



Université Mohamed Khider de Biskra
Entrez votre faculté
Entrez votre département

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Métallurgie

Spécialité : Métallurgie

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Chenafi Khaled/ Femmam Ahmed

Le : mercredi 12 juin 2024

Etude expérimentale des joints soudures de la partie chaude d'une turbine à gaz (GE MS3002)

Jury :

Pr.	BENTRAH Hamza	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	LEMMAD Fatima zohra	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr.	DJELLAB Mounir	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour terminer ce travail.

J'adresse également mes plus profonds remerciements et ma gratitude au Dr. DJELLAB Mounir, pour sa patience et ses conseils qui ont été à la base de ce travail.

Sans oublier les membres du jury et tous ceux qui ont contribué à ma formation, notamment mes professeurs et les administrateurs,

Un grand merci à tous.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

*L'esprit de mes chers parents, que Dieu ait
pitié d'eux, qui m'ont donné un merveilleux
exemple de travail acharné et de
persévérance.*

*Je le dédie également à ma petite famille,
qui a été ma plus grande motivation
À tous ceux qui s'intéresse et sont heureux
de mon succès.*

Chenafi Khaled

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

L'esprit de mes chers parents, que Dieu ait pitié d'eux, qui m'ont donné un merveilleux exemple de travail acharné et de persévérance.

Je le dédie également à ma petite famille, notamment à ma femme, qui a été ma plus grande motivation, Et ma sœur professeure été une pousser pour la continuation.

À tous ceux qui s'intéresse et sont heureux de mon succès.

Femmam Ahmed

الملخص:

يقدم هذا البحث دراسة تجريبية لوصلات اللحام في الجزء الساخن من توربين الغاز (GE MS3002) أثناء الصيانة في الموقع، باستخدام الفحص غير التدميري (CND) بتقنية الفحص بالسوائل المتغلغلة (PT) الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم سلامة وجودة اللحامات التي تعتبر حيوية لأداء وسلامة التوربين. تشمل هذه الدراسة تحليلاً شاملاً لعمليات اللحام، وأنواع العيوب التي تحدث عادة، وفعالية تقنية كطريقة (CND) في الكشف عن العيوب السطحية.

توثق الدراسة تحضير أسطح اللحام، وتطبيق السائل المتغلغل والمظهر، وتفسير الإشارات. توفر النتائج نظرة على الأنواع الشائعة للعيوب الموجودة في لحامات الجزء الساخن، مثل الشقوق، المسامية، ونقص الانصهار، وتقييم احتمالية الكشف ظروف الموقع. وموثوقية بالإضافة إلى ذلك، تناقش الدراسة آثار هذه النتائج على استراتيجيات الصيانة وإدارة دورة حياة توربينات الغاز.

تختتم الدراسة بتوصيات لتحسين ممارسات اللحام وإجراءات (CND) لتعزيز موثوقية التشغيل وسلامة توربينات يساهم هذا العمل في مجال صيانة توربينات الغاز من خلال توفير بيانات تجريبية وإرشادات عملية بفعالية في الكشف على عيوب اللحام في المكونات الحيوية عالية الحرارة.

الكلمات المفتاحية: وصلات اللحام، الفحص غير التدميري، الفحص بالسوائل المتغلغلة، الجزء الساخن توربين الغاز (GE MS3002) ، الصيانة، كشف العيوب، الموثوقية، السلامة.

Résumé :

Ce mémoire présente une étude expérimentale des joints de soudure dans la partie chaude d'une turbine à gaz GE MS3002 en révision sur chantier, avec un contrôle non destructif (CND) par ressuage pénétrant (PT). L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'intégrité et la qualité des soudures, essentielles pour les performances et la sécurité de la turbine. La recherche implique une analyse approfondie des procédés de soudage, des types de défauts généralement rencontrés, et de l'efficacité du PT en tant que méthode de CND pour détecter les discontinuités de surface. La méthodologie inclut un examen détaillé des joints de soudure par PT, une technique largement reconnue pour sa sensibilité et sa fiabilité dans l'identification des défauts de surface. L'étude documente la préparation des surfaces soudées, l'application du pénétrant et du révélateur, ainsi que l'interprétation des indications. Les résultats fournissent des informations sur les types courants de défauts trouvés dans les soudures de la partie chaude, tels que les fissures, la porosité et le manque de fusion, et évaluent la probabilité de détection (POD) et la fiabilité du PT dans des conditions de chantier. De plus, la recherche discute des implications de ces résultats pour les stratégies de maintenance et la gestion du cycle de vie des turbines à gaz. L'étude se termine par des recommandations visant à améliorer les pratiques de soudage et les procédures de CND pour renforcer la fiabilité opérationnelle et la sécurité des turbines à gaz. Ce travail contribue au domaine de la maintenance des turbines à gaz en fournissant des données empiriques et des lignes directrices pratiques pour l'utilisation efficace du PT dans la détection des défauts de soudure sur des composants critiques à haute température.

Mots-clés : Turbine à gaz, GE MS3002, joints de soudure, contrôle non destructive (CND), ressuage pénétrant (PT), partie chaude, maintenance, détection des défauts, fiabilité, sécurité.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL.....	1
CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
I-1 introduction.....	3
I-2-Principe du fonctionnement de la turbine à gaz.....	3
I-2-1-Compression de l'air.....	4
I-2-2-Injection de carburant et combustion.....	4
I-2-3-Expansion et production d'énergie.....	4
I-2-4-Extraction de l'énergie mécanique.....	4
I-2-5-Rejet des gaz d'échappement.....	4
I-3-Notion générales sur le soudage.....	5
I-3-1-Continuité métallique.....	7
I-3-2-Mécanismes d'obtention de la Continuité Métallique.....	8
I-3-3-Zones constitutives d'un joint soudé.....	10
I-4-Types des assemblages soudés.....	10
I-4-1-Assemblage bout-à-bout.....	11
I-4-2-Assemblage en coin ou en angles.....	11
I-4-3-Assemblage à bord relevés.....	12
I-4-4-Assemblage par recouvrement.....	12
I-5- Paramètres du soudage.....	13
I-5-1-Courant de soudage.....	13
I-5-2-Tension de soudage.....	13
I-5-3-Vitesse de soudage.....	13
I-5-4-Débit de gaz de protection.....	13
I-5-5- Type et diamètre de l'électrode ou du fil de soudage.....	14
I-5-7- Technique de soudage.....	14
I-5-8- Préchauffage et température inter-passe.....	14
I-6-procédés de soudage.....	15
I-6-1-Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.....	16
I-6-1-1-Définition de l'électrode enrobée.....	17
I-6-1-2-Classification des enrobages des électrodes enrobées.....	18
I-6-1-3-Étuvage des électrodes enrobées.....	18
I-6-1-4-La polarité de l'électrode enrobée.....	19
I-6-1-5- Le soudage à l'arc sous flux solide.....	20
I-6-1-6-Soudage MIG/MAG (Meta Inert Gas/Metal Active Gas)	21
I-6-1-7-Soudage TIG (Tungstène Inerte Gas)	22

I-6-2-Soudage -Principaux défauts des soudures.....	25
I-6-2-1-Défauts des cavités.....	25
I-6-2-2-Les fissures.....	26
I-6-2-3-Morsures et les Caniveaux.....	28
I-6-2-4-Défaut de manque de fusion.....	28
I-6-2-5-Défauts de pénétration.....	29
I-6-2-6-Défauts de géométries des cordons.....	29
I-6-2-7-Défauts des projections.....	30
I-7-Contrôle des soudures.....	30
I-7-1-Essais destructifs.....	30
I-7-2-Essais d'étanchéités.....	32
I-7-3-Essais Non destructifs.....	32
CHAPITRE II : METHODES ET CONDITIONS EXPERIMENTALES	
II-1-Introduction.....	37
II-2-Materiels Utilisés.....	37
II-2-1-Caractéristiques de la turbine à gaz GE MS3002.....	37
II-2-2-Poids Des Pieces Nobles.....	38
II-2-3-Moyens.....	38
II-3-Preparation Du Chantier.....	39
II-4-Déroulement de la révision générale.....	39
II-5-Rapport D'inspection.....	40
II-6-Sections Principales De La Turbine GE MS3002.....	41
II.7. Produits utilises.....	43
II-7-1-Le pénétrant FLUXO P125.....	43
II-7-2-Le révélateur FLUXO R175.....	44
II-8-Methodes D'étude Et Conditions Expérimentales.....	44
I II-8-2-Conditions Expérimentales.....	44
I-8-1-Méthodes d'étude (le ressuage)	44
III. CHAPITRE RESULTATS ET DISCUSSION	
Conclusion générale.....	54
Références.....	55

LISTE DES FIGURES

- Figure I 1: principe d'un turbine a gaz
- Figure I 2 : carte pétrolière et gazière de l'Algérie
- Figure I 3 : procède de soudage
- Figure I 4 : Nature de la continuité métallique
- Figure I 5 : Soudage par ultrason
- Figure I 6 : Soudage par résistance
- Figure I 7 : Soudage dit par diffusion
- Figure I 8 : Représentation schématique du joint soudé
- Figure I 9 : Préparation des bords en assemblage bout-à-bout
- Figure I 10 : assemblage en angle
- Figure I 11 : Assemblage à bords relevés
- Figure I 12 : Assemblage à recouvrement
- Figure I 13 : Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie
- Figure I 14: Procédure de soudage l'arc électrique avec électrode enrobée
- Figure I 15: l'électrode enrobée
- Figure I 16: Polarité directe (négative)
- Figure I 17: Polarité indirecte (positive)
- Figure I 18: soudages à l'arc automatique sous flux
- Figure I 19: schéma du procédé MIG MAG
- Figure I 20: Equipement et l'installation pour le soudage TIG
- Figure I 21: Schéma de transfert du métal
- Figure I 22: Affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG
- Figure I 231: Défauts de soufflures
- Figure I 24: Défauts des retassures
- Figure I 25 : Défauts des inclusions
- Figure I 26 : Fissure dans le cordon de soudure
- Figure I 27: Fissures à chaud
- Figure I 28 : Types de la fissure à froid
- Figure I 29: Morsures et Caniveaux
- Figure I 30 : Défauts de manque de fusion
- Figure I 31 : Défauts de pénétration
- Figure I 32 : Défaut d'alignement
- Figure I 33 : Défauts des projections
- Figure I 34 : Essai de traction
- Figure I 35 : Essai de pliage
- Figure I 36 : Essai de dureté

- Figure I 37 : Essai de résilience
- Figure I 38 : Essai de pression hydrostatique
- Figure I 39 : Essai de pression pneumatique
- Figure I 40 : Control des pièces industrielles par ultrason
- Figure II 1 : chambres de combustion
- Figure II 2 : tubes à flamme
- Figure II 3 : Pièces transition
- Figure II 4 : Tubes d'interconnexions
- Figure II 5 : directrice HP
- Figure II 6 : Rotors HP et BP
- Figure II 7 : produits utilises
- Figure II 8 : Schéma qui présente les étapes du ressuage
- Figure III 1 : Etape : nettoyage préalable
- Figure III 2 : Etape : application du pénétrant
- Figure III 3 : Etape : élimination du pénétrant
- Figure III 4: Etape : application du révélateur
- Figure III 5 : Etape : examen (contrôle des différents organes)
- Figure III 6: Contrôle des tubes a flamme
- Figure III 7: Contrôle des pieces de transition
- Figure III 8: Contrôle des interconnexions
- Figure III 9: Contrôle de la roue HP
- Figure III 10: Contrôle de la roue BP

Introduction Générale

Introduction Générale :

Dans le domaine de l'ingénierie des turbines à gaz, les joints de soudure jouent un rôle crucial dans la fiabilité et la performance des composants, en particulier dans la partie chaude de ces machines. Les températures extrêmes et les contraintes mécaniques élevées auxquelles sont soumises les turbines à gaz imposent des exigences strictes en matière de qualité et d'intégrité des joints de soudure. Ainsi, leur étude expérimentale revêt une importance capitale pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité des turbines à gaz.

Cette recherche se concentre spécifiquement sur l'étude expérimentale des joints de soudure de la partie chaude des turbines à gaz. L'objectif principal est d'évaluer la qualité, la résistance et la durabilité de ces joints dans des conditions de fonctionnement représentatives. Pour ce faire, une approche multidisciplinaire intégrant des techniques de soudage avancées, des méthodes de contrôle non destructif et des analyses métallurgiques est adoptée.

Dans cette introduction, nous contextualisons d'abord l'importance des joints de soudure dans les turbines à gaz, en mettant en lumière les défis spécifiques auxquels ils sont confrontés. Ensuite, nous présenterons les objectifs de cette étude ainsi que la méthodologie de recherche adoptée pour les atteindre.

Le succès de cette étude pourrait contribuer significativement à l'amélioration des pratiques de conception, de fabrication et de maintenance des turbines à gaz, en fournissant des données essentielles pour optimiser la performance et prolonger la durée de vie de ces équipements essentiels dans divers secteurs industriels.[1]

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée en trois chapitres :

- Le premier chapitre représente les notions générales sur le soudage tel que les procédés de soudage, les paramètres d'assemblage et les différents types de défauts constatés
- Le deuxième chapitre présente les techniques et les méthodes de caractérisation mises en œuvre ainsi que les conditions expérimentales adoptées.
- Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I :
Synthèse
bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-1-Introduction

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction métallique à savoir : les Pipelines, les bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, les turbines tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. Le développement industriel est porté par le souci permanent de trouver de nouveaux procédés de fabrication pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le coût de revient et le temps d'exécution etc. dans ce chapitre on présente des notions générales sur le soudage et explique les différents types d'assemblage et procédés, précisément le procédé de soudage TIG (Tungstène Inerte Gas).

I-2-Principe du fonctionnement de la turbine à gaz

Les turbines à gaz sont des dispositifs utilisés pour convertir l'énergie de combustion du carburant en énergie mécanique, généralement sous forme de rotation d'un arbre. Voici les principes de fonctionnement des turbines à gaz [1].

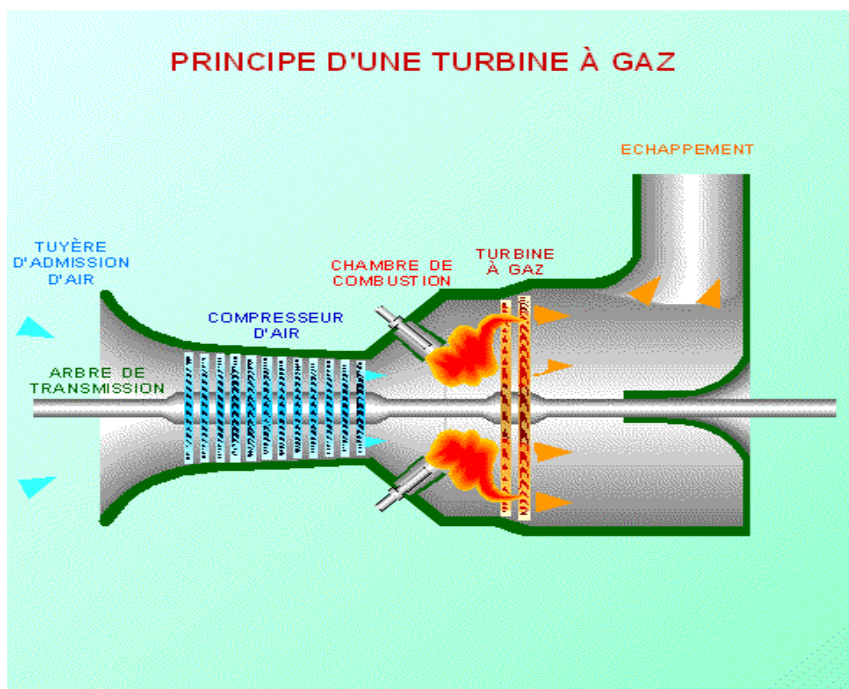


Figure I 1 : principe d'un turbin a gaz [2]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-2-1-Compression de l'air :

Le processus commence par la compression de l'air ambiant. L'air est aspiré dans la turbine à travers des entrées d'air et est comprimé à haute pression par un compresseur. Ce compresseur est généralement composé de plusieurs étages de rotors et de stators qui augmentent la pression de l'air en le comprimant successivement.

I-2-2-Injection de carburant et combustion :

Une fois que l'air est comprimé, il est mélangé avec du carburant et brûlé dans une chambre de combustion. Le carburant peut être du gaz naturel, du kérosène, du diesel, du biogaz ou d'autres combustibles similaires. La combustion de l'air et du carburant crée un mélange de gaz chauds à haute pression.

I-2-3-Expansion et production d'énergie :

Les gaz chauds produits par la combustion sont dirigés vers les aubages de la turbine, où ils font tourner les rotors de la turbine. L'expansion des gaz à travers la turbine convertit l'énergie thermique en énergie mécanique, entraînant la rotation de l'arbre de la turbine.

I-2-4-Extraction de l'énergie mécanique :

L'arbre de la turbine est connecté à un générateur ou à un autre dispositif mécanique pour extraire l'énergie produite sous forme de rotation. Dans le cas d'une turbine utilisée pour produire de l'électricité, l'arbre de la turbine est connecté à un alternateur qui génère de l'électricité.

I-2-5-Rejet des gaz d'échappement :

Une fois que les gaz ont traversé la turbine et transféré leur énergie mécanique, ils sont évacués de la turbine à travers les tuyaux d'échappement. Ces gaz d'échappement peuvent être utilisés pour d'autres applications, comme la production de vapeur pour des processus industriels ou pour alimenter une turbine à vapeur supplémentaire dans une installation de cycle combiné.

Ce processus de conversion d'énergie est répété en continu, permettant à la turbine à gaz de fonctionner de manière efficace et de produire de l'électricité ou entraîne une pompe ou bien un compresseur centrifuge pour transporter des hydrocarbures (comme indique la carte de

Chapitre I : Synthèse bibliographique

transport des hydrocarbure notre payer l'Algérie figure I 2) avec une grande puissance et une faible consommation de carburant, ce qui en fait une technologie largement utilisée dans le monde entier.[1]

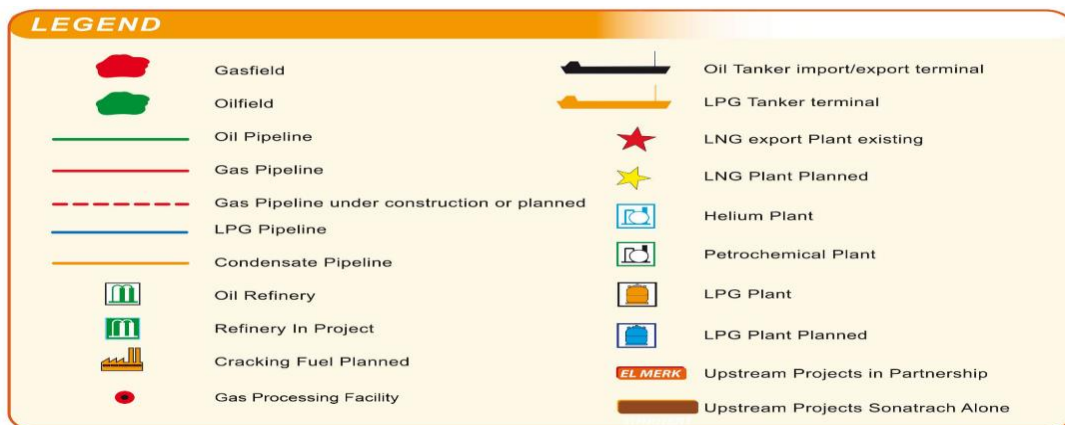


Figure I 2 : carte pétrolière et gazière de l'Algérie [3]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-3-Notion générales sur le soudage

Le soudage comme moyen d'assemblage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue de maîtriser tous ses aspects Métallurgique et Technologiques de mise en œuvre des opérations de soudage, de contrôle et de vérification de l'intégrité des soudures. On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique avec Électrode enrobée, et avec fil électrode fusible Sous flux en poudre..., la plus utilisé en construction des pipelines Figure. I 3.[4]

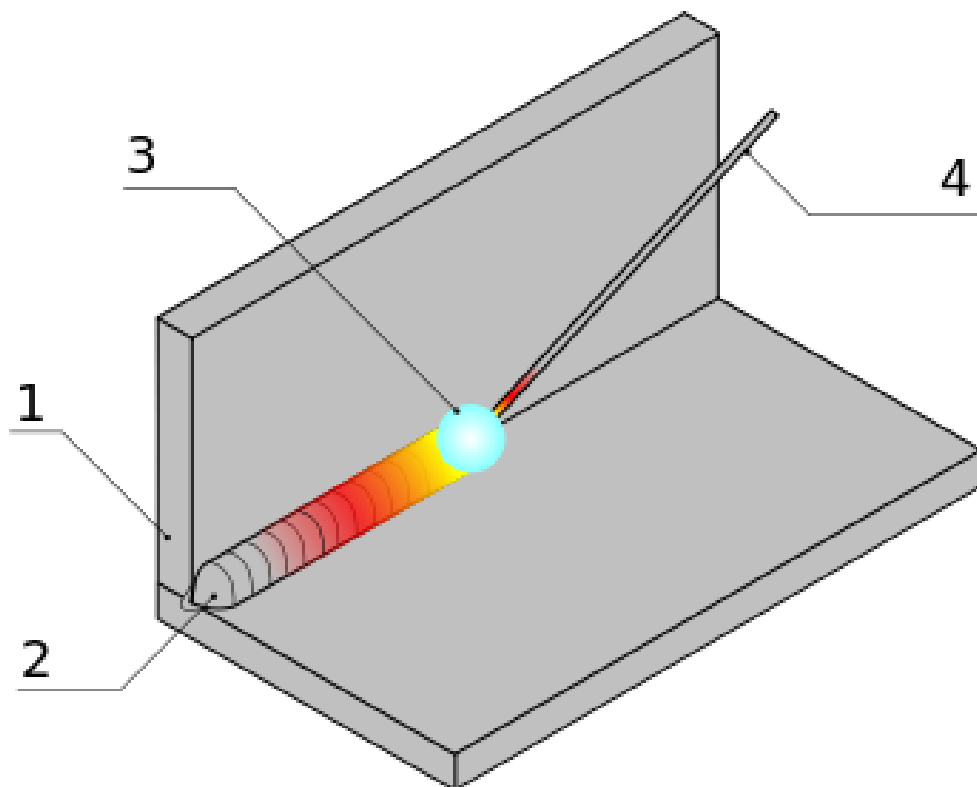


Figure I 3 : procédé de soudage [4]

I-3-1-Continuité métallique

Parmi les définitions nombreuses et variées du soudage que fournit la littérature technique depuis trois quarts de siècle, la plus indiquée est celle qui fait appel à la notion de continuité. Selon cette définition, le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, par divers moyens.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Cette définition, valable pour n'importe quel matériau, y compris les matières plastiques, s'applique intégralement au cas des métaux et alliages, dans la mesure où l'opération consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler. À l'échelle macroscopique, la continuité métallique implique l'absence, une fois dans l'assemblage réalisé, de toute matière non métallique interposée entre les éléments réunis.

Un examen plus attentif de ce qui se passe à l'échelle de la structure cristalline nous éclairera mieux sur la nature de la continuité métallique qu'établit le soudage ; avant l'opération, les atomes de chaque partie à assembler sont groupés en deux ensembles, sans interposition d'aucun atome étranger aux deux ensembles initiaux (pour simplifier, on envisage le cas d'une soudure sans métal d'apport). La figure I 4 ci-après en schématise le principe :

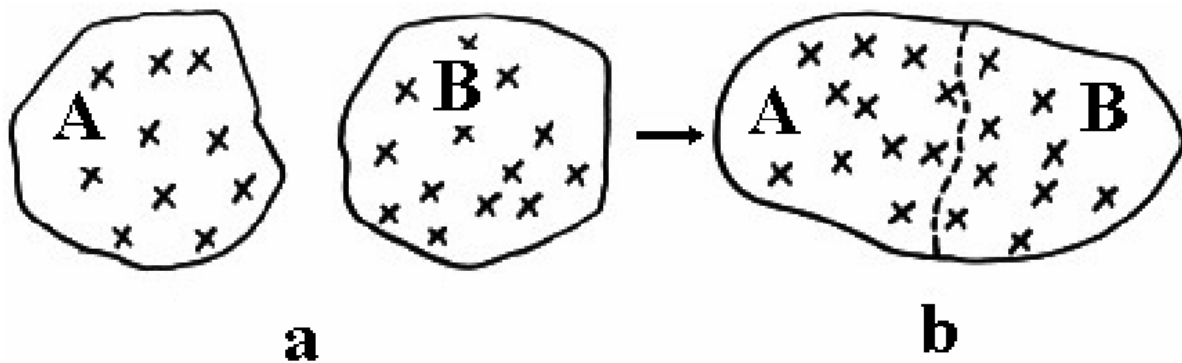


Figure I 4 : Nature de la continuité métallique [5]

Pour l'ensemble AB résultant de l'opération de soudage, les atomes résultant de A et B séparés (initialement) forment une zone de liaison assurant la continuité métallique.

Le caractère essentiel de l'opération de soudage réside dans le fait que cette zone de liaison n'est le siège d'aucune discontinuité quant au caractère métallique des atomes qui y sont présents. Tout procédé de soudage doit donc comporter un processus d'élimination des atomes étrangers non métalliques qui pourraient s'opposer à la liaison.

I-3-2-Mécanismes d'obtention de la Continuité Métallique

La continuité métallique, ou la conductivité électrique d'un matériau, est essentielle dans de nombreux domaines, notamment en électronique, en ingénierie des matériaux et en génie électrique.

On distingue trois mécanismes conduisant à la continuité métallique :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- ✓ **Mécanisme par rapprochement en phase solide (effort mécanique).**
- Il intervient à chaud ou à froid (par déformation)
 - Soudage par ultrason (ou soudage par pression à froid) figure I 5.

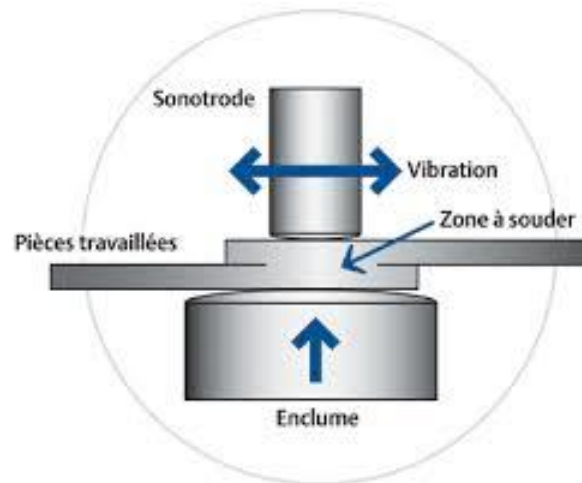


Figure I 5 : Soudage par ultrason

- Soudage par résistance (ou par friction)

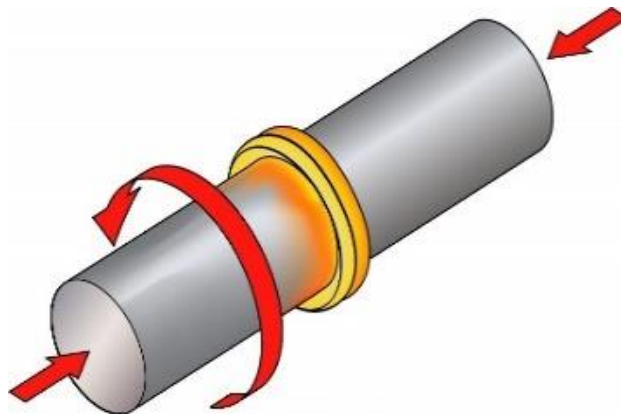


Figure I 6 : Soudage par résistance [6]

- Conséquence :
 - La déformation provoque l'écrouissage et la structure cristalline est altérée.
 - La continuité métallique peut être complétée par le phénomène de recristallisation si la déformation a lieu à chaud.
- ✓ **Mécanisme de diffusion**

La diffusion se produit lorsque des atomes se déplacent à travers la structure cristalline d'un matériau en réponse à un gradient de concentration. Dans le contexte de la conductivité électrique, la diffusion est particulièrement importante car elle peut affecter la

Chapitre I : Synthèse bibliographique

distribution des impuretés, la mobilité des électrons, et donc la conductivité électrique du matériau.

➤ Soudage dit par diffusion

Si l'interface est liquide-solide, il y a création d'une zone d'alliage sur une très faible épaisseur au-delà de l'interface. C'est le processus du brassage (action du mélange) qui caractérise la solidification d'une phase liquide sur une phase solide. [6]

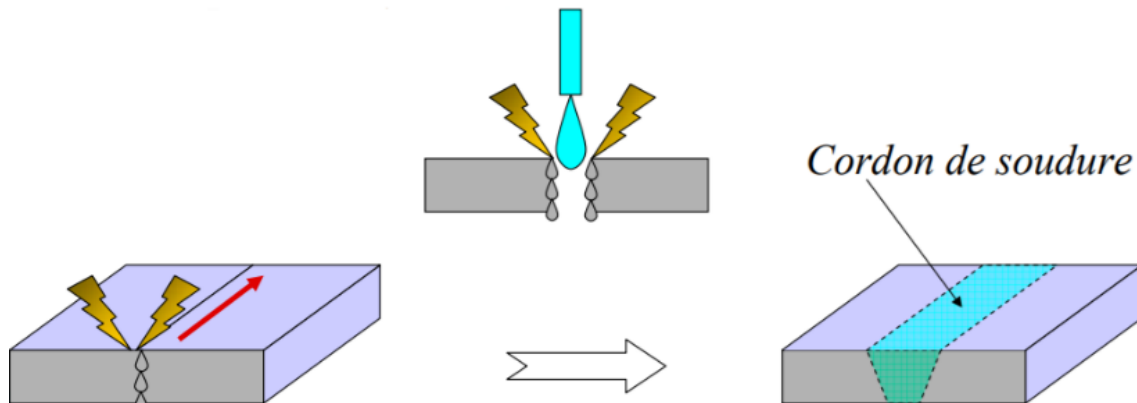


Figure I 7 : Soudage dit par diffusion [6]

✓ Mécanisme reposant sur la solidification d'un liquide sur un solide.

La diffusion se produit lorsque des atomes se déplacent à travers la structure cristalline d'un matériau en réponse à un gradient de concentration. Dans le contexte de la conductivité électrique, la diffusion est particulièrement importante car elle peut affecter la distribution des impuretés, la mobilité des électrons, et donc la conductivité électrique du matériau

La continuité est assurée par le phénomène d'épitaixie. Les premiers cristaux solidifiés adoptent l'orientation des cristaux du métal solide.

Cas particulier : continuité faisant intervenir une interface vapeur-solide (revêtement de surface croissant par épitaixie).

I-3-3-Zones constitutives d'un joint soudé

Afin d'obtenir un joint soudé, en faisant fondre le métal de base des deux composants à relier avec ou sans métal d'apport. Dans la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé on distingue quatre zones essentielles :

- **La zone de fusion ou La zone fondue (ZF) mélangé :**

Chapitre I : Synthèse bibliographique

La zone où de métal d'apport et le métal de base sont mélangés de façon homogène (Bain de fusion) sous une température élevée adaptée dit température de liquidus.

- **La zone fondue partiellement (ZFP) :** elle est nommée aussi par la zone de liaison (ZL), elle se situe entre la zone de fusion et la zone affectée thermiquement.
- **La zone affectée thermiquement (ZAT) :** ou zone affectée par la chaleur est la zone de métal de base ou ses propriétés mécaniques et microstructures sont modifiées par la chaleur du soudage.
- **Le métal de base (MB) :** Il constitue le métal des pièces à assembler, Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature légèrement différente. [7]

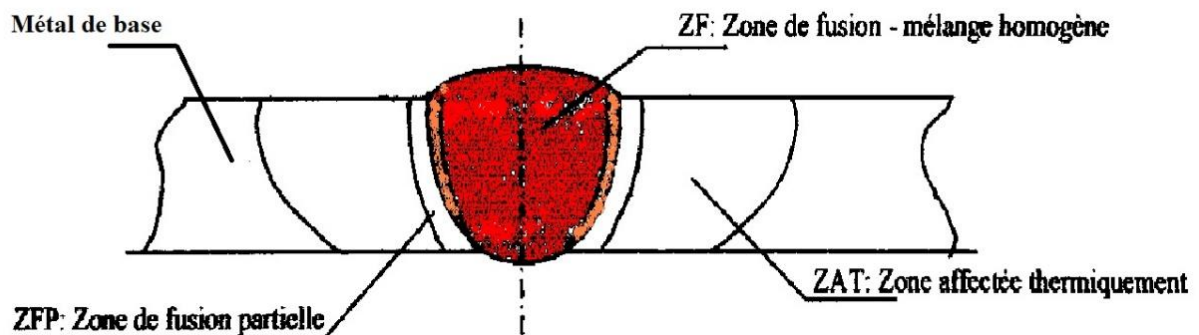


Figure I 8 : Représentation schématique du joint soudé[7]

I-4-Types des assemblages soudés

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permette de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration. Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis. [7]

I-4-1-Assemblage bout-à-bout

La soudure bout-à-bout (figure I 9) est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égales à 5 mm

Chapitre I : Synthèse bibliographique

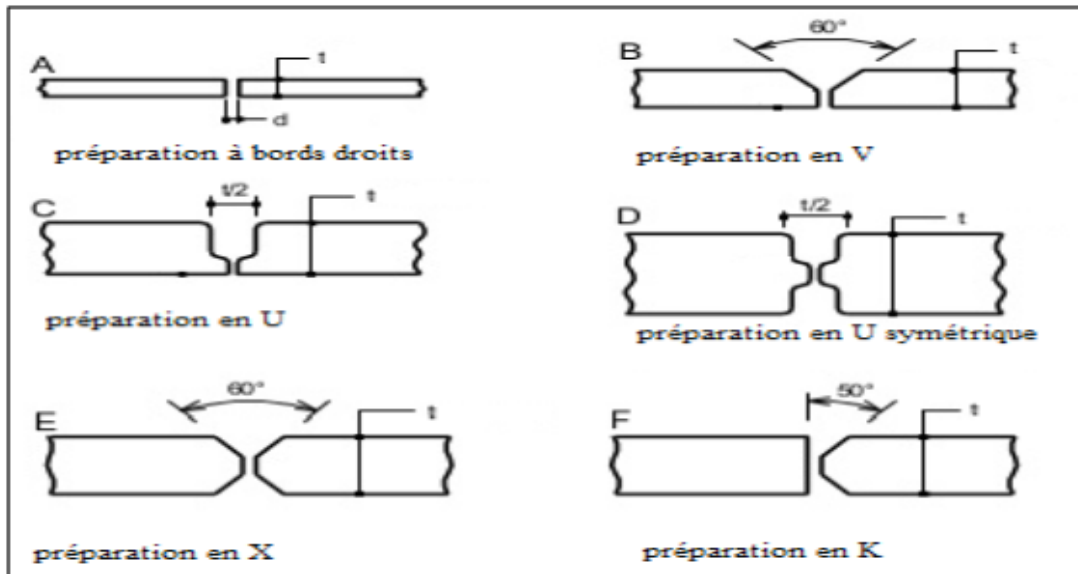


Figure I 9: Préparation des bords en assemblage bout-à-bout [8]

I-4-2-Assemblage en coin ou en angles

Comme son nom l'indique, il est utilisé pour connecter deux pièces ensemble à un certain angle et le jeu entre eux doit être approprié pour éviter l'effondrement du bain de fusion. Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de 90° faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en T (figure I 10).

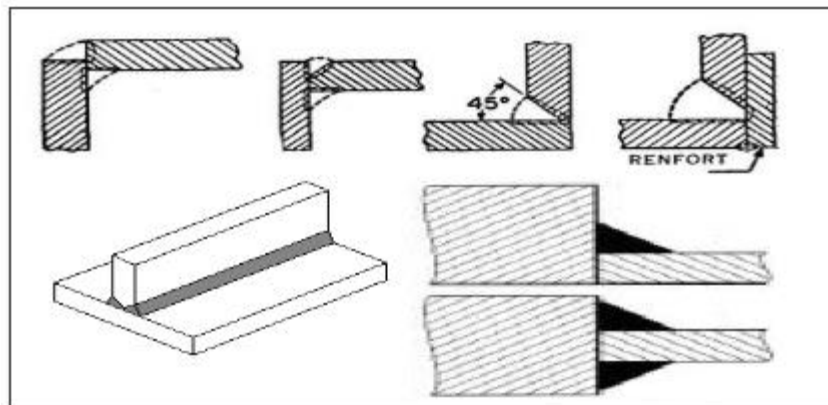


Figure I 10 : assemblage en angle [8]

I-4-3-Assemblage à bord relevés

Un type soudure à rainure, est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces

Chapitre I : Synthèse bibliographique

de tôleris quions des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être fait pour réunir deux pièces adjacentes (figure I 11).

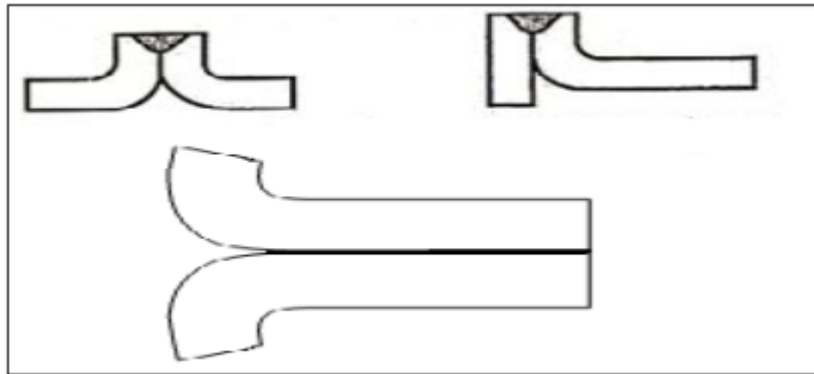


Figure I 11 : Assemblage à bords relevés [8]

I-4-4-Assemblage par recouvrement

Il reforme lorsque deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur une certaine distance le long du bord (figure I 12).

Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.

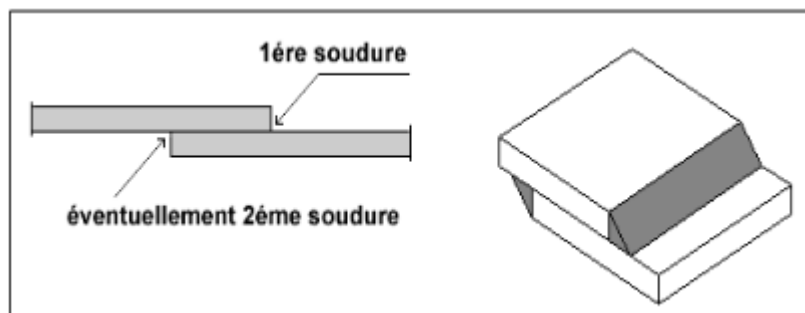


Figure I 12: Assemblage à recouvrement [8]

I-5- Paramètres du soudage [9]

Le soudage est un processus qui permet d'assembler des matériaux (souvent des métaux) en utilisant la chaleur, la pression ou les deux. Les paramètres du soudage influencent fortement la qualité de la soudure. Voici les principaux paramètres à considérer :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-5-1-Courant de soudage

- **Type de courant :** Courant continu (DC) ou courant alternatif (AC).
- **Intensité de courant :** Mesurée en ampères (A). Elle doit être ajustée en fonction de l'épaisseur et du type de matériau à souder.

I-5-2-Tension de soudage

- **Tensions électrique :** Mesurée en volts (V). Elle influence la longueur de l'arc de soudage et la stabilité de l'arc.

I-5-3-Vitesse de soudage

- **Vitesse de déplacement :** La vitesse à laquelle l'électrode ou la torche de soudage est déplacée le long du joint de soudure. Une vitesse trop élevée ou trop basse peut affecter la qualité de la soudure.

I-5-4-Débit de gaz de protection

- **Type de gaz :** Argon, hélium, dioxyde de carbone, ou un mélange de ces gaz. Le choix du gaz dépend du type de matériau et du procédé de soudage.
- **Débit :** Mesuré en litres par minute (L/min). Un débit adéquat est essentiel pour protéger le bain de fusion des contaminants atmosphériques.

I-5-5- Type et diamètre de l'électrode ou du fil de soudage

- **Type d'électrode :** Enrobée, fil fourré, tungstène, etc. Chaque type a ses propres caractéristiques et applications.
- **Diamètre :** Le choix du diamètre dépend de l'épaisseur du matériau à souder et du type de joint.

I-5-6- Type et diamètre de l'électrode ou du fil de soudage

- **Nettoyage :** Enlever les oxydes, la rouille, l'huile, et autres contaminants.
- **Géométrie du joint :** Type de préparation du bord (biseautage, emboîtement, etc.), largeur de l'écart, etc.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-5-7- Technique de soudage

- **Position de soudage : Soudage** à plat, en position horizontale, verticale, ou au plafond. Chaque position peut nécessiter des ajustements spécifiques des paramètres.
- **Mouvement de la torche : Technique** de manipulation de la torche, incluant les mouvements circulaires, en zigzag, ou linéaires.

I-5-8- Préchauffage et température inter-passe

- **Préchauffage** : Chauffage du matériau avant le soudage pour éviter les fissures.
 - **Température inter-passe : Température** entre les passes de soudure. Il est crucial de la contrôler pour éviter les défauts.
- La maîtrise des paramètres de soudage est essentielle pour obtenir des soudures de haute qualité. Chaque paramètre doit être ajusté en fonction du matériau, de l'épaisseur, du type de joint et des conditions de soudage spécifiques. Une bonne compréhension et un contrôle précis de ces paramètres permettent de prévenir les défauts et d'assurer la durabilité des assemblages soudés

I-6-procédés de soudage

Les procédés de soudage sont des techniques spécifiques utilisées pour assembler des matériaux métalliques en le fusionnant ensemble. Chaque procédé de soudage présente des avantages et des inconvénients et est adapté à des applications et à des matériaux spécifiques.

Voici quelques-uns des principaux procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- ✓ Le type d'énergie mise en œuvre ;
- ✓ Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- ✓ Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- ✓ La morphologie de la liaison qu'ils permettent de la réaliser.

Il existe à l'heure actuelle des dizaines de procédés de soudage, le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisée, par exemple : énergie électrique, énergie chimique... etc.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Les principaux procédés de soudage sont présentés sur la figure ci-après [9]

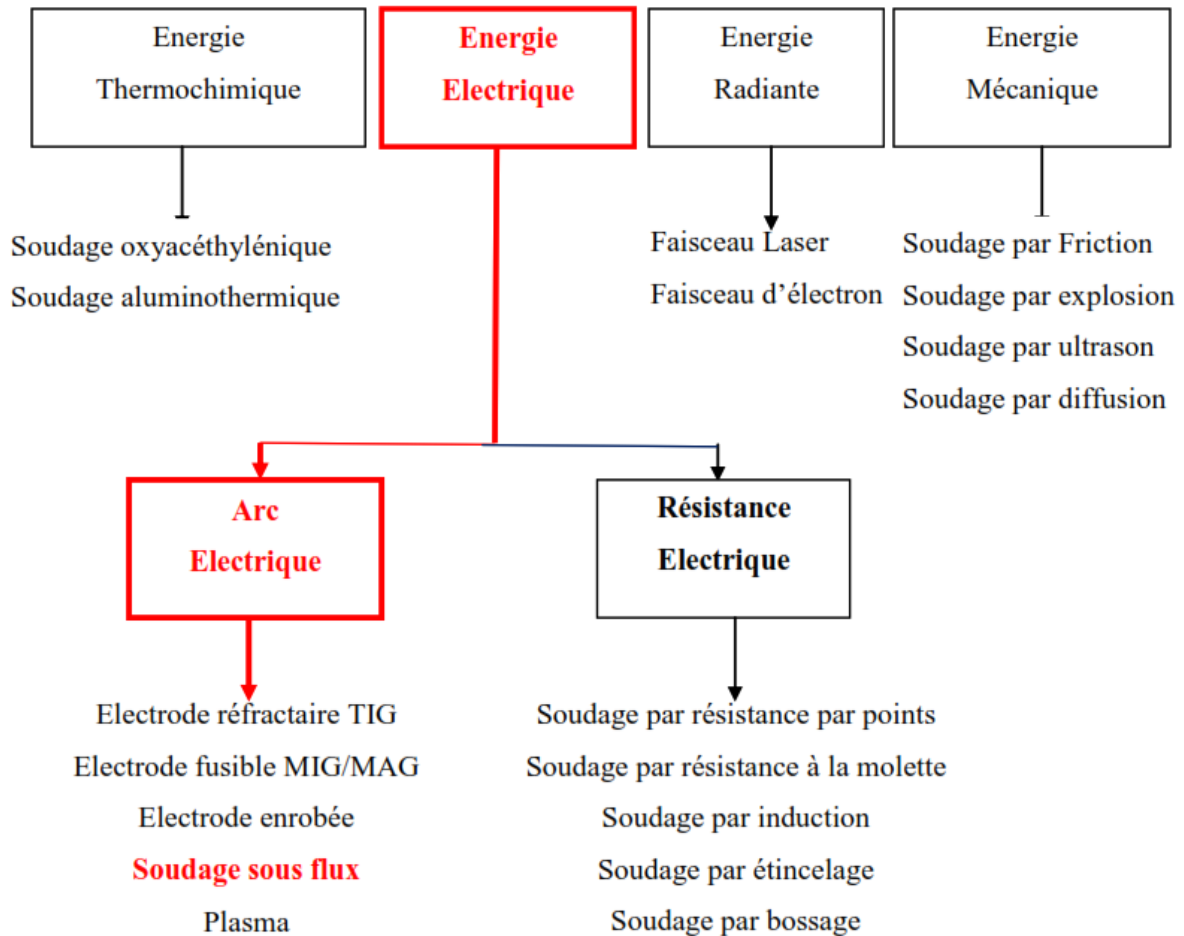


Figure I 13 : Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie [10]

I-6-1-Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée

La fusion des métaux est obtenue par l'énergie calorifique dégagée par un arc électrique qui jaillit entre une électrode métallique fusible comportant un enrobage et les pièces à souder.

L'enrobage, en fondant simultanément avec l'âme métallique, produit un gaz et un laitier qui protègent le métal en fusion de l'oxydation. Il favorise également la stabilité de l'arc et, dans certains cas, apporte des améliorations d'ordre métallurgique.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

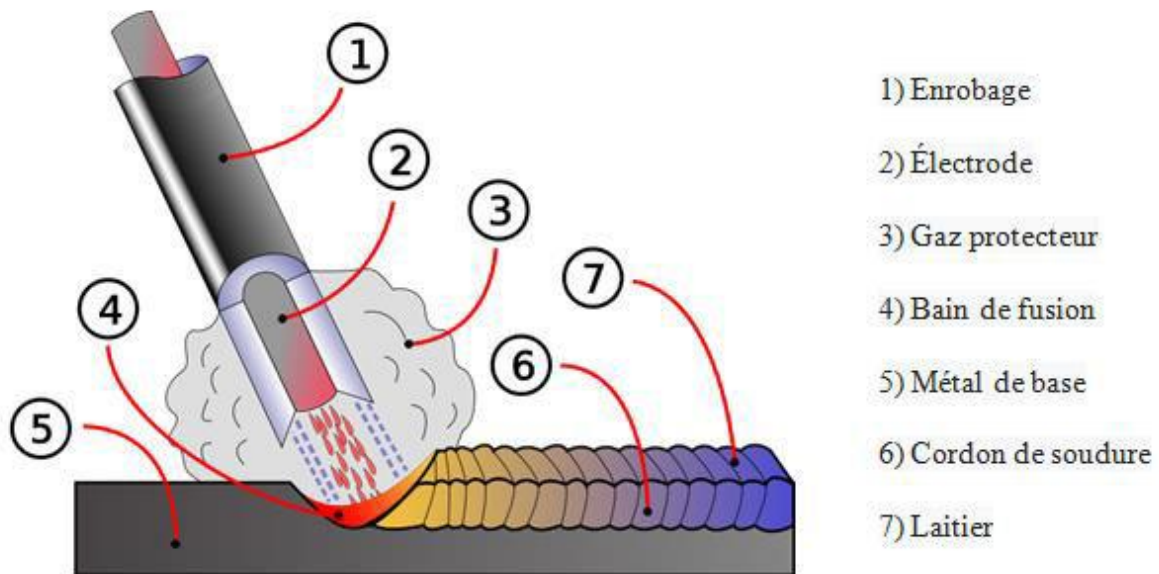


Figure I 14 : Procédure de soudage l'arc électrique avec électrode enrobée [6]

I-6-1-1-Définition de l'électrode enrobée :

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

- **L'âme** : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.
- **L'enrobage** : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. L'enrobage a un **rôle électrique**, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un **rôle métallurgique**, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe. [6]



Figure I 15 : l'électrode enrobée [6]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de \varnothing 1,6 à \varnothing 8 mm La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm Certaines électrodes peuvent atteindre 1 mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique).

I-6-1-2-Classification des enrobages des électrodes enrobées

- Acide ou **A** (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- Basique ou **B** (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium).
- Cellulosique ou **C** (à base de cellulose).
- Oxydant ou **O** (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- Rutile ou **R** (à base d'oxyde de titane).
- Haut rendement ou **RR** (à base de poudre métallique).
- Spécial ou **S**.

Les électrodes enrobées utilisées couramment sont :

- Rutilés pour les travaux courants.
- Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression).
- Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position vertical en montant ou en descendant.

I-6-1-3-Étuvage des électrodes enrobées

Les électrodes à enrobage basique et rutilé-basiques doivent être étuvées dans un four-étuve à 300° Celsius pendant 2 heures. Après étuvage, les électrodes à enrobage basique et rutilo-basiques doivent être conservées à une température de 120° Celsius dans des étuves portatives sur le lieu de soudage. Les autres types d'électrodes à enrobage rutile, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60%.

Un nouveau système de fabrication et d'emballage sous vide permet d'obtenir des électrodes à enrobage basique à très faible taux d'humidité qui ne nécessitent aucun étuvage avant utilisation.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-6-1-4-La polarité de l'électrode enrobée

➤ Polarité directe (négative)

Les passes de pénétration (non reprises à l'envers) réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la **polarité négative** à l'électrode. La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (-)



Figure16 Polarité directe (négative)[11]

Note :

- Température plus élevée du métal de base.
- Bonne fusion du bain.
- Utilisation généralement pour les électrodes rutiles.
-

➤ Polarité indirecte (positive)

Les passes de remplissage et de finition réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec **la polarité positive** à l'électrode. La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (+)



Figure17 :Polarité indirecte (positive)[6]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Note :

- Température plus élevée du métal d'apport.
- Utilisation généralement pour l'électrode basique.

I-6-1-5- Le soudage à l'arc sous flux solide (SAW : Submerged automatic welding)

➤ Définition du procédé de soudage.

Définition du procédé de soudage. Le soudage électrique à l'arc sous flux solide électro-conducteur (SAW : **Submerged automaticwelding**) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de Ø 1,6 à Ø 6 mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder. La fusion est accompagnée d'un dégagement gazeux. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.

➤ Descriptif du matériel et installation pour le soudage à l'arc automatique sous flux :

L'équipement de soudage électrique à l'arc sous flux solide électro-conducteur comprend généralement :

- Un générateur de courant continu ou alternatif (200 à 2000 Ampères)
- Un banc de soudage ou une potence de soudage.
- Une ou plusieurs têtes de soudage avec câble conducteur.
- Une trémie d'alimentation du flux en poudre.
- Une pince de masse avec câble conducteur.
- Un aspirateur avec tamisage pour le recyclage du flux.
- Une étuve spéciale à flux solide.
- Un marteau à piquer et une brosse métallique
- Une tenaille ou coupe-fil pour couper le fil électrode

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure I 18: soudages à l'arc automatique sous flux[11]

I-6-1-6-Soudage MIG/MAG (Meta Inert Gas/Metal Active Gas)

Ce procédé utilise un arc électrique entre un fil-électrode continu et les pièces à souder. Dans le soudage MIG, un gaz inerte tel que l'argon est utilisé comme gaz de protection, tandis que dans le soudage MAG, un gaz actif tel que le CO₂ est utilisé.

La fusion des métaux est obtenue par l'énergie calorifique dégagée par un arc électrique qui éclate dans une atmosphère de protection entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler. Selon les gaz utilisés pour l'atmosphère de protection : [12]

- Gaz neutre (L'Argon ou L'Hélium), le procédé est désigné « Métal Inerte Gaz » (MIG).
- Gaz actif (CO₂ ou mélange L'Argon/CO₂), le procédé est désigné « Métal Active Gaz » (MAG).

Le procédé peut être utilisé en semi-automatique ou automatique.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

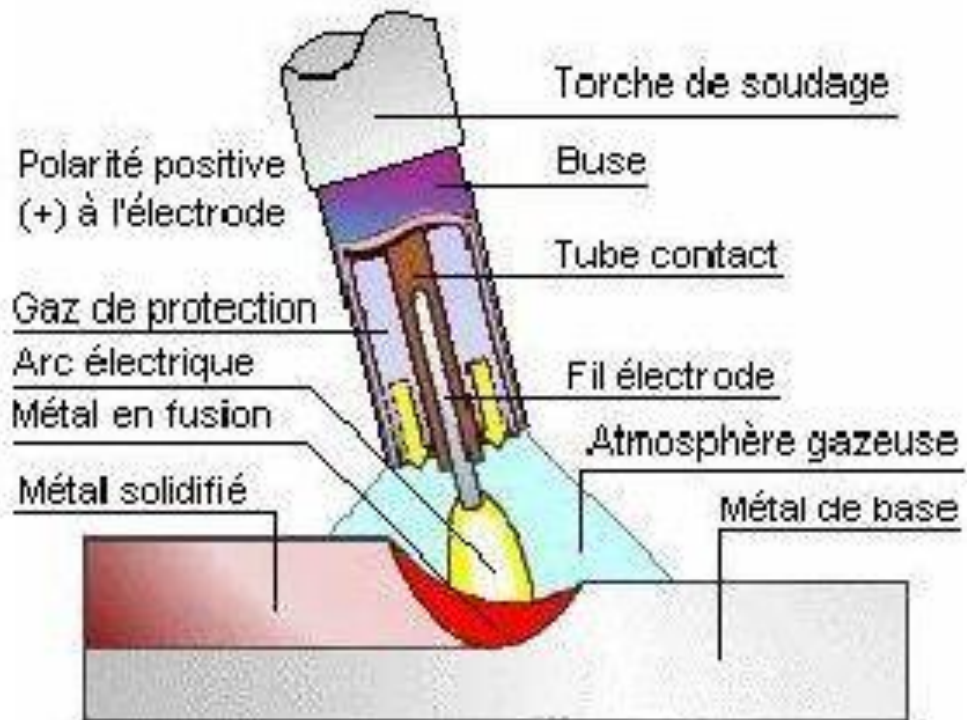


Figure I 19:schéma du procédé MIG MAG[13]

I-6-1-7-Soudage TIG (Tungstène Inerte Gas)

Également connu sous le nom de soudage à l'arc au tungstène, ce procédé utilise un arc électrique entre une électrode en tungstène non consommable et les pièces à souder. Un gaz inerte tel que l'argon est utilisé comme gaz de protection pour empêcher l'oxydation de la soudure.

➤ Définition du procédé :

Le soudage TIG (Tungstène Inerte Gas) ou GTAW (Gas Tungstène Arc Welding) est un procédé à l'arc sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène). Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène (de \varnothing 1,0 mm à \varnothing 8,0 mm) et la pièce à souder. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 4,0 mm) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de \varnothing 0,8 mm à \varnothing 2,0 mm) dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertage de gaz (de 5 à 25 litres/minute) de protection (**Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H₂** pour les procédés automatiques). Un

Chapitre I : Synthèse bibliographique

générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 5 à 300 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La polarité de l'électrode est toujours négative en courant continu (polarité directe)[14].

Descriptif du matériel

L'équipement et l'installation pour le soudage TIG comprend généralement :

1. Un générateur de courant continu ou alternatif (principalement pour l'aluminium).
2. Un groupe réfrigérant à circuit fermé (lors d'utilisation à forte intensité)
3. Une bouteille de gaz avec détendeur/débitmètre et boyaux d'alimentation
4. Une torche de soudage (avec ou sans refroidissement) avec câble conducteur
5. Une pince de masse avec câble conducteur
6. Un masque avec verres teintés spéciaux numéros 10 à 13
7. Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple
8. Une brosse métallique
9. Une meuleuse d'angle électrique ou pneumatique pour les reprises.
10. Des écrans ou rideaux de protection
11. Une ventilation efficace dans les endroits confinés



Figure I 20: Equipement et l'installation pour le soudage TIG[11]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

➤ Schéma de principe :

L'arc électrique éclate entre l'extrémité de l'électrode en tungstène et les pièces à souder. Le soudage s'effectue en courant continu l'électrode au pôle négatif (polarité directe) pour les aciers et ses alliages, cuivre, nickel...

Le soudage s'effectue en courant alternatif pour le soudage de l'aluminium et de ses alliages. Le gaz de protection utilisé est généralement de l'argon, des mélanges argon-hydrogène, argon – hélium ou l'hélium en fonction des matériaux, et du courant utilisé.[12]

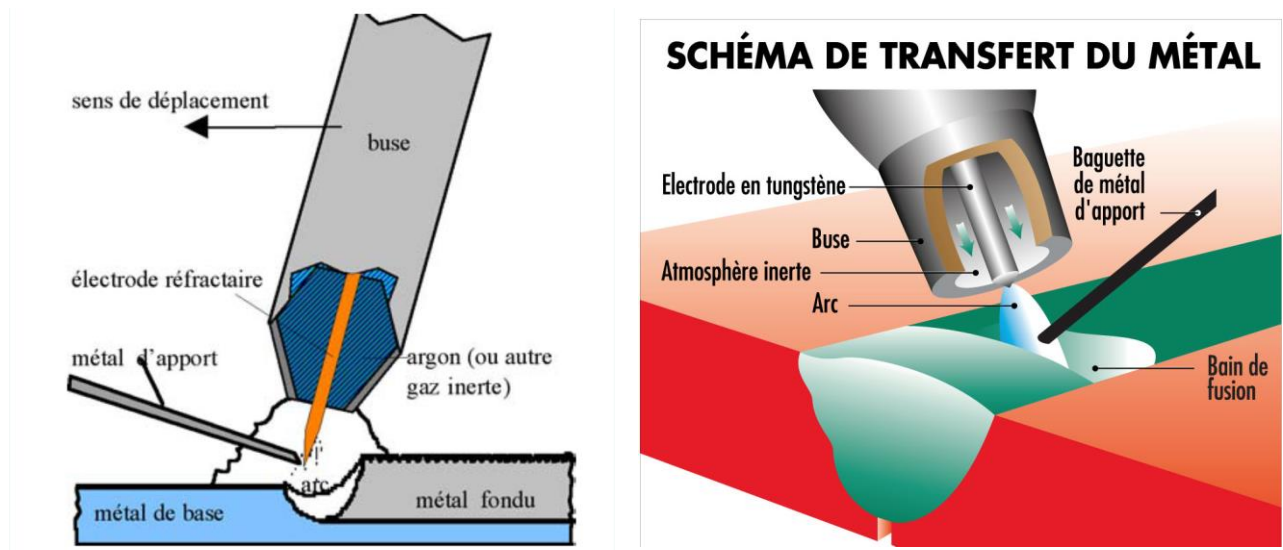


Figure I 21: Schéma de transfert du métal[11]

➤ L'affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG :

La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible est une variable importante. L'affûtage est exécuté à l'aide d'une meuleuse à grain fin avec récupération des poussières. L'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30 et 60 degrés. Les stries d'usinage ou de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode. La pointe d'extrémité du cône doit être adoucie pour supporter les densités de courant. [12]

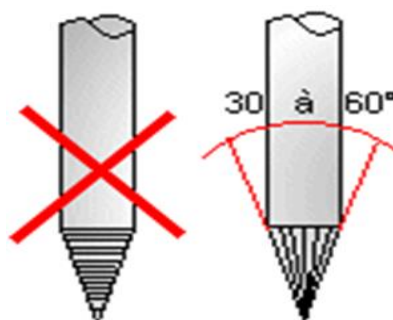


Figure I 22: Affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG. [12]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-6-2-Soudage -Principaux défauts des soudures

Les principaux défauts des soudures que l'on peut rencontrer pendant l'opération de soudage sont :

I-6-2-1-Défauts des cavités

➤ Défauts des soufflures

Sont des défauts généralement sphériques, formés par des bulles de gaz placées dans le cordon de soudure .si elles sont visibles en surface on parle donc des piqûres et si elles sont allongées, on parle donc, à des soufflures vermiculaires (voir la figure ci-après).

Les causes de soufflures peuvent être dues à des courants d'air, un manque de gaz de protection, ou des impuretés dans le joint à souder. Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base. Donc, pour limiter le risque de soufflures il faut s'assurer que la surface du métal de base et d'apport est propre et vérifier que la protection gazeuse est suffisante.[12]

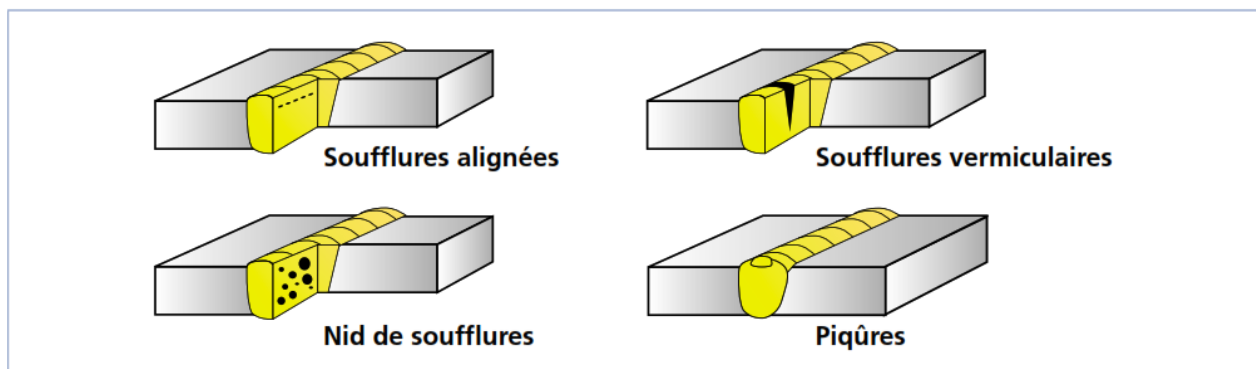


Figure I 232:Défauts de soufflures [12]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

➤ Défauts des retassures

Les retassures sont des défauts sous forme des espaces vides qui apparaissent suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement. Ce sont des défauts non visibles qu'avec un microscope.

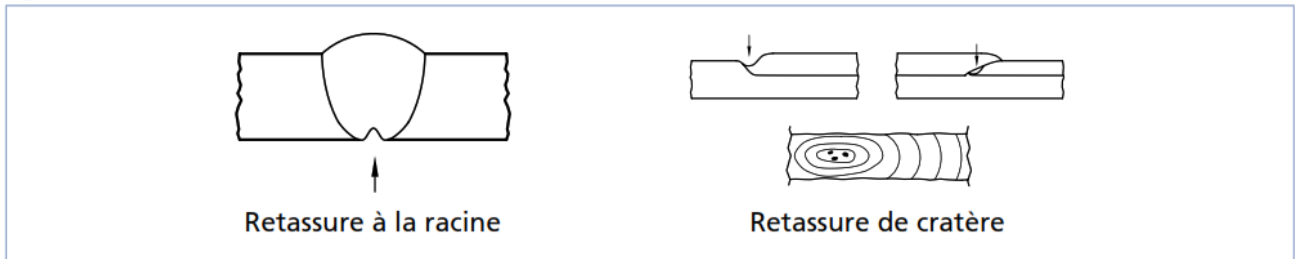


Figure I 24 : Défauts des retassures [12]

➤ Défauts des inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation dans le cordon de soudure, d'un composé étranger, il existe plusieurs types d'inclusions (voir la figure I 25) :

- **Inclusion solide** : Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu comme la poussière.
- **Inclusion métallique** : Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu.

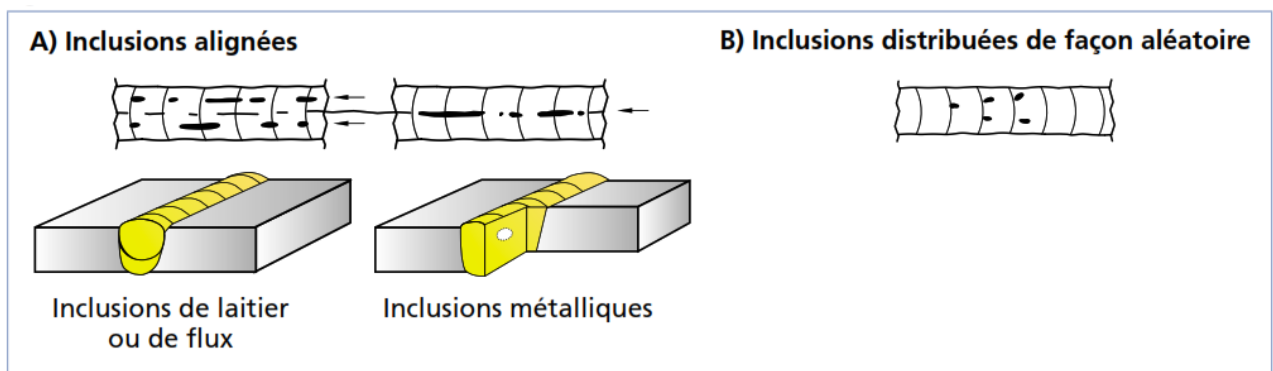


Figure I 25 : Défauts des inclusions [12]

I-6-2-2-Les fissures

Ce sont les plus fréquents défauts dans la soudure. Elles peuvent se produire dans plusieurs endroits (dans le métal fondu, la ZAT, et le métal de base) quand les contraintes localisées dépassent la résistance mécanique maximum du métal.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Les fissures sont divisées en deux catégories selon leur Orientation :

- **Les fissures longitudinales(a)**(parallèle à l'axe de la soudure),
- **Les fissures transversales(b)** (perpendiculaires à l'axe de la soudure).

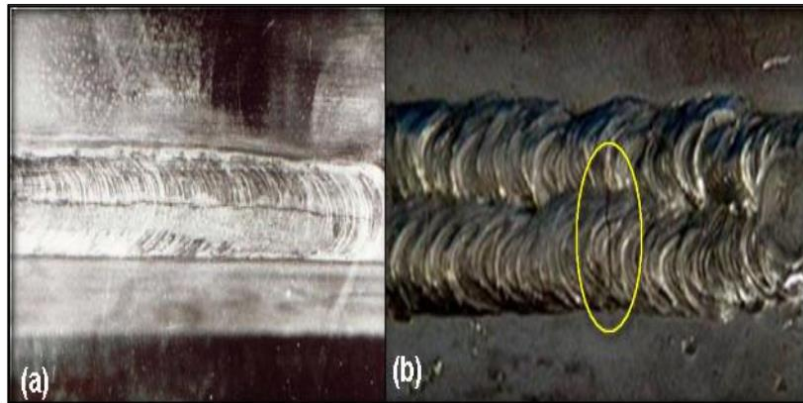


Figure I 26 : Fissure dans le cordon de soudure(longitudinale, Transversale) [12]

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure

- **la fissuration à chaud**
- **la fissuration à froid.**

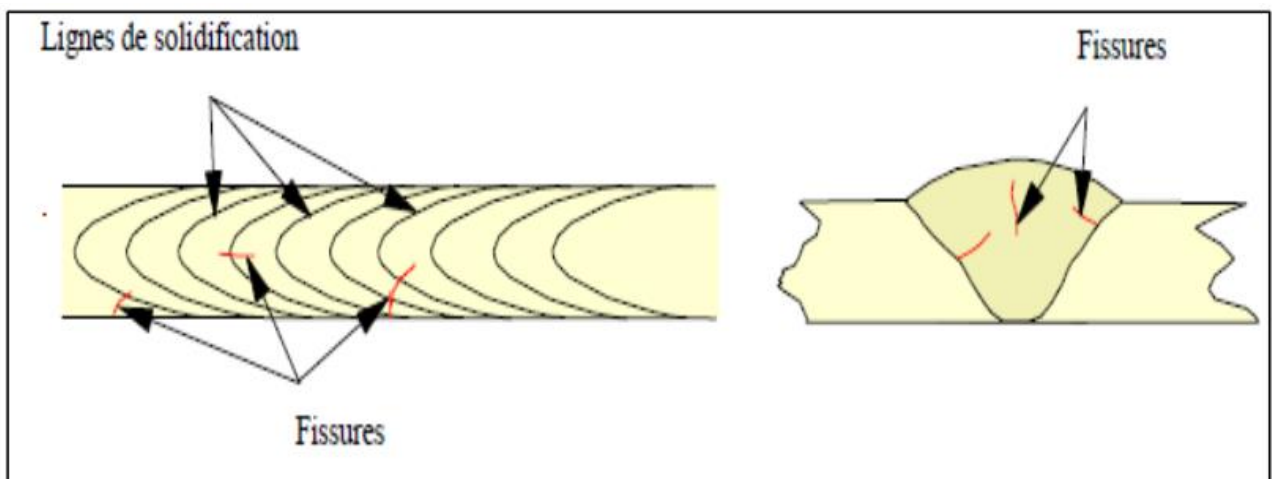


Figure I 27 Fissures à chaud [12]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

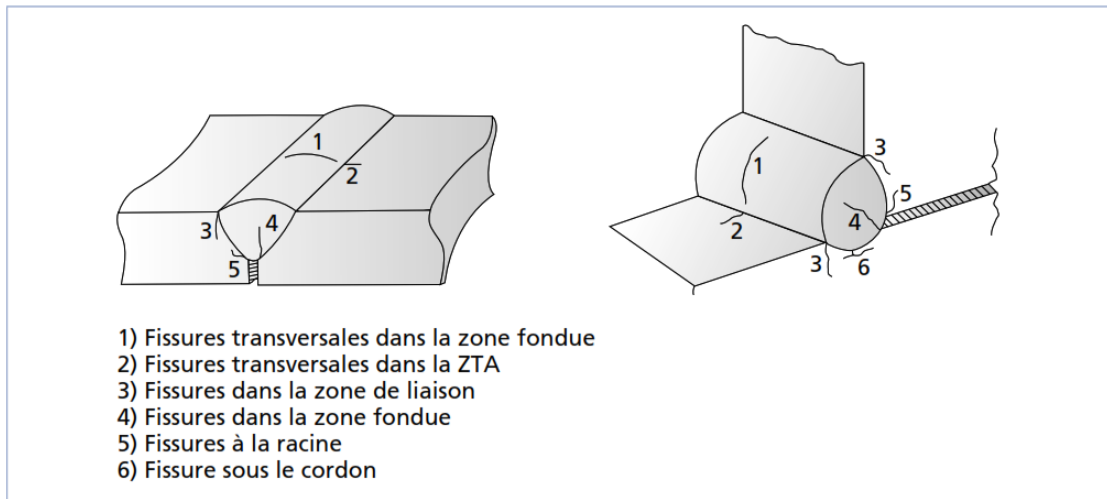


Figure I 28 : Types de la fissure à froid [12]

I-6-2-3-Morsures et les Caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par un creusage ou insuffisance du métal de base sur une partie du cordon.

Un caniveau est une morsure de grande taille proportionnellement à la grandeur du métal de base.

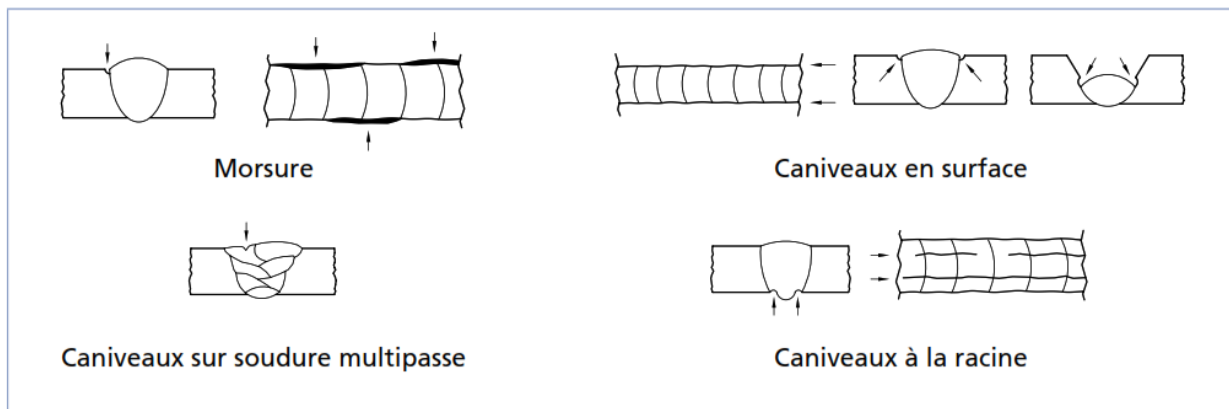


Figure I 29 : Morsures et Caniveaux [12]

I-6-2-4-Défaut de manque de fusion

Les manques de fusion ou collages sont des manques ou absence de contact entre le métal fondu et le métal de base. Les Types de manque de fusion sont :

- Manque de fusion des bords à souder.
- Manque de fusion entre les passes.
- Manque de fusion à la racine.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

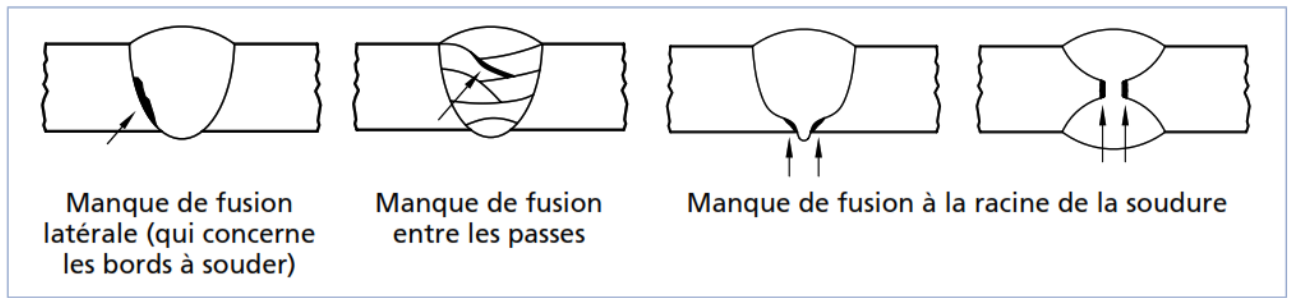
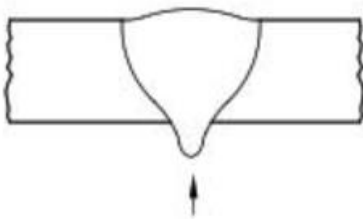


Figure I 30 Défauts de manque de fusion [12]

I-6-2-5-Défauts de pénétration

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration (voir la figure ci-après).

Excès de pénétration



Manque de pénétration

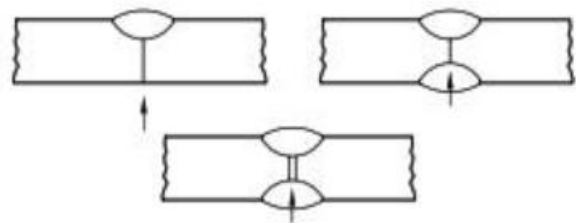


Figure I 31 : Défauts de pénétration [12]

I-6-2-6-Défauts de géométries des cordons

➤ Défaut d'alignement

Un défaut d'alignement est remarqué généralement une soudure bout à bout quand les pièces à unir sont mal bridées et/ou le pointage est insuffisant.

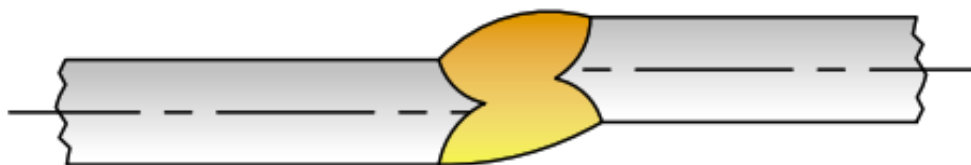


Figure I 32 : Défaut d'alignement [12]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

➤ b. Défauts angulaires

Les défauts angulaires sont des déformations importantes (le pliage ou le cintrage) générés grâce à la dilatation des pièces sous le grand effet calorifique au cours de l'opération du soudage.

I-6-2-7-Défauts des projections

Les projections sont des particules métalliques en fusion projetées pendant le soudage et qui collent au métal de base ou au cordon déjà solidifié.

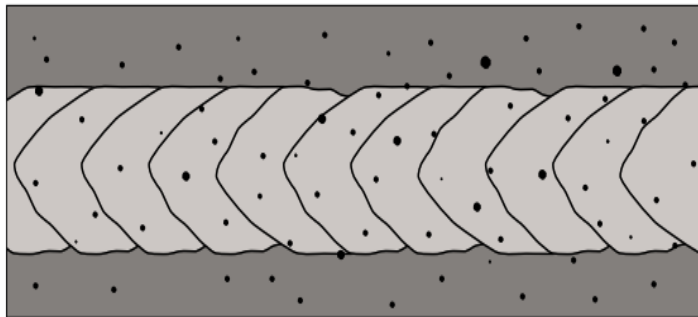


Figure I 33 : Défauts des projections [12]

I-7-Contrôle des soudures

Le contrôle des soudures consiste à vérifier la qualité et l'intégrité des soudures effectuées sur une pièce. Il vise à identifier les éventuels défauts ou imperfections pouvant compromettre la solidité et la durabilité de la soudure. Le contrôle des soudures peut être effectué à différentes étapes du processus de fabrication, y compris avant, pendant et après la réalisation de la soudure. Les principales méthodes de contrôle des soudures ont été mentionnées précédemment, notamment l'inspection visuelle, le ressuage, la magnétoscopie, les ultrasons et la radiographie. Ces méthodes permettent de détecter divers défauts tels que les fissures, les pores, les inclusions, les déformations, etc.[15] [16].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-7-1-Essais destructifs

Les essais destructifs sont des procédures utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques, physiques ou chimiques d'un matériau ou d'un assemblage, en détruisant l'échantillon testé dans le processus. Ces essais sont souvent utilisés pour obtenir des données précises sur les caractéristiques d'un matériau ou d'une soudure, mais ils impliquent généralement la perte de l'échantillon. Voici quelques exemples d'essais destructifs couramment utilisés dans le contrôle des soudures :

-Essai de traction : Cet essai évalue la résistance à la traction d'un matériau en soumettant un échantillon à une force de traction jusqu'à ce qu'il se fracture. Les données obtenues à partir de cet essai incluent la limite d'élasticité, la limite de traction et l'allongement à la rupture, ce qui est important pour évaluer la qualité d'une soudure. [17]



Figure I 34Essai de traction [18]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **Essai de pliage** : Cet essai est utilisé pour évaluer la ductilité et la résistance à la fissuration d'une soudure en pliant un échantillon jusqu'à la rupture. Il peut révéler des défauts tels que les fissures de fatigue, les inclusions ou les soudures mal exécutées.



Figure I 35 Essai de pliage [19]

- **Essai de flexion** : Cet essai évalue la flexibilité et la résistance à la flexion d'une soudure en appliquant une charge sur un échantillon jusqu'à ce qu'il se déforme ou se fracture. Il est utile pour évaluer la qualité des soudures dans des applications où la flexion est un facteur critique, comme dans les structures métalliques. [20]

- **Essai de dureté** : Cet essai mesure la résistance d'un matériau à la pénétration d'une pointe ou d'une denture, ce qui peut fournir des informations sur la résistance et la ductilité d'une soudure. [21]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

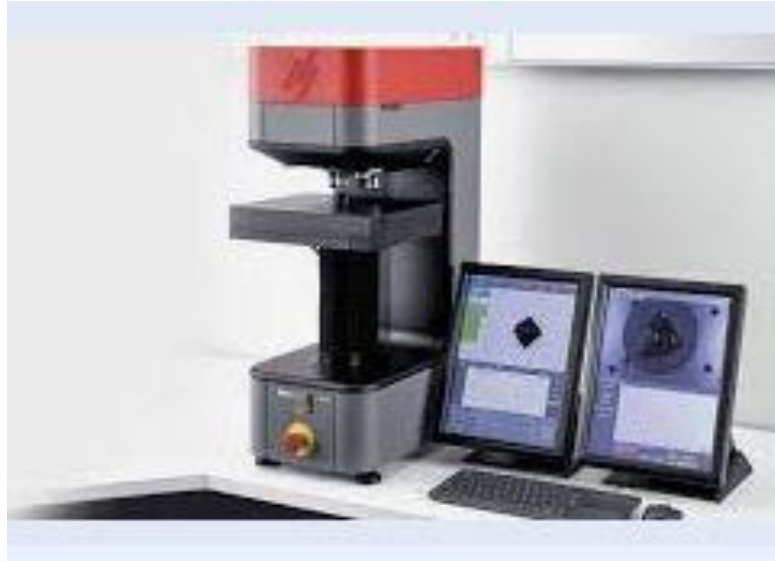


Figure I 36 Essai de dureté [22]

-Essai de résilience : Cet essai évalue la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie lorsqu'il est soumis à un choc soudain, ce qui peut être important pour évaluer la ténacité d'une soudure dans des conditions de charge dynamique.

Ces essais destructifs fournissent des informations précieuses sur les propriétés mécaniques, la résistance et la durabilité des soudures. Ils sont essentiels pour évaluer la qualité et la fiabilité des soudures et pour garantir leur conformité aux normes et aux spécifications applicables. Toutefois, il convient de noter que ces essais nécessitent la destruction des échantillons, ce qui peut être coûteux et limité dans le cadre de la production industrielle. Par conséquent, ils sont souvent utilisés en complément des essais non destructifs pour une évaluation complète des soudures. [23]

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure I 37:Essai de résilience [24]

I-7-2-Essais d'étanchéités[25]

Les essais d'étanchéité sont des procédures utilisées pour vérifier l'intégrité et la fiabilité des soudures en ce qui concerne leur capacité à empêcher les fuites de fluides ou de gaz à travers les joints soudés. Ces tests sont essentiels dans de nombreuses industries pour garantir la sécurité, la qualité et la conformité aux normes. Voici quelques-unes des techniques couramment utilisées pour les essais d'étanchéité des soudures :

- ✓ **Essai de pression hydrostatique:** Cet essai implique le remplissage du système ou de la structure avec un liquide incompressible tel que l'eau, suivi de l'application d'une pression spécifiée pendant une période déterminée. Les fuites sont détectées en surveillant toute baisse de pression.

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure I 38 Essai de pression hydrostatique [26]

- ✓ **Essai de pression pneumatique** : Similaire à l'essai de pression hydrostatique, mais utilisant de l'air comprimé comme fluide de test. Ce test est souvent utilisé pour les systèmes qui ne peuvent pas être remplis d'eau en raison de restrictions de conception ou de sécurité.[25]



Figure I 39 Essai de pression pneumatique [27]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-7-3-Essais Non destructifs

Les essais non destructifs (END), également connus sous le nom de contrôles non destructifs (CND), sont des méthodes d'inspection utilisées pour évaluer la qualité des soudures sans altérer ou endommager les pièces testées. Les techniques d'inspection non destructives telles que la radiographie, l'ultrason, la magnétoscopie et le ressuage pénétrant sont largement utilisées pour détecter les défauts internes ou sur surfaces des soudures sans endommager les pièces. Ces méthodes permettent de détecter les fissures, les inclusions, les déaminations, les porosités, etc. [28]

- ✓ **Radiographie RT** : La radiographie utilise des rayons X ou des rayons gamma pour produire des images des soudures. Ces images révèlent les défauts internes tels que les fissures, les inclusions, les porosités ou les manques de fusion. [29]
- ✓ **Ultrasons UT** : Les ultrasons utilisent des ondes sonores à haute fréquence pour inspecter les soudures. Un transducteur envoie des ondes ultrasonores à travers la soudure, et les réflexions d'ondes résultantes sont analysées pour détecter les défauts tels que les fissures, les inclusions, les porosités ou les manques de fusion. [25]



Figure I 40 : Control des pièces industrielles par ultrason [25]

- ✓ **Magnétoscopie MT** : La magnétoscopie utilise un champ magnétique pour inspecter les soudures. Des particules magnétiques fines sont appliquées à la surface de la soudure, et un champ magnétique est appliqué. Les particules révèlent les lignes de champ magnétique, permettant de détecter les fissures et Autres défauts [25].
- ✓ **Ressuage pénétrant PT** : C'est une Méthode très ancienne utilisée en 1910 chez Rolls Royce.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Cette technique essais non destructifs ne permet de mettre en évidence que les discontinuités débouchant Le ressuage est compatible avec une très grande variété de matériaux à l'exception des matériaux trop poreux.

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

Pour réaliser un examen de ressuage, vous devez faire pénétrer un produit dans les discontinuités, tout en lui permettant de sortir.

Pour cela, la pièce doit être enduite d'un liquide appelé "pénétrant" coloré ou fluorescent (ou les deux !). Le liquide va alors pénétrer par capillarisation à l'intérieur des défauts de la pièce à contrôler. Après un temps de repos, la surface doit être nettoyée et séchée avant d'être recouverte à nouveau d'une couche mince d'un produit dit "révélateur", un produit avec la capacité d'absorber le liquide pénétrant.

Si un défaut est présent sur la pièce, le révélateur va mettre en évidence le pénétrant qui s'était infiltré dans le défaut l'opérateur pour alors, à l'œil nu, constater la présence de discontinuités débouchant sur la surface. [30]

➤ Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant.

- La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler.
- Application et pénétration du liquide du pénétrant dans les fissures.
- Nettoyage de l'excès de pénétrant.
- Application du révélateur.

Le révélateur extrait le pénétrant retenu par les (fissures, porosités, Criques, piqûres. [21]

➤ Temps d'une inspection par pénétrant liquide se fait en six[30]

1^{er} temps : Nettoyage de la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.

2^{ème} temps : Application du pénétrant sur toute la surface à examiner et maintien d'une couche continue de pénétrant pendant tout le temps d'imprégnation.

3^{ème} temps : Elimination du pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate : il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).

4^{ème} temps : Application régulière du révélateur sur toute la surface à examiner.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

5^{ème} temps : Pendant et après développement des indications, inspection soignée en lumière blanche ou/et sous lumière ultraviolette pour repérer la présence, localiser, donner la « nature » et la « grandeur » des discontinuités débouchant à la surface.

6^{ème} temps : Nettoyage de la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage.

Chapitre II :
Méthodes et conditions
expérimentales

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

II-1-Introduction

Ce chapitre détaillera le matériel utilisé pour mener les expérimentations, en mettant en lumière les équipements spécifiques nécessaires à la réalisation des tests sur les joints de soudure de la turbine à gaz GE MS3002. Nous décrirons également en détail la préparation du chantier, soulignant les protocoles suivis pour assurer un environnement de travail sécurisé et optimal.

Une section importante de ce chapitre sera consacrée à la description du rapport d'inspection par Contrôle Non Destructif (CND) des joints de soudure. Nous exposerons en détail les différentes étapes de la technique de CND par PT utilisées.

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des méthodes et des conditions dans lesquelles les expériences ont été menées

II-2-MATERIELS UTILISÉS.

Nous allons présenter une description détaillée de la turbine à gaz GE de type MS3002. Ce type de turbines est largement utilisé dans l'industrie pétrolière pour l'entraînement des compresseurs centrifuges et les pompes à forte entrée air et sortie gaz chaud. Nous allons décrire technologiquement et fonctionnellement cette turbine en s'étalant sur chaque partie constituante.

II-2-1-Caractéristiques de la turbine à gaz GE MS3002

- Marque : GENERALE ELECTRIQUE
- Série du model :MS3002
- Type :JET DERIVATIVES
- Cycle : Simple
- Puissance : 11.290Kw
- Rotation de l'arbre Sens Antihoraire
- Type de fonctionnement Continu
- Vitesse de l'arbre HP de 7100 tr/min
- Vitesse de l'arbre BP de.6500 tr/min
- Commande SPEEDTRONIC MARK V
- Température à l'échappement 542°C
- Température décharge 820°C

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

- Système de démarrage Turbine à détente
- Puissance 23.2 MW
- Atténuation du bruit Silencieux d'admission et d'échappement selon les exigences locales [1]

II-2-2-POIDS DES PIECES NOBLES :

- Corps turbine HP = 2268 kg
- Corps turbine BP = 907 kg
- • Directrice 1ere étage = 136x2 kg
- Rotor générateur de gaz = 3402 kg
- • Rotor turbine de charge = 1400 kg
- Stator BP compresseur axial = 1270 kg
- Stator HP compresseur axial = 862 kg
- • Carter chambre de combustion = 748 kg
- • Diaphragme entre étage = 340 x 2 kg
- • Panneau plénum d'échappement = 272 kg
- • Coude d'admission (filtre / plénum) = 363 kg

NB. : Poids total de la turbine est de : 70 Tonnes.[1]

II-2-3-MOYENS

➤ MOYENS HUMAINS

Les moyens humains nécessaires pour effectuer une révision générale sont Neuf (09) agents :

- (01) Superviseur
- (01) contremaître mécanique
- (07) techniciens mécaniciens

➤ MOYENS DE MANUTENTION

- Grue 25 tonnes

➤ EQUIPEMENT DE MAINTENANCE

- (01) compresseur à air mobile
- (01) nettoyeur à haute pression

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

II-3-PREPARATION DU CHANTIER

➤ CONSIGNATION DE LA MACHINE

Prise de contact avec le chef d'établissement d'une petite réunion pour recenser d'éventuels problèmes sur la machine en question avant l'opération de maintenance et ce pour estimer la durée globale de l'opération.

NB.: Ne jamais anticiper l'opération de démontage avant que l'autorisation du travail soit signée par tous les responsables concernées (chef de station, chargé de la maintenance & le responsable de la sécurité).

II-4-Déroulement de la révision générale

➤ Isolement de la machine (alimentation en gaz, électricité et CO2)

➤ Démontage

- De la toiture –
- Du coude admission d'air,
- Portières & plénum d'admission –
- De la tuyauterie d'air de refroidissement –
- Des injecteurs de gaz –
- Calage de la machine –
- De l'accouplement HP –
- De l'accouplement BP –
- Dépose des (06) brides des chambres de combustion –
- Extraction des arrêtoirs,
- Tubes d'interconnexions & des (06) tubes à flamme figure II 4et II 2
- Dépose des (06) chambres de combustion figure II 1–
- Dépose du carter chambres de combustion –
- Dépose des (06) pièces de transition –figure II 3
- Dépose du corps turbines HP –
- Dépose de la directrice 1er étage voire figure II 5–
- Dépose du support directrice 1er étage –
- Du diaphragme inter-étage –
- Calandre du plénum d'échappement –
- Corps turbine BP - diffuseur échappement –

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

- Demi stator compresseur axial –
 - Des chapeaux de paliers 1,2,3 et 4 –
 - Des rotors HP & BP figure 46
- Nettoyage des organes déposés
 - Inspection visuelle
 - Contrôle non destructif « RESSUAGE PT » de tous les organes
 - Prise des jeux de fonctionnement nécessaire
 - Remplacement des pièces jugé usées.
 - Remontage de l'ensemble des organes
 - Préparation du dossier de l'opération de maintenance
 - Essais de la machine pour évaluation des performances.



Figure II 1 : chambres de combustion



Figure II 2 : tubes à flamme



Figure II 3: Pièces transition



Figure II 4: Tubes d'interconnexions

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales



Figure II 5: directrice HP



Figure II 6: Rotores HP et BP

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

II-5-RAPPORT D'INSPECTION

Il est constitué des travaux contrôle des :

- Injecteur de gaz
- Enveloppes internes des chambres de combustion
- Pièces de transition
- Tubes à flamme
- Tubes d'interconnexion
- Arrêteoirs
- Aubage et cover plates HP & BP
- Directrice 1er & 2eme étage
- Aubage rotorique & statorique du compresseur axial
- Support directrice 1er étage ; - Diaphragme
- Accouplement auxiliaire et de charge
- Paliers porteurs & des butées
- Joints labyrinthes
- Mécanisme de survitesse turbine HP & BP

II.7. PRODUITS UTILISES

Les produits utilisés dans le cadre de cette étude sont le nombre du trois à savoir ; le révélateur de type FLUXO R175 et les deux pénétrants FLUXO P125 et HM-3A. L'ensemble des produits utilisés est présenté en détail sous-dessous ainsi que les affiches techniques de ces produits sont présentées dans l'annexe.

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales



Figure II 7: produits utilisés

II-7-1-Le pénétrant FLUXO P125

➤ Description et Composition

- Pénétrant Coloré Lavable à l'eau ou éliminable au solvant pour contrôle par Ressuage
- Type 2 - Sensibilité 2 (selon EN ISO 3452-2)
- Température d'utilisation : 10°C à 50°C
- Utilisable également à basse température (inf. à 10°C). Nécessité d'augmenter le temps de pénétration.
- Composition : association d'agents tensioactifs, de colorant rouge intense dans un pétrole désaromatisé à haut point éclair.

➤ Propriétés

- Performances : détection de 100 % des défauts sur cale Ni-Cr 50µm et 30µm
- Aspect et Couleur : Liquide rouge
- Masse volumique : 855 kg/m³
- Point éclair : > 82 °C
- Viscosité : entre 3 et 3,5 mm²/s (40°C)
- Compatibilité : avec tous métaux, et certaines céramiques
- Sensibilité 2 selon ISO 3452-2 pour la gamme FLUXO P125 + FLUXO R175

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

II-7-2-Le révélateur FLUXO R175

➤ Description et Composition

- Révélateur à base de Solvant Humique non aqueux pour contrôle par Ressuage.
- Température d'utilisation : 10°C à 50°C.
- Composition : poudre blanche dans un solvant humide non aqueux incolore.

➤ Propriétés

- Performances : détection de 100 % des défauts sur cale Ni-Cr 50µm et 30µm
- Aspect et Couleur : poudre blanche en suspension dans un liquide incolore
- Densité (20°C) : 890 kg/m³
- Point éclair : 12°C
- Compatibilité : avec tous métaux, et certaines céramiques
- Sensibilité 2 selon ISO 3452-2 pour la gamme FLUXO P125 + FLUXO R175

II-8-METHODES D'ETUDE ET CONDITIONS EXPERIMENTALES

II-8-1-Méthodes d'étude (le ressuage)

Le ressuage ne peut détecter que les défauts superficiels qui mènent à la surface. . Les défauts affaiblis ou fermés ne sont que partiellement détectés. Les erreurs internes, en revanche, ne peuvent pas être détectées. De cette manière, des défauts tels que le formage, la fatigue, l'usinage, le traitement thermique et le soudage peuvent être identifiés. Le ressuage peut être appliqué aux métaux tels que l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane et l'acier inoxydable, ainsi qu'aux céramiques, plastiques, Caoutchouc moulé (toutefois, dans le cas des matières plastiques et des mélanges de caoutchouc moulé, il convient de prêter attention à la réactivité avec les produits utilisés et d'effectuer des tests préalables).[23]

II-8-2-CONDITIONS EXPERIMENTALES

Pour réaliser un examen de ressuage, vous devez faire pénétrer un produit dans les discontinuités, tout en lui permettant de sortir. Pour cela, la pièce doit être enduite d'un liquide appelé "pénétrant" coloré ou fluorescent (ou les deux !). Le liquide va alors pénétrer par capillarisation à l'intérieur des défauts de la pièce à contrôler. Après un temps de repos, la surface doit être nettoyée et séchée avant d'être recouverte à nouveau CHAPITRE IV PARTIE

Chapitre II : Méthodes et conditions expérimentales

EXPERIMENTALE 51 d'une couche mince d'un produit dit "révélateur", un produit avec la capacité d'absorber le liquide pénétrant. Si un défaut est présent sur la pièce, le révélateur va mettre en évidence le pénétrant qui s'était infiltré dans le défaut l'opérateur pour alors, à l'œil nu, constater la présence de discontinuités débouchâtes sur la surface.

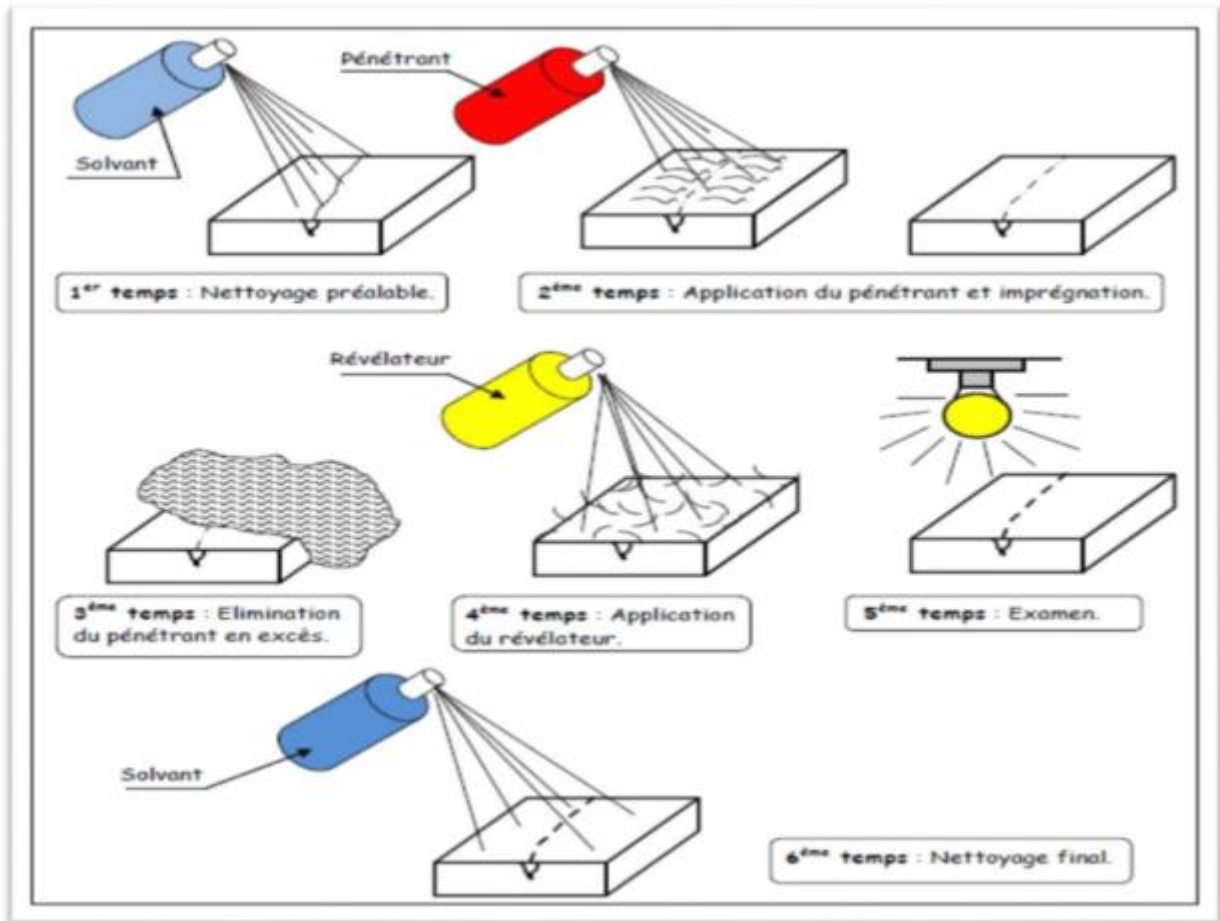


Figure II 8. Schéma qui présente les étapes du ressuage [13]

Chapitre III :

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

Cette section se concentre sur l'application de la technique de ressuage PT comme essai non destructif sur les organes de partie chaude d'une turbine à gaz MS3002.



Figure III.1: Etape nettoyage préalable



Figure III 2: Etape : application du pénétrant



Figure III 3: Etape élimination du pénétrant



Figure III 4: Etape : application du révélateur



Figure III 5: Etape examen (contrôle des différents organes)

Chapitre III : Résultats et discussion

La figure III 1 montre un nettoyage préalable, Cette étape est cruciale car toute contamination sur la surface de la pièce peut empêcher la pénétration du liquide fluorescent ou coloré dans les défauts. Une surface propre assure que les résultats du test ne seront pas faussés par des résidus ou de l'huile. La Figure III 2 présente l'application du pénétrant Le pénétrant, généralement un liquide teinté de couleur rouge, est appliqué sur la surface de la pièce. Les propriétés capillaires du pénétrant lui permettent de s'infiltrer dans les microfissures ou autres discontinuités. La Figure III 3 illustre l'Élimination du pénétrant, Après un temps de pénétration approprié, l'excès de pénétrant est soigneusement éliminé de la surface, tout en veillant à ce que le pénétrant reste dans les défauts.

La Figure 52 montre l'application du révélateur ; Le révélateur est appliqué pour absorber le pénétrant qui s'échappe des défauts, créant ainsi une image visible de la discontinuité. L'absence de couleur rouge, indiquant que le pénétrant n'a pas été absorbé par des défauts, suggère que les pièces examinées sont exemptes de défauts critiques. La figure 53 (examen visuel) l'observation des pièces sous une lumière appropriée révèle les défauts. La présence de traces rouges (indiquant la présence de pénétrant absorbé par le révélateur) signifie que des défauts existent, nécessitant une évaluation supplémentaire pour déterminer si la pièce peut être réutilisée, nécessite des réparations, ou doit être remplacée.



Figure III 6: Contrôle des tubes a flamme

Chapitre III : Résultats et discussion



Figure III 7: Contrôle des pièces de transition



Figure III 8: Contrôle des interconnexions



Figure III 9: Contrôle de la roue HP



Figure III 10: Contrôle de la roue BP

Chapitre III : Résultats et discussion

La figure III 6 montre des Tubes à flamme, ces composants sont essentiels pour la gestion de la combustion dans la turbine. Le test de ressuage peut révéler des fissurations dues à la fatigue thermique. Si des traces de pénétrant sont observées sur le révélateur, cela indique des fissures ou des défauts de surface qui peuvent affecter l'efficacité de la combustion et la durabilité des tubes. La détection précoce de ces anomalies permet de planifier des maintenances correctives avant que des défaillances plus graves ne surviennent.

La figure III 7 montre des Pièces de transition, ces éléments assurent la transition des gaz de combustion à haute température depuis les chambres de combustion vers les premiers étages de la turbine. Les défauts ici peuvent entraîner des pertes de rendement thermique et des risques d'endommagement accru des composants en aval. Une coloration rouge dans ces zones (indiquant la présence de fissures) nécessiterait une analyse plus poussée pour évaluer l'impact de ces défauts sur l'intégrité structurelle des pièces.

La figure III 8 illustre des Interconnexions, ces composants sont déterminants pour l'intégrité structurelle de la turbine, car ils lient différents modules ou sections. Le ressuage aide à identifier des problèmes potentiels qui pourraient compromettre la stabilité mécanique de la turbine. Des anomalies détectées ici pourraient indiquer une nécessité de remplacement ou de renforcement des joints ou des liaisons.

La Figure III 9 montre la roue HP (Haute Pression) et la figure III 10 montre la roue BP (Basse Pression) où ces roues de la turbine sont soumises à d'intenses contraintes mécaniques et thermiques. Des défauts dans ces composants peuvent mener à des défaillances catastrophiques. Le ressuage révèle toute discontinuité de surface qui pourrait évoluer en fissure sous l'effet des contraintes opérationnelles. La présence de signaux rouges sur ces composants est particulièrement critique et doit être traitée immédiatement pour éviter des ruptures de rotor.

Pour chaque composant testé, il est essentiel de comparer les observations visuelles avec les critères de tolérance spécifiques de l'industrie et du fabricant. Des mesures correctives doivent être envisagées en fonction de la gravité et de la localisation des défauts détectés. La décision de réparer, de remplacer, ou de continuer l'exploitation d'un composant doit être prise sur la base d'une évaluation technique approfondie, en tenant compte des implications pour la sécurité et la performance de la turbine.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre étude expérimentale sur les joints de soudure de la partie chaude d'une turbine à gaz (GE MS3002) a été réalisée après un contrôle non destructif par ressuage (PT), a mis en lumière les défis techniques et économiques associés à la réparation et au remplacement des composants de la partie chaude de la turbine à gaz. Les turbines à gaz, éléments clés dans la production d'énergie, exigent des organes de haute fiabilité, en particulier les soudures exposées à des températures élevées et leur longévité

Les résultats obtenus après le contrôle par ressuage ont mis en évidence la présence de défauts superficiels, tels que des fissures et des porosités, dans certaines soudures. Ces défauts, peuvent avoir des implications significatives sur la durée de vie et la performance des composants de la partie chaude soudés. En comparant les soudures réparées à des organes neufs, il a été observé que les premiers présentent une durée de vie inférieure en raison des contraintes résiduelles et des imperfections essentielles aux réparations.

Cette recherche a démontré que les coûts élevés des réparations et des composants neufs des turbines à gaz (GE MS3002) sont principalement dus à la complexité technique des réparations, aux matériaux et équipements spécialisés, à la durée de vie réduite des organes réparés et aux normes strictes à respecter. En perspective soulignent l'importance de développer des stratégies de maintenance préventive et d'investir dans des technologies de soudage et des matériaux plus durables pour réduire les coûts à long terme. Des innovations dans les techniques de réparation et des améliorations dans la qualité des matériaux pourraient également contribuer à réduire les coûts et à prolonger la durée de vie des composants, assurant ainsi une meilleure performance et une fiabilité accrue des turbines à gaz.

Références

Références

Références:

1. REHAJEM F. BOUGHENAMA C. MÉMOIRE DE MASTER 2019/2020 Maintenance de circuit de pompe hydraulique de démarrage de la turbine à gaz UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA 2019/2020
2. Futur science.com <https://static.techno-science.net/illustration>
3. REVU SONATRACH <https://sonatrach.com › uploads › 2022/11>
4. Bensaada S. LE SOUDAGE. OPU Autours: Université de Biskra
5. MÉMOIRE DE MASTER. LOUNADI, Y. 2022. Étude expérimentale de l'effet des variations géométrique sur la soudabilité par le procédé TIG, méthodes semi-automatique et automatique : cas d'un métal galvanisé. Université Aboubakr Belkaïd .Tlemcen.
6. MÉMOIRE DE MASTER. BELABED, A. 2017. Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles. Faculté de TECHNOLOGIE. Université Abou Bekr Belkaïd. Tlemcen.
7. H. GRANJON, " Bases Métallurgiques du Soudage", Publications du Soudage et de ses Application, 2ème édition, 1998.
8. DERFOUF, C. E. (2011). Effet de la soudure sur la structure de l'acier (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).
9. MÉMOIRE DE MASTER. BELABED, A. 2017. des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles. Faculté de TECHNOLOGIE. Université Abou Bekr Belkaïd. Tlemcen.
10. N. CAVALLO, "Contribution à la Validation Expérimentale de Modèles décrivant la Z.A.T. lors d'une Opération de Soudage", Thèse de doctorat – INSA de Lyon – Avril 1998.
11. MÉMOIRE DE MASTER. BERARDI, I. 2022. étude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure. FACULTE DE TECHNOLOGIE. DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. M'SILA
12. MÉMOIRE DE MASTER. LOUNADI, Y. 2022. Étude expérimentale de l'effet des variations géométrique sur la soudabilité par le procédé TIG, méthodes semi-automatique et automatique : cas d'un métal galvanisé. Université Aboubakr Belkaïd .Tlemcen.
13. MÉMOIRE DE MASTER. RAHMOUNE, H. REKIS, H. 2022. Etude pratique de soudage pipeline au niveau de l'entreprise nationale de canalisation. Domaine : Sciences et Techniques. Université Mohamed Khider de Biskra. 70PP
14. <https://wikidocs.univ-lorraine.fr/plugins/viewsource/viewpagesrc.action?pageId=206143717>
15. Technologue Pro <https://www.technologuepro.com › chapitre-4>
16. <https://fr.scribd.com › document › Essai de résilience>
17. <https://www.mesures-et-tests.com/p/4573/essai-de-resilience-et-la-mecanique-de-la-rupture>
18. P. BERTHET, "Déformations et Contraintes en Soudage", Publications de la Soudure Autogène, EYROLLES, 1988.