الجـــــــــــــمهـوريـــة الجـــــــــزائرية الديمـــــقراطية الشـــــــعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــعليـم العـــــالي والبـــــــحث العـــلـمـي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــامعة أبي بكـــر بلـقـايد– تـلمســـــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

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

En : **Génie Mécanique**

Spécialité **:** ***Assemblages Soudés et Matériaux***

Par : **AOUAD Abdelbasset**

Thème

Optimisation des procédés de soudure pour améliorer les caractéristiques mécaniques

Soutenu publiquement, le …../..../2026, devant le jury composé de

M/KARA-ALI Djamal	MCA	Université de Tlemcen	Président
M/SEBAA Fethi	MCA	Université de Tlemcen	Professeur
M/HADJOUI Féthi	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à mon parcours, à ma formation et à l'aboutissement de ce travail.

À mes parents, modèles de courage, de sagesse et de bienveillance, qui m'ont toujours soutenu avec amour et patience. Vous avez cru en moi dans les moments où moi-même j'en doutais. Votre foi en mes capacités, vos sacrifices silencieux, et votre constante présence m'ont porté durant toutes ces années. Je vous dois bien plus que des remerciements, je vous dois cette réussite.

À mes frères et sœurs, pour leurs encouragements, leur humour et leur compréhension.

À mes amis proches, pour leur soutien moral, leurs conseils avisés et leur capacité à m'écouter sans juger. Merci pour les discussions constructives, les moments de détente et cette précieuse camaraderie qui m'a permis de garder l'équilibre tout au long de ce parcours.

À mes enseignants, pour leur dévouement, leur rigueur et leurs enseignements qui ont nourri ma réflexion.

Enfin, à moi-même, pour avoir tenu bon malgré les doutes, les échecs passagers et les nuits blanches. Ce mémoire représente plus qu'un accomplissement académique, c'est une preuve de persévérance, de discipline et de croissance personnelle.

Remerciements

Je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la volonté et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui, par leur soutien, leurs conseils ou leur présence, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie sincèrement HADJOUI Fethi , pour sa disponibilité, ses remarques pertinentes et ses encouragements constants, sa bienveillance et son exigence ont été déterminants dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants et membres du corps pédagogique d'Université Aboubakr Belkaïd, pour la qualité de leur enseignement, leur accompagnement tout au long de ma formation.

Je souhaite remercier chaleureusement ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur confiance en moi. Leur soutien moral et affectif a été une source inestimable d'énergie et de motivation. Mes amis, anciens et nouveaux, trouvent aussi ici toute ma reconnaissance.

A toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont croisé ma route durant ces mois de travail, je dis merci. Votre soutien a été précieux, et ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

Abstract

This study presents a review of welding processes and their influence on the mechanical properties and weldability of steels used in industrial applications, particularly in the oil and gas transport sector. The main welding techniques are examined, namely fusion welding, arc welding, resistance spot welding, and plasma welding, in order to highlight their respective principles, advantages, and fields of application.

The mechanical properties of metals, including tensile strength, hardness, and toughness, are analyzed in relation to the metallurgical transformations induced by the thermal cycles of welding. Particular attention is given to the concept of weldability, which reflects the ability of a material to be joined without the occurrence of defects or significant degradation of its mechanical performance. A comparative analysis of steel grades used in pipeline manufacturing is also carried out, based on data related to Sonatrach pipeline applications, in order to evaluate their behavior under welding conditions.

The results emphasize the strong relationship between the chosen welding process, the resulting microstructure, and the final mechanical properties of the welded joint. They also confirm that an appropriate selection of welding parameters is essential to ensure the structural integrity and reliability of welded steel structures, especially pipelines subjected to severe operating conditions.

In conclusion, this work provides a synthesized understanding of welding technologies and their impact on steel performance, offering a useful basis for optimizing welding procedures in critical industrial applications such as pipeline construction.

Keywords: Welding, weldability, mechanical properties, steel, fusion welding, pipeline.

ملخص

تقدم هذه الدراسة مراجعة لعمليات اللحام وتأثيرها على الخواص الميكانيكية وقابلية لحام الفولاذ المستخدم في التطبيقات الصناعية، لا سيما في قطاع نقل النفط والغاز. وتتناول الدراسة تقنيات اللحام الرئيسية، وهي: لحام الانصهار، ولحام القوس الكهربائي، ولحام المقاومة النقطية، ولحام البلازما، وذلك لتسليط الضوء على مبادئها ومزاياها ومجالات تطبيقها.

وتُحلل الخواص الميكانيكية للمعادن، بما في ذلك مقاومة الشد والصلابة والمتانة، في ضوء التحولات المعدنية الناتجة عن دورات اللحام الحرارية. ويُركز البحث بشكل خاص على مفهوم قابلية اللحام، الذي يعكس قدرة المادة على الالتحام دون حدوث عيوب أو تدهور ملحوظ في أدائها الميكانيكي. كما تُجرى دراسة مقارنة لأنواع الفولاذ المستخدمة في تصنيع خطوط الأنابيب، استنادًا إلى بيانات متعلقة بتطبيقات خطوط أنابيب سوناطراك، لتقييم سلوكها في ظروف اللحام.

وتؤكد النتائج على العلاقة الوثيقة بين عملية اللحام المختارة، والبنية المجهرية الناتجة، والخواص الميكانيكية النهائية للوصلة الملحومة. كما يؤكدون على أن اختيار معايير اللحام المناسبة أمرٌ بالغ الأهمية لضمان السلامة الهيكلية والموثوقية للهياكل الفولاذية الملحومة، لا سيما خطوط الأنابيب المعرضة لظروف تشغيل قاسية.

وختامًا، يقدم هذا العمل فهمًا شاملًا لتقنيات اللحام وتأثيرها على أداء الفولاذ، مما يوفر أساسًا مفيدًا لتحسين إجراءات اللحام في التطبيقات الصناعية الحيوية، مثل إنشاء خطوط الأنابيب.

الكلمات المفتاحية: اللحام، قابلية اللحام، الخواص الميكانيكية، الفولاذ، اللحام الانصهاري، خطوط *الأنابيب*.

Résumé

Cette étude présente une synthèse des procédés de soudage et de leur influence sur les propriétés mécaniques et la soudabilité des aciers utilisés dans les applications industrielles, notamment dans le secteur du transport pétrolier et gazier. Les principales techniques de soudage sont examinées : soudage par fusion, soudage à l'arc, soudage par points par résistance et soudage plasma, afin de mettre en évidence leurs principes, avantages et domaines d'application respectifs.

Les propriétés mécaniques des métaux, telles que la résistance à la traction, la dureté et la ténacité, sont analysées en relation avec les transformations métallurgiques induites par les cycles thermiques du soudage. Une attention particulière est portée au concept de soudabilité, qui reflète l'aptitude d'un matériau à être assemblé sans apparition de défauts ni dégradation significative de ses performances mécaniques. Une analyse comparative des nuances d'acier utilisées dans la fabrication de pipelines est également réalisée, à partir de données relatives aux applications de Sonatrach, afin d'évaluer leur comportement en conditions de soudage.

Les résultats soulignent la forte corrélation entre le procédé de soudage choisi, la microstructure résultante et les propriétés mécaniques finales du joint soudé. Ils confirment également qu'une sélection appropriée des paramètres de soudage est essentielle pour garantir l'intégrité structurelle et la fiabilité des structures en acier soudées, notamment les pipelines soumis à des conditions d'exploitation sévères.

En conclusion, ce travail offre une compréhension synthétique des technologies de soudage et de leur impact sur les performances de l'acier, fournissant ainsi une base utile pour l'optimisation des procédés de soudage dans des applications industrielles critiques telles que la construction de pipelines.

Mots-clés : soudage, soudabilité, propriétés mécaniques, acier, soudage par fusion, pipeline.

Sommaire

Dédicace ..... **I**
Remerciements ..... **II**
Abstract ..... **III**
ملخص ..... **IV**
Résumé ..... **V**
Sommaire ..... **VI**
Liste des figures ..... **IX**
Liste des abréviations ..... **XI**
Introduction Générale ..... **L**
Chapitre 1 ..... **1**
Généralité sur le soudage **1**
Introduction 2
1.1 Origines du soudage 2
1.2 Définition 2
1.2.1 Importance de soudage dans l'industrie 3
1.2.2 Types de soudure 3
1.2.3 Métallurgie de soudage 4
1.2.4 Matériaux de base en soudage 4
1.3 Classification des procédés de soudage 6
1.3.1 Paramètres de soudage 7
1.4 Soudabilité des métaux 8
1.4.1 Définition 8
1.4.2 Facteurs influençant la soudabilité d'un métal 9
1.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) et transformations métallurgiques 10
1.4.4 Pré-chauffage et gestion de l'énergie thermique 10
1.4.5 Principaux défauts liés à une soudabilité mal maîtrisée 10
Conclusion 11
Chapitre 2 ..... **12**
Comparaison entre les procédés de soudage **12**
Introduction 13
2.1 Soudage par fusion 13
2.1.1 Définition 13

2.1.2 Principe 14
2.1.3 Types d'électrodes 14
2.2 Soudage à l'arc électrique 14
2.2.1 Soudage à l'électrode enrobée (MMA ou SMAW) 15
2.2.2 Soudage à fil fourré (FCAW) 16
2.2.3 Soudage au gaz inerte métallique (MIG) 17
2.2.4 Soudage au gaz inerte au tungstène (TIG) 18
2.2.5 Soudage à l'arc submergé (SAW) 19
2.2.6 Autres procédés 20
2.3 Soudage par pression 24
2.3.1 Soudage par point 24
2.3.2 Soudage par friction malaxage (FSW) 26
2.3.3 Soudage à la molette 27
Conclusion 29
Chapitre 3 30
Caractéristiques mécaniques et méthodes d'optimisation 30
Introduction 31
3.1 Principales caractéristiques mécaniques des métaux 31
3.1.1 Résistance mécanique 31
3.1.2 Allongement à la rupture 31
3.1.3 Ductilité et malléabilité 32
3.1.4 Résilience 32
3.1.5 Dureté 32
3.1.6 Fluage 32
3.2 Méthodes d'essais mécaniques 32
3.2.1 Essai de traction 33
3.2.2 Essai de dureté 33
3.2.3 Essai de résilience 34
3.2.4 Essai de flexion 34
3.2.5 Essais de fatigue 34
3.3 Comportement élastique 34
3.4 Comportement plastique 36
Conclusion 37
Chapitre 4 38
Résultats et discussion 38

Introduction 39
4.1 Calcul de contrainte vraie ,déformation vraie et déformation plastique 39
4.1.1 Déformation nominale 39
4.1.2 Contrainte Nominale 39
4.1.3 Calcul de la déformation vraie 40
4.1.4 Calcul de la contrainte vraie 40
4.2 Etapes de simulation de traction par abaqus 40
4.2.1 Ouvrir abaqus avec standard /explicite mode 41
4.2.2 Création de la géométrie (modèle 2D/3D de l'éprouvette 41
4.2.3 Modélisation 42
4.2.3.1 Eprouvette 3D avec joint de soudure visualisant les Zones (MB, ZAT et MF) 42
4.2.4 Définition des matériaux élastique /elastoplastique zone (MB, ZAT, MF) et affectation des sections 43
4.2.5 Assemblage et Création de l'étape de calcul step (static général) 43
4.2.6 Application des conditions aux limites et chargements 43
4.2.6.1 Encastrement et déplacement 43
4.2.7 Définition du maillage 44
4.2.8 Lancement du calcul (Job) 44
4.2.8.1 Analyse des résultats 44
4.2.9 Resultats et discusion 45
4.2.9.1 Discussion comparative 47
4.2.9.2 Effet du courant de soudage (intensité) 47
4.2.9.3 Effet du débit de gaz de protection 47
Conclusion 47
4.2.10 Comparison synthétique 49
Conclusion 49
Conclusion génèrale 50
Webography 51

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Soudure homogène.....04

Figure 1.2 : Soudure hétérogène.....04

Figure 1.3 : Acier doux.....05

Figure 1.4 : Acier inoxydable.....05

Figure 1.5 : Fonte 05

Figure 1.6 : Aluminum.....05

Figure 1.7 : Cuivre.....07

Chapitre 2

Figure 2.1 : Soudage à l'électrode enrobée.....15

Figure 2.2 : Soudage à fil fourré.....16

Figure 2.3 : Soudage au gaz inerte métallique.....17

Figure 2.4 : Soudage au gaz inerte au tungstène.....18

Figure 2.5 : Soudage à l'arc submergé.....19

Figure 2.6 : Soudage au flamme oxyacétylénique.....21

Figure 2.7 : Soudage plasma.....22

Figure 2.8 : Soudage au laser.....23

Figure 2.9 : Soudage par point.....25

Figure 2.10 : Soudage par friction malaxage.....26

Chapitre 3

Figure 3.1 : Phénoménologie de l'élasticité.....35

Figure 3.2 : Phénoménologie de la viscoélasticité.....36

Chapitre 4

Figure 4.1 : Courbe de traction pour 130A17L/min.....46

Figure 4.2 : Courbe de traction pour 150A17L/min.....46

Liste des abréviations

ZAT : Zone Affectée Thermiquement

ZF : Zone Fondue

MB : Métal de Base

MF : Métal Fondu

MA : Métal d'Apport

TIG : Tungsten Inert Gas (soudage à l'électrode de tungstène sous gaz inerte)

MIG : Metal Inert Gas

MAG : Metal Active Gas

SMAW : Shielded Metal Arc Welding (soudage à l'arc avec électrode enrobée)

SAW : Submerged Arc Welding (soudage à l'arc submergé)

Re : Limite d'élasticité

Rm : Résistance à la traction (résistance à la rupture)

A% : Allongement à la rupture

KV : Résilience (essai de flexion par choc, Charpy V)

Ceq / CE : Carbone équivalent

HV : Dureté Vickers

HB : Dureté Brinell

HRC : Dureté Rockwell C

CND : Contrôle Non Destructif

API : American Petroleum Institute

AWS : American Welding Society

ASTM : American Society for Testing and Materials

ISO : International Organization for Standardization

WPS : Welding Procedure Specification (descriptif de mode opératoire de soudage)

PQR : Procedure Qualification Record (procès-verbal de qualification de mode opératoire)

Introduction Générale

Le soudage est aujourd'hui l'un des procédés d'assemblage les plus utilisés dans l'industrie. Que ce soit dans la construction mécanique, le bâtiment, l'automobile ou l'industrie pétrolière et gazière, presque toutes les structures métalliques font appel à cette technique à un moment ou un autre de leur fabrication.

Le soudage n'est pas une invention récente. Depuis l'Antiquité, l'homme a cherché des moyens d'assembler les métaux, d'abord par forgeage, puis progressivement par des méthodes plus élaborées grâce aux avancées technologiques. Aujourd'hui, on distingue plusieurs grandes familles de procédés de soudage : le soudage par fusion, le soudage à l'arc électrique, le soudage par résistance (notamment le soudage à la molette) et le soudage plasma. Chacun de ces procédés a ses propres caractéristiques, ses avantages, ses limites, et convient plus ou moins bien selon le type de matériau, l'épaisseur des pièces ou encore les conditions d'utilisation.

Pour bien choisir un procédé de soudage, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques des métaux à assembler, ainsi que leur soudabilité, c'est-à-dire leur capacité à être soudés sans que cela n'entraîne de défauts ou une perte de résistance. Cette question est particulièrement importante dans le cas des pipelines utilisés pour le transport des hydrocarbures, où une soudure défaillante peut avoir des conséquences graves, aussi bien sur le plan de la sécurité que sur le plan économique. C'est d'ailleurs un sujet qui a déjà fait l'objet d'études, notamment sur la comparaison de différents aciers destinés aux pipelines de la Sonatrach.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail. L'objectif est de présenter, dans un premier temps, une synthèse sur le soudage : son historique, ses principaux procédés, ainsi que les notions de propriétés mécaniques et de soudabilité des aciers. Ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres qui permettent d'aborder ces différents aspects de manière progressive et structurée.

Chapitre 1

Généralité sur le soudage

Introduction :

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

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

Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects : Le soudage automatique et le soudage hétérogène.

1.1 Origines du soudage :

L'origine du soudage est ancienne, puisque les premières manifestations de ce procédé remontent à l'âge du bronze et à l'âge du fer. À cette époque, les forgerons recouraient à des techniques rudimentaires de soudage à la forge, fondées sur le chauffage puis le martelage des pièces métalliques, afin de façonner outils, armes et divers objets utilitaires.

Au Moyen Âge, l'introduction du laitier a constitué une avancée notable, contribuant à renforcer la résistance et à améliorer la qualité des assemblages métalliques. Ces procédés, bien que rudimentaires au regard des standards actuels, marquent une étape fondatrice dans l'évolution du soudage et ont ainsi ouvert la voie à l'émergence de technologies plus spécialisées et performantes. **[1]**

1.2 Définition :

Le soudage des métaux constitue un procédé d'assemblage permanent visant à établir une continuité métallique entre les pièces à assembler. On désigne par le terme « soudure » le joint résultant de la fusion des bords des pièces soudées, cette fusion pouvant s'opérer avec ou sans apport d'un métal additionnel. Ainsi, la soudure peut résulter soit exclusivement du mélange des métaux de base c'est-à-dire des métaux constituant les pièces à assembler, soit de la combinaison de ces derniers avec un métal d'apport.

Un grand nombre de métaux se prêtent à l'opération de soudage, à condition qu'une étude préalable rigoureuse soit menée et qu'un mode opératoire spécifique soit défini. Parmi les

matériaux couramment soudés figurent notamment les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel, ainsi que leurs alliages respectifs.

Il convient de souligner que le soudage se caractérise par une fusion localisée des éléments à assembler, ce qui le distingue fondamentalement du brasage, procédé au cours duquel les métaux de base ne subissent, en aucun cas, de fusion. **[2]**

1.2.1 Importance de soudage dans l'industrie :

Le soudage joue un rôle essentiel dans diverses applications de l'industrie de la construction :

- *Structures métalliques :* Il est largement employé pour assembler les charpentes des bâtiments et des ponts. Ces soudures doivent garantir une résistance optimale face aux charges importantes ainsi qu'aux conditions environnementales telles que le vent, les séismes et les variations de température.

- *Pipelines :* Les joints soudés sont indispensables dans la construction des conduites destinées au transport de l'eau, du pétrole, du gaz et d'autres fluides. Leur qualité influe directement sur la sécurité et l'efficacité du réseau.

- *Armatures en béton :* Le soudage est utilisé pour l'assemblage des cages d'armature et des structures de renforcement dans le béton. Ces soudures assurent la solidité nécessaire pour préserver l'intégrité de l'ouvrage face aux charges qu'il subit.

- *Infrastructures :* Dans la construction de ponts, chemins de fer et tunnels, le soudage est un élément clé garantissant la robustesse et la longévité des ouvrages. Des soudures de haute qualité sont essentielles pour assurer leur fiabilité et leur sécurité.

1.2.2 Types de soudure :

On distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.



Figure 1.1 : Soudure homogène

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



Figure 1.2 : Soudure hétérogène

1.2.3 Métallurgie de soudage :

La réussite d'un procédé de soudage repose sur un principe essentiel : assurer la continuité métallique entre les pièces à assembler. Cela implique la mise en œuvre de forces de liaison interatomiques de nature métallique, un cycle thermique adapté au soudage, et l'absence de corps étrangers pouvant compromettre l'union.

1.2.4 Matériaux de base en soudage :

Le processus de soudage repose sur une sélection rigoureuse des matériaux et des techniques appropriées, condition indispensable à l'obtention de joints de qualité et durables dans le temps. La diversité des matériaux métalliques employés répond à des exigences industrielles variées, chacun se distinguant par des propriétés physico-chimiques et des domaines d'application spécifiques.

- Les principaux matériaux utilisés dans les procédés de soudage :
  - Acier doux.
  - Acier Inoxydable.
  - Aluminium.
  - Fonte.
  - Cuivre.



Figure 1.3 : Acier doux



Figure 1.4 : Acier inoxydable



Figure 1.5 : Fonte

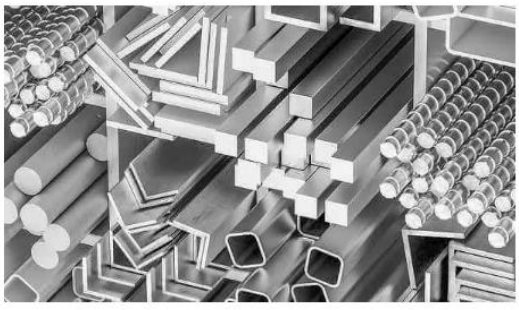


Figure 1.6 : Aluminum



Figure 1.7 : Cuivre

1.3 Classification des procédés de soudage :

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

1) Selon l'état du métal pendant le soudage

- ✓ Soudage par fusion.
- ✓ Soudage par pression.

2) Selon la source d'énergie

- ✓ Energie électrique.
- ✓ Energie chimique.
- ✓ Energie mécanique.
- ✓ Energie focalisée.

3) Selon les paramètres physiques :

Les paramètres physiques, tels que la température, la pression et l'environnement extérieur, influencent directement le processus de soudage. La température est essentielle pour assurer la fusion des matériaux, tandis que la pression facilite leur liaison. De plus, l'environnement extérieur peut intervenir dans les réactions chimiques ou protéger le bain de fusion contre l'oxydation.

4) Selon le mode d'élaboration de la continuité de la matière :

Ce critère concerne le mode de formation de la liaison entre les matériaux. Il existe deux principaux mécanismes : la solidification à partir de l'état liquide et la diffusion à l'état solide. Dans le premier cas, les matériaux fondent, se mélangent, puis forment une liaison solide en

refroidissant. Dans le second, les matériaux restent solides, mais les atomes migrent à l'interface, créant ainsi une liaison durable.

5) Selon la morphologie de la liaison réalisée :

La morphologie de la liaison fait référence à la forme et à la structure de la zone soudée. Elle dépend du procédé de soudage, des matériaux assemblés et des conditions de soudage. Selon la technique utilisée, les soudures peuvent être linéaires, circulaires ou adopter d'autres configurations spécifiques.

1.3.1 Paramètres de soudage :

Les paramètres de soudage conditionnent l'interaction entre le métal de base et le métal d'apport tout au long du processus de soudage. Leur réglage rigoureux constitue un préalable indispensable à l'obtention de cordons de soudure présentant à la fois robustesse mécanique, durabilité et qualité esthétique. Cinq paramètres fondamentaux méritent une attention particulière.

1) Intensité du courant :

L'intensité du courant détermine directement la quantité de chaleur générée lors du soudage. Une intensité élevée favorise une pénétration profonde du métal, mais expose à des risques de surchauffe et de déformation de la pièce. À l'inverse, une intensité insuffisante compromet la fusion et fragilise la liaison soudée. L'optimisation de ce paramètre doit ainsi être adaptée aux spécificités de chaque projet.

2) Tension de l'arc :

La tension de l'arc conditionne la stabilité du processus et, par conséquent, la qualité du soudage. Un réglage adéquat garantit une fusion homogène et une dépose régulière du métal d'apport, tandis que des variations de tension engendrent des défauts tels que projections ou pénétration irrégulière. La maîtrise de ce paramètre est donc essentielle à l'obtention d'une soudure stable.

3) Vitesse de dépôt :

La vitesse de dépôt du métal d'apport influence directement le profil du cordon et le volume de matière déposée. Une vitesse excessive peut provoquer une fusion incomplète,

alors qu'une vitesse insuffisante entraîne des surépaisseurs et des défauts structurels. Ce paramètre doit être ajusté selon les exigences propres à chaque application.

4) Débit de gaz de protection :

Le débit de gaz de protection prévient l'oxydation du bain de fusion et assure la propreté du cordon. Un débit trop faible favorise les contaminations et imperfections, tandis qu'un débit excessif génère des turbulences responsables de pertes thermiques. Le choix du gaz et le réglage de son débit doivent être adaptés aux matériaux et conditions de soudage.

5) Angle de soudage :

L'inclinaison de la torche ou de l'électrode par rapport à la pièce influence la qualité de la fusion et la géométrie du cordon. Un positionnement approprié garantit une répartition homogène de la chaleur ainsi qu'une pénétration adéquate du métal d'apport, faisant de ce paramètre un facteur déterminant de la réussite de l'opération.

1.4 Soudabilité des métaux :

1.4.1 Définition :

La soudabilité correspond à la capacité d'un matériau à être assemblé par soudage tout en préservant des propriétés mécaniques adéquates (résistance, ductilité, résistance à la fatigue, étanchéité) ainsi qu'une qualité de joint conforme à l'usage prévu. Un matériau est dit soudable lorsqu'il résiste au cycle thermique imposé par le procédé sans développer de défauts majeurs, et qu'il autorise l'obtention d'un assemblage fiable moyennant des paramètres et précautions usuels. **[3]**

- Les trois dimensions de la soudabilité :

- ✓ ***Soudabilité métallurgique :*** elle porte sur les modifications internes induites par l'apport de chaleur (évolution structurale, variations de dureté, risques de fragilisation).
- ✓ ***Soudabilité opératoire :*** elle concerne la mise en œuvre pratique du soudage — préparation des bords à assembler, accessibilité de la zone à souder, sensibilité du matériau aux impuretés, stabilité de l'arc électrique, et risques de déformation de la pièce.
- ✓ ***Soudabilité en service :*** elle évalue le comportement du joint soudé dans la durée, face aux sollicitations rencontrées en exploitation (vibrations, corrosion, cycles thermiques, chocs, contraintes cycliques).

La soudabilité n'est pas une propriété intrinsèque et figée du matériau, mais une notion relative au contexte d'application. Un même métal peut ainsi être considéré comme facilement soudable dans un contexte donné (ex. réparation courante) et comme délicat dans un autre (ex. tuyauterie sous pression, construction soumise à fatigue). C'est l'évolution des exigences liées à l'application et non une transformation du matériau lui-même qui modifie l'appréciation portée sur sa soudabilité.

1.4.2 Facteurs influençant la soudabilité d'un métal :

La soudabilité d'un métal résulte de l'interaction de plusieurs paramètres, relatifs tant au matériau qu'aux conditions opératoires du soudage.

1. Composition chimique :

Pour les aciers, la teneur en carbone et les éléments d'alliage (Mn, Cr, Mo, Ni, V) conditionnent la sensibilité à la fissuration et la dureté post-refroidissement. Cette influence est synthétisée par l'équivalent carbone : sa valeur croissante impose des précautions renforcées (préchauffage, maîtrise de l'apport thermique, choix du métal d'apport, séquençage des passes).

2. Spécificités selon les matériaux :

- Aluminium : forte conductivité thermique et dilatation élevée → échauffement rapide, déformations, nécessité d'une protection gazeuse rigoureuse contre l'oxydation.
- Inox : sensibilité variable à la déformation et à certains phénomènes métallurgiques selon la famille, exigeant un contrôle précis de l'énergie thermique et du gaz de protection.
- Fonte : risque élevé de fissuration, nécessitant préchauffage et méthodes d'assemblage adaptées.
- Titane : bonne soudabilité procédurale, mais conditionnée à une protection gazeuse parfaite, toute contamination à chaud fragilisant la zone soudée.

3. Paramètres géométriques et opératoires :

La soudabilité dépend également de l'épaisseur et de la géométrie des pièces, de l'état de surface (oxydes, peinture, graisse, humidité), du degré de bridage de l'assemblage, et du procédé retenu. Ainsi, un joint mince, aisé en TIG, peut devenir problématique en MIG/MAG sans adaptation de la vitesse et de l'énergie ; inversement, une forte épaisseur requiert souvent

plusieurs passes, une préparation des bords, et une stratégie limitant contraintes résiduelles et déformations.

1.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) et transformations métallurgiques :

Le soudage induit un cycle thermique (chauffage puis refroidissement) qui affecte non seulement le métal fondu, mais également les zones adjacentes, appelées zone affectée thermiquement (ZAT). Ce cycle peut provoquer des transformations microstructurales modifiant les propriétés mécaniques du matériau (durcissement, adoucissement, fragilisation, sensibilité accrue à la corrosion). La ZAT constitue ainsi le point critique de l'assemblage soudé. Ses effets varient selon le matériau : sur les aciers, un refroidissement rapide favorise des structures dures et fragiles, propices à la fissuration ; sur les métaux à forte conductivité thermique (aluminium, cuivre), la dissipation rapide de la chaleur exige un apport énergétique accru ; sur les aciers inoxydables, la maîtrise de l'apport thermique limite les déformations. La soudabilité relève donc autant de la métallurgie appliquée que des paramètres opératoires.

1.4.4 Pré-chauffage et gestion de l'énergie thermique :

Le pré-chauffage réduit le gradient thermique entre la zone soudée et le reste de la pièce, limitant ainsi les contraintes internes et les risques de refroidissement excessif. Il est particulièrement recommandé pour les aciers difficiles à souder, les pièces épaisses et la fonte. Par ailleurs, l'énergie linéique (fonction de l'intensité, de la tension, de la vitesse d'avance et du procédé) doit être optimisée : un excès entraîne déformations et élargissement de la ZAT, tandis qu'un déficit génère un manque de fusion et un joint fragile. La soudabilité repose donc sur un équilibre thermique optimal.

1.4.5 Principaux défauts liés à une soudabilité mal maîtrisée :

Une mauvaise prise en compte de la soudabilité favorise l'apparition de défauts, notamment :

- ✓ Fissurations : à chaud (lors de la solidification) ou à froid (liées aux contraintes résiduelles, à l'hydrogène et à une microstructure durcie), particulièrement fréquentes sur la fonte, les aciers alliés et les assemblages fortement bridés.
- ✓ Porosités : dues à des gaz piégés ou à une protection gazeuse insuffisante.
- ✓ Projections : liées à des réglages inadaptés.
- ✓ Manque de pénétration/fusion : résultant d'un apport énergétique insuffisant.

- ✓ Déformations : causées par un apport thermique excessif ou une séquence de soudage inadéquate.

Conclusion :

Le soudage constitue un procédé essentiel dans l'assemblage des matériaux métalliques, en particulier dans les domaines industriels. Sa maîtrise repose sur la compréhension des principes fondamentaux tels que la continuité métallique, la soudabilité des matériaux et les risques associés. Une connaissance approfondie de ces éléments est indispensable pour garantir la qualité, la sécurité et la durabilité des assemblages soudés.

Chapitre 2

Comparaison entre les procédés de soudage

Introduction :

Le soudage est essentiel dans de nombreuses industries, avec plusieurs procédés disponibles. La comparaison entre ces procédés est cruciale pour optimiser les coûts, améliorer la qualité des soudures et augmenter la productivité. En comprenant les avantages et les limites de chaque méthode, les professionnels peuvent choisir le procédé le plus adapté à leurs besoins, garantissant ainsi des assemblages solides et durables tout en réduisant les coûts et les temps de production. Ce chapitre vise à comparer systématiquement les principaux procédés de soudage pour faciliter ce choix.

2.1 Soudage par fusion :

Le soudage par fusion est un processus essentiel pour l'assemblage de matériaux dans les secteurs de la construction et de la fabrication. En utilisant une source de chaleur élevée, il amène les métaux à leur point de fusion et les fusionne lors du refroidissement.

Le soudage par fusion fonctionne sur le principe de chauffer les matériaux de base jusqu'à leur point de fusion, puis de leur permettre de se solidifier en une structure unifiée. Ce processus forme ce que l'on appelle le cordon de soudure. Points clés à connaître :

- *Source de chaleur :* La source de chaleur peut varier , les méthodes courantes incluent les arcs électriques (soudage à l'arc) ou les flammes de gaz (soudage au gaz).
- *Point de fusion :* les matériaux de base doivent atteindre leur point de fusion pour une fusion correcte sans qu'il soit nécessaire d'appliquer une pression externe.
- *Solidification :* lors du refroidissement, les matériaux se solidifient pour former un joint et la zone autour de la soudure devient connue sous le nom de zone affectée thermiquement .
- *Matériau de remplissage :* Parfois, un matériau de remplissage est utilisé pour améliorer la résistance et le volume du joint. **[4]**

2.1.1 Définition :

Le soudage à l'arc est utilisé pour assembler et réparer des composants métalliques, ce qui trouve son application dans de multiples industries. Parmi les industries qui dépendent fortement de l'assemblage de pièces métalliques, citons la construction automobile, la

tuyauterie industrielle, la construction navale et l'assemblage de structures métalliques. En raison de la polyvalence des matériaux métalliques, ils sont largement utilisés dans la fabrication moderne, et par conséquent, le soudage à l'arc (en tant qu'outil de fabrication courant pour les métaux) est également largement appliqué.

2.1.2 Principe :

Le processus de soudage à l'arc fonctionne en utilisant un arc électrique pour faire fondre le métal. Un arc est créé en appliquant une tension à travers deux électrodes conductrices distinctes (dont l'une est la pièce) jusqu'à ce qu'un chemin électrique soit créé à travers l'espace d'air entre elles. Une électrode conductrice est la pièce en métal de base ; L'autre électrode est mobile, soit manuellement, soit automatiquement. L'arc électrique qui traverse l'air entre les deux électrodes a une température élevée de plus de 3000 °C. Par conséquent, cet arc chauffe le métal à souder au-delà de son point de fusion, formant une flaque de métal en fusion à la fin de l'arc. Les bords des deux métaux sont fondus, généralement avec un matériau d'apport provenant d'une électrode consommable, et se combinent pour former un seul mélange fondu. Au fur et à mesure que l'arc progresse, le bain de fusion se refroidit et le métal durcit en formant un brasage. **[5]**

2.1.3 Types d'électrodes :

Les électrodes de soudage à l'arc se divisent en deux catégories : non-consommables et consommables. Les non-consommables (ex. tungstène en TIG) guident l'arc sans fondre, un fil d'apport séparé étant ajouté si nécessaire. Les consommables fondent dans la soudure et incluent plusieurs types : fils nus (MIG), fils légèrement enrobés d'agent désoxydant stabilisant l'arc, ou électrodes à revêtement épais formant une gaine protectrice de gaz. Ce revêtement épais améliore la stabilité de l'arc et empêche la formation d'oxydes ou de nitrures dans le joint soudé.

2.2 Soudage à l'arc électrique :

Les principaux types de soudage à l'arc se distinguent par la nature de l'électrode, le gaz de protection et leur domaine d'application :

2.2.1 Soudage à l'électrode enrobée (MMA ou SMAW) :

Le SMAW (parfois appelé « soudage à la baguette ») est le type de soudage à l'arc le plus courant et le plus accessible. Il utilise une électrode manuelle consommable (la « barre »). Cette électrode est recouverte d'un flux, qui fond à l'extrémité de l'électrode et produit le gaz de protection, ainsi qu'un produit de laitier qui protège la soudure de l'oxydation pendant le soudage.

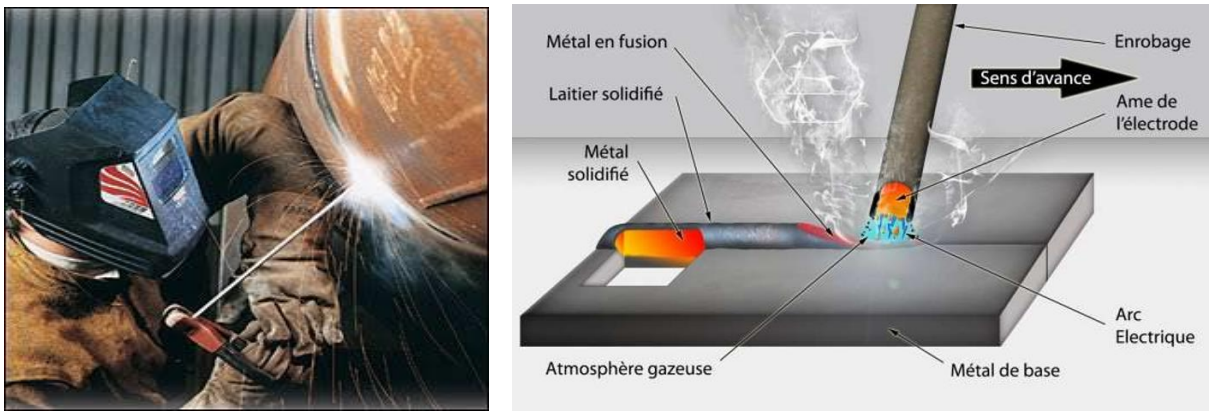


Figure 2.1 : Soudage à l'électrode enrobée

Avantages :

- ✓ Permet de souder dans toutes les positions, même dans des zones difficiles d'accès.
- ✓ Applicable à une large gamme de matériaux et d'épaisseurs (> 2 mm).
- ✓ Équipement simple et peu coûteux.
- ✓ Convient aux travaux en extérieur.

Inconvénients :

- ✓ Vitesse de soudage relativement faible.
- ✓ Nettoyage du laitier après soudage.

Applications :

- ✓ Construction métallique
- ✓ Maintenance
- ✓ Réparation.

2.2.2 Soudage à fil fourré (FCAW) :

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux (MAG fil fourré) est appelé également soudage FCAW. Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil constitué d'un tube en métal fourré de flux. Le flux aide à amorcer l'arc, forme un laitier et comprend des adjuvants destinés à renforcer la soudure. Le gaz de protection (CO2, mélange Argon – CO2) dépend du fil fourré utilisé (possibilité d'une autoprotection par dégagement du gaz protecteur suite à la décomposition du flux).

Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux d'assemblage mécanique (charpente) ou de maintenance générale. Ce procédé est principalement utilisé pour les aciers au carbone et aciers inoxydables. **[6]**

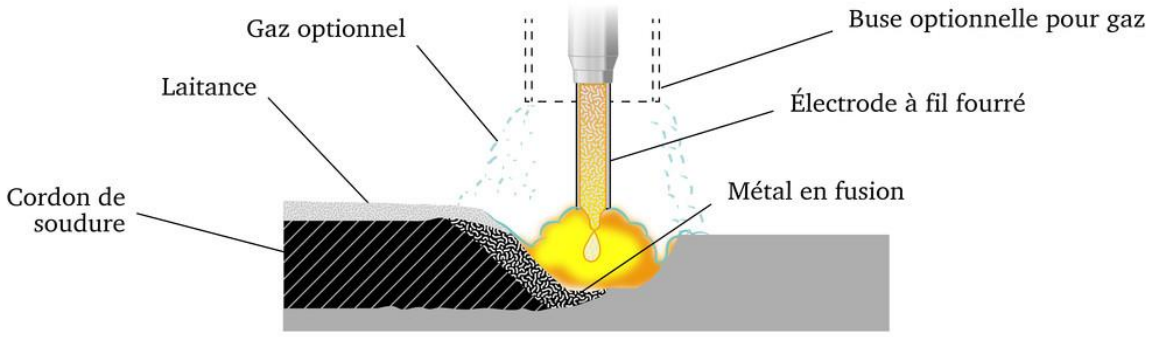


Figure 2.2 : Soudage à fil fourré

Avantages :

- ✓ Moins de pré-nettoyage du métal requis comparé à d'autres procédés.
- ✓ Rendement élevé.
- ✓ Bonne pénétration.
- ✓ Adapté aux travaux extérieurs (certaines variantes).

Inconvénients :

- ✓ Le fil fourré est plus coûteux que le fil plein (MIG/MAG).
- ✓ Le laitier doit être enlevé après soudage, ce qui ajoute une étape de finition.
- ✓ Risques de défauts spécifiques : porosité, fusion incomplète, inclusions de laitier, si les réglages ne sont pas optimaux.
- ✓ Production de fumées et de laitier selon le procédé.

Applications :

- ✓ Construction métallique
- ✓ Chantiers
- ✓ Travaux lourds.

2.2.3 Soudage au gaz inerte métallique (MIG) :

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein est appelé également soudage en atmosphère inerte avec fil-électrode fusible (procédé MIG). Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil plein. La protection est assurée par un gaz inerte, habituellement de l'argon (également de l'hélium ou encore un mélange de ces deux gaz avec du CO2). Ce type de soudage n'entraine pas de formation de laitier.

Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux de soudage de l'acier doux mais aussi pour le soudage de pièces en cuivre, de nickel, d'acier inoxydable, de magnésium et d'aluminium.

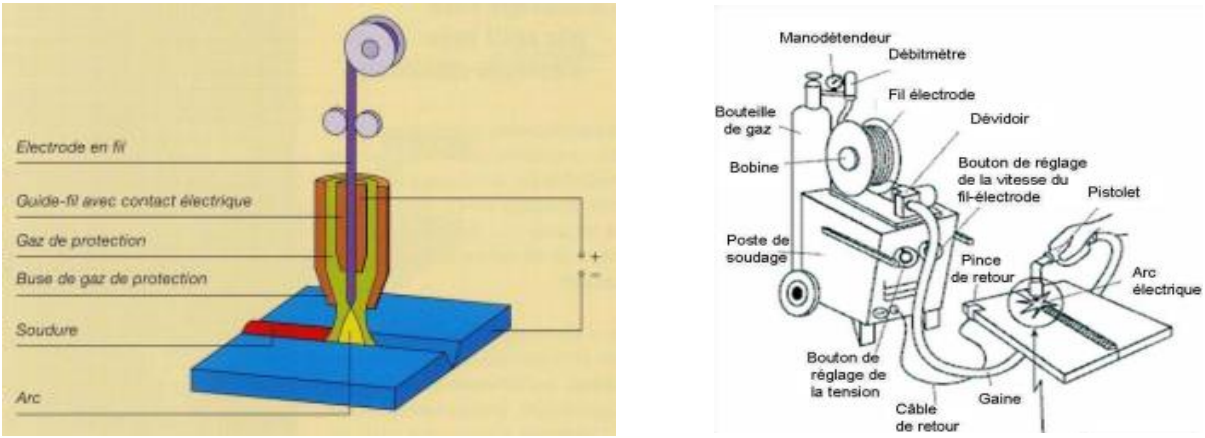


Figure 2.3 : Soudage au gaz inerte métallique

Avantages :

- ✓ Grande vitesse de soudage et rendement élevé.
- ✓ Qualité des soudures : bonne pénétration, peu de défauts, aspect propre.
- ✓ Facilité d'utilisation : apprentissage rapide, automatisation possible.
- ✓ Polyvalence : adapté à de nombreux métaux et épaisseurs.
- ✓ Productivité élevée : idéal pour les travaux en série ou de longue durée.

Inconvénients :

- ✓ Sensibilité aux courants d'air : le gaz de protection peut être dispersé, ce qui affecte la qualité de la soudure.
- ✓ Nécessite un équipement spécifique (poste à souder, bouteille de gaz, dévidoir de fil).
- ✓ Coût du gaz et de l'équipement plus élevé que certains autres procédés (ex. MMA).
- ✓ Moins adapté aux travaux en extérieur ou en environnement venteux.
- ✓ Projection de particules et fumées possibles, nécessitant une ventilation adéquate.

Applications :

- ✓ Industrie automobile.
- ✓ Chaudronnerie.
- ✓ Fabrication de structures métalliques.

2.2.4 Soudage au gaz inerte au tungstène (TIG) :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) repose sur l'amorçage d'un arc électrique entre la pièce à souder et une électrode de tungstène, laquelle reste infusible durant l'opération. La zone de soudage est protégée par un flux continu de gaz inerte, généralement de l'argon, parfois de l'hélium ou un mélange des deux, empêchant ainsi toute contamination par les gaz atmosphériques. Selon les besoins de l'assemblage, la soudure peut être réalisée sans métal d'apport ou avec l'ajout d'une baguette d'apport. Ce procédé est particulièrement adapté au soudage de l'aluminium et des métaux nobles, mais il permet également d'assembler des aciers doux et des aciers inoxydables.

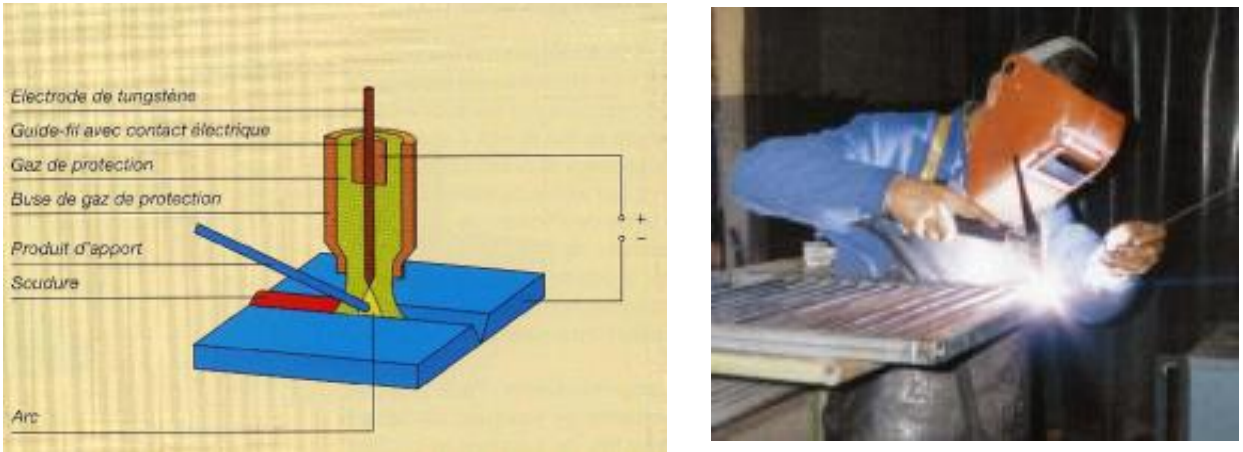


Figure 2.4 : Soudage au gaz inerte au tungstène

Avantages :

- ✓ Très haute qualité de soudure.
- ✓ Excellente finition.
- ✓ Adapté aux faibles épaisseurs.

Inconvénients :

- ✓ Vitesse de soudage faible.
- ✓ Exige une bonne maîtrise technique.

Applications : aéronautique, nucléaire, inox, aluminium.

2.2.5 Soudage à l'arc submergé (SAW) :

Le soudage à l'arc submergé (SAW, Submerged Arc Welding) est un procédé de soudage par fusion automatisé où l'arc électrique est créé sous une couche de flux granulaire ou en poudre. Ce flux protège le bain de fusion de l'oxydation et des contaminations atmosphériques. Ce procédé est principalement utilisé pour souder des constructions mécano-soudées en acier, notamment des pièces épaisses ou des cordons longs et continus.

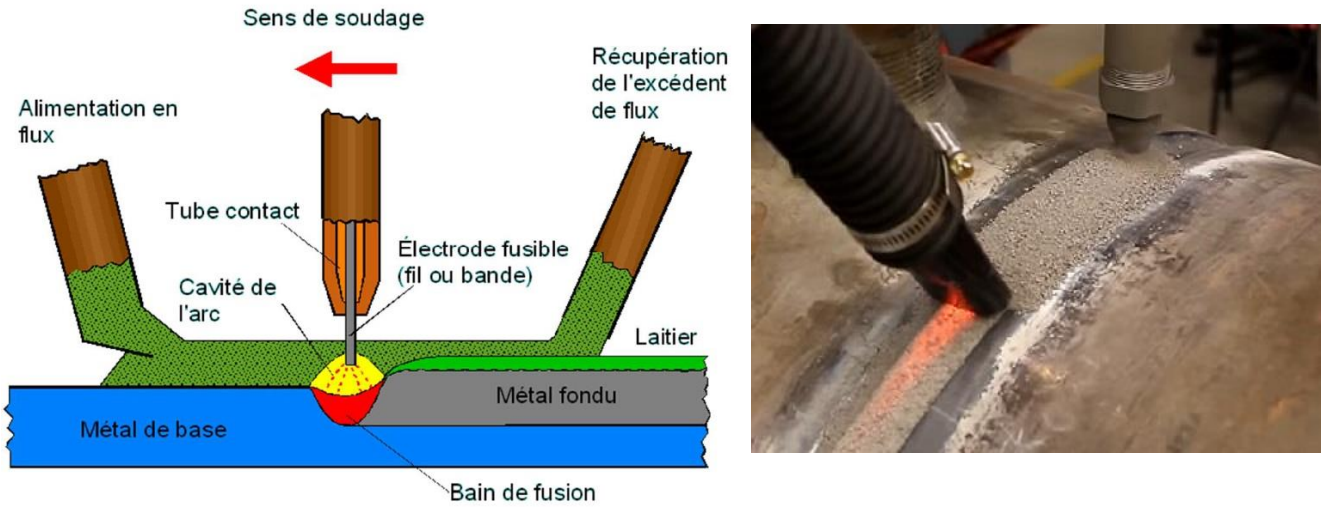


Figure 2.5 : Soudage à l'arc submergé

Avantages :

- ✓ Très grande productivité.
- ✓ Soudures profondes et de haute qualité.
- ✓ Peu de projections.

Inconvénients :

- ✓ Principalement pour les soudures à plat.
- ✓ Utilisé surtout en atelier.

Applications : construction navale, réservoirs, pipelines.

2.2.6 Autres procédés :

2.2.6.1 Soudage au flamme oxyacétylénique (SOA) :

Le soudage Oxyacéthylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène -C2H2 avec un gaz comburant d'oxygène -O2 . La température de la flamme peut atteindre les 3200 ° Celsius, lorsque le mélange C2H2 et O2 est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bord à bord ». L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

Principe :

Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux (boyaux) de gaz à la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar) Un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule la pression et l'arrivée des gaz.

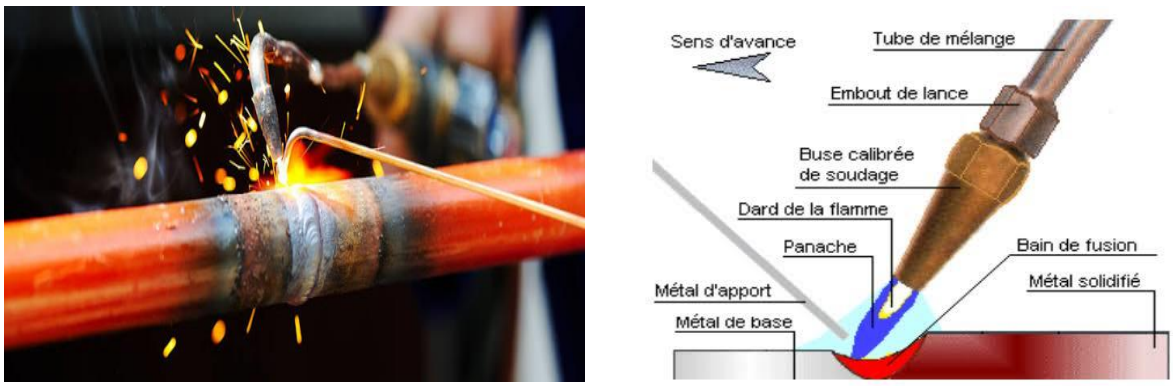


Figure 2.6 : Soudage au flamme oxyacétylénique

Avantages :

- ✓ Équipement simple, portable et peu coûteux.
- ✓ Permet de souder sans électricité, idéal pour les chantiers isolés.
- ✓ Possibilité de souder avec ou sans métal d'apport.
- ✓ Procédé polyvalent.

Inconvénients :

- ✓ Limité aux pièces de faible épaisseur (en général < 7 mm).
- ✓ Soudures souvent moins esthétiques et nécessitant un nettoyage ou une finition supplémentaire.
- ✓ Risques liés à la manipulation de gaz inflammables et sous pression (sécurité à respecter impérativement).

Applications :

- ✓ Soudage de tôles fines.
- ✓ Assemblage de tubes de petit diamètre.
- ✓ Travaux de brasage et soudo-brasage.

2.2.6.2 Soudage plasma (PAW) :

Ce procédé de soudage à l'arc est similaire au soudage TIG, mais s'en distingue par le confinement de l'arc électrique à l'intérieur d'une buse, qui génère un jet de plasma fin, concentré et pouvant atteindre des températures de l'ordre de 30 000 °C. Cette caractéristique confère au procédé une très grande précision, notamment sa capacité à percer les matériaux

avant de les souder. Il est particulièrement adapté au soudage de matériaux tels que l'acier inoxydable, le titane et les alliages à haute résistance mécanique.

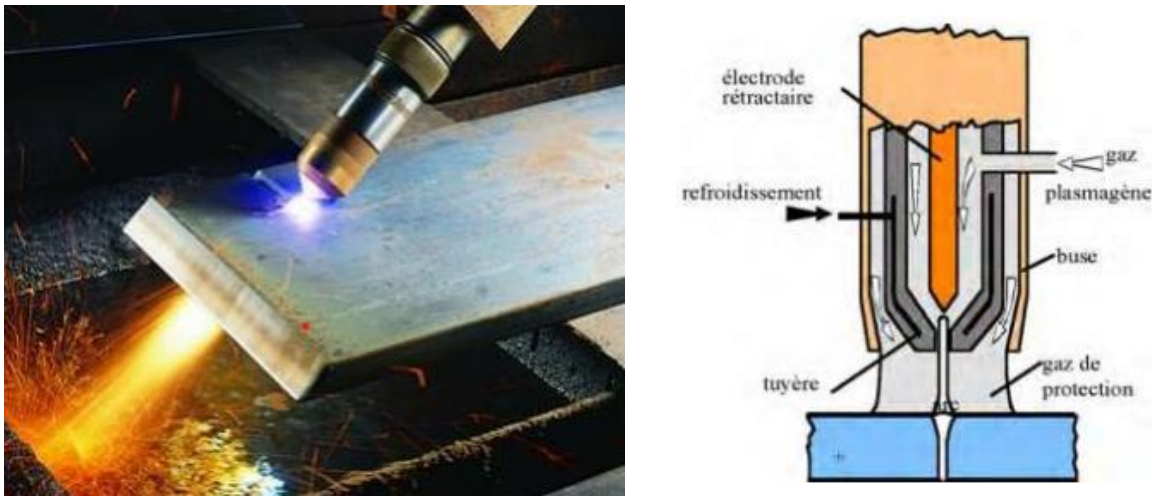


Figure 2.7 : Soudage plasma

Paramètres de soudage :

La qualité du cordon dépend fortement du réglage précis des paramètres. Une configuration mal adaptée peut provoquer une fusion incomplète, un arc instable, des défauts de pénétration ou une oxydation excessive du joint.

- *Intensité et tension :* ajustées selon l'épaisseur, la position et la nature du métal.
- *Débit du gaz plasma :* trop faible, l'arc devient instable ; trop élevé, le jet peut perturber le bain de fusion.
- *Vitesse d'avance :* influence directement la largeur du cordon, la pénétration et la zone affectée thermiquement.
- *Distance buse/pièce :* doit rester constante pour maintenir la concentration du jet et la régularité de fusion.

Avantages :

- ✓ Arc très stable, y compris à faible intensité (micro-plasma).
- ✓ Pénétration profonde et régulière sur des épaisseurs compatibles.
- ✓ Vitesse de soudage élevée et déformations thermiques souvent réduites.
- ✓ Très bon contrôle du bain, notamment sur les assemblages précis et répétitifs.

Inconvénients :

- ✓ Équipement plus coûteux et plus complexe qu'un poste TIG .
- ✓ Refroidissement de la torche souvent indispensable .
- ✓ Réglages plus sensibles .
- ✓ Risque de contamination du tungstène.
- ✓ Bruit plus élevé et rayonnement UV intense.

Applications :

- ✓ Industrie automobile.
- ✓ Aérospatiale.
- ✓ Construction navale.
- ✓ Fabrication de machines et équipements industriels.
- ✓ Soudage de tuyauteries, réservoirs, structures métalliques. **[7]**

2.2.6.3 Soudage au laser :

Cette procédé utilise un faisceau laser à haute intensité pour fusionner les matériaux. Le faisceau laser, d'une grande précision et puissance, permet de concentrer l'énergie sur une zone très réduite, générant ainsi une fusion rapide du matériel.

Le faisceau laser peut être ajusté pour contrôler la profondeur et la largeur de la soudure,ce procédé est couramment utilisé pour souder les matériaux fins.

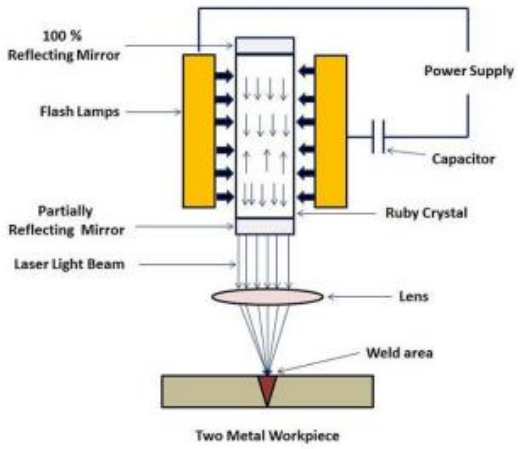




Figure 2.8 : Soudage au laser

Avantages :

- ✓ Soudage précis et contrôlé, adapté aux pièces complexes et délicates.
- ✓ Compatible avec une grande variété de matériaux (métaux, plastiques, matériaux hétérogènes).
- ✓ Faible déformation thermique, préservant les propriétés mécaniques du matériau environnant.
- ✓ Vitesse d'exécution élevée, augmentant la productivité.

Inconvénients :

- ✓ Investissement initial élevé pour l'équipement.
- ✓ Peu adapté aux matériaux très épais ou aux surfaces fortement réfléchissantes.
- ✓ Fonctionnement en ligne de visée directe, limitant l'accès aux joints complexes ou peu accessibles.

Applications :

- ✓ Industrie automobile (assemblage de carrosseries, composants).
- ✓ Aéronautique (structures légères et complexes).
- ✓ Fabrication électronique et microtechnique (micro-soudure laser).
- ✓ Construction navale et mécanique de précision.
- ✓ Soudage de matériaux variés : acier, inox, aluminium, cuivre, alliages spéciaux, et même certains plastiques et composites.

2.3 Soudage par pression :

2.3.1 Soudage par point :

Le soudage par point, ou soudage par résistance, est un procédé d'assemblage électrique utilisé pour joindre localement deux ou plusieurs tôles métalliques. Il consiste à faire passer un courant électrique de forte intensité à travers les tôles maintenues sous pression entre deux électrodes, généralement en alliage de cuivre. La chaleur générée par la résistance électrique à l'interface des tôles provoque la fusion locale du métal, formant ainsi un point de soudure solide après refroidissement.

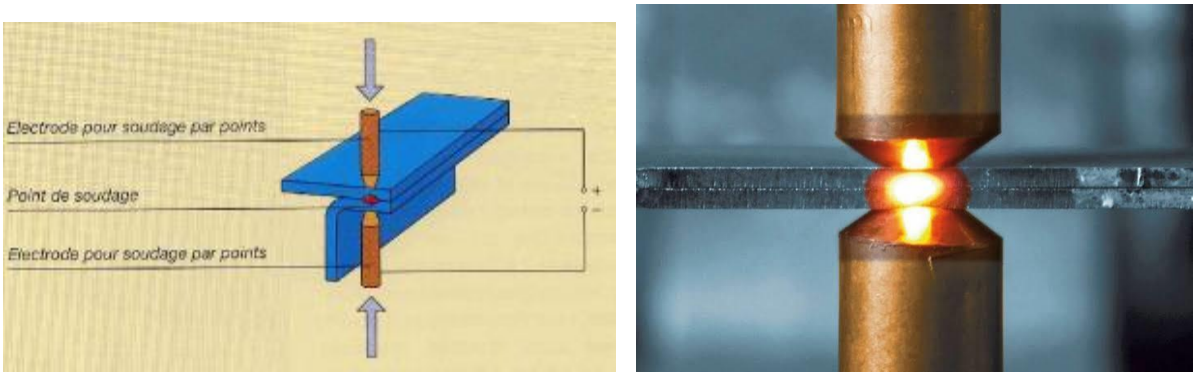


Figure 2.9 : Soudage par point

Avantages :

- ✓ Vitesse rapide : La rapidité du processus est tout simplement stupéfiante, chaque soudure ne prenant que quelques secondes.
- ✓ Pas de gaz de remplissage ni de gaz de protection : Le procédé est également très économique puisqu'il ne nécessite ni métaux d'apport, ni gaz de protection, ni nettoyage approfondi par la suite.
- ✓ Distorsion minimale : Le soudage par points permet de maintenir les tôles métalliques à plat, minimisant ainsi les déformations, tandis que le procédé crée des liaisons solides, même sur des tôles qui se chevauchent.
- ✓ Automatisation facile : Automatisez facilement vos processus. Le soudage par points par résistance vous permet de reproduire fidèlement la taille, la profondeur et la résistance de la soudure. **[8]**

Inconvénients

- ✓ Limité aux épaisseurs fines ou moyennes
- ✓ Nécessite un bon positionnement et un contact parfait entre les pièces
- ✓ Points de soudure localisés, donc assemblage discontinu (nécessité de plusieurs points pour une liaison solide)
- ✓ Moins adapté aux métaux fragiles ou à faible conductivité électrique
- ✓ Nécessite un entretien régulier des électrodes pour garantir la qualité des soudures.

Applications :

On le retrouve utilisé dans la production de masse dans les usines automobiles, les fabricants d'appareils électroménagers et les ateliers de fabrication métallique.

Le soudage par points est le procédé de choix pour la fabrication de produits en tôle qui doivent présenter des soudures identiques, propres et fiables.

Les industries automobile et aérospatiale font appel aux soudures par points pour garantir la solidité et la sécurité à long terme. Tant que le métal n'est pas corrodé et que la soudure a été réalisée avec la pression et le courant appropriés, une soudure par points peut durer toute la durée de vie du produit.

2.3.2 Soudage par friction malaxage (FSW) :

Le soudage par friction malaxage (FSW, Friction Stir Welding) est un procédé d'assemblage à l'état solide qui utilise la chaleur générée par friction mécanique entre un outil rotatif et les matériaux à assembler. Ce procédé ne fait pas appel à la fusion des métaux ni à un métal d'apport, ce qui permet d'obtenir des soudures sans défauts liés à la fusion.

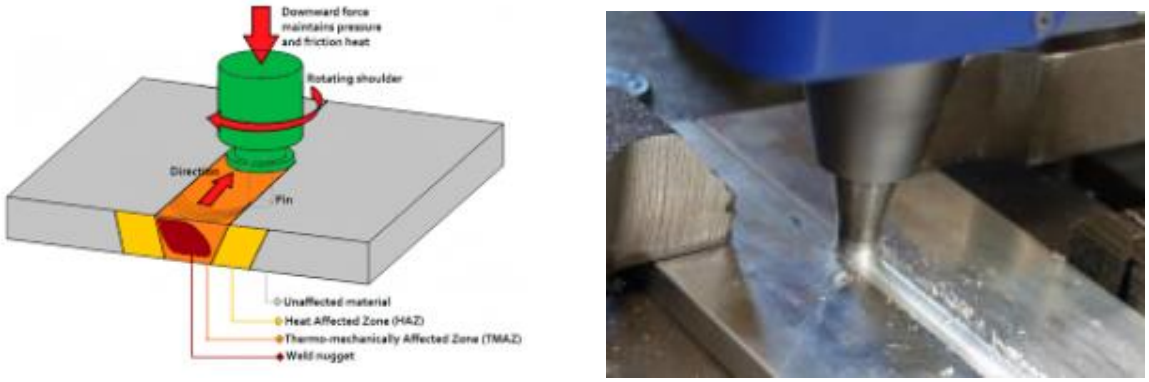


Figure 2.10 : Soudage par friction malaxage

Principe :

Le procédé FSW consiste à assembler deux pièces, sans apport de matière. Un pion en rotation échauffe la matière jusqu'à l'amener dans un état pâteux. En avançant, le pion mélange la matière de chaque pièce et soude ainsi les deux éléments.

La soudure obtenue est lisse, étanche et répétable quelle que soit la taille de lot.

Avantages :

- ✓ Procédé propre, sans émission de fumées ni de gaz nocifs.
- ✓ Excellentes caractéristiques mécaniques des soudures, avec une résistance élevée.
- ✓ Faible consommation énergétique comparée aux procédés par fusion.

- ✓ Pas besoin de métal d'apport, de gaz de protection ou de préparation spéciale des surfaces (pas de décapage d'oxyde nécessaire).
- ✓ Réduction des défauts classiques liés à la fusion (fissures, porosité, retrait).
- ✓ Possibilité d'assembler des matériaux hétérogènes

Inconvénients :

- ✓ Limité aux assemblages bout à bout (pas adapté aux joints en T ou en angle).
- ✓ Coût élevé des machines et des outillages nécessaires.
- ✓ Procédé automatisé uniquement, nécessitant un équipement spécialisé et une programmation précise.
- ✓ Usure de l'outil due aux contraintes mécaniques et thermiques importantes.
- ✓ Nécessite un bon bridage et une fixation rigoureuse des pièces à souder.

Applications :

- ✓ Assemblage d'alliages d'aluminium, notamment ceux difficiles à souder par fusion (séries 2 000 et 7 000).
- ✓ Construction navale.
- ✓ Aéronautique et industrie spatiale.
- ✓ Fabrication de structures métalliques et de composants nécessitant une haute résistance mécanique.
- ✓ Soudage de matériaux similaires ou dissemblables (ex. aluminium et acier).

2.3.3 Soudage à la molette :

Définition:

Le soudage à la molette est un procédé de soudage par résistance électrique, dérivé du soudage par points, qui permet de réaliser des soudures continues et étanches sur des tôles fines. Il utilise des électrodes en forme de disques ou molettes en cuivre, qui roulent sur les pièces à assembler tout en appliquant une pression et en faisant passer un courant électrique.

Principe :

Contrairement au soudage par points où les électrodes sont fixes, le soudage à la molette remplace ces électrodes par deux molettes rotatives, positionnées l'une au-dessus de l'autre, entre lesquelles les pièces métalliques sont serrées. En faisant rouler ces molettes le long des

tôles, un courant électrique passe localement à travers les pièces au point de contact, générant par effet Joule une élévation de température suffisante pour fondre et souder les matériaux. La rotation des molettes permet ainsi de créer un cordon de soudure continu et étanche. Le cycle comprend trois phases : l'accostage (mise en contact et serrage des pièces), le soudage (passage du courant et rotation des molettes), puis l'arrêt (écartement des molettes en fin de cordon). **[9]**

Avantages :

- ✓ Permet des soudures continues, étanches et régulières, contrairement au soudage par points discontinu.
- ✓ Vitesse de soudage élevée (de 0,5 à 4 m/min, voire jusqu'à 15-50 m/min dans certains cas).
- ✓ Procédé automatisable et adapté à la production en série
- ✓ Bonne qualité de soudure avec un cordon de largeur constante proportionnelle à l'épaisseur des tôles.
- ✓ Moins de déformations thermiques grâce à la concentration locale de la chaleur.
- ✓ Adapté aux tôles fines et moyennes.

Inconvénients :

- ✓ Limité aux matériaux et épaisseurs compatibles (tôles fines, généralement max 3 mm).
- ✓ Nécessité d'une préparation soignée des surfaces (propreté, absence de rouille ou calamine).
- ✓ Équipement spécifique et maintenance des molettes en cuivre nécessaires.
- ✓ Moins flexible pour les formes complexes ou assemblages non linéaires.
- ✓ Moins adapté aux soudures en position verticale ou difficilement accessibles.

Applications :

- ✓ Assemblage de tôles fines (généralement de 0,1 à 3 mm d'épaisseur) en acier doux, inoxydable ou aluminium.
- ✓ Fabrication de tubes roulés-soudés (soudures longitudinales ou transversales).
- ✓ Production de boîtes de conserve et emballages métalliques.
- ✓ Assemblage de tôles profilées dans l'industrie automobile et mécanique.
- ✓ Usinage et fabrication industrielle nécessitant des cordons continus et étanches. **[10]**

Conclusion :

L'étude menée dans ce chapitre a mis en évidence la diversité des procédés de soudage existants, répartis principalement entre le soudage par fusion et le soudage par pression. Le soudage à l'arc, sous ses différentes variantes (SMAW, FCAW, MIG/MAG, TIG), demeure largement utilisé grâce à sa polyvalence et à son accessibilité, bien que chaque variante présente des avantages et des limites propres selon les matériaux et les conditions de mise en œuvre. Les procédés par pression, quant à eux, se distinguent par leur rapidité d'exécution et leur adaptation à la production en série, notamment dans les secteurs automobile et aéronautique. Cette analyse comparative des différents procédés, de leurs principes physiques et de leurs domaines d'application respectifs, permet de mieux appréhender les critères de sélection à considérer pour garantir des assemblages fiables et durables. Ces connaissances constituent une base indispensable pour la suite de notre travail, notamment pour le choix du procédé le plus approprié à la problématique étudiée.

Chapitre 3

Caractéristiques mécaniques et méthodes d'optimisation

Introduction :

Les propriétés mécaniques des métaux déterminent la manière dont un matériau réagit aux forces externes et aux conditions de fonctionnement auxquelles il est soumis, influençant directement son applicabilité et sa durabilité dans le temps. Qu'il s'agisse d'infrastructures civiles, de l'industrie automobile, aérospatiale ou manufacturière, le choix du bon métal avec des propriétés mécaniques adaptées peut faire la différence entre le succès ou l'échec d'un projet.

3.1 Principales caractéristiques mécaniques des métaux :

3.1.1 Résistance mécanique :

La résistance mécanique d'un métal est une mesure de sa capacité à supporter des charges sans se déformer ou se casser. Elle se divise en :

- **Résistance à la traction des métaux :** capacité d'un matériau à résister aux forces qui tendent à l'allonger. Elle est mesurée en termes de contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de se rompre.
- **Résistance à la compression des métaux :** mesure la capacité du matériau à résister aux forces qui tendent à l'écraser. Elle est particulièrement importante dans les applications structurelles.
- **Limite d'élasticité des métaux :** représente le point à partir duquel un matériau commence à se déformer plastiquement. Au-delà de ce point, la déformation n'est plus totalement réversible.
- **Résistance à la fatigue des métaux :** capacité d'un matériau à résister à des charges cycliques répétées sans se rompre, en fonction de la microstructure du métal et de la présence de défauts internes ou superficiels.

3.1.2 Allongement à la rupture :

L'allongement à la rupture indique la capacité d'un matériau à se déformer avant de se rompre. C'est une mesure de la ductilité du métal, qui montre dans quelle mesure il peut être étiré ou déformé sans se fracturer. Cette propriété est essentielle pour les applications nécessitant une certaine flexibilité.

3.1.3 Ductilité et malléabilité :

La ductilité est la capacité d'un métal à se déformer plastiquement sous traction sans se casser. La malléabilité, quant à elle, décrit la capacité d'un métal à se déformer sous compression. Ces deux propriétés sont cruciales dans les processus de transformation des métaux, tels que le laminage et le tréfilage, où le matériau doit être façonné sans se rompre.

3.1.4 Résilience :

La résilience est une mesure de la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de se rompre. Elle combine résistance et ductilité, et est particulièrement importante dans les applications où les matériaux doivent résister à des chocs ou des impacts. Un métal résilient ne se contente pas de résister à la rupture : il absorbe aussi beaucoup d'énergie avant de céder.

3.1.5 Dureté :

La dureté d'un métal indique sa résistance à la déformation permanente ou à l'usure de surface. Elle est mesurée via divers tests de dureté, comme les essais Brinell, Vickers ou Rockwell. La dureté est un indicateur clé de la résistance d'un matériau à l'abrasion et à l'indentation, essentielle dans les applications nécessitant une surface résistante à l'usure mécanique.

3.1.6 Fluage :

Le fluage est la tendance d'un matériau à se déformer lentement sous une charge constante, au fil du temps. Ce phénomène est particulièrement important à hautes températures. Dans les composants soumis à des contraintes thermiques prolongées, comme les turbines à gaz ou les réacteurs nucléaires, la résistance au fluage est essentielle pour éviter les déformations permanentes et les défaillances prématurées. **[11]**

3.2 Méthodes d'essais mécaniques :

Les essais mécaniques ont pour objectif de caractériser le comportement de divers matériaux ou composants tels que des seringues, des ressorts, des micromoteurs ou des microrubans soumis à des conditions de sollicitation spécifiques. Ils permettent d'établir la relation entre les efforts appliqués et les déformations qui en résultent au sein des composants étudiés. Un grand nombre de méthodes d'essais mécaniques normalisées existent à cet effet,

parmi lesquelles les plus couramment employées sont : l'essai de traction, l'essai de compression, l'essai de flexion, l'essai de décollement (pelage), l'essai de cisaillement, l'essai de déchirure, l'essai de fatigue, l'essai de fluage et l'essai de frottement.

3.2.1 Essai de traction :

L'essai de traction constitue sans doute l'essai mécanique le plus fondamental parmi les méthodes de caractérisation des matériaux. Il permet de déterminer les principales grandeurs mécaniques, à savoir le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture ainsi que le coefficient de striction. Sa mise en œuvre relativement simple, associée à la richesse des informations qu'il fournit, explique son utilisation généralisée pour le dimensionnement de pièces mécaniques, qu'il s'agisse d'éléments de petite taille tels qu'un pignon ou de structures métalliques de grande envergure comme celle d'un hall industriel. Dans le domaine de la recherche, cet essai est largement employé pour la caractérisation de nouveaux matériaux, tandis que dans l'industrie, il constitue un outil de contrôle périodique permettant de surveiller la qualité des alliages produits.

3.2.2 Essai de dureté :

Les essais de dureté visent à évaluer la résistance qu'oppose un matériau à la pénétration locale d'un indenteur (conique, pyramidal ou sphérique) appliqué sur une surface plane, en mesurant la pression moyenne de contact ainsi générée. La dureté peut être déterminée soit après le retrait de l'indenteur, à partir des dimensions de l'empreinte résiduelle, soit en cours d'essai, à partir de la courbe d'indentation reliant la profondeur de pénétration à la charge appliquée.

Le principe général consiste à enfoncer un pénétrateur dans le matériau sous une charge constante, puis à mesurer les dimensions de l'empreinte obtenue : plus celle-ci est réduite, plus le matériau est considéré comme dur. La dureté H est ainsi définie comme le rapport entre la force appliquée et la surface de l'empreinte formée. Selon la nature de l'indenteur et le mode opératoire, on distingue notamment :

- ✓ la dureté Brinell (HB) .
- ✓ la dureté Rockwell (HR) .
- ✓ la dureté Vickers (HV).

3.2.3 Essai de résilience :

L'essai de résilience se présente comme un complément indispensable à l'essai de traction, dans la mesure où il permet d'évaluer le comportement du matériau face à une sollicitation dynamique. Il consiste à rompre, en un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée, dans le but de mesurer l'énergie absorbée lors de la rupture. Cet essai est classiquement réalisé au moyen d'un mouton-pendule (essai Charpy). **[12]**

3.2.4 Essai de flexion :

L'essai de flexion est effectué afin de déterminer les propriétés mécaniques du matériau. Il couvre une méthode utilisée pour la construction d'expériences de flexion transversale des racines, des surfaces et des bords effectuées sur des soudures bout à bout et des échantillons expérimentaux prélevés sur des soudures bout à bout habillées (plaques habillées et soudures habillées) pour évaluer la ductilité sur ou près de la surface du joint et / ou si des défauts sont présents sur ou près de la surface de jonction. Cet essai couvre également une méthode utilisée pour les expériences de flexion longitudinale des racines et des surfaces, qui sera utilisée à la place des expériences de flexion transversale pour des groupes hétérogènes, lorsqu'il existe une différence significative dans les propriétés physiques et mécaniques du métal de base et/ou du métal additionnel par rapport à l'expérience de flexion. Cet essai est appliqué à toutes les formes finies de matériaux métalliques avec des joints soudés réalisés par n'importe quel procédé de soudage à l'arc par fusion.

3.2.5 Essais de fatigue :

Les essais de fatigue, un aspect essentiel de l'ingénierie des matériaux, évaluent la durabilité d'un matériau sous des charges répétées, simulant les conditions d'utilisation dans le monde réel. Ce processus est essentiel pour prédire la durée de vie et la sécurité des composants dans tous les secteurs, de l'aérospatiale à l'automobile. Comprendre les tests de fatigue aide les ingénieurs à concevoir des produits plus résistants et plus fiables, garantissant ainsi leur longévité et leurs performances.

3.3 Comportement élastique :

L'élasticité désigne une déformation réversible et instantanée, décrite par la relation contrainte-déformation-temps.

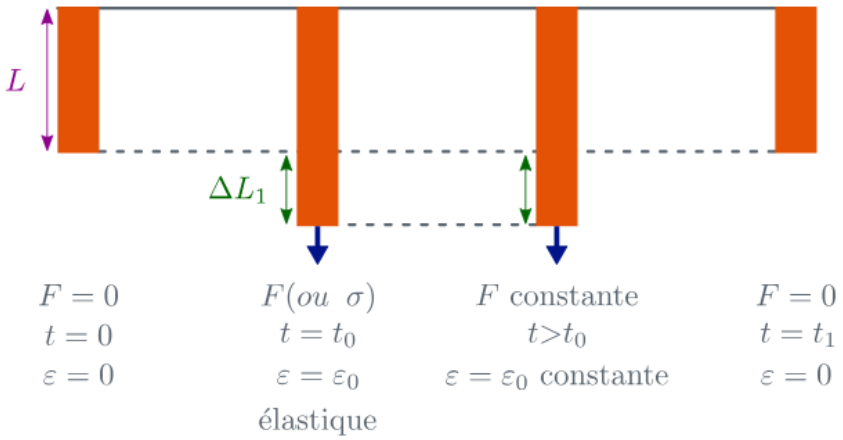


Figure 3.1 : Phénoménologie de l'élasticité

On distingue plusieurs types :

- ***Linéarité :*** élasticité linéaire (loi de Hooke, valable pour les métaux) versus élasticité non linéaire (élastomères, hyperélasticité).
- ***Symétrie :*** élasticité isotrope (métaux et alliages polycristallins) versus anisotrope (monocristaux, polycristaux texturés).
- ***Origine thermodynamique :*** élasticité enthalpique versus entropique.

Pour les solides cristallisés, la déformation élastique correspond à un déplacement collectif des atomes autour de leur position d'équilibre, sans création d'ordre structural supplémentaire. L'entropie du système reste donc constante, tandis que l'énergie interne augmente avec la déformation — d'où le caractère enthalpique de cette élasticité. Bien que les déplacements atomiques puissent être significatifs (cas d'une flexion), la déformation élastique des métaux demeure limitée en amplitude relative, mais restitue une quantité d'énergie importante lors du relâchement de la contrainte.

À l'inverse, pour les polymères, la déformation élastique s'accompagne d'un réarrangement des chaînes macromoléculaires qui accroît l'ordre structural, entraînant une diminution d'entropie. L'élasticité y est donc principalement entropique : l'énergie restituée au relâchement est négligeable, bien que la déformation réversible puisse atteindre plusieurs centaines de pourcent (cas des élastomères).

Enfin, lorsque la restitution de l'énergie élastique n'est pas instantanée, on parle de viscoélasticité, phénomène à distinguer du fluage, qui n'intervient qu'à haute température (au-delà d'environ la moitié de la température de fusion, exprimée en Kelvin).

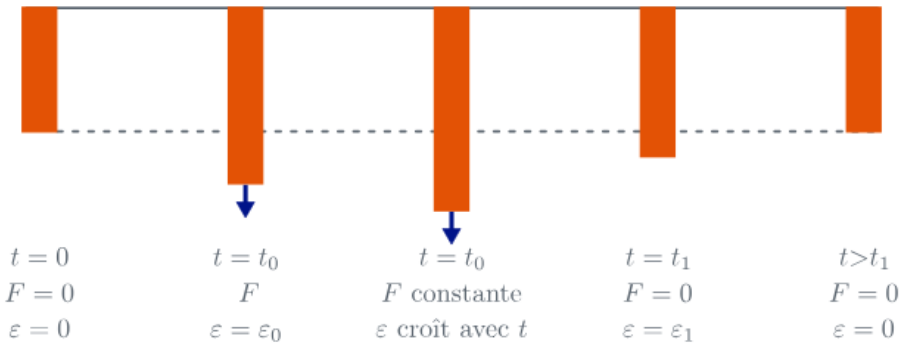


Figure 3.2 : Phénoménologie de la viscoélasticité

3.4 Comportement plastique :

La plasticité correspond à la capacité d'un matériau à subir une déformation permanente et irréversible avant rupture. À l'échelle microscopique, elle se manifeste par la déformation des grains métallurgiques, elle-même causée par des cisaillements de plans cristallins à l'échelle atomique.

Cette aptitude n'est pas universelle : elle est propre aux matériaux cristallins porteurs de dislocations, à savoir les métaux et alliages métalliques. Les céramiques, dépourvues de cette capacité, présentent un comportement purement élastique et rompent sans déformation résiduelle.

Les dislocations sont des défauts cristallins linéaires, formés lors de la solidification, dont le mouvement produit un changement de forme permanent du cristal. Leur densité peut être considérable (illustrée dans le texte par l'exemple du cuivre). Après élaboration du matériau, ces dislocations peuvent également se multiplier ou se recombiner au cours des sollicitations ultérieures. **[13]**

Conclusion :

En conclusion, l'étude des propriétés mécaniques des métaux nous a permis de mieux comprendre comment ces matériaux se comportent face aux différentes sollicitations qu'ils peuvent subir. Nous avons vu que des caractéristiques telles que la résistance mécanique, la ductilité, la dureté, la résilience ou encore le fluage jouent chacune un rôle important dans le choix d'un métal selon son domaine d'utilisation. Les essais mécaniques, notamment l'essai de traction, de dureté, de résilience, de flexion et de fatigue, constituent des outils essentiels permettant de mesurer ces propriétés de manière fiable et normalisée. De plus, la distinction entre comportement élastique et comportement plastique nous a permis de comprendre les mécanismes internes qui expliquent la déformation des métaux, en particulier le rôle des dislocations dans la déformation plastique. Ainsi, la maîtrise de ces notions est essentielle pour bien choisir les matériaux et garantir la sécurité et la performance des structures dans divers secteurs comme le génie civil, l'automobile ou l'aérospatiale.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Introduction :

La simulation numérique est devenue un outil indispensable dans le domaine de la mécanique des matériaux, permettant de prédire le comportement des structures sous diverses conditions de chargement sans dépendre uniquement d'essais expérimentaux coûteux et chronophages. Parmi les essais les plus couramment étudiés est l'essai de traction, qui fournit des propriétés mécaniques clés telles que la limite d'élasticité, la résistance maximale à la traction et l'allongement à la rupture.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur la simulation du comportement en traction , représentant un matériau de base heterogene (eprouvette soude en V) en variant les paramètres de soudage , qui introduit une hétérogénéité localisée en raison du procédé de soudage. Le soudage modifie de manière significative la réponse mécanique de la structure en raison des changements microstructuraux et des contraintes résiduelles générées lors des cycles thermiques du soudage.

Le logiciel de calcul par éléments finis (Abaqus) est utilisé pour modélisation des cas étudiés. En comparant les résultats obtenus, nous visons à mettre en évidence l'influence ces paramètres sur la distribution des contraintes, la localisation des déformations et la résistance mécanique globale.

Cette approche basée sur la simulation fournit des informations précieuses sur le rôle critique du soudage dans l'intégrité des structures et contribue au développement de conceptions plus fiables et de modèles de prévision de durée de vie pour les composants soudés.

4.1 Calcul de contrainte vraie ,déformation vraie et déformation plastique :

A partir de la courbe de traction expérimentale (force -allongement)

4.1.1 Déformation nominale :

$$\varepsilon_{nominale} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ou ΔL : allongement mesuré

L_0 :la longueur initiale de la jauge

4.1.2 Contrainte Nominale :

$$\sigma_{nominale} = \frac{F(KN)}{S(mm^2)}$$

F : Force appliquée

S_0 : Section initiale

4.1.3 Calcul de la déformation vraie :

$$\varepsilon_{vraie} = \ln(1 + \varepsilon_{nominale})$$

On suppose un allongement homogène jusqu'à la striction

4.1.4 Calcul de la contrainte vraie:

$$contrainte_{vraie} = \sigma_{nominale} \times (1 + \varepsilon_{nominale})$$

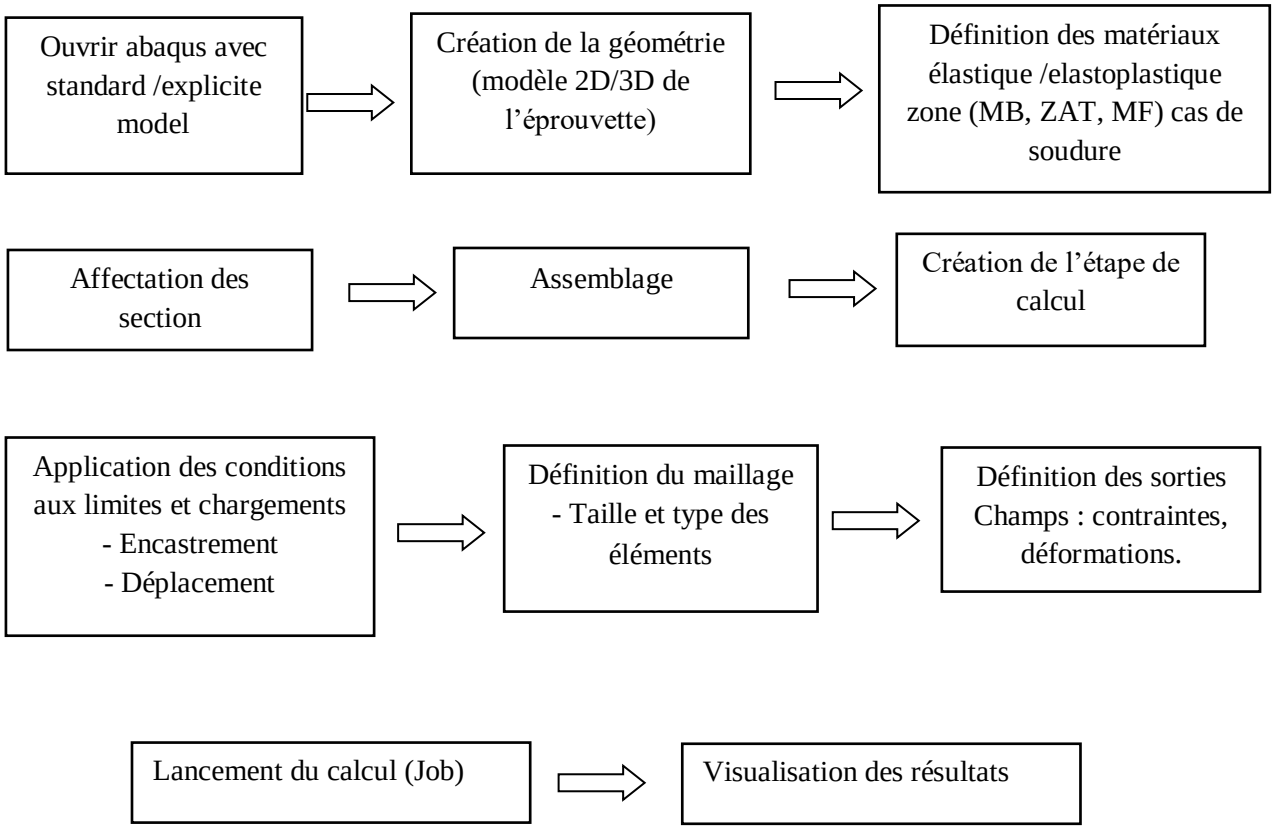
Cela prend en compte la réduction de la section transversale.

Calcul de la déformation plastique vraie

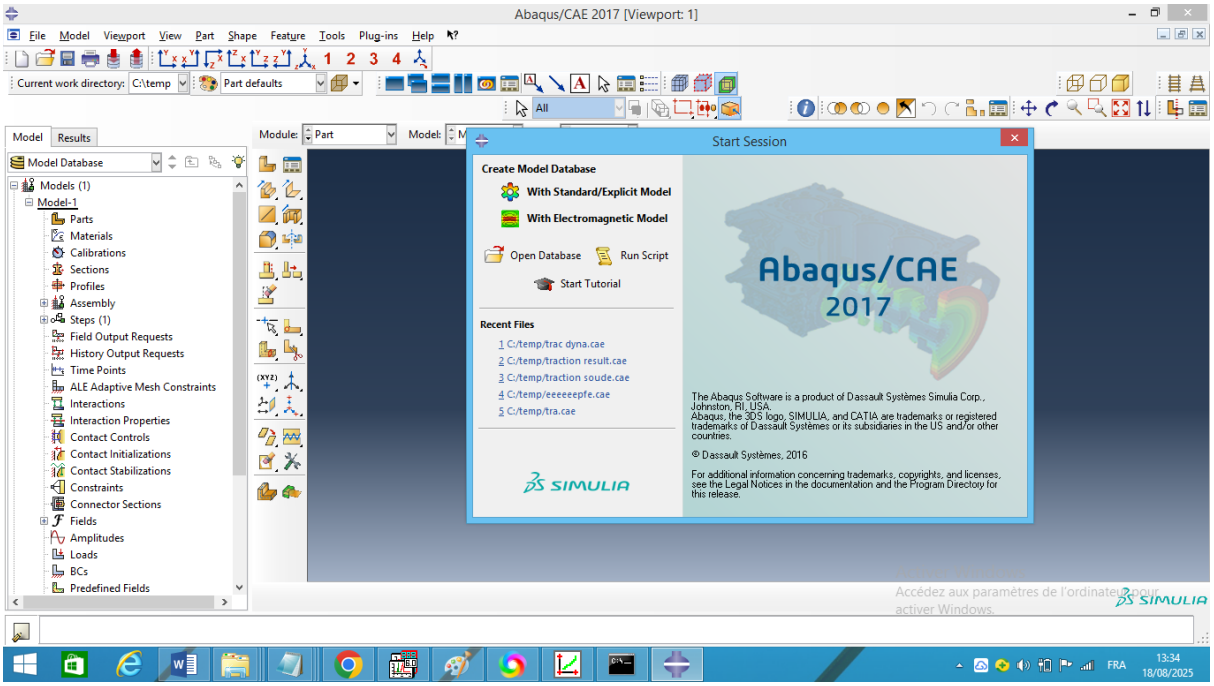
$$\varepsilon_{plastique} = \varepsilon_{vraie} - \frac{\sigma_{vraie}}{E}$$

Avec E , module de Young

4.2 Etapes de simulation de traction par abaqus :

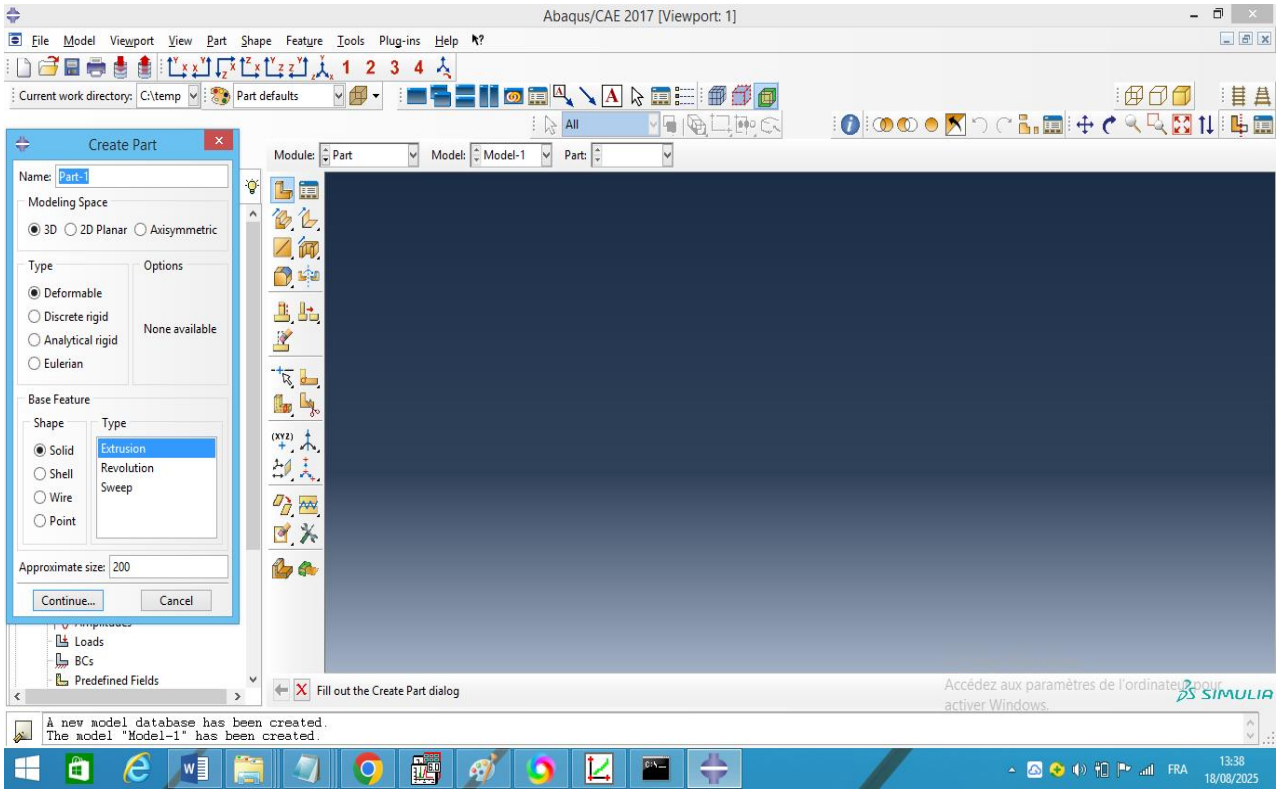


4.2.1 Ouvrir abaqus avec standard /explicite mode



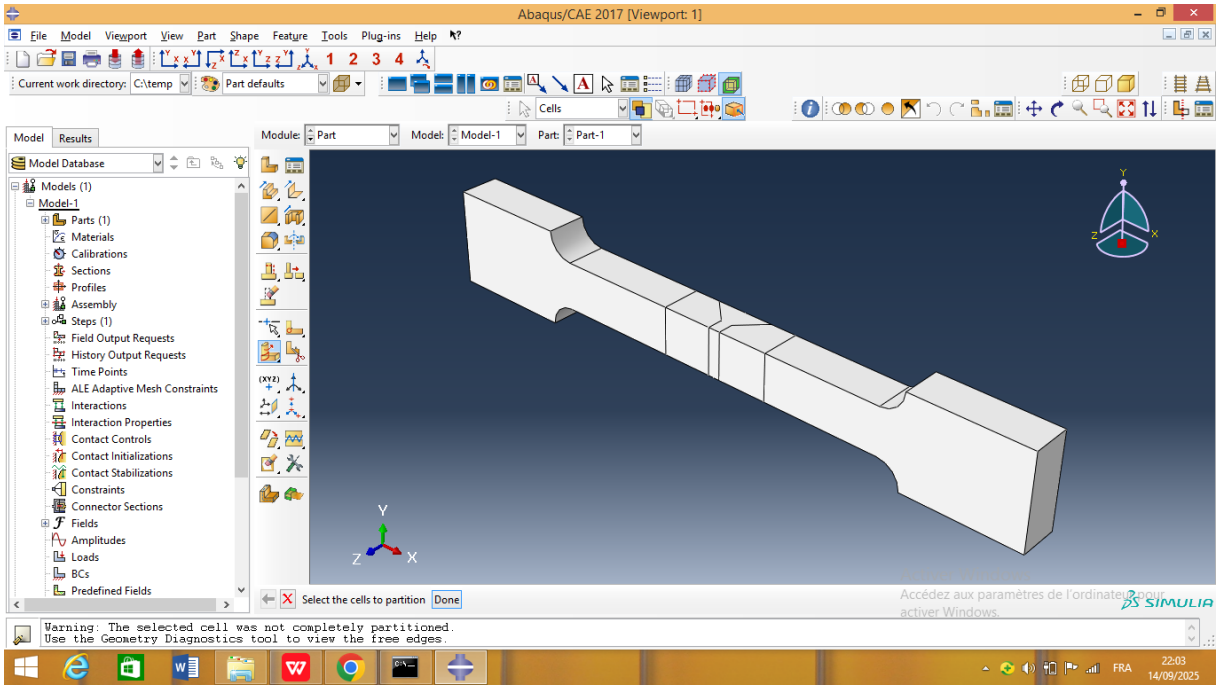
4.2.2 Création de la géométrie (modèle 2D/3D de l'éprouvette

1-

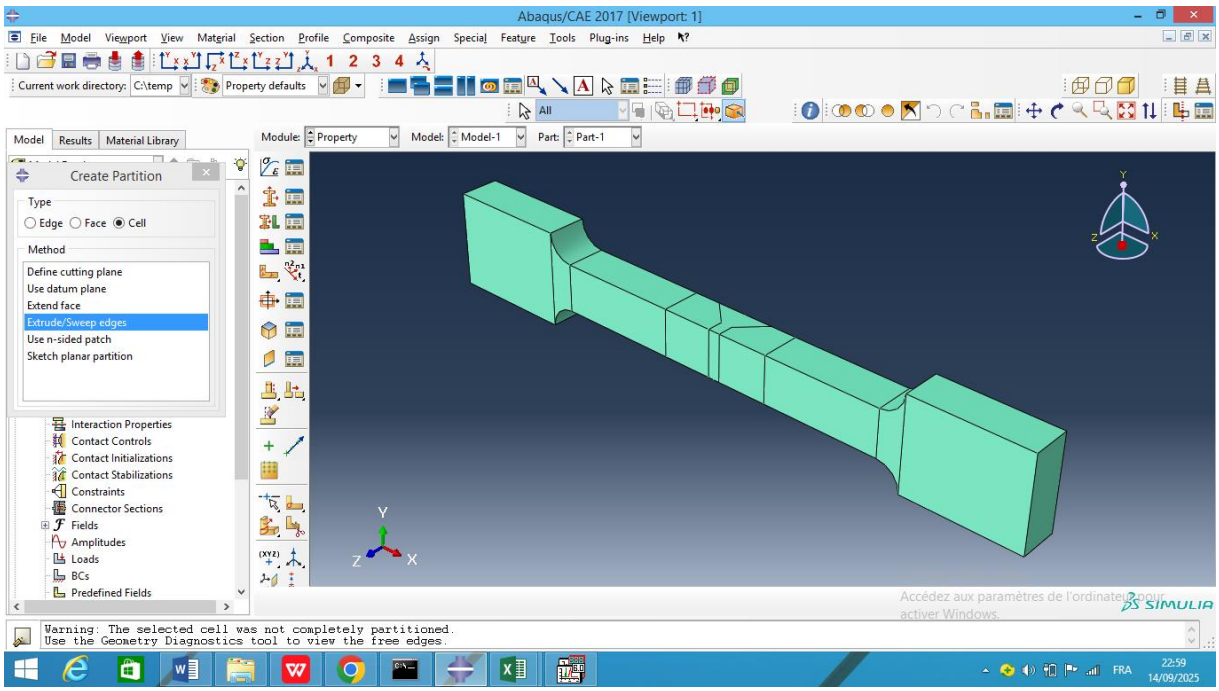


4.2.3 Modélisation

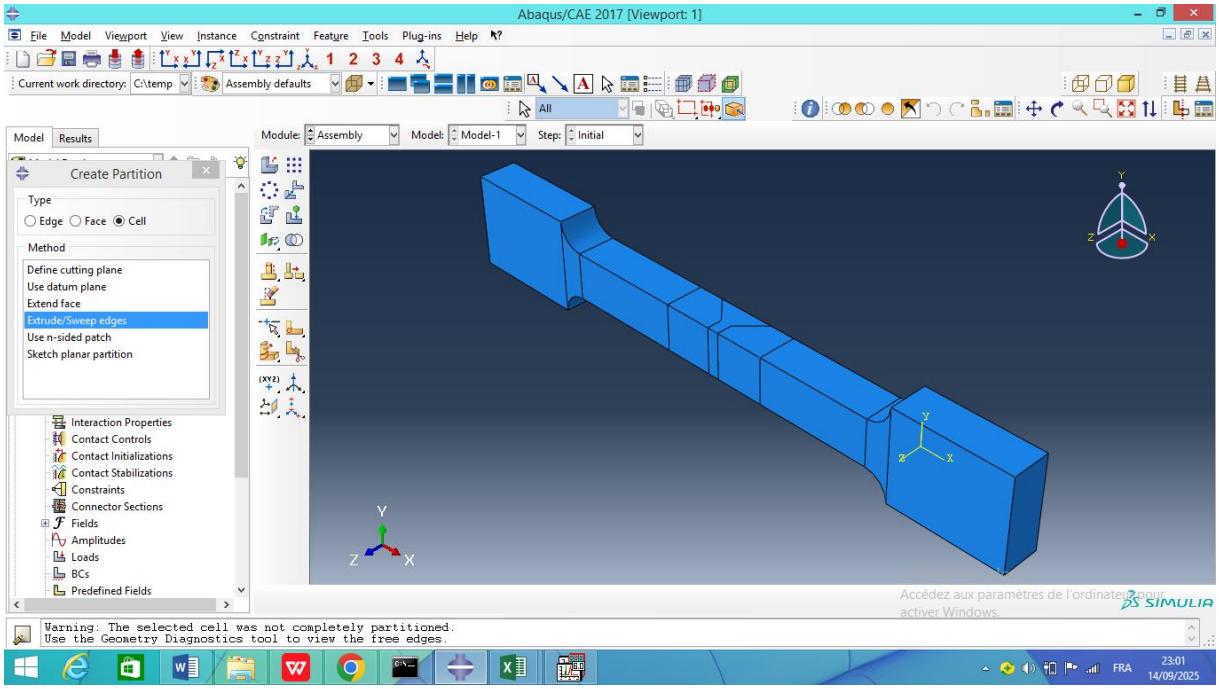
4.2.3.1 Eprouvette 3D avec joint de soudure visualisant les Zones (MB, ZAT et MF)



4.2.4 Définition des matériaux élastique /elastoplastique zone (MB, ZAT, MF) et affectation des sections

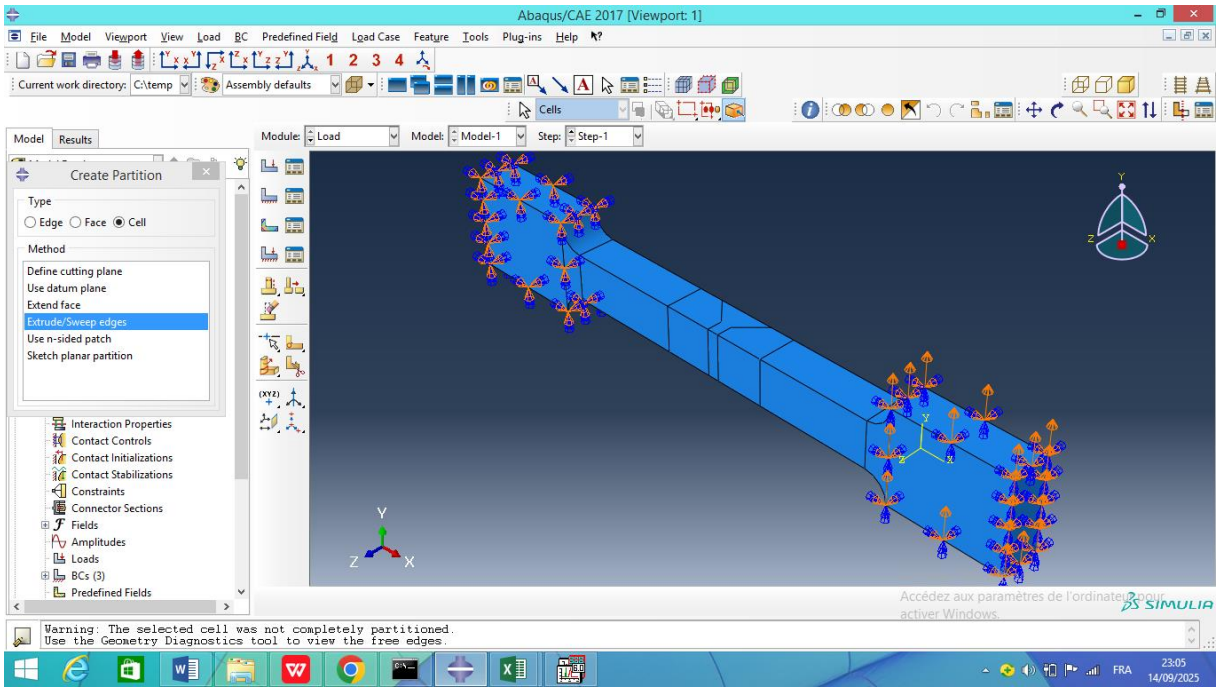


4.2.5 Assemblage et Création de l'étape de calcul step (static général)



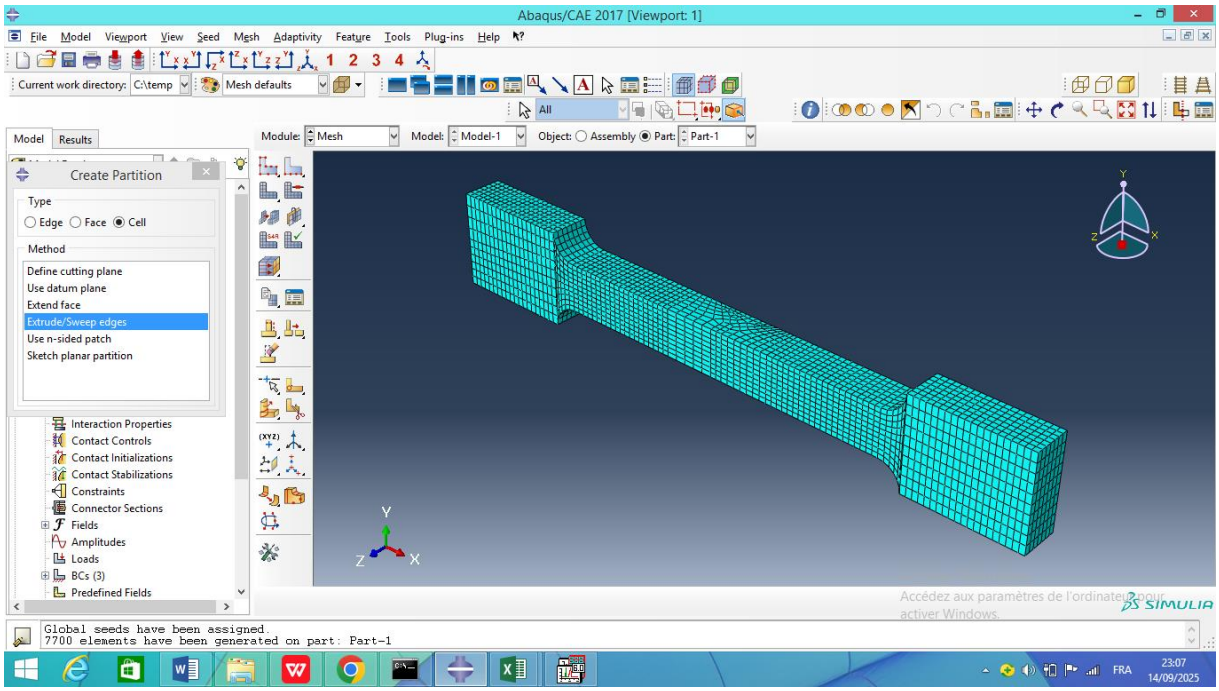
4.2.6 Application des conditions aux limites et chargements :

4.2.6.1 Encastrement et déplacement



4.2.7 Définition du maillage :

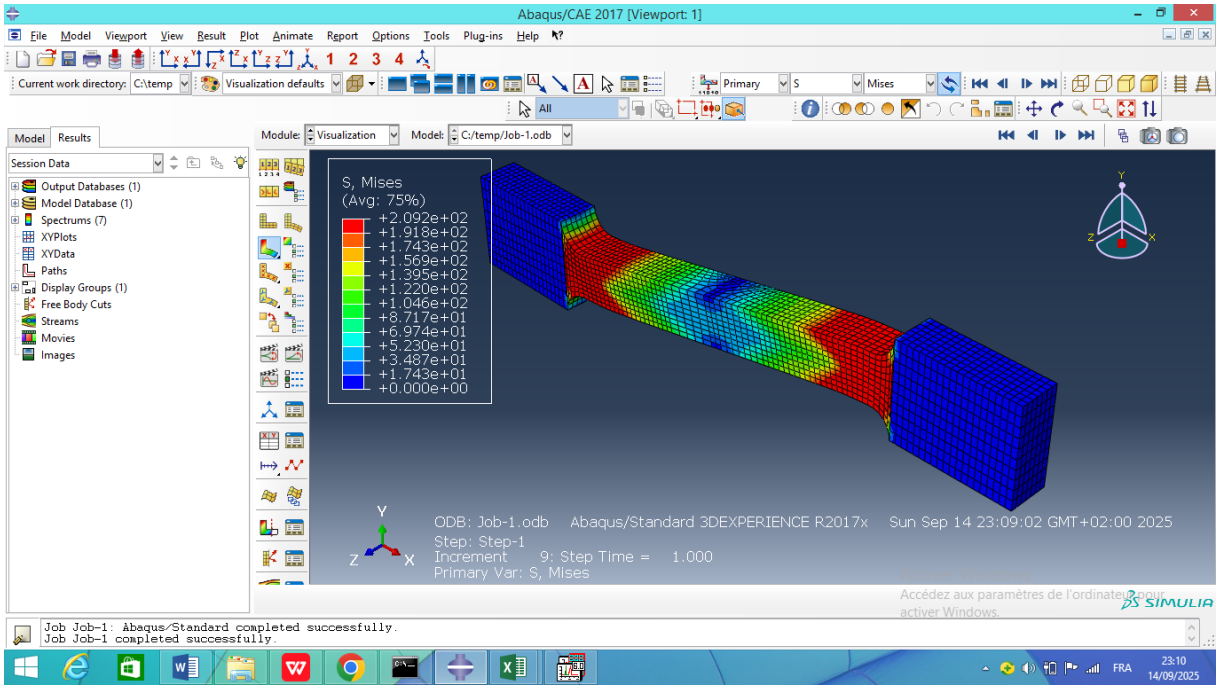
- Taille et type des éléments



4.2.8 Lancement du calcul (Job) :

4.2.8.1 Analyse des résultats

Visualisation



4.2.9 Resultats et discusion :

❖ Les courbes :

Cette étude présente une comparaison entre deux courbes de traction obtenues pour des éprouvettes soudées en acier API 5L X42, testées sous deux régimes de soudage différents : 130A17L/min et 150A17L/min. Les courbes présentées incluent à la fois les résultats expérimentaux et les courbes corrigées (ou modélisées).

❖ Analyse graphique :

Les figures ci-dessous montrent les courbes contraintes-déplacement (130A) et contraintes-déformation (150A). Chaque graphique contient deux courbes : la courbe expérimentale en noir et la courbe corrigée en rouge.

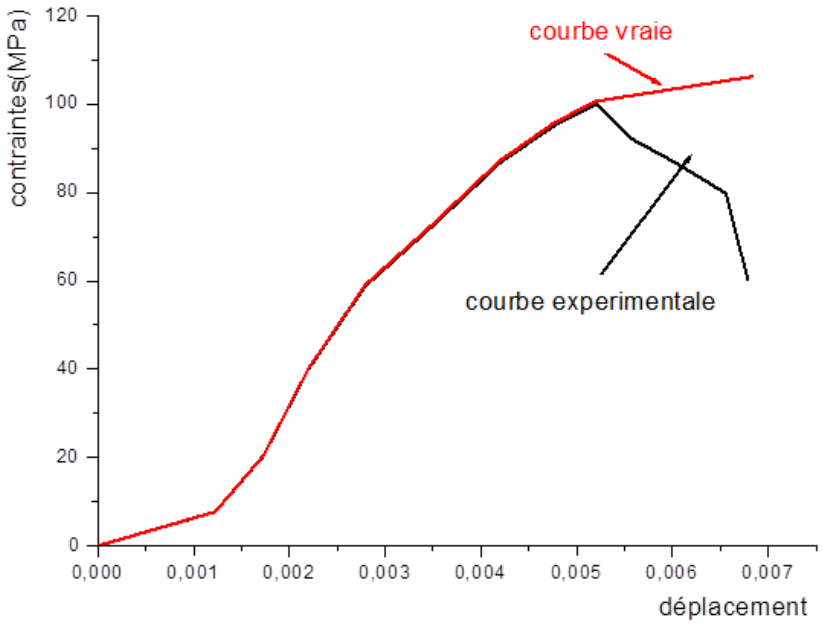


Figure 4.1 : Courbe de traction pour 130A17L/min.

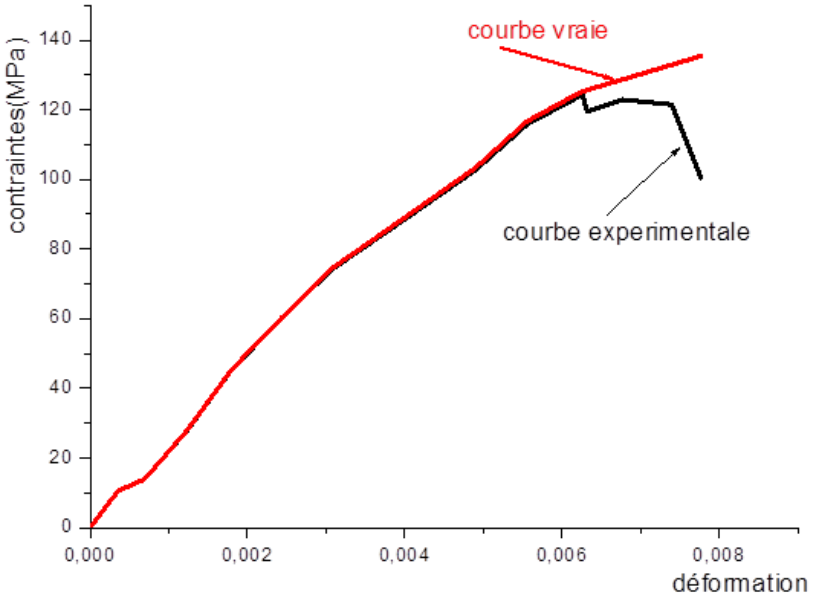


Figure 4.2 : Courbe de traction pour 150A17L/min.

4.2.9.1 Discussion comparative :

L'analyse montre que la courbe à 150 A présente une contrainte maximale plus élevée (~140 MPa) et une déformation plus importante (~0,008), traduisant un comportement plus ductile. À l'inverse, la courbe à 130 A atteint une contrainte maximale d'environ 110 MPa et une déformation inférieure (~0,0065), ce qui peut indiquer une moindre qualité de soudure ou une zone affectée thermiquement moins favorable.

Le régime 150 A semble donc offrir une meilleure performance mécanique, à condition de bien contrôler les effets thermiques (risques de surchauffe, microstructure grossie).

4.2.9.2 Effet du courant de soudage (intensité) :

L'intensité du courant influence directement la pénétration, la fusion et la formation de la microstructure. Une intensité trop faible (comme 130 A) peut engendrer un manque de fusion, particulièrement du côté AA7075, et ainsi créer des défauts d'interface, diminuant la résistance mécanique du joint.

À l'inverse, une intensité plus élevée (150 A) permet une fusion plus complète, assurant une liaison plus homogène. Cependant, elle augmente le risque de fissuration à chaud et de formation de phases intermétalliques fragiles, notamment dans la zone fondue riche en zinc, magnésium et cuivre.

4.2.9.3 Effet du débit de gaz de protection :

Le débit de gaz de 17 L/min, s'il est bien dirigé et stable, protège efficacement le bain de fusion contre l'oxydation. Ce paramètre est crucial pour les alliages comme l'AA7075, très sensibles à l'oxydation. Un débit insuffisant entraînerait des défauts métallurgiques tels que des porosités ou inclusions d'oxyde, réduisant la qualité de la soudure.

Conclusion :

Le soudage des alliages dissemblables AA5182 et AA7075 est une opération délicate qui nécessite une maîtrise fine des paramètres thermiques. L'utilisation d'un courant de 150 A permet d'obtenir une meilleure fusion et des propriétés mécaniques supérieures, mais augmente le risque de défauts métallurgiques s'il n'est pas bien contrôlé.

Le débit de gaz de 17 L/min, s'il est maintenu constant, assure une bonne protection du bain et participe à la stabilité de l'arc électrique.

Un équilibre entre courant, temps d'arc, vitesse de soudage et protection gazeuse est donc essentiel pour assurer une soudure de qualité entre ces deux alliages, tout en limitant les risques métallurgiques.

B contraintes de Von mis :

Cette discussion présente une comparaison détaillée entre deux cas de soudage (130A17L/min et 150A17L/min) à partir de simulations numériques sous Abaqus. Elle porte sur la distribution des contraintes de Von Mises dans une éprouvette soudée soumise à un essai de traction, permettant d'évaluer l'effet du courant de soudage sur la résistance mécanique du joint.

Figure : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'éprouvette simulée sous Abaqus (image à insérer).

Cas 130A17L/min :

La soudure réalisée à 130 A présente une concentration importante des contraintes de Von Mises dans une zone étroite, principalement au niveau de la zone fondue. Cette localisation traduit une mauvaise homogénéité et un comportement mécanique fragile. La transition entre les zones de faibles et fortes contraintes est brutale, ce qui indique une capacité limitée à dissiper les efforts mécaniques. Cela reflète une soudure de moindre qualité, avec un risque accru de rupture prématurée.

Cas 150A17L/min :

À 150 A, la simulation montre une distribution des contraintes de Von Mises plus étendue et plus progressive. La zone plastifiée est plus large, traduisant une meilleure fusion des matériaux et une transition plus douce entre les zones élastiques et plastiques. Cela se traduit par un comportement plus ductile du joint soudé, une meilleure résistance mécanique, et une réduction du risque de rupture localisée.

4.2.10 Comparison synthétique :

Critère	130A17L/min	150A17L/min
Distribution des contraintes	Concentrée	Répartie
Zone plastifiée	Étroite	Large
Comportement mécanique	Fragile	Ductile
Transitions de contrainte	Brutales	Progressives
Risque de rupture	Élevé	Réduit
Qualité du joint	Moyenne à faible	Bonne à très bonne

Conclusion :

L'analyse de la distribution des contraintes de Von Mises montre que le courant de soudage influence fortement le comportement mécanique du joint soudé. Le régime à 150A17L/min permet une meilleure homogénéité du joint, une plus grande capacité de déformation et une résistance mécanique accrue. Il est donc préférable pour assurer la durabilité et la performance structurelle du soudage entre alliages dissemblables (AA5182 / AA7075).

Conclusion génèrale

Au terme de ce travail, nous avons pu retracer l'évolution historique du soudage ainsi que les fondements théoriques et techniques des principaux procédés employés dans l'industrie contemporaine. L'étude comparative du soudage par fusion, du soudage à l'arc électrique, du soudage par résistance à la molette et du soudage plasma a permis de mettre en évidence la spécificité de chaque technique, tant sur le plan des mécanismes physiques mis en jeu que sur celui des domaines d'application privilégiés.

L'analyse des propriétés mécaniques des métaux et de la notion de soudabilité a par ailleurs souligné l'importance capitale de ces paramètres dans le choix et la maîtrise d'un procédé de soudage, dans la mesure où ils conditionnent directement la qualité, la résistance et la durabilité des assemblages réalisés. Cette problématique revêt une importance particulière dans le secteur des hydrocarbures, où l'intégrité des soudures constitue un enjeu majeur de sûreté industrielle, ainsi que le confirment les travaux menés sur la comparaison d'aciers destinés aux pipelines de la Sonatrach.

Ce mémoire, en dressant un état de l'art synthétique et structuré sur le soudage et la soudabilité des aciers, constitue ainsi une base méthodologique et scientifique pertinente pour appréhender les problématiques liées à l'assemblage des métaux. Il ouvre également des perspectives pour des travaux ultérieurs, orientés notamment vers l'optimisation des paramètres opératoires ou l'évaluation expérimentale du comportement mécanique de différentes nuances d'aciers soumises à des procédés de soudage spécifiques

Webography

1. (n.d.). Retrieved from Linked in : https://fr.linkedin.com/advice/0/what-common-failure-modes-mechanisms-low-cycle?lang=fr
2. (n.d.). Retrieved from https://stirweld.com/
3. Crack Initiation and Propagation. (n.d.). Retrieved from https://fea-solutions.co.uk/crack-initiation-and-propagation/
4. Davim, J. P. (2021). Welding Technology.
5. Duval, M. (2018). Soudage de l'aluminium. Québec: Centre d'expertise et d'innovation sur l'aluminium.
6. Fatigue Strength and Limit: Understanding Materials-Specific Data. (n.d.). Retrieved from https://sdcverifier.com/structural-engineering-101/fatigue-strength-and-limit-understanding-materials-specific-data/#:~:text=They%20are%20stress%20concentration%2C%20surface,loading%20conditions%2C%20and%20environmental%20influences.
7. GASTEBOIS, S. (2015 , juillet 9). Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une. Retrieved from https://pastel.hal.science/tel-01298711v1/file/2015ENMP0040_archivage.pdf
8. Giasson, L. (2003). Développement des méthodes de calcul et de mesure de la courbe J-R. Université du Québec à Rimouski.
9. Góral, A. (s.d.). Analysis of residual stresses.
10. LAMRAOUI, M. M. (juin 2012). Etude de la fatigue par flexion de l'acier inoxydable 316 L. Alger: École Nationale Polytechnique, Avenue 10, Hassen Badi, El Harrach. Alger.16200.
11. Linotte, B. (2019-2020). Caractérisation expérimentale du comportement en. Faculté des Sciences appliquées.
12. Lours, P. (2014). École des mines d'Albi-Carmaux.
13. Lours, P. (2014). École des mines d'Albi-Carmaux.
14. MAŁGORZATA SKORUPA, T. M. (2005). THE NASGRO STRIP YIELD MODEL PREDICTIONS ON FATIGUE CRACK GROWTH FOR AIRCRAFT ALUMINIUM ALLOYS UNDER CONST ANT AMPLITUDE AND VARIABLE AMPLITUDE PROGRAMMED AND RANDOM LOADING. Retrieved from

https://journals.pan.pl/Content/124986/PDF/7_MECHANICAL_52_2005_4_Skorupa_The_nasgro.pdf

15. Mishra, R. S. (2005). Friction stir welding and processing.

16. Nurul Syahida Mohd Nasir, M. K. (2016). REVIEW ON WELDING RESIDUAL STRESS . ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 6167.

17. PHILIP MALTAIS, I. (2008, SEPTEMBRE). DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE PREDICTION DE LA DURÉE DE VIE EN FATIGUE DE STRUCTURES TUBULAIRES SOUDÉES EN ALUMINIUM. L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIM!

18. Suresh, S. (1998). Fatigue of Materials (2nd ed.). Cambridge University Press.

19. Suzuki, T. (2022). How to Measure Residual Stress. Retrieved from https://www.pulstec.net/measuring-residual-stress/