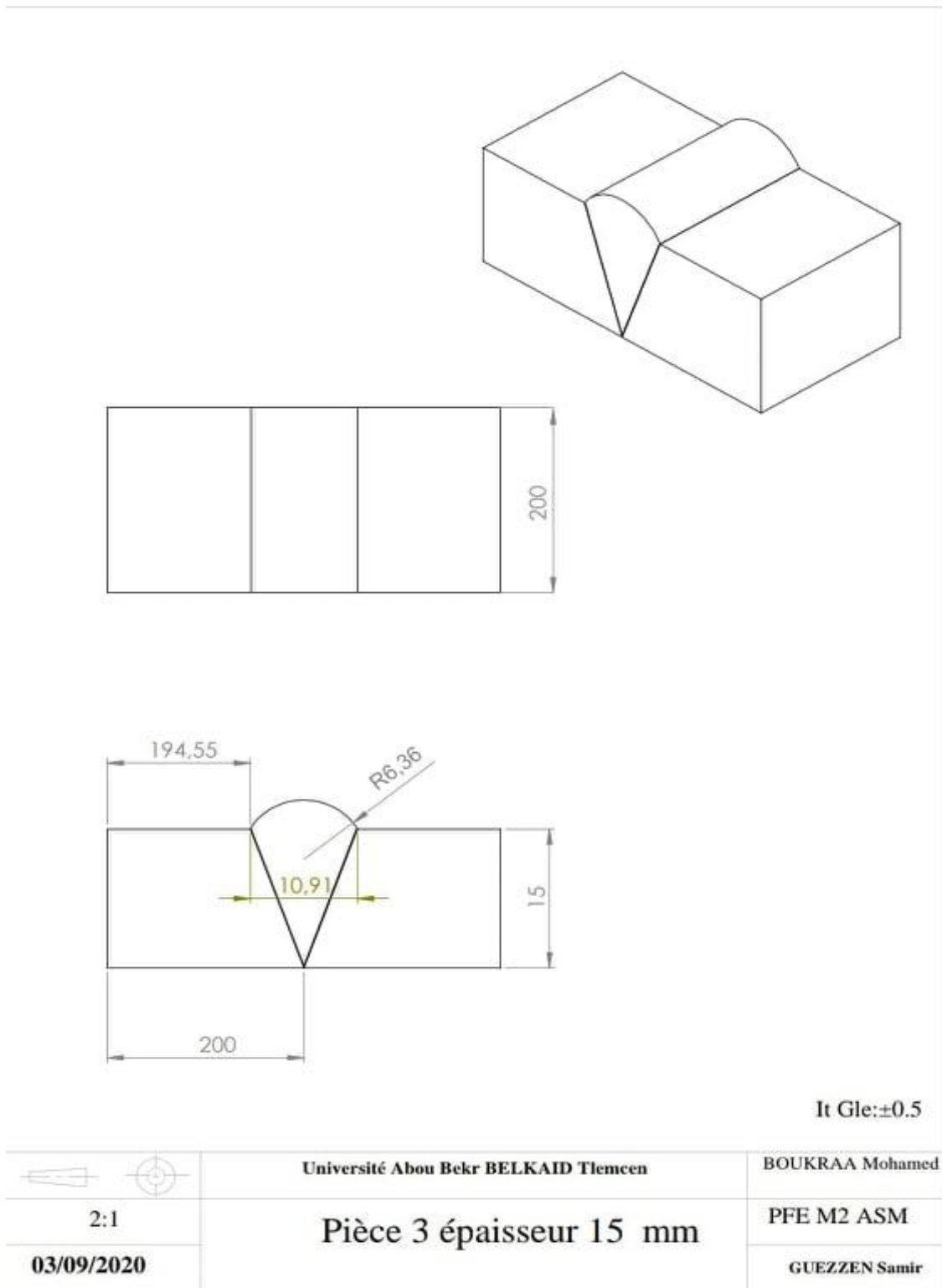


Figure 55 : Dessin de définition de la pièce 3

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

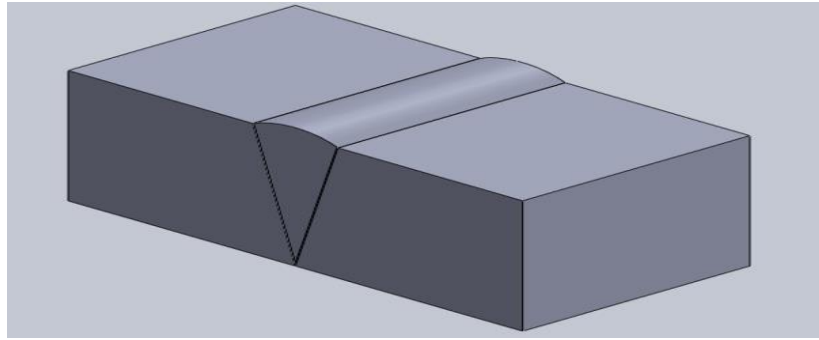


Figure 56 : Dessin 3D de pièce 1

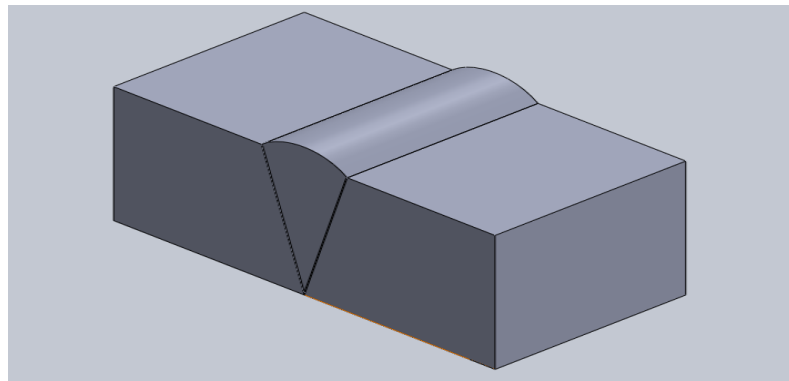


Figure 57 : dessin 3D de pièce 2

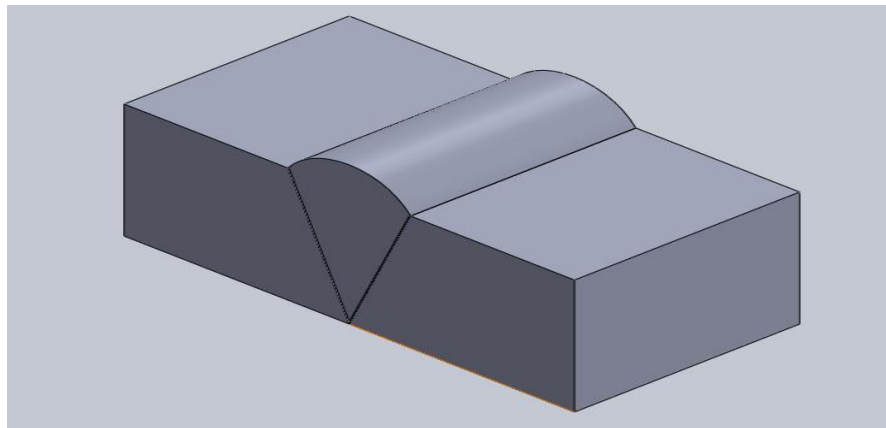


Figure 58 : dessin 3D de pièce 3

3 - Préparation des échantillons :

Dans cette étude expérimentale j'ai travaillé sur 3 échantillons de même nature de matériau et des épaisseurs différentes (15 mm, 18 mm, 20 mm), j'ai soudée les pièces sans faire le chanfrein avec le procédé du soudage à l'arc.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

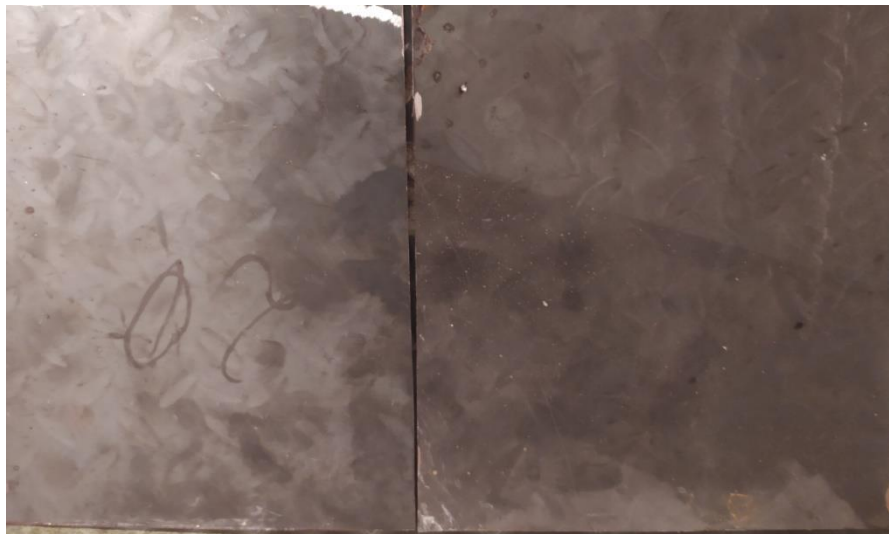


Figure 59 : Forme de l'échantillon avant le soudage



Figure 60 : Forme de l'échantillon après le soudage

4- Présentation du métal d'apport :

E6013 électrode enrobée rutile pour le soudage à l'arc, excellent amorçage et réamorçage. Appréciée pour sa facilité d'utilisation dans toutes les positions.

4-1- Domaines d'utilisation :

- * Chaudronnerie
- * Tuyauterie
- * Réservoirs
- * Serrurerie
- * Constructions métalliques

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

4-2- Composition chimique et mécaniques du métal d'apport (Tableau 10):

EN 499	AWS A 5.1	DIN 1913
E 42 0 RC 11	E6013	E 43 21 RC 11

* Caractéristiques chimiques : selon la norme EN ISO 6847 (Tableau 11):

C	0.06 %
Mn	0.50 %
Si	0.40 %
S	0.025 %
P	0.025 %

* caractéristiques mécaniques : selon la norme AFNOR NF 1594 .1

(Tableau 12):

Re	440 Mpa
Rm	540 Mpa
A 5 d	24 %
Kv 0° c	50 j

5- Le procédé du soudage utilisé :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée, soudage manuel ou soudage à la baguette, est l'un des procédés de soudage les plus utilisés. Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort effet calorifique provoquant la fusion de l'électrode.

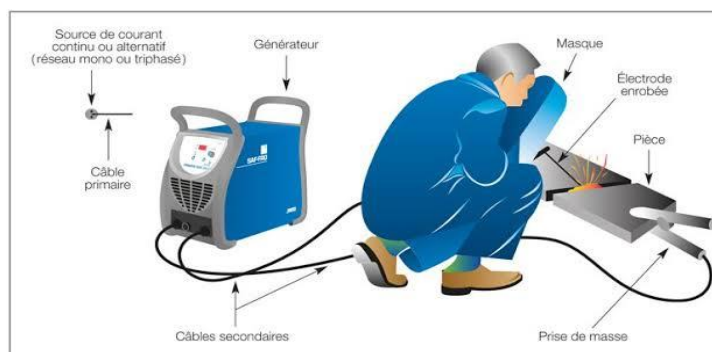


Figure 61 : Le principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

6- Contrôle par ressuage :

Le contrôle par ressuage (pénétrant testing en anglais, d'où son abréviation officielle : PT) est une méthode de contrôle non destructif très utilisée dans l'aéronautique, l'industrie de production d'énergie, les transports et les prothèses chirurgicales.

Un liquide pénétrant et coloré ou fluorescent est infiltré dans les défauts, puis ensuite mis en valeur par un produit révélateur. Cette opération permet d'observer des défauts débouchant tels que des piqûres, fissures, retassures ...

6-1- Mode opératoire du ressuage :

6-1-1- Les produits de ressuage :

Pour réaliser opération de ressuage j'ai utilisé 3 produit : le produit de nettoyage N-120 , le pénétrant , le révélateur .



Figure 62 : Les produits utilisés dans opération de ressuage

6-1-2- Nettoyage des pièces :

- Nettoyer, dégraisser et sécher les pièces à traiter avec le produit de nettoyage N- 120.
- L'opération de nettoyage consiste à enlever toute crasse, graisse, trace de repérage, huile ou autre substance pouvant masquer les indications du test à l'aide d'un chiffon propre qui contient un liquide solvant N-120.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

- Cette opération elle a pour le but d'obtenir une surface propre pour permettre au pénétrant à Persée les défauts.



Figure 63 : Nettoyage des pièces

6-1-3- Application du pénétrant :

Le produit pénétrant peut être coloré ou fluorescent. Ce produit a pour particularité de pouvoir s'insérer par capillarité dans les interstices les plus fins.

Généralement ces produit elle à une couleur rouge, ce produit est inflammable et parfois nocif donc il faut mettre les moyenne de protection (masque, des gants...), j'ai laissé le temps de pénétration d'environ 15 min.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »



Figure 64 : Application du produit de ressuage « pénétrant »

6-1-4- Rinçage du pénétrant :

Laver les pièces avec un chiffon qui contient de l'eau ou à l'aide d'un solvant comme N-120. Pour enlever les surplus de pénétrant.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »



Figure 65 : Elimination du pénétrant

6-1-5- Application du révélateur :

Après le séchage des pièces, j'ai appliqué le révélateur sur la surface des pièces avec un temps de révélation d'environ 5 min.

Le révélateur fait ressortir le pénétrant qui avait été infiltré dans les défauts.

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »



Figure 66 : Application du produit de ressuage « révélateur »

7- L'interprétation des résultats obtenus :

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

Après application du produit révélateur avec un temps de révélation environ 5 min, j'ai remarqué quelques souffleurs éparpillés sans incidence sur les joints de soudure et des parasites et soufflure débouchant.

La différence que j'ai remarqué entre les 3 pièces contrôler avec le ressuage, c'est que la pièce de l'épaisseur 15 mm est la plus affecté par les défauts débouchant par port à l'autre pièce. Cette opération de ressuage elle a donné un bon résultat pour la pièce de 15 mm à cause de faible épaisseur par port à l'autre pièce 18 mm et 20 mm. Ces les

Chapitre 04 : Etude expérimentale « Contrôle par ressuage des joints soudés »

épaisseurs des pièces est plus grande il faut passe à une autre méthode comme le (radiographie, ultrasons ...).



Figure 67 : Les défauts détectés dans les pièces après ressuage.

Conclusion :

Les techniques de détection des fissures sont nombreuses mais certaines d'autre elles sont coûteuses donc difficiles à réaliser en Algérie. L'utilisation de la méthode de contrôle par ressuage est une bonne technique parce que facile à utiliser avec une économie de temps et l'argent.

Conclusion général

Conclusion générale :

Dans cette étude j'ai montré les principaux procédés de soudage et les différents méthodes de contrôle non destructif. Par la suite j'ai traité le procédé de CND par ressuage bien détaillé.

Pour l'étude expérimentale, j'ai utilisé le procédé de ressuage sur 3 pièces différentes dans épaisseurs (15 mm, 18 mm, 20 mm), avec le même matériau (tôles en acier) soudés avec le procédé de soudage à l'arc électrique. Cette opération a révélé quelques défauts sur les pièces soudées qui sont plus significatif dans la pièce la moins épaisse.

Liste des références :

- [1] introduction générale ; thesis.univ.biskra.dz ; consulter le 14/05/2020 à 13.25
- [2] procédés de soudage – unitheque.com ;www.unitheque.com ;consolter le 14/05/2020 à 14.00
- [3] soudage de métaux : les principaux procédés – L’usine nouvelle ; https : //www.usinenouvelle.com ; consulter le 14/05/2020 à 14.20
- [4] cour sur le soudage chalumeau – soudage OA – soudage oxyacétylénique – Rocardier ; https : // www.rocdacier.com ; consulter le 14/05/2020 à 15.30
- [5] cours sur le soudage à l’arc électrode enrobée ! Rocardier ; https : // www.rocdacier.com ; consulter le 14/05/2020 à 15.40
- [6] soudage prof 3 ; Ipmei.com ; consulter le 15/05/2020 à 12.50
- [7] procédé de soudage TIG / SAF – FRO ;https://www.saf-fro.com ;consolter le 15/05/2020 à 14.50
- [8] cours sur la soudure TIG (soudage tungsten inert gas) – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 15/05/2020 à 18.53
- [9] Qu’est – ce que le soudage TIG ? – fronius international ; https :www.fronius.com ; consulter le 15/05/2020 à 19.01
- [10] procédé de soudage MIG – MAG / SAF – FRO ; <https://www.saf-fro.com> consolter le 16/05/2020 à 18.07
- [11] Soudage MIG – MAG – wikipédia ; https : // fr.m.wikipedia.org ;consulter le 16/05/2020 à 18.23
- [12] cours sur la soudure MIG (semi – automatique ou automatique) – rocdacier ; consulter le 16/05/2020 à 19.40
- [13] Qu’est – ce que le soudage MIG / MAG ? – fronius ; https : // www.fronius.com ; consolter le 18/05/2020 à 12.23
- [14] procédé de soudage à l’arc submergé (AS) / saf – fro ; https : // www.saf-fro.com ;consulter le 18/05/2020 à 12.56
- [15] le soudage sous arc submergé – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 18/05/2020 à 14.00
- [16] introduction au soudage laser ; <https://www.novika.ca> ; consulter le 20/05/2020 à 13.01

- [17] soudage laser : la soudure au laser , technique – poste à souder – ooreka.fr ; consulter le 20/05/2020 à 13.24
- [18] le soudage laser – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 20/05/2020 à 13.58
- [19] structure métalliques – pdf ; doc player.fr ; consulter le 22/05/2020 à 12.00
- [20] défauts des soudures – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> /defauts des soudures ; consulter le 22/05/2020 à 12.03
- [21] les principaux défauts et risques liés au soudage ; <https://eduscol.education.fr> ; consulter le 22/05/2020 à 13.36
- [22] contrôle non destructif ressuage magnétoscopie ; radiographie ... USTO ; consulter le 02/06/2020 à 9.30
- [23] Jacques Dumont – Fillon ingénieur de l'école centrale de paris ancien directeur technique de l'institut de recherches de sidérurgie (IRSID) ; consulter le 02/06/2020 à 9.32
- [24] contrôle non destructif – wikipédia ; <https://fr.m.wikipedia.org> ; consulter le 02/06/2020 à 9.38
- [25] A LAKHDARI ; A CHERIET ; MFELIACHI ; modélisation 3D d'un capteur matriciel à courants de foucault par la MVF , CGE07 , EMP , algerie ; 12-13 avril 2011 ; consulter le 02/06/2020 à 9.40
- [26] F GAUTHIER ; « les rails du métro sous le regard des courants de foucault » mesures physiques ; mesures 750 , décembre 2002 ; consulter le 02/06/2020 à 9.45
- [27] Mag mat ; le contrôle non destructif ; une vue d'ensemble des différentes techniques dossier technique ; N°20 , octobre – décembre 2006 ; consulter le 02/06/2020 à 10.08
- [28] AISSANI NACERADDINE ; « contrôle non destructif (cnd) par courants de foucault (cf) utilisation des capteurs magnétiques à très hautes sensibilité » ; université de m'sila master ingénierie des systèmes électromécaniques :S.n ; 2015 ; consulter le 02/06/2020 à 10.30
- [29] la norme API 1104 , American petroleum institute (septembre 1999) ; consulter le 02/06/2020 à 10.31

- [30] contrôle visuel , méthode de contrôle non destructif (CND) – savoy control ; <https://www.savoycontrol.fr> ; consulter le 03/06/2020 à 9.39
- [31] examen visuel des soudures – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 03/06/2020 à 9.55
- [32] Qu'est – ce que le ressuage ?- alticontrôle .com ; consulter le 04/06/2020 à 9.41
- [33] cours sur le ressuage – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 04/06/2020 à 11.10
- [34] controles par radiographie industrielle / SC/France ; <https://www.scifrancesa.fr> ; consulter le 05/06/2020 à 9.38
- [35] controles CND ; sti-lycee-schwilgue.com ; consulter le 05/06/2020 à 10.09
- [36] radiographie (RT) – cofrend ; <https://www.cofrend.com> ; consulter le 05/06/2020 à 10.43
- [37] L'examen des soudures par radiographie – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 05/06/2020 à 11.02
- [38] L'examen des soudures par ultrasons – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 06/06/2020 à 10.16
- [39] contrôle non destructif par ultrasons – slide share ; consulter le 06/06/2020 à 10.43
- [40] le contrôle des pièces par courants metal blog – ctif.com ; consulter le 07/06/2020 à 11.31
- [41] courants de foucaults (ET) confrend ; <https://www.confrend.com> ; consulter le 07/06/2020 à 12.09
- [42] essais par courants de foucault (CF) – essais non destructifs-uberspec ; <https://uberspec.com> ; consulter le 11/06/2020 à 10.23
- [43] Qu'est – ce que la magnétoscopie ? alticontrôle ; <https://www.alticontrôle.com> ; consulter le 11/06/2020 à 11.10
- [44] inspection par magnétoscopie (MPI) essais non destructifs – uberspec ; <https://uberspec.com> ; consulter le 11/06/2020 à 12.18
- [45] www.intercontrôle.com /Qu'est ce que le contrôle non destructif (CND) ? ; consulter le 13/06/2020 à 10.07

- [46] contrôle non destructif – site internet ; web.lerelaisinternet.com ; consulter le 13/06/2020 à 10.20
- [47] contrôle thermographique – mistras/France ; <https://mistrasgroup.fr> ; consulter le 13/06/2020 à 10.56
- [48] soundweld :contrôle de qualité des soudures par émission acoustique / institut ; <https://www.bil-ibs.be> ; consulter le 14/06/2020 à 10.07
- [49] France – monitoring par emission acoustique – mistras ; <https://mistrasgroup.fr> ; consulter le 14/06/2020 à 10.20
- [50] emission acoustique (AT) – cofrend ; <https://www.cofrend.com> ; consulter le 14/06/2020 à 11.09
- [51] : ressuage ; sti.lycee-schwilgue.com ; consulter le 06/07/2020 à 10.06
- [52] : ressuage – precend ; <https://www.precend.fr> ; consulter le 08/07/2020 à 10.48
- [53] : ressuage / apave ; <https://www.apave.com> ; consulter le 08/07/2020 à 11.05
- [54] : contrôle par ressuage (PT) – scancap ; www.scancap.fr ; consulter le 08/07/2020 à 11.20
- [55] : cours sur le ressuage – rocdacier ; <https://www.rocdacier.com> ; consulter le 08/08/2020 à 12.40
- [56] : produits de ressuage – sofranel ,www.sofranel.com ; consulter le 08/08/2020 à 12.43
- [57] : contrôle et expertises ressuage – CND réunion ;www.cndreunion.com ; consulter le 09/08/2020 à 10.23
- [58] : ressuage – compte rendu – métallurgie – studocu ; <https://www.studocu.com> ; consulter le 12/08/2020 à 11.03
- [59] : Qu'est-ce que le contrôle des soudures par ressuage coloré ou fluorescent ;<https://www.soudeurs.com> ; consulter le 20/08/2020 à 12.03