

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



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblage soudés et matériaux

Par : DOUDOU Yasser

Sujet

Analyse numérique de l'influence de la forme du joint soudé sur le comportement mécanique des pièces soudées.

Soutenu publiquement, le 26 / 09 / 2024, devant les jurys composés de :

M. HADJOUI Abdelhamid	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. GHERNAOUT Mohamed Amine	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
M. GUEZZEN Samir	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M. AMIRAT Mohamed	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 / 2024

REMERCIEMENTS

- Tout d'abord, je remercie Allah et Lui exprime ma gratitude pour m'avoir accordé le succès dans mes études et de m'avoir donné la patience et la force pour achever ce mémoire.
- Deuxièmement, je voudrais remercier la meilleure mère du monde, la plus gentille et la plus belle. Je te remercie de tout cœur pour tes prières, ton inquiétude, ta patience avec moi, et pour ton aide, que ce soit à la maison ou ailleurs, sans jamais me laisser manquer de quoi que ce soit.
- Je voudrais remercier mon père, qui a pourvu à tous mes besoins pour mon succès et qui continue de se battre pour notre bien-être, je souhaite que Dieu les protège et leur donne la santé et la vigueur.
- Je voudrais remercier mes encadreurs monsieur AMIRAT Mohamed et monsieur GUEZZEN Samir pour leur confiance, leur aide, ainsi que leurs conseils et orientations, grâce auxquels j'ai pu terminer ce mémoire.
- Je tiens également à exprimer ma gratitude aux membres du jury, Monsieur HADJOUI Abdelhamid et Monsieur GHERNAOUT Mohamed Amine, pour leurs remarques pertinentes et le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail. Je remercie également les enseignants et l'administration du département de génie mécanique pour leurs enseignements enrichissants et leur soutien.
- Je voudrais remercier mes frères Rayane, Souhail et Mohmed amin et aussi mes sœurs pour leurs prières pour mon succès.
- Je tiens à remercier mes amis Jalil, Abdou, Kawter et Houda pour leurs conseils précieux issus de leur expérience, ainsi que pour leur aide.
- Je remercie toute ma famille et mes amis.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire de fin d'études à mes chères grands-mères, Mani Khadija et Mama Aicha, ainsi qu'à mes chers grands-pères, elhadj abdelkader et Daoud. Je prie Dieu pour qu'Il vous accorde Sa miséricorde et vous accueille dans Jannatul Firdaus.

ملخص

في إطار دراستنا التي تهدف إلى تحليل تأثير شكل الوصلات الملحومة على السلوك الميكانيكي للقطع الملحومة، أنجزنا عملاً يتكون من أربعة فصول. في البداية، تناولنا اللحام بشكل عام، مستكشفين تاريخه وأنواعه المختلفة، وأنواع الزوايا، بالإضافة إلى العيوب الشائعة المرتبطة بعمليات اللحام، مما أتاح لنا وضع الأسس اللازمة لفهم عميق للموضوع. ثم قدمنا برنامج ANSYS Mechanical، الذي لعب دوراً حاسماً في تحليلنا، حيث قمنا بتفصيل المعايير المختلفة التي تميزه وكذلك طرق اختيار وتطبيق هذه المعايير، مثل ما يتعلق بتطبيق القوى واختيار اتجاهها. في الفصل الثالث، قمنا بنمذجة أنواع مختلفة من العينات لدراستنا، ثم اخترنا معدن القاعدة، وهو المعدن S235JR، بالإضافة إلى ثلاثة أنواع مختلفة من معادن الحشو (E6013، E71TGS، ER70S-3) بعد هذه المرحلة، أجرينا سلسلة من التجارب لاختبار إعدادات مختلفة، محددين الخيار الأنسب لكل معلمة، والذي يشمل الإزاحة، الوقت، والشبكة. أخيراً، قمنا بإجراء اختبار شد على القطع لدراسة تأثير اختيار معدن الحشو، وتأثير شكل الوصلة الملحومة بما في ذلك الأشكال: مسطحة، V، X، K، U، و O، بالإضافة إلى تأثير تغيير سمك العينات (5 مم، 7 مم و 9 مم) وزاوية الوصلة الملحومة (30°، 60° و 90°). تم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها بالتفصيل، مما أتاح لنا الوصول إلى استنتاجات هامة حول الموضوع.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة، انسياس، الشطب، التحليل الرقمي، التلحيم، اللحام بغاز التنغستن الخامل

SUMMARY

As part of our study aimed at analyzing the influence of the shape of the welded joint on the mechanical behavior of welded components, we conducted a structured investigation divided into four chapters. First, we approached welding from a general perspective, exploring its history, various types, chamfer varieties, and common defects associated with welding processes. This provided the necessary foundation for a deeper understanding of the subject. Next, we introduced the ANSYS Mechanical software, which played a crucial role in our analysis. We detailed its key parameters and the methods for selecting and applying them, particularly regarding the application of forces and the choice of their direction. In the third chapter, we modeled various test specimens for our studies and selected the base metal, S235JR steel, along with three different filler metals (E6013, E71TGS, ER70S-3). Following this, we conducted a series of experiments to test different settings, determining the most suitable option for each parameter, including displacement, time, and meshing. Finally, we performed tensile tests on the specimens to study the effect of the filler metal choice, the influence of the weld joint shape (including flat, V, X, K, U, and O shapes), and the impact of variations in specimen thickness (5 mm, 7 mm, and 9 mm) and weld joint angles (30°, 60°, and 90°). The obtained results were then analyzed in detail, enabling us to draw meaningful conclusions on the subject.

Keywords: Simulation, ANSYS, Chamfers, Numerical analysis, Welding, TIG.

RESUME

Dans le cadre de notre étude visant à analyser l'influence de la forme du joint soudé sur le comportement mécanique des pièces soudées, nous avons réalisé un travail structuré en quatre chapitres. Dans un premier temps, nous avons abordé la soudure de manière globale, en explorant son histoire, ses différents types, les variétés de chanfreins, ainsi que les défauts courants associés aux procédés de soudage, ce qui nous a permis de poser les bases nécessaires à une compréhension approfondie du sujet. Nous avons ensuite introduit le logiciel ANSYS Mechanical, qui a joué un rôle crucial dans notre analyse, en détaillant les divers paramètres qui le caractérisent ainsi que les méthodes de sélection et d'application de ces paramètres, notamment en ce qui concerne l'application des forces et le choix de leur direction. Dans le troisième chapitre, nous avons procédé à la modélisation des éprouvettes différentes pour nos études, ensuite nous sélectionnons le métal de base l'acier S235JR ainsi que trois types différents de métal d'apport (E6013, E71TGS, ER70S-3). Après cette étape, nous avons mené une série d'expérimentations pour tester différents réglages, déterminant l'option la plus adaptée pour chaque paramètre, incluant le déplacement, le temps et le maillage. Enfin, nous avons appliqué essai de traction sur les pièces afin d'étudier l'effet du choix du métal d'apport, l'influence de la forme du joint de soudure (incluant les formes Plat, V, X, K, U et O), ainsi que l'impact de la variation de l'épaisseur des éprouvettes (5 mm, 7 mm et 9 mm) et de l'angle du joint de soudure (30°, 60° et 90°). Les résultats obtenus ont ensuite été analysés en détail, permettant ainsi d'établir des conclusions significatives sur le sujet.

Mots clé : Simulation, ANSYS, Chanfrein, Soudage, Analyse numérique, TIG.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ZF : Zone fondu (zone de fusion).

ZAT : Zone affecté thermiquement.

MB : Métal de base.

CAP : Certificat d'aptitude professionnelle.

MIG : Metal inert gas.

MAG: Metal active gas.

TIG: Tungsten inert gas.

SMAW: Shielded metal arc welding.

CZ : Zone composite.

UMZ : Zone non mélangée.

TZ : Zone de transition.

SAF : Société des Ateliers et Forges de la Loire.

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding.

MEF : La méthode des éléments finis.

C : La largeur de cordon.

E : L'épaisseur de la pièce.

σ : La contrainte maximale en Mpa

F : La force appliquer en N

A : La surface en mm²

v : La vitesse en mm/s.

d : Le déplacement en mm.

t : Le temps en s.

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Les régions de soudure avant 1960. -----	4
Figure I.2 : Les régions de soudure en 1976. -----	4
Figure I.3 : Une soudure autogène (sans métal d'apport). -----	5
Figure I.4 : Une soudure homogène. -----	6
Figure I.5: Les composants de soudage SMAW. -----	8
Figure I.6 : Schéma représente principe de soudage SMAW. -----	8
Figure I.7 : Principe de soudage MIG/MAG. -----	13
Figure I.8 : Les composants de soudage MIG/MAG. -----	13
Figure I.9 : Les modes de transferts du métal. -----	15
Figure I.10: Principe de soudage TIG. -----	18
Figure I.11 : Les types de joint. -----	19
Figure I.12 : Les types de chanfrein. -----	21
Figure I.13 : Les types de fissuration. -----	23
Figure I.14 : Les types de soufflure. -----	25
Figure I.15: Les types d'inclusions. -----	26
Figure I.16 : Manque de fusion. -----	27
Figure I.17 : Le caniveaux. -----	28
Figure I.18: La distorsion. -----	29
Figure II.1 : L'interface de logiciel ANSYS. -----	32
Figure II.2 : L'interface de DesignModeler. -----	34
Figure II.3 : L'interface de SpaceClaim. -----	34
Figure II.4 : La base de donne du ANSYS pour les matériaux. -----	37
Figure II.5 : Les déferents propriétés qui est disponible dans ANSYS. -----	38
Figure II.6 : La méthode pour sélectionner la taille d'élément. -----	40
Figure II.7 : La méthode pour appliquer un déplacement. -----	42
Figure II.8 : La méthode pour appliquer une vitesse. -----	44
Figure III.1 : Modélisation les différents joints soudés. -----	49
Figure III.2 : Modélisation des éprouvettes avec différents épaisseurs. -----	49
Figure III. 3 : Modélisation des éprouvettes avec différents angles de joint. -----	50
Figure III.4 : Courbe de contrainte pour différents déplacements. -----	51
Figure III.5 : Courbe de contrainte pour différents temps. -----	53
Figure III.6 : L'éprouvette après le maillage. -----	54
Figure III.7 : Courbe de contrainte pour différents maillages. -----	55
Figure IV.1 : Courbe de contrainte pour différents métaux d'apport. -----	58
Figure IV.2 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport E6013. -----	58
Figure IV.3 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport E71TGS. -----	59
Figure IV.4 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport ER70S-3. -----	59
Figure IV.5 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat. -----	60
Figure IV.6 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en V. -----	60
Figure IV.7 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en U. -----	60
Figure IV.8 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en K. -----	61
Figure IV.9 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en X. -----	61

Figure IV.10 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en O. -----	61
Figure IV.11 : Courbe de contrainte pour différents joint soudée. -----	62
Figure IV.12 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 5 mm d'épaisseur. -----	63
Figure IV.13 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 7 mm d'épaisseur. -----	63
Figure IV.14 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 9 mm d'épaisseur. -----	63
Figure IV.15 : Courbe de contrainte pour différentes épaisseurs avec joint plat. -----	64
Figure IV.16 : Courbe de force pour différentes épaisseurs avec joint plat. -----	64
Figure IV.17 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 5 mm d'épaisseur. ---	65
Figure IV.18 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 7 mm d'épaisseur. ---	65
Figure IV.19 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 9 mm d'épaisseur. ---	65
Figure IV.20 : Courbe de contrainte pour différentes épaisseurs avec joint en V. -----	66
Figure IV.21 : Courbe de force pour différentes épaisseurs avec joint en V. -----	66
Figure IV.22 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 30°. -----	67
Figure IV.23 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 60°. -----	67
Figure IV.24 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 90°. -----	68
Figure IV.25 : Courbe de contrainte pour différents angles de chanfrein. -----	68

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Causes et moyens de prévention liés à la fissuration. -----	22
Tableau I.2 : Les causes d'inclusion et moyens de prévention. -----	26
Tableau I.3 : Les causes de manque pénétration et Moyens de prévention. -----	27
Tableau III.1: La composition chimique du métal de base. -----	47
Tableau III.2: Les caractéristiques mécaniques du métal de base. -----	47
Tableau III.3: La composition chimique du métal d'apport. -----	48
Tableau III.4 : Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport. -----	48
Tableau III.5 : La valeur de force et contrainte pour chaque déplacement. -----	51
Tableau III.6 : La valeur de vitesse pour différents temps. -----	52
Tableau IV.1 : Tableau représenter les résultats des figures IV.20 et IV.21 -----	67

TABLE DE MATIERE :

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

TABLE DE MATIERE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Généralité sur le soudage	2
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. DEFINITION DE SOUDAGE	3
I.3. HISTOIRE DU SOUDAGE	3
I.4. REGIONS DE LA SOUDURE PAR FUSION	4
I.5. ZONE DE FUSION	5
I.6. TYPES DE ZONE DE FUSION	5
I.7. TYPES DE SOUDAGE	6
I.8. SOUDAGE A ARC A L'ELECTRODE ENROBEE	7
I.8.1. Définition	7
I.8.2. Principe de fonctionnement	8
I.8.3 L'électrode enrobé	9
I.8.4. Types d'enrobage	9
I.8.5. Choix du diamètre de l'électrode enrobée	10
I.8.6. Avantages et inconvénients de procédé	11
I.9. SOUDAGE MIG / MAG	12
I.9.1 Définition	12
I.9.2. Principe de fonctionnement	12
I.9.3. Les composants de soudage MIG/MAG	13
I.9.4. Modes de transferts du procédé MIG/MAG	15
I.9.5. Avantages et inconvénients de procédé	16
I.10. PROCEDE DE SOUDAGE TIG	17
I.10.1. Définition	17
I.10.2. Principe de ce procédé	17
I.10.3. Avantages et inconvénients de procédé	18
I.11. TYPES DE JOINT	19
I.12. TYPES DE CHANFREIN	20

I.13. DEFAUTS DE SOUDAGE -----	21
I.13.1. Fissurations -----	21
I.13.2. Soufflures -----	23
I.13.3. Inclusions -----	25
I.13.4. Manque de fusion -----	26
I.13.5. Manque de pénétration -----	27
I.13.6. Caniveaux -----	28
I.13.7. Distorsion -----	28
CHAPITRE II : Présentation du logiciel ANSYS-----	30
II.1. INTRODUCTION -----	31
II.2. FONCTIONS PRINCIPALES D'ANSYS -----	31
II.3. DOMAINES D'UTILISATION -----	31
II.4. ANSYS MECHANICAL -----	31
II.5. INTERFACE UTILISATEUR -----	32
II.5.1. Création de la géométrie dans ANSYS Mechanical -----	32
II.5.2. Définition des matériaux dans ANSYS -----	35
II.5.3. Le maillage dans ANSYS Mechanical -----	38
II.5.4 Insertion des conditions aux limites dans ANSYS Mechanical -----	41
II.5.5. Application des conditions de vitesse et d'accélération dans ANSYS Mechanical --	43
II.5.6. Lancement de la simulation -----	45
II.6. CONCLUSION -----	45
CHAPITRE III : Modélisation numérique-----	46
III.1. INTRODUCTION -----	47
III.2. LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA SIMULATION -----	47
III.2.1. Métal de base -----	47
III.2.2. Métal d'apport -----	47
III.3. MODELISATION DES DIFFERENTES PIECES -----	48
III.3.1. Modélisation des différents joints soudés -----	48
III.3.2. Modélisation de différentes épaisseurs -----	49
III.3.3. Modélisation des différents angles du joint de soudure -----	50
III.4. SELECTION DES PARAMETRES DE SIMULATION -----	50
III.4.1. Choix de déplacement pour la simulation -----	50
III.4.2. Choix du temps pour la simulation -----	52
III.4.3. Choix du maillage -----	53
III.6. CONCLUSION -----	56
CHAPITRE IV : Résultats et discussions.-----	46

IV.1. INTRODUCTION	58
IV.2. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHOIX DU METAL D'APPORT	58
IV.3. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHOIX DU JOINT DE SOUDURE	60
IV.4. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHANGEMENT DE L'ÉPAISSEUR DES ÉPROUVETTES	63
IV.4.1. L'effet du changement de l'épaisseur des éprouvettes avec joint plat	63
IV.4.2. Effet du changement de l'épaisseur des éprouvettes avec joint V	65
IV.5. ÉTUDE L'EFFET DU CHANGEMENT DE L'ANGLE DU JOINT DE SOUDURE	67
CONCLUSION GENERALE	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71
REFERENCES WEBOGRAPHIS	72

INTRODUCTION GENERALE

Le soudage est une méthode essentielle dans l'industrie moderne pour assembler des pièces métalliques de manière efficace et durable. Cependant, la qualité et la résistance de la soudure peuvent être grandement influencées par la forme du joint soudé, qui définit la manière dont les pièces sont assemblées. Cette influence sur le comportement mécanique des pièces soudées est cruciale à étudier et à comprendre pour garantir la fiabilité des structures assemblées. Par conséquent, la problématique de ce mémoire est : quel est le joint soudé le plus résistant à la déformation, et existe-t-il d'autres facteurs qui affectent le joint soudé ?

Ce mémoire se focalise sur l'analyse numérique de l'influence de la forme du joint soudé sur le comportement mécanique des pièces. Il est structuré en quatre chapitres principaux, chacun abordant une facette spécifique de cette problématique. Le premier chapitre présente une introduction générale au processus de soudage, à ses types et aux procédés les plus utilisés, ainsi qu'une présentation des différents types de joints et de chanfreins utilisés dans le domaine du soudage, ainsi que les défauts de soudage les plus connus.

Le deuxième chapitre se concentre sur le logiciel ANSYS Mechanical, incluant sa définition et les fonctionnalités qu'il offre, ainsi que sur la manière de choisir les propriétés.

Le troisième chapitre aborde la modélisation numérique des différentes pièces utilisées dans les simulations. Il explore également les méthodes de choix des matériaux, ainsi que les propriétés de soudage telles que le temps, le déplacement et le maillage. Cette section détaille les aspects techniques de la simulation numérique qui permettent d'étudier précisément l'influence de la forme du joint sur les comportements mécaniques des assemblages soudés.

Enfin, le quatrième chapitre présente une comparaison détaillée et une discussion approfondie des résultats obtenus à travers les simulations numériques. Cette section analyse les différentes formes de joints soudés, ainsi que l'épaisseur et les différents angles, et évalue leur impact sur les critères de performance mécanique des éprouvettes soudées.

Chapitre I :

Généralité sur le soudage

I.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous définirons le soudage, puis nous aborderons ses différents types et verrons les procédés de soudage les plus importants afin d'avoir un aperçu général de l'assemblage soudé. Enfin, nous présenterons les types de joints soudés, les types de chanfreins et les défauts de soudage.

I.2. DEFINITION DE SOUDAGE :

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent utilisant une source de chaleur et/ou de compression qui assure la continuité de la matière à assembler. Ce processus est essentiel dans la construction et la réparation de nombreux objets et structures métalliques, allant des automobiles aux bâtiments, en passant par les équipements industriels. Cette technique (le soudage) se distingue des autres techniques d'assemblage telles que le rivetage, le boulonnage, l'agrafage ou le collage.

Pour les métaux, la continuité est établie par fusion. Bien qu'un soudage puisse théoriquement se produire lentement grâce aux forces interatomiques et à la diffusion entre des pièces métalliques en contact total, avec des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, en pratique, il nécessite une énergie pour obtenir rapidement la continuité souhaitée. Cette énergie peut être sous forme de chaleur ou d'électricité, permettant ainsi au métal d'atteindre son point de fusion au niveau de la soudure. On peut souder plusieurs matériaux comme les métaux, les matières thermoplastiques et le bois. [1]

I.3. HISTOIRE DU SOUDAGE :

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux, avec des méthodes rudimentaires telles que la soudure à la poche à l'âge du bronze et la soudure à la forge à l'âge du fer.

Jusqu'au milieu du 19ème siècle, les procédés de soudage évoluent peu, mais vers 1850, l'utilisation du gaz pour chauffer les métaux à souder commence à se répandre.

À la fin du 19ème siècle, de nouveaux procédés voient le jour, tels que le soudage oxyacétylénique, le soudage aluminothermique, le soudage à l'arc électrique et le soudage par résistance, qui connaissent un essor industriel vers 1920.

Au début du 20ème siècle, le soudage se répand dans tous les secteurs industriels, entraînant des modifications importantes dans la conception et la réalisation des objets, comme l'utilisation de poutres reconstituées soudées pour les ponts de grandes dimensions et fortes épaisseurs. Le soudage devient alors indissociable du développement de nombreux secteurs économiques.

Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit encore avec son utilisation dans la construction navale, l'automobile et l'aéronautique. Cela conduit à l'émergence du métier de soudeur, nécessitant la formation d'ouvriers et l'organisation de cours, notamment avec la création du CAP de soudeur en 1931.

Au fil des années, le soudage continue d'évoluer sur le plan technologique, avec l'industrialisation de principes physiques comme le faisceau d'électrons, le soudage au laser et

aux ultrasons, ainsi que la découverte involontaire de nouveaux procédés comme le soudage par explosion et par diffusion. De plus, l'introduction croissante de la microélectronique dans les équipements de soudage et le développement de la robotisation contribuent à améliorer la qualité et la productivité.

Au cours des dix dernières années, les innovations se concentrent moins sur les procédés eux-mêmes que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport, ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, avec une amélioration continue en matière d'hygiène et de sécurité. À l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100 kW/cm². [2]

I.4. REGIONS DE LA SOUDURE PAR FUSION :

La compréhension des régions d'une soudure a évolué considérablement depuis les années 1960. Avant cette époque, on pensait qu'une soudure par fusion était constituée de seulement deux régions, la figure I.1 représente ces deux régions (zone de fusion et zone affectée thermiquement environnante).

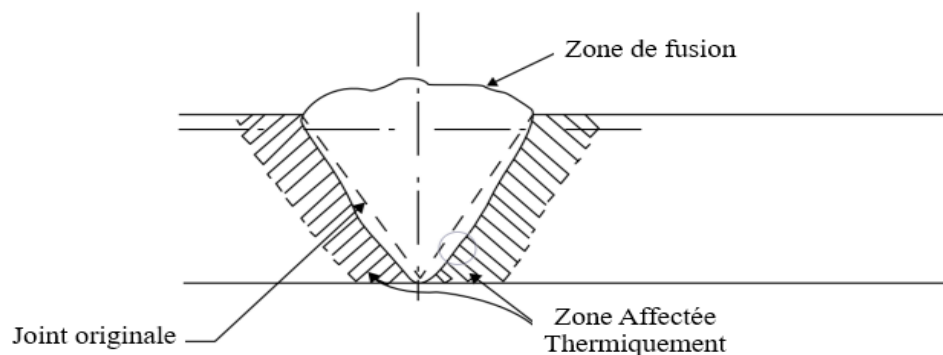


Figure I.1 : Les zones de soudure avant 1960. [3]

En 1976, une étude a proposé plusieurs modifications de la terminologie utilisée pour décrire les régions de microstructure des soudures par fusion, telles que représentées dans la figure I.2.

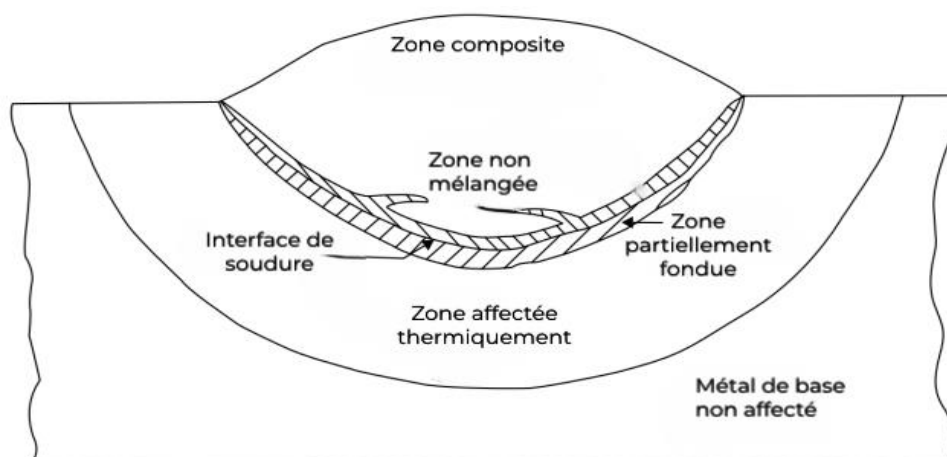


Figure I.2 : Les zones de soudure en 1976. [3]

I.5. ZONE DE FUSION :

La zone de fusion désigne la région d'une soudure par fusion où une fusion complète et une re-solidification se produisent pendant le processus de soudage. La microstructure dans cette zone dépend de la composition et des conditions de solidification. Même de légères variations de composition peuvent entraîner des différences significatives dans la microstructure et les propriétés. Dans certains cas, la modification des taux de solidification et de refroidissement peut également avoir un impact sur la microstructure, parfois de manière notable.

Dans les soudures où le métal d'apport présente une composition différente de celle du métal de base, théoriquement, trois régions distinctes peuvent être identifiées. La plus grande de ces régions est la zone composite (CZ), constituée de métal d'apport uniformément dilué avec le métal de base. Adjacent à la frontière de fusion, deux autres régions peuvent se former. La zone non mélangée (UMZ) est composée de métal de base fondu et re-solidifié, où un mélange négligeable avec le métal d'apport s'est produit. Entre la zone non mélangée et la CZ, une zone de transition (TZ) doit être présente, caractérisée par un gradient de composition allant du métal de base à la CZ. [3]

I.6. TYPES DE ZONE DE FUSION :

On note trois différents types de zone de fusion :

- **Les soudures autogènes** : Les soudures autogènes sont celles réalisées sans l'ajout de métal d'apport, où la fusion et la re-solidification du métal de base forment la zone de fusion (Fig I.3). Elles sont fréquentes dans des situations où les sections à souder sont minces et où la pénétration peut être obtenue facilement par le processus choisi. Dans les sections minces, le soudage autogène peut souvent être effectué à des vitesses élevées, avec un minimum de préparation de joint, souvent limitée à des joints bout à bout. La zone de fusion présente essentiellement la même composition que le métal de base, à l'exception de possibles pertes dues à l'évaporation ou à l'absorption de gaz provenant de l'atmosphère de protection. Toutefois, tous les matériaux ne peuvent pas être joints de manière autogène en raison de problèmes de soudabilité. [3]

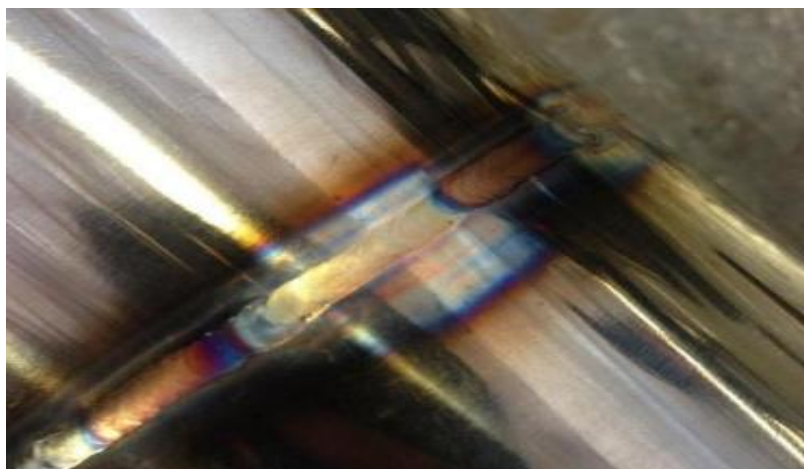


Figure I.3 : Une soudure autogène (sans métal d'apport) [4]

- **Les soudures homogènes** : Les soudures homogènes sont réalisées en utilisant un métal d'apport qui correspond étroitement à la composition du métal de base (Figure I.4). Ce type de zone de fusion est privilégié lorsque l'application exige que les propriétés du métal d'apport et du métal de base soient parfaitement assorties, telles que la résistance à la corrosion et la dureté. [3]



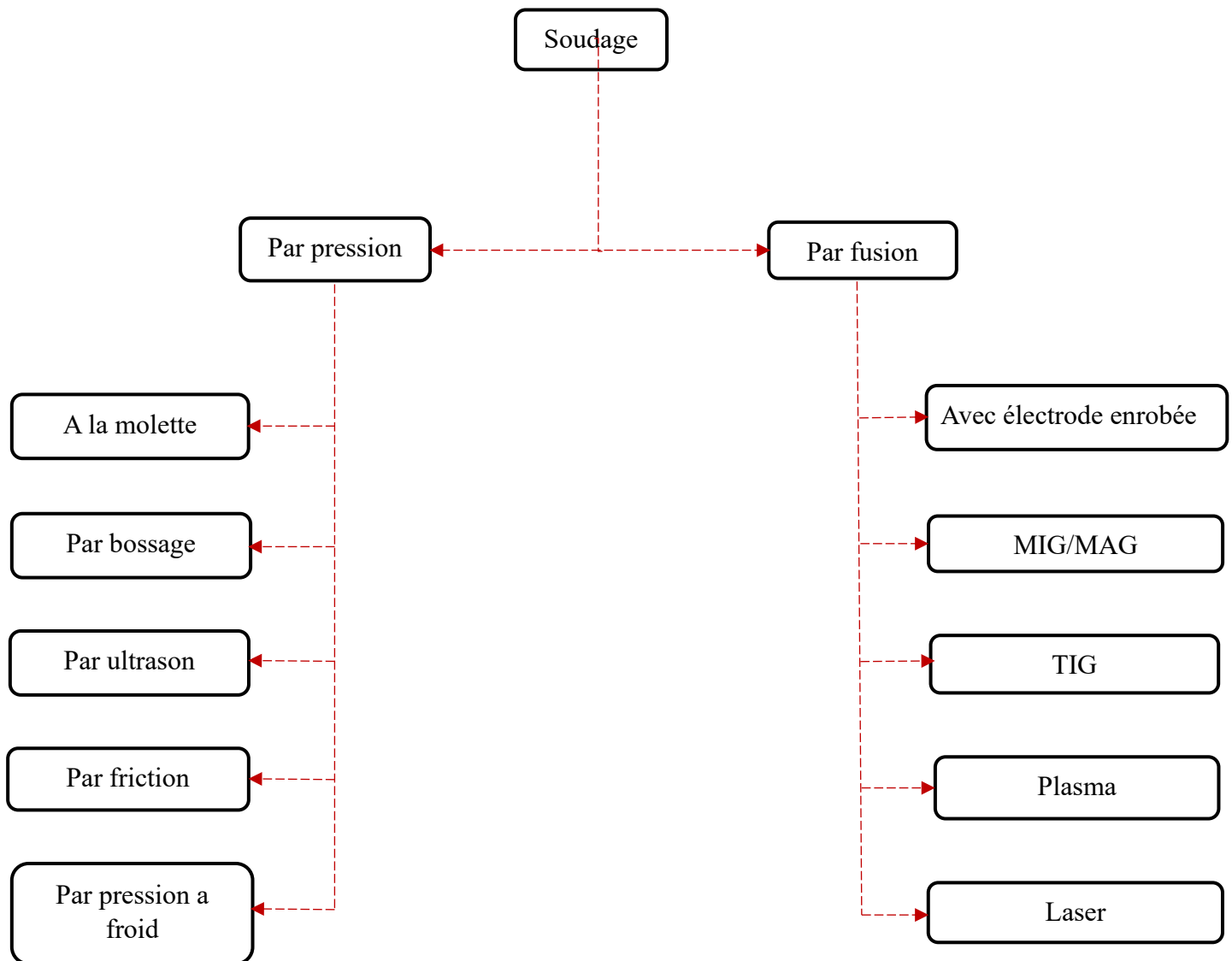
Figure I.4 : Une soudure homogène. [5]

- **Les soudures hétérogènes** : Les soudures hétérogènes sont des soudures par fusion réalisées avec des métaux d'apport dont la composition diffère de celle du métal de base. Dans de nombreuses situations, il peut ne pas exister de métaux d'apport correspondants, ou les propriétés de soudure souhaitées ne peuvent pas être obtenues avec une composition correspondante. Il est également important de reconnaître que de nombreuses compositions de métal de base peuvent présenter une soudabilité intrinsèquement médiocre, rendant ainsi nécessaire l'utilisation de métaux d'apport dissimilaires pour obtenir des propriétés ou des performances en service acceptables. [3]

I.7. TYPES DE SOUDAGE :

Il existe deux types de soudage : le soudage par fusion et le soudage par pression. Chaque type comprend plusieurs procédés, certains nécessitant l'utilisation de métal d'apport, tandis que d'autres se réalisent sans ce métal.

- Dans le soudage par fusion, les métaux sont joints en les chauffant jusqu'à ce qu'ils fondent. Certains procédés de soudage par fusion nécessitent l'utilisation de métaux d'apport ou de feuillets de soudage.
- Le soudage par pression constitue une approche différente. Dans ce cas, les métaux sont assemblés sans ajout de matériaux d'apport. L'assemblage se fait en comprimant fortement la pièce supérieure contre la pièce inférieure, les pressant ainsi l'une contre l'autre. [6]



I.8. SOUDAGE A ARC A L'ELECTRODE ENROBEE :

I.8.1. Définition :

En 1904, un ingénieur suédois nommé Oscar Kjellberg a développé la technique de soudage à l'arc à l'électrode enrobée, connue sous le nom de SMAW. Ce procédé est désigné par le numéro 111 dans la nomenclature de la norme NF EN ISO 4063. On trouve son application dans divers domaines tels que la construction métallique, la fabrication industrielle, la construction de pipelines, et surtout dans la réparation des défauts [7]. Ce procédé contient plusieurs composants, présentés dans la figure I.5.

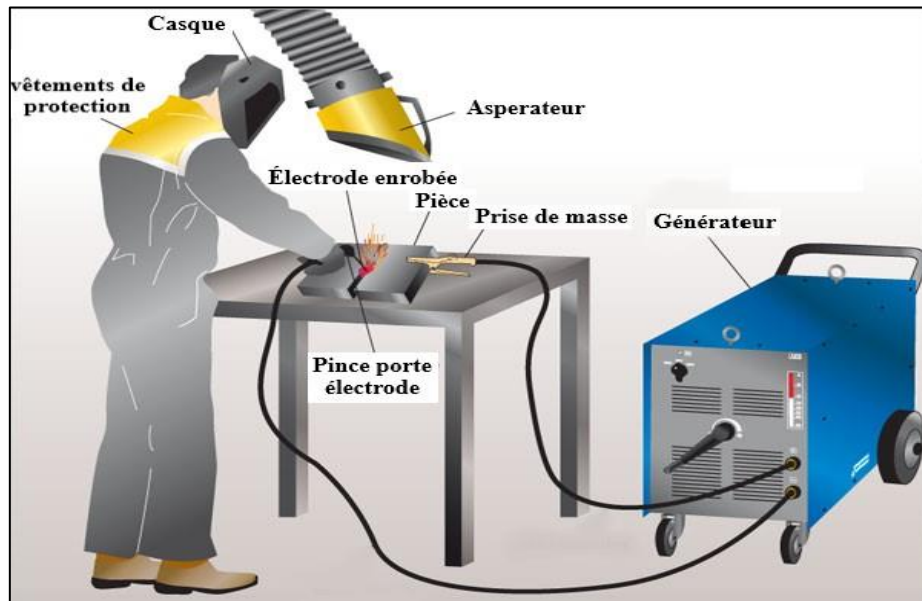


Figure I.5: Les composants de soudage SMAW. [8]

I.8.2. Principe de fonctionnement :

Le soudage à l'électrode enrobée est un procédé de soudage à l'arc où une électrode métallique recouverte d'un enrobage flux-cored est utilisée pour créer un arc électrique entre l'électrode et les pièces à souder. Lorsque l'arc est établi, le métal de l'électrode fond et forme une goutte de métal en fusion, qui est transférée dans le joint de soudure pour former une liaison solide entre les pièces. Pendant ce processus, l'enrobage de l'électrode se décompose, formant un gaz protecteur et un laitier qui protègent le bain de fusion des impuretés atmosphériques et favorisent la solidification du métal soudé (Figure I.6). Ce procédé est largement utilisé dans diverses applications industrielles et de fabrication en raison de sa polyvalence, de sa facilité d'utilisation et de sa capacité à souder une grande variété de métaux et d'épaisseurs. [7]

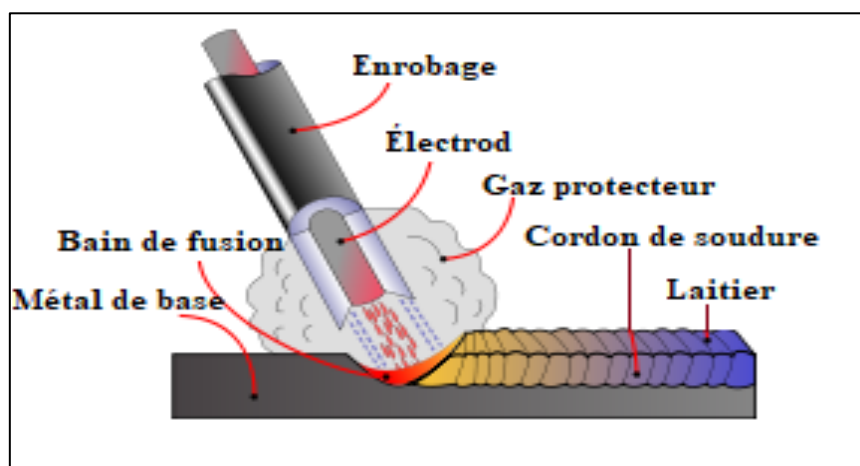


Figure I.6 : Schéma représente principe de soudage SMAW. [9]

I.8.3 L'électrode enrobée :

L'électrode enrobée est utilisée dans le soudage. C'est une tige métallique spéciale recouverte d'un enrobage composé de différents matériaux. Cette baguette joue plusieurs rôles essentiels lors du processus de soudage, notamment :

- **Flux et matériaux de revêtement** : L'enrobage contient généralement des flux et d'autres matériaux de revêtement qui jouent un rôle crucial dans la création du joint de soudure. Ces matériaux peuvent inclure des oxydes, des désoxydants, des stabilisateurs d'arc et des éléments d'alliage.
- **Protection du bain de fusion** : L'enrobage se décompose lorsqu'il est exposé à la chaleur de l'arc électrique, produisant un gaz protecteur qui entoure le bain de fusion. Ce gaz protège le métal fondu des impuretés atmosphériques telles que l'oxygène et l'azote, prévenant ainsi la formation de défauts dans le joint de soudure.
- **Formation du laitier** : L'enrobage génère également un matériau appelé laitier, qui flotte sur le bain de fusion. Le laitier protège également le métal fondu des contaminants atmosphériques et de surface, améliorant ainsi la qualité du joint de soudure.
- **Stabilisation de l'arc** : Certains composants de l'enrobage sont conçus pour stabiliser l'arc électrique pendant le soudage, garantissant ainsi une performance cohérente et une fusion uniforme du métal. [7]

I.8.4. Types d'enrobage :

Les électrodes enrobées peuvent être classées en différents types en fonction de la composition de leur enrobage et de leurs propriétés. Les types d'enrobage les plus courants utilisés dans les électrodes enrobées sont :

- **Enrobage rutile** : Les électrodes enrobées avec un enrobage à base de rutile (dioxyde de titane) sont connues pour offrir une stabilité d'arc et un amorçage facile. Elles produisent généralement des soudures esthétiques avec peu de projections, ce qui les rend populaires pour les applications où l'apparence du cordon de soudure est importante.
- **Enrobage basique** : Les électrodes enrobées avec un enrobage basique (carbonate de calcium, fluorure de calcium) sont utilisées pour souder des aciers à haute résistance, des aciers à faible teneur en carbone et des aciers alliés. Elles sont reconnues pour offrir une bonne pénétration, une résistance élevée à la fissuration et des propriétés mécaniques améliorées dans le métal soudé.
- **Enrobage cellulosique** : Les électrodes enrobées avec un enrobage à base de cellulose sont utilisées pour des applications nécessitant une pénétration profonde et une grande vitesse de dépôt. Elles sont souvent utilisées dans les soudures en position verticale et en surplomb, ainsi que dans les soudures sous tension.

- **Enrobage oxydique** : Les électrodes enrobées avec un enrobage oxydique contiennent des oxydes de fer, de manganèse et de silicium dans leur composition. Elles sont utilisées pour souder des aciers faiblement alliés et pour obtenir des soudures résistantes à la fissuration et à la porosité.

- **Enrobage acide** : Ce type d'enrobage est composé d'oxydes de fer, de manganèse, de titane, de silice et contient une proportion considérable de ferromanganèse ou d'autres agents désoxydants. Le laitier résultant est facile à éliminer. Ces électrodes conviennent aux soudures à plat avec des courants continus ou alternatifs de haute intensité, offrant ainsi une fusion rapide et une bonne pénétration. Cependant, elles présentent un risque de fissuration à chaud et sont moins couramment utilisées pour les travaux de qualité. De plus, l'enrobage est sensible aux températures élevées de séchage, ce qui peut entraîner la présence d'humidité résiduelle et par conséquent, la formation d'inclusions d'hydrogène dans la soudure.

- **Enrobage mixte** : Certains types d'électrodes enrobées utilisent un mélange d'enrobages, combinant par exemple des caractéristiques d'enrobage rutile et basique pour offrir une combinaison de stabilité d'arc, de pénétration et de résistance mécanique.

Chaque type d'enrobage a ses avantages et ses applications spécifiques. Le choix de l'enrobage approprié dépend des exigences de la pièce à souder, des propriétés mécaniques souhaitées de la soudure et des conditions de soudage. [10]

I.8.5. Choix du diamètre de l'électrode enrobée :

Le choix du diamètre de l'électrode enrobée dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- **Épaisseur des matériaux à souder** : En règle générale, plus les matériaux à souder sont épais, plus le diamètre de l'électrode doit être important pour fournir suffisamment de métal d'apport et assurer une bonne pénétration.

- **Position de soudage** : La position dans laquelle vous allez souder (à plat, verticale, horizontale ou en plafond) peut influencer le diamètre de l'électrode. Par exemple, les soudures en position verticale ou en plafond peuvent nécessiter des électrodes de plus petit diamètre pour réduire les risques de chute de métal fondu.

- **Type de joint de soudure** : Le type de joint (bout à bout, en angle, en T, etc.) et la configuration de la pièce à souder peuvent également influencer le choix du diamètre de l'électrode.

- **Courant de soudage** : Le diamètre de l'électrode peut être choisi en fonction du courant de soudage utilisé. Les électrodes de gros diamètre sont souvent utilisées avec des courants plus élevés, tandis que les électrodes de petit diamètre conviennent aux courants plus faibles.

- **Préférences de l'opérateur** : Les préférences personnelles de l'opérateur de soudage peuvent également jouer un rôle dans le choix du diamètre de l'électrode, en fonction de son expérience et de ses habitudes de travail.

En général, il est recommandé de sélectionner le diamètre de l'électrode enrobée en fonction des recommandations du fabricant, des spécifications de la pièce à souder et des conditions de soudage. Il peut être utile de faire des essais avec différents diamètres d'électrodes pour déterminer celui qui convient le mieux. [11]

I.8.6. Avantages et inconvénients de procédé :

Le soudage à l'électrode enrobée est une méthode de soudage largement utilisée dans nombreuses industries en raison de sa polyvalence et de sa facilité d'utilisation. Les avantages de ce procédé de soudage sont :

- **Coût** : Les équipements nécessaires pour le soudage à l'électrode enrobée sont généralement moins chers que ceux nécessaires pour d'autres techniques de soudage plus avancées.
- **Polyvalence** : Le soudage à l'électrode enrobée peut être utilisé dans diverses positions de soudage (horizontal, vertical, bout à bout, en T ...) et sur une grande variété de matériaux métalliques.
- **Facilité d'utilisation** : Cette méthode est relativement simple à apprendre et à utiliser, ce qui la rend accessible même aux opérateurs moins expérimentés.
- **Mobilité** : Les équipements de soudage à l'électrode enrobée sont souvent portables, ce qui permet de les utiliser dans des environnements où l'accès à une alimentation électrique stable peut être limité.
- **Adaptabilité aux conditions extérieures** : Ce procédé peut être utilisée dans des conditions météorologiques variables, ce qui en fait un choix idéal pour les travaux en extérieur.

Malgré il a de nombreux avantages mais il a aussi des inconvénients comme :

- **Productivité** : Le soudage à l'électrode enrobée peut être moins productif que d'autres méthodes de soudage plus automatisées, car il nécessite souvent un temps d'arrêt pour changer les électrodes.
- **Qualité du soudage** : Bien que cette méthode puisse produire des soudures de qualité, elle peut être plus sujette à des défauts tels que des porosités ou des inclusions, surtout si elle est mal exécutée.
- **Niveau de qualification** : Les opérateurs de soudage doivent être correctement formés et qualifiés pour garantir la qualité des soudures, ce qui peut nécessiter un investissement supplémentaire en termes de formation.
- **Émissions de fumée et de gaz** : Le processus de soudage à l'électrode enrobée génère des fumées et des gaz, ce qui peut nécessiter une ventilation adéquate pour assurer la sécurité des opérateurs.
- **Consommables** : Les électrodes enrobées sont des consommables qui doivent être régulièrement remplacés, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires à long terme. [12]

I.9. SOUDAGE MIG / MAG :

I.9.1 Définition :

Le soudage MIG (Metal Inert Gas) a été inventé dans les années 1948 par les ingénieurs HM Hobart and PK Devers chez Battelle Memorial Institute à Columbus, Ohio, aux États-Unis. Ils ont développé ce procédé en utilisant l'arc électrique pour fondre un fil-électrode continu tout en le protégeant avec un gaz inerte, tel que l'argon, pour empêcher l'oxydation du bain de fusion, Ce procédé est désigné par le numéro 131.

Le soudage MAG (Metal Active Gas), qui est une variante du soudage MIG, a été développé plus tard dans les années 1950 par des ingénieurs en Grande-Bretagne. Dans le soudage MAG, un gaz actif tel que le dioxyde de carbone (CO₂) est utilisé comme gaz de protection, en plus d'autres gaz actifs ou mixtes, Ce procédé est désigné par le numéro 135.

Ces développements ont marqué le début d'une ère de soudage moderne, offrant des méthodes plus efficaces et polyvalentes pour joindre les métaux. Depuis lors, le soudage MIG/MAG est devenu l'un des procédés de soudage les plus couramment utilisés dans diverses industries à travers le monde, en raison de sa polyvalence, de sa facilité d'utilisation et de sa capacité à produire des soudures de haute qualité sur une variété de métaux. [6]

I.9.2. Principe de fonctionnement :

Le soudage MIG est une technique polyvalente adaptée au soudage des pièces épaisses et minces, Et le fil-électrique utilisé peut-être plein ou fourré, avec un diamètre compris entre 0,6 mm et 1,6 mm. Pour amorcer le processus de soudage, le fil-électrode est mis en contact avec les pièces à souder, créant ainsi un arc électrique entre l'électrode et la pièce. La chaleur de cet arc électrique fait fondre à la fois la surface métallique et le fil-électrode, formant ainsi un bain de fusion. Ce bain de fusion refroidit ensuite pour former un joint de soudure solide. Un gaz de protection est ensuite expulsé par la buse de la torche de soudage afin de protéger le bain de fusion fondu de l'humidité et des contaminants en suspension dans l'air telles que représentées dans la figure I.7. Le choix du gaz de protection dépend du métal à souder et de son domaine d'application. Pendant le processus de soudage, le soudeur déplace progressivement la torche de soudage le long de la ligne de joint de la zone de soudage.

Dans le soudage MIG/MAG semi-automatique, la vitesse d'alimentation du fil et la longueur de l'arc sont contrôlées par la source d'alimentation. Cependant, le positionnement du fil et la vitesse de déplacement sont contrôlés manuellement par le soudeur. En revanche, dans le soudage MIG/MAG automatique, aucune intervention manuelle n'est nécessaire pour réaliser le processus. [13]

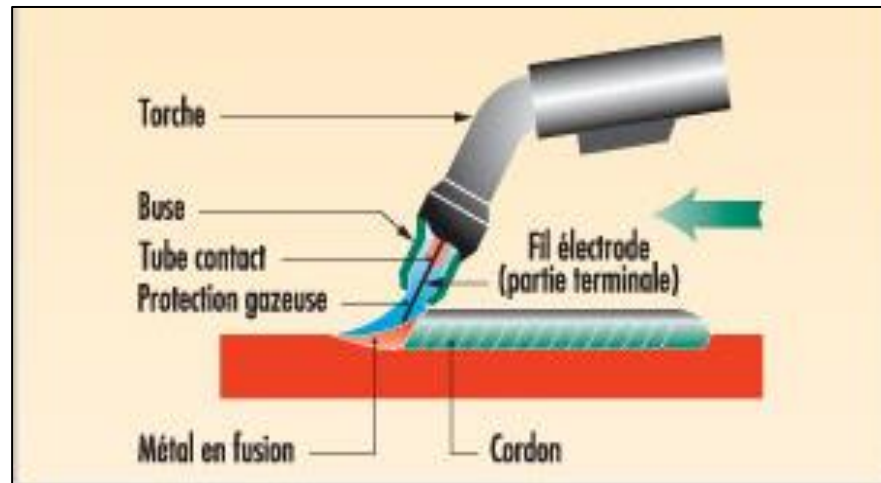


Figure I.7 : Principe de soudage MIG/MAG. [8]

I.9.3. Les composants de soudage MIG/MAG :

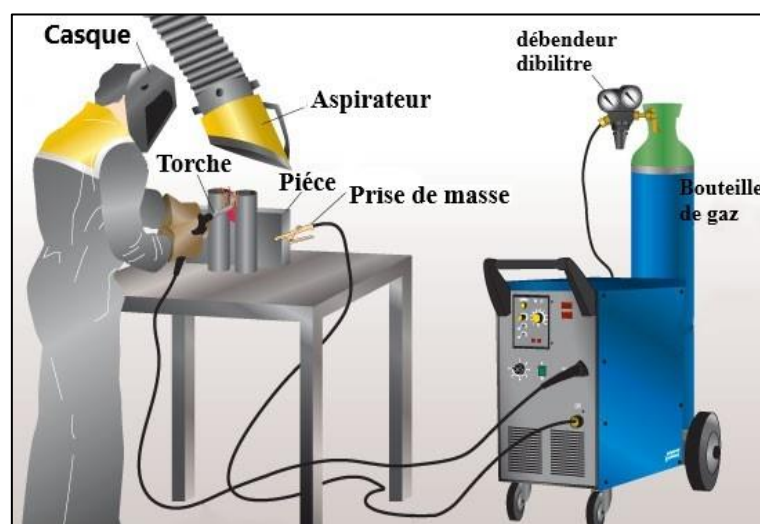


Figure I.8 : Les composants de soudage MIG/MAG. [8]

- **Fil électrode :** Avec ce procédé de soudage l'électrode qui conduit le courant joue également le rôle de métal d'apport. Il existe deux types de fils-électrodes disponibles, chacun adapté à des projets et à des métaux spécifiques :

Fil solide (plein) : Ce type de fil est largement utilisé par la plupart des soudeurs MIG en raison de son prix abordable, de sa facilité de contrôle et de sa polyvalence sous différents angles. Les fils solides typiques contiennent un mélange de 75% d'argon et 25% de dioxyde de carbone comme gaz de protection.

Fil fourré : Ce type de fil incorpore un flux à l'intérieur, éliminant ainsi le besoin d'un gaz de protection externe. Cela rend le soudage MIG plus adapté aux travaux en extérieur et dans des conditions venteuses. Cependant, les fils fourrés génèrent de laitier pendant le soudage qui nécessitent un nettoyage ultérieur.

- **La torche de soudage :** Une torche de soudage, également connue sous le nom de pistolet, est un outil spécialisé utilisé pour fondre et assembler les métaux. Les torches MIG sont polyvalentes et peuvent être utilisées pour une variété de types et d'épaisseurs de métaux. Elles sont divisées en deux catégories principales :

Torches de soudage refroidies par gaz : Ces torches sont susceptibles de surchauffer, leur utilisation est donc souvent limitée à de petits projets.

Torches de soudage refroidies par eau : Elles peuvent être utilisées à des ampérages plus élevés, fournissant ainsi plus de puissance. Elles offrent également un contrôle plus précis de la pointe de contact de la buse. Cependant, elles sont plus coûteuses, avec un prix de 20 à 30 % supérieur à celui des torches refroidies par gaz, et nécessitent l'installation d'un système de refroidissement par eau dans la machine à souder.

Il existe quatre types de buses différents utilisés dans une torche de soudage : encastrée, affleurante, saillante et réglable. Le choix de la buse dépend du type de fil-électrode utilisé dans le processus de soudage.

- **Source d'énergie :** Les équipements modernes de soudage MIG corrigent automatiquement le courant en fonction des variations de longueur de l'arc et de la vitesse d'alimentation du fil, assurant ainsi la stabilité le joint de soudure. Les options disponibles pour les sources d'énergie dans les processus de soudage MIG sont :

Polarité positive DC : Dans ce mode les électrons circulent de la pointe de contact de l'électrode vers la base métallique. Cette configuration est la plus couramment utilisée car elle offre un arc stable, garantissant une meilleure qualité des cordons de soudure, une pénétration améliorée et moins de projections. Elle convient au soudage de matériaux de différentes épaisseurs, qu'ils soient fins ou épais.

Polarité négative DC : Dans ce mode, les électrons se déplacent de la base métallique vers la pointe du fil d'électrode. Bien que cette configuration permette des vitesses de dépôt plus rapides que le DC, elle présente quelques inconvénients tels qu'un manque de pénétration et une chaleur insuffisante dans le bain de fusion. Elle n'est pas idéale pour les matériaux plus épais, mais peut être utilisée pour souder des métaux minces.

- **Gaz de protection :** Lorsque les métaux fondent dans le bain de soudure, un gaz de protection est acheminé à travers la torche de soudage pour maintenir le bain de soudure exempt de contamination, sans altérer les propriétés métalliques. Le choix du gaz de protection en soudage MIG dépend du matériau à souder et de l'application. Les plus couramment utilisés sont l'argon et l'hélium, parfois mélangés à d'autres gaz (semi-inertes), tels que le dioxyde de carbone, pour réduire les coûts.

En ce qui concerne les procédés de soudage, un gaz actif résiste également aux changements chimiques, mais dans une moindre mesure que les gaz inertes. Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz actif souvent utilisé dans le soudage MAG, soit pur, soit mélangé en faibles pourcentages à un gaz inerte. Les principaux avantages du CO₂ sont sa rentabilité par rapport au gaz inerte et sa capacité à pénétrer plus profondément dans le métal. Cependant, son principal

inconvenient réside dans ses caractéristiques d'arc plus rigoureuses, entraînant davantage de projections nécessitant un nettoyage accru autour de la soudure.

L'oxygène est un gaz non inerte utilisé en très faibles proportions pour augmenter la pénétration des soudures dans les métaux plus épais et l'acier inoxydable. Cependant, étant donné que l'oxygène est également responsable de l'oxydation et de la formation de rouille dans les soudures défectueuses, il est utilisé en quantités très limitées (1% à 5%). Dans ces proportions, il contribue également à stabiliser l'arc tout en étant moins coûteux que l'hélium. [14]

I.9.4. Modes de transferts du procédé MIG/MAG :

Le procédé MIG/MAG peut fonctionner avec plusieurs modes de transfert de métal fondus illustrées dans la figure I.9, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications spécifiques.

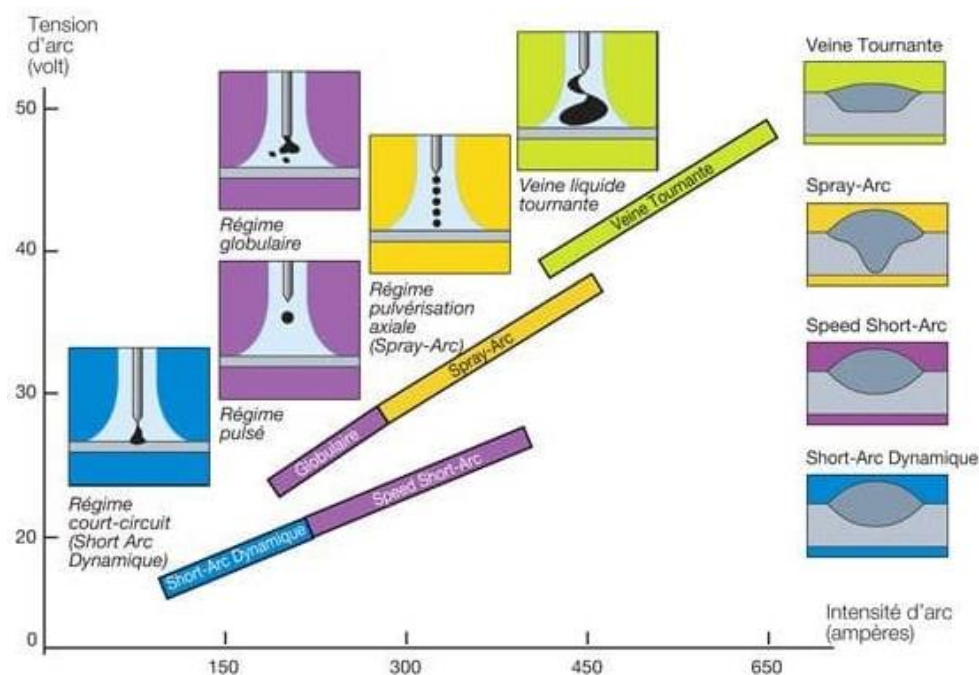


Figure I.9 : Les modes de transferts du métal. [15]

Les principaux modes de transfert utilisés dans le soudage MIG/MAG sont :

Court-circuit (ou court-arc) : C'est le mode de transfert le plus courant pour les soudures de faible épaisseur. Dans ce mode, le fil d'apport entre en contact avec le matériau de base, provoquant un court-circuit électrique. Cela crée une petite goutte de métal fondu qui est transférée à la pièce. Ce mode de transfert produit un arc doux et peu de projections, ce qui en fait un bon choix pour les soudures de qualité.

Globulaire : Ce mode de transfert implique la formation de gouttes de métal fondu de taille plus importante sur l'extrémité du fil d'apport. Ces gouttes sont transférées à la pièce lorsque leur poids les fait tomber. Le mode globulaire peut être utilisé pour les soudures de plus grande épaisseur, mais il peut produire plus de projections et nécessite souvent une plus grande quantité de gaz de protection.

Spray : Dans ce mode de transfert, le métal fondu est pulvérisé en fines gouttelettes par l'arc électrique. Cela crée un transfert de métal continu et stable, ce qui en fait un bon choix pour les soudures de haute qualité et les applications nécessitant une grande vitesse de dépôt. Le mode de transfert en pulvérisation nécessite généralement des paramètres de soudage spécifiques, tels qu'une tension et un débit de gaz de protection élevés.

Pulsé : Le mode de transfert pulsé combine les avantages du court-circuit et du mode de transfert en pulvérisation. Il utilise des impulsions de courant pour contrôler la quantité de métal fondu transférée à la pièce, ce qui permet un contrôle précis de la chaleur et du dépôt de métal. Le mode de transfert pulsé est souvent utilisé pour les soudures sur des matériaux fins ou pour minimiser la déformation de la pièce. [16]

I.9.5. Avantages et inconvénients de procédé :

Les avantages de ce procédé sont :

Productivité élevée : Le soudage MIG/MAG est généralement plus rapide que d'autres méthodes de soudage, ce qui permet une productivité accrue.

Bonne qualité de soudure : Il produit généralement des soudures de haute qualité avec une bonne apparence et des caractéristiques mécaniques satisfaisantes.

Polyvalence : Cette méthode peut être utilisée pour souder une grande variété de métaux et d'épaisseurs, ce qui la rend adaptée à de nombreuses applications différentes.

Moins de retouches nécessaires : Les soudures MIG/MAG ont tendance à nécessiter moins de retouches après le soudage en raison de leur bonne qualité initiale.

Peu de projections : Comparé à d'autres méthodes de soudage comme le SMAW (soudage à l'arc avec électrode enrobée), le MIG/MAG produit moins de projections, ce qui facilite le nettoyage et réduit les risques de défauts de soudure.

Les inconvénients de ce procédé sont :

Coût initial : Les équipements de soudage MIG/MAG peuvent être relativement coûteux à l'achat et à l'installation, surtout pour les applications de haute capacité.

Sensibilité aux conditions environnementales : Les soudures MIG/MAG peuvent être sensibles aux contaminants atmosphériques tels que l'humidité et les gaz, ce qui peut entraîner des défauts de soudure si les conditions ne sont pas contrôlées.

Compétences requises : Bien que le MIG/MAG soit relativement facile à apprendre par rapport à certaines autres méthodes de soudage, il nécessite encore une formation et une pratique pour être utilisé efficacement et produire des soudures de qualité.

Consommables : Le soudage MIG/MAG nécessite l'utilisation de gaz de protection et de fils d'apport, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour l'achat de ces consommables.

Limites d'épaisseur : Bien que le MIG/MAG puisse être utilisé pour souder une large gamme d'épaisseurs de matériaux, il peut ne pas être aussi efficace que d'autres méthodes pour les matériaux très épais ou très minces. [17,18]

I.10. PROCEDE DE SOUDAGE TIG :

I.10.1. Définition :

Le procédé de soudage numéro 141 c'est le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), également connu sous le nom de GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) a été inventé par Hobart aux États-Unis en 1924. Il a été ensuite introduit en France par la Société des Ateliers et Forges de la Loire (SAF) en 1948. Ce procédé a connu une expansion significative dans les années 70.

Le procédé TIG est un type de soudage à l'arc avec un électrode réfractaire, où un gaz inerte est utilisé pour protéger le cordon de soudure. Le gaz utilisé est nécessairement inerte, généralement de l'argon pur ou un mélange d'argon et d'hélium ou d'hydrogène. Un faible taux d'oxygène est essentiel pour éviter l'usure prématurée de l'électrode.

Le soudage TIG peut être utilisé dans divers modes, notamment manuel, automatique et robotique. Il est couramment utilisé pour souder des épaisseurs faibles à moyennes. Les opérations de soudage sur des épaisseurs plus épaisses sont moins fréquentes en raison du temps nécessaire à leur exécution par rapport à d'autres procédés tels que le soudage MIG/MAG. Cependant, le principal avantage du TIG réside dans la qualité supérieure des cordons obtenus.

Le soudage TIG est souvent privilégié dans des domaines exigeants tels que les équipements sous pression, l'industrie alimentaire, l'aéronautique ou nucléaire, où les qualifications des soudeurs doivent être certifiées. En effet, le TIG permet un réglage précis des paramètres pour une meilleure maîtrise du procédé, répondant ainsi aux exigences strictes de ces industries. [19,20]

I.10.2. Principe de ce procédé :

Le procédé de soudage TIG est réalisé grâce à la chaleur générée par un arc électrique non fusible, qui fait fondre la pièce à souder avec le métal d'apport ou sans métal d'apport dans le cas de la pièce est mince, et c'est ainsi que se forme le cordon de soudure.

Un gaz inerte tel que l'argon, l'hélium ou un mélange d'argon et d'hélium protège l'électrode et le bain de fusion de l'oxydation pendant le soudage TIG (Figure I.10). Ce gaz de protection est distribué par la buse installée sur la torche.

Pour le soudage des pièces de faible épaisseur (quelques millimètres), l'utilisation d'un métal d'apport n'est généralement pas nécessaire. Cependant, lorsqu'il est nécessaire de souder des pièces chanfreinées, soit une baguette, soit du fil d'apport est souvent utilisé pour réaliser les soudures. [21]

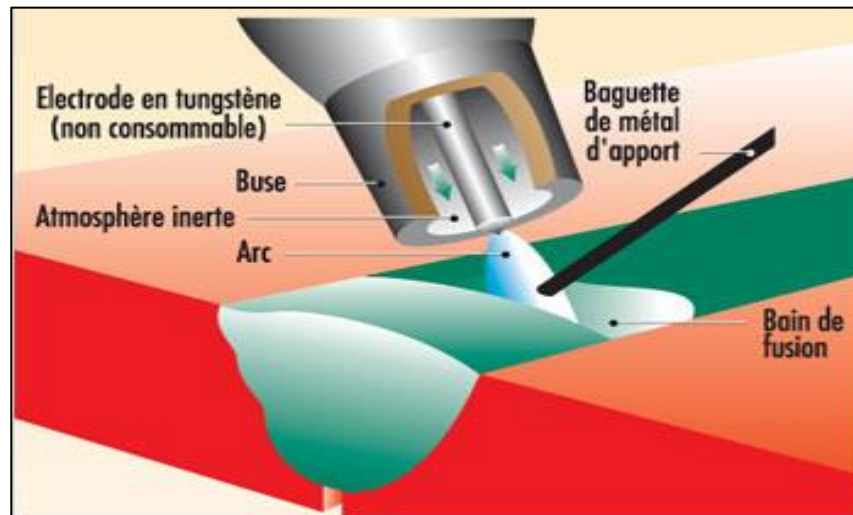


Figure I.10: Principe de soudage TIG. [8]

I.10.3. Avantages et inconvénients de procédé :

Le soudage TIG présente plusieurs avantages et inconvénients, qui varient en fonction des besoins spécifiques de l'application. des principaux avantages du soudage TIG sont:

Qualité des soudures : Le soudage TIG produit des soudures de haute qualité avec une apparence propre et des caractéristiques mécaniques satisfaisantes. Il est particulièrement adapté aux applications où la qualité de la soudure est critique.

Polyvalence des matériaux : Le soudage TIG peut être utilisé pour souder une grande variété de métaux, y compris l'acier, l'aluminium, le cuivre, le titane, l'acier inoxydable et leurs alliages, ce qui en fait un choix polyvalent pour de nombreuses applications.

Contrôle précis : Le soudage TIG offre un contrôle précis sur le processus de soudage, permettant au soudeur d'ajuster séparément la puissance de l'arc, la vitesse d'avance du fil d'apport et le débit de gaz de protection pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

Peu de projections : Comparé à d'autres méthodes de soudage, le soudage TIG produit généralement moins de projections, ce qui réduit le besoin de retouches après le soudage et facilite le nettoyage des soudures.

Pas de consommation d'électrode : L'électrode en tungstène utilisée dans le soudage TIG est non consommable, ce qui signifie qu'elle ne se consomme pas pendant le processus de soudage. Cela réduit les coûts de consommables et permet une plus longue durée de vie de l'électrode.

Les inconvénients de ce procédé sont :

Vitesse de soudage très lente : Le soudage TIG est généralement plus lent que d'autres méthodes de soudage telles que le soudage MIG/MAG, ce qui peut entraîner des temps de production plus longs et des coûts plus élevés.

Compétences requises : Le soudage TIG nécessite des compétences de soudage plus avancées que certaines autres méthodes en raison de son contrôle précis et de la nécessité de maintenir un arc stable. Une formation et une pratique adéquates sont nécessaires pour maîtriser cette technique.

Sensibilité aux conditions environnementales : Le soudage TIG est sensible aux contaminants atmosphériques tels que l'humidité et les gaz, ce qui peut entraîner des défauts de soudure si les conditions ne sont pas contrôlées.

Coût initial élevé : Les équipements de soudage TIG peuvent être relativement coûteux à l'achat et à l'installation, surtout pour les applications de haute capacité. [22,23]

I.11. TYPES DE JOINT :

Il existe plusieurs types de joints de soudage, chacun étant utilisé en fonction des exigences spécifiques de l'application et de la configuration des pièces à souder. Les principaux types de joints de soudage sont :

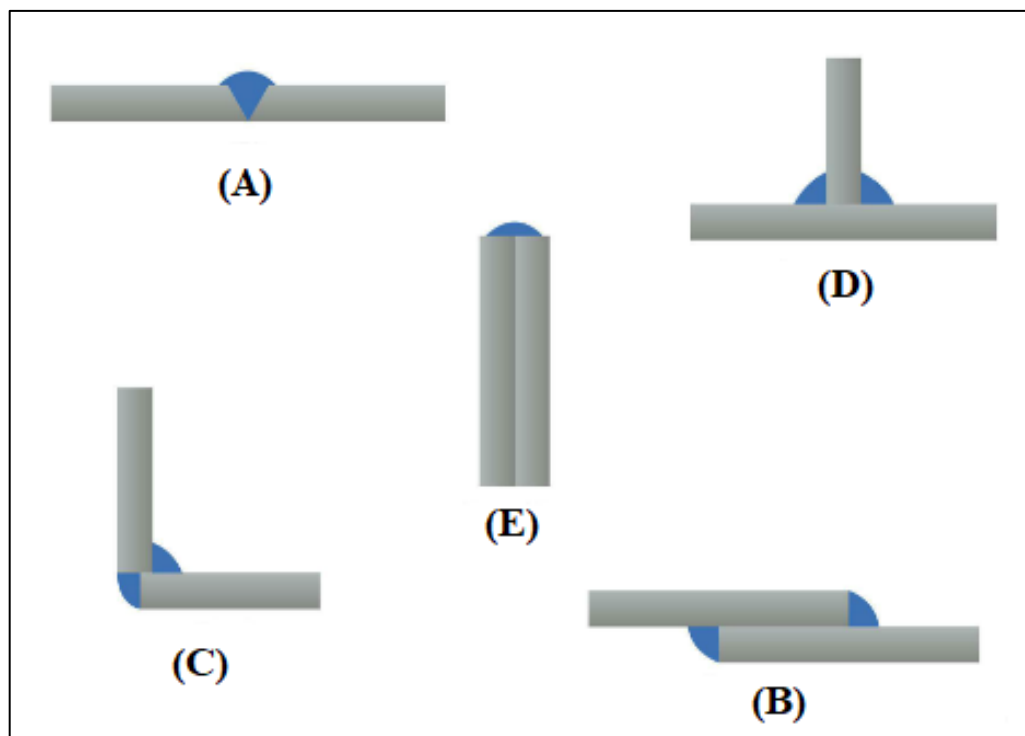


Figure I.11 : Les types de joint. [24]

- Joint bout à bout (A) : Dans ce type de joint, les bords des pièces à souder sont alignés l'un contre l'autre pour former une liaison continue. Ce type de joint est couramment utilisé pour souder des pièces en tôle ou en profilés.
- Joint à recouvrement (B) : Dans un joint à recouvrement, une pièce est placée par-dessus l'autre, créant un chevauchement entre les deux pièces. Ce type de joint est souvent utilisé lorsque des renforts de soudure sont nécessaires ou lorsque la résistance à la traction est importante.

- Joint à angle (C) : Les joints à angle sont formés lorsque deux pièces sont assemblées pour former un angle, comme un joint en L ou un joint en onglet. Ces joints sont couramment utilisés dans la construction de structures métalliques, de cadres de fenêtres et dans d'autres applications similaires.

- Joint en T (D) : Dans un joint en T, une pièce est placée perpendiculairement à une autre, formant un "T". Ce type de joint est couramment utilisé dans la fabrication de cadres et de supports.

- Joint de bord (E) : Les soudures de bord sont employées pour unir les bords de deux ou plusieurs pièces métalliques. La soudure est déposée le long du bord de chaque pièce, ce qui est particulièrement utile pour assembler des pièces de tôle, notamment dans la fabrication de réservoirs ou de panneaux.

Ces types de joints sont adaptés à diverses applications et configurations de pièces. Le choix du joint approprié dépend des exigences spécifiques de chaque projet. [25]

I.12. TYPES DE CHANFREIN :

Le chanfrein est une forme donnée aux bords des pièces à souder pour faciliter la création d'une soudure solide et de haute qualité. Les principaux types de chanfreins utilisés dans le soudage sont :

A - Chanfrein plat : Dans ce type de chanfrein, le bord des pièces est coupé verticalement. Il est souvent utilisé pour souder des pièces de faible épaisseur.

B - Chanfrein en V : Ce type de chanfrein est formé en coupant un "V" dans le bord des pièces à souder. Il est couramment utilisé dans le soudage de pièces en tôle et offre une bonne pénétration de la soudure.

C - Chanfrein en U : Similaire au chanfrein en V, mais avec des côtés incurvés formant un "U". Il est souvent utilisé dans les applications nécessitant une pénétration plus profonde de la soudure.

D - Chanfrein en X : Ce type de chanfrein est formé en coupant les bords en diagonale des deux côtés, créant une forme en "X". Il est souvent utilisé dans les soudures d'angle.

E - Chanfrein en Y : Dans ce type de chanfrein, un angle est coupé dans le bord des pièces, formant une forme en "Y". Il est utilisé pour les soudures d'angle, offrant une meilleure pénétration de la soudure.

F - Chanfrein en J : Similaire au chanfrein plat, mais avec une encoche en forme de "J" sur l'un des bords. Cela crée un espace pour le dépôt du métal d'apport, améliorant la pénétration de la soudure.

Chaque type de chanfrein est adapté à des applications spécifiques et peut influencer la qualité et la robustesse de la soudure. Le choix du chanfrein approprié dépend des exigences de conception, des matériaux à souder, et des spécifications du procédé de soudage.

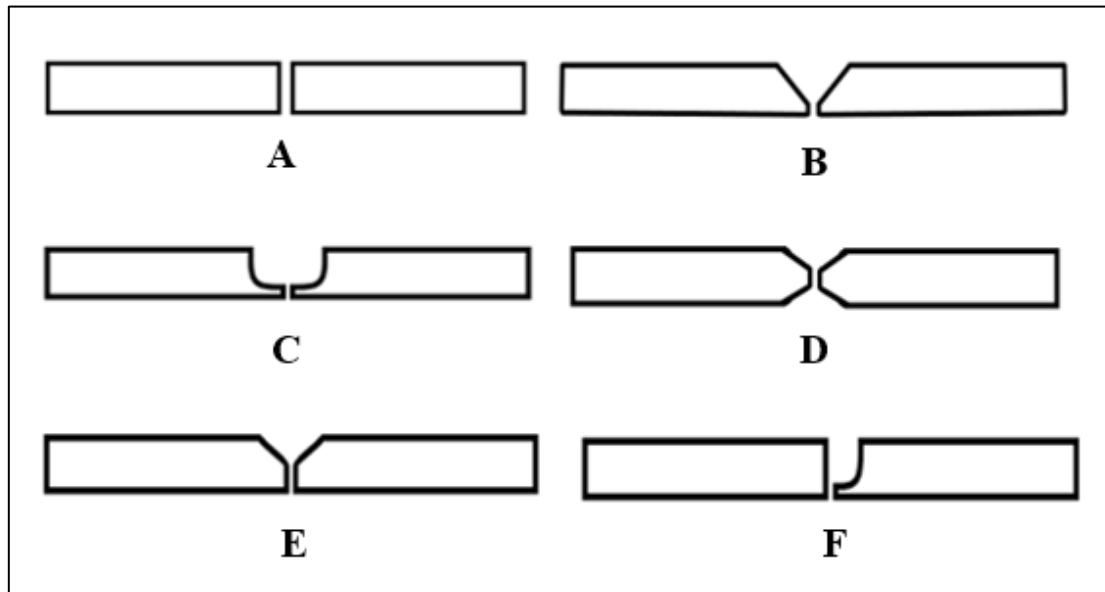


Figure I.12 : Les types de chanfrein.

I.13. DEFAUTS DE SOUDAGE :

Un défaut de soudage est une imperfection ou une anomalie qui compromet la qualité, la solidité ou l'intégrité d'une soudure. Ces défauts peuvent survenir à différentes étapes du processus de soudage, depuis la préparation des matériaux jusqu'à la solidification de la soudure. Parfois, le défaut peut être acceptable, mais dans certains cas, il peut s'avérer dangereux, selon le type et la taille du défaut.

I.13.1. Fissurations :

Les fissurations représentent l'un des défauts de soudure les plus courants. Elles résultent de tensions internes excessives dans le métal soudé, de l'utilisation d'un métal d'apport inadéquat, d'un cordon trop étroit, ou encore des tensions internes dues à la contraction. Pour éviter ces fissures, il est crucial de choisir judicieusement le métal d'apport, de préchauffer correctement, de bien préparer les joints, et de former un cordon de soudure respectant les dimensions requises.

Les fissures peuvent apparaître à deux endroits différents : soit dans le métal fondu (en fonction du métal d'apport et des conditions de soudage), soit dans le métal de base, souvent en raison de sa soudabilité inférieure. Il existe plusieurs types de fissures, illustrés sur la figure I.13. En outre, les fissures peuvent se produire à chaud ou à froid, selon le moment où elles surviennent après la soudure. Le tableau I.1 répertorie les principales causes des fissurations à chaud et à froid, ainsi que les mesures préventives à adopter. [30]

Tableau I.4 : Causes et moyens de prévention liés à la fissuration [30].

Causes		Moyens de prévention
Fissuration à chaud	– Joints trop étroits – Présence d'impuretés dans la soudure comme soufre et phosphore. – Métal d'apport et le métal de base est incompatible. – Cordon trop petit – Trop de retrait durant ou après le soudage	– Mesurer correctement l'angle du chanfrein – Préchauffage et chauffage pendant le soudage – Bon choix pour le métal d'apport – Refroidissement lent – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) – Réduction de vitesse au besoin
Fissuration à froid	– Hydrogène coincé dans la soudure – Tensions internes résiduelles importantes	– Préchauffage et chauffage pendant le soudage – Refroidissement lent – Utilisation d'électrodes basiques – Stockage des électrodes dans un four chaud – Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) – Dessoudage (si nécessaire).

a) Fissuration à chaud : La fissuration à chaud survient lors de la solidification du bain de fusion, notamment en présence d'impuretés telles que le soufre ou le phosphore dans le métal de base. Pour réduire ce risque lors du soudage de métaux, l'utilisation d'électrodes à flux basique est recommandée. Il est également essentiel que le métal d'apport soit compatible avec le métal de base et que le cordon de soudure soit suffisamment large.

Dans certains cas, relever trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure peut créer un cratère, formant ainsi une cavité interne susceptible de provoquer une fissure. Pour prévenir ces fissures, il est conseillé de réaliser un léger recul avec l'électrode à la fin de la soudure, de préchauffer le métal, de réduire l'écart entre les pièces, ou encore d'ajouter davantage de métal pour remplir le cratère. [30]

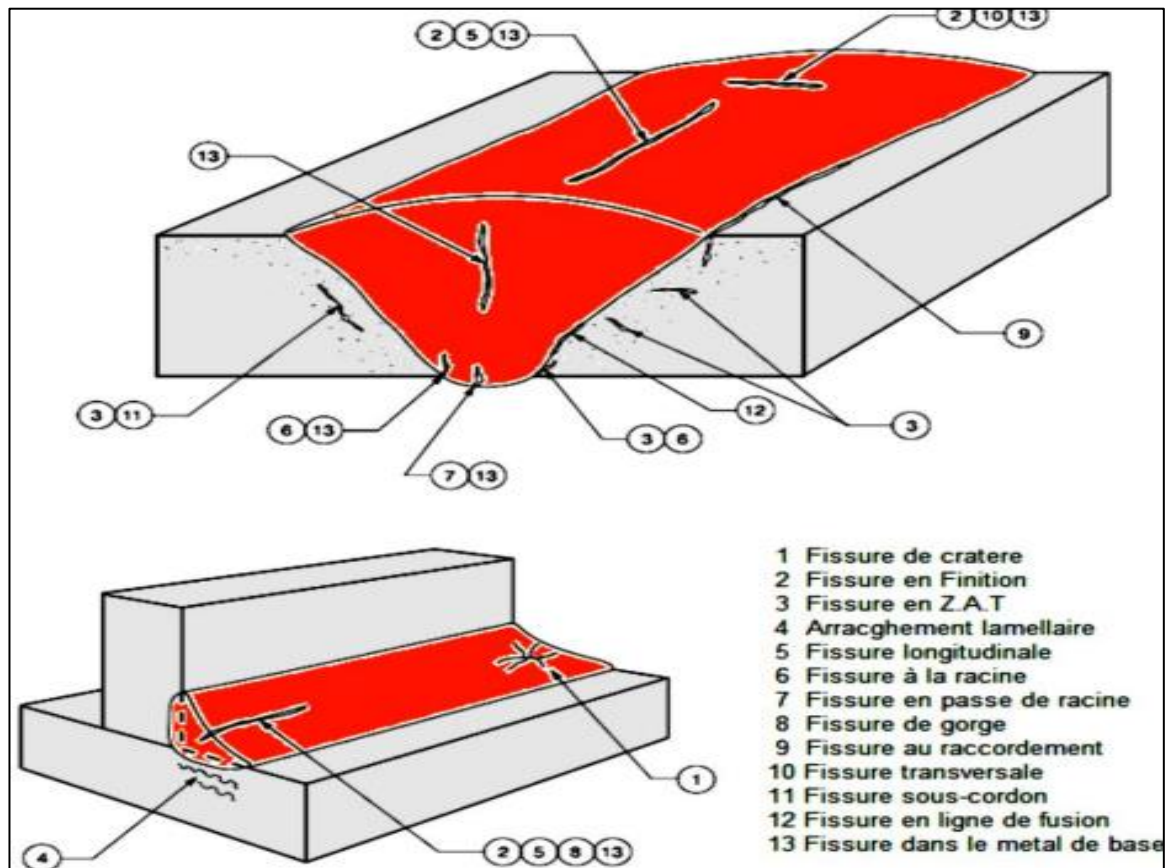


Figure I.13 : Les types de fissuration. [31]

b) Fissuration à froid : Des fissures à froid peuvent survenir des heures, voire des jours après le soudage. Elles se produisent dans la zone de soudage ou dans la zone affectée thermiquement et sont provoquées par l'hydrogène emprisonné dans la soudure ou par une contrainte interne résiduelle importante. Les aciers à haute teneur en carbone et faiblement alliés sont plus sensibles à la fissuration à froid. Plusieurs facteurs peuvent affecter la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, notamment :

Trempabilité liée à l'équivalent carbone.

Présence d'hydrogène due à l'humidité sur la pièce ou sur l'enrobage, ou à certains composés comme la rouille et la calamine.

Humidité de l'air.

Refroidissement rapide de la pièce.

Défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, épaisseur de soudure excessive, caniveau, etc.). [30]

I.13.2. Soufflures :

Une soufflure est un défaut de soudure caractérisé par la présence de cavités ou de bulles de gaz piégées à l'intérieur de la soudure ou entre la soudure et le matériau de base. Les soufflures peuvent être causées par plusieurs facteurs, notamment :

- Présence d'humidité : Lorsque les matériaux à souder contiennent de l'humidité, celle-ci se vaporise pendant le soudage, créant des bulles de gaz dans la soudure.
- Contaminants sur les surfaces de soudure : Des substances comme l'huile, la graisse, la peinture ou la rouille peuvent générer des gaz lorsqu'elles sont chauffées pendant le soudage, entraînant la formation de soufflures.
- Protection gazeuse inadéquate : Une mauvaise distribution ou un débit insuffisant de gaz de protection permet à l'oxygène de contaminer la soudure, causant des soufflures.
- Conditions de soudage inappropriées : Des paramètres de soudage mal réglés (tension ou courant excessif, vitesse de soudage trop élevée, polarité incorrecte) peuvent favoriser l'apparition de soufflures.

Pour éviter ce défaut, il est important de respecter les bonnes pratiques suivantes :

- Nettoyage et préparation des surfaces de soudure : Les surfaces à souder doivent être propres et exemptes de contaminants comme la graisse, l'huile, la peinture ou la rouille. Il est recommandé d'utiliser des méthodes telles que le brossage, le dégraissage ou le meulage pour éliminer les impuretés.
- Contrôle de l'humidité : Les matériaux d'apport et les pièces à souder doivent être stockés dans des conditions appropriées pour éviter l'humidité excessive. Si nécessaire, chauffer les pièces avant le soudage pour éliminer toute humidité résiduelle.
- Choix du procédé de soudage : Certains procédés de soudage sont plus susceptibles de provoquer des soufflures. Il est donc essentiel de choisir le procédé adapté à l'application et au matériau pour minimiser ce risque.
- Contrôle des paramètres de soudage : S'assurer que les paramètres (courant, tension, vitesse d'avance, débit de gaz de protection) sont correctement ajustés selon le matériau et le procédé utilisés. Des réglages inadéquats peuvent contribuer à la formation de soufflures.
- Utilisation de matériaux d'apport de qualité : Il est crucial d'utiliser des électrodes, fils et flux de soudage de qualité supérieure, adaptés au matériau et au procédé, afin de réduire les risques de soufflures.
- Utilisation d'un gaz de protection approprié : Lors des procédés MIG/MAG ou TIG, il est nécessaire d'utiliser un gaz de protection adapté pour éviter l'oxydation du métal fondu et diminuer le risque de formation de soufflures.

Les soufflures affaiblissent la soudure en créant des discontinuités internes qui peuvent réduire sa résistance mécanique et sa capacité à supporter la fatigue. Elles peuvent également accélérer la corrosion en permettant l'infiltration d'agents corrosifs. Il est donc impératif de les éviter autant que possible. En cas de soufflures, elles doivent être corrigées rapidement afin d'assurer la qualité et l'intégrité des soudures. Il existe quatre types principaux de soufflures illustrés à la figure I.14.

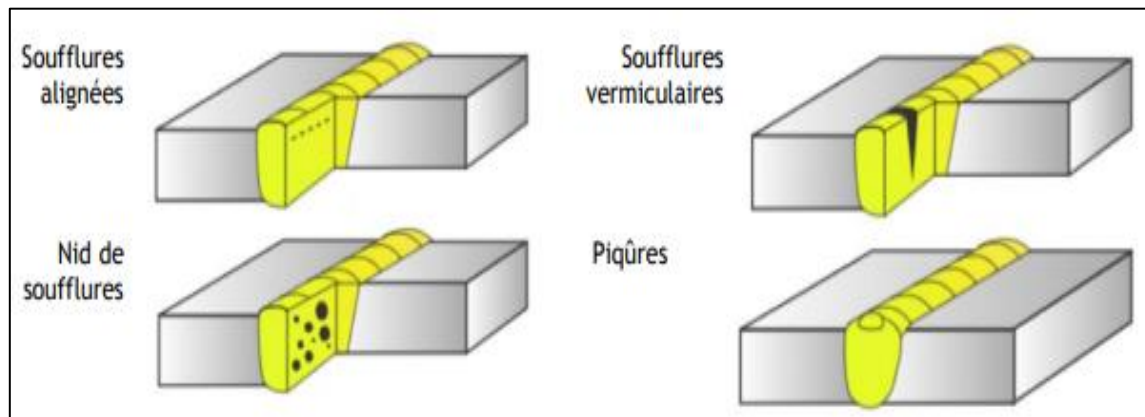


Figure I.14 : Les types de soufflure. [32]

I.13.3. Inclusions :

Les inclusions sont des défauts qui se produisent lorsque des particules étrangères, telles que des impuretés, des scories ou du métal non fondu, se retrouvent piégées dans la zone de soudure. Ces inclusions peuvent affaiblir l'assemblage soudé et compromettre la qualité et la solidité de la soudure. Voici les principaux types d'inclusions :

- **Scories** : Les scories sont des substances non métalliques qui se forment à la surface du métal fondu pendant le processus de soudage. Si elles ne sont pas correctement éliminées après chaque passe de soudure, elles risquent de se retrouver piégées dans la soudure, créant ainsi des inclusions qui affectent l'intégrité de l'assemblage.

- **Particules non fondues** : Il peut arriver que des particules de métal d'apport ou de matériau de base ne fondent pas complètement pendant le soudage. Si ces particules restent piégées dans la zone de soudure, elles créent des inclusions solides, compromettant la qualité et la résistance de la soudure.

- **Gaz piégés** : Durant le soudage, des gaz peuvent être emprisonnés dans le métal fondu. Si ces gaz ne sont pas correctement évacués, ils forment des bulles ou des porosités à l'intérieur de la soudure, affaiblissant ainsi l'assemblage. Ce type de défaut est souvent associé à une protection gazeuse insuffisante ou à des paramètres de soudage inappropriés. [33]

Ces inclusions doivent être évitées, car elles diminuent la résistance mécanique de la soudure et augmentent les risques de défaillance sous contrainte. Le contrôle strict des procédures de soudage, le nettoyage approprié des surfaces et l'utilisation de matériaux de haute qualité sont essentiels pour minimiser les risques d'inclusions.

Tableau I.5 : Les causes d'inclusion et moyens de prévention. [33]

Les causes d'inclusion	Moyens de prévention
- Des projections excessives. - Technique de soudage mauvaise. - Mauvais choix de type d'électrode. - La vitesse de soudage est incorrecte. - Nettoyage inadéquat du métal de base. - Vent ou à un mouvement d'air excessif peut provoquer le soufflage de scories dans la soudure.	- Nettoyage méticuleux. - Le bon choix de l'électrode. - Utilisation des techniques et les paramètres de soudage appropriés. - Effectuer une inspection visuelle et, si nécessaire, des tests non destructifs pour détecter et éliminer les inclusions avant qu'elles n'affectent la qualité de la soudure.

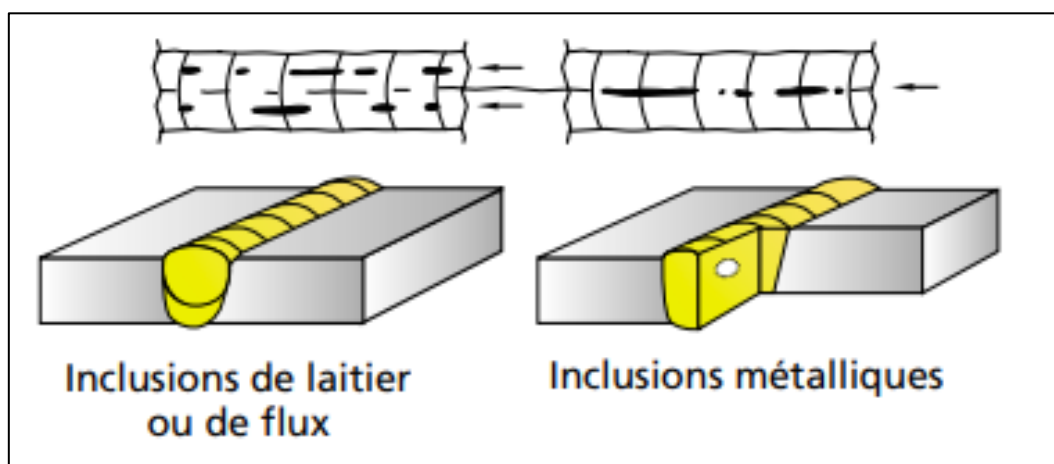


Figure I.15 : Les types d'inclusions. [32]

I.13.4. Manque de fusion :

Le manque de fusion est un défaut courant en soudage, se caractérisant par une absence de fusion complète entre le matériau de base et le matériau d'apport (comme illustré à la figure I.16), ou encore entre les passes de soudure successives. Ce défaut crée une faiblesse dans la jonction soudée, compromettant ainsi la résistance et l'intégrité structurale de la pièce soudée. Plusieurs facteurs peuvent provoquer un manque de fusion, notamment :

Paramètres de soudage inappropriés : Un choix inadéquat des paramètres de soudage, tels que le courant, la tension, la vitesse de soudage, ou encore un matériau d'apport inadapté, peut entraîner une fusion insuffisante entre les composants.

Préparation inadéquate des surfaces : Des surfaces mal préparées, rouillées ou mal nettoyées peuvent empêcher une bonne fusion entre les pièces à souder. Un nettoyage approprié est crucial pour garantir une soudure de qualité.

Technique de soudage incorrecte : Une mauvaise technique, comme un angle d'électrode ou une longueur d'arc incorrecte, peut nuire à la fusion des matériaux, causant ainsi des zones non fusionnées.

Mauvaise manipulation de l'arc : Une manipulation incorrecte de l'arc peut limiter la pénétration du matériau d'apport dans le métal de base, ce qui résulte en un manque de fusion.

Épaisseur excessive de la couche de passivation : Si une couche de passivation est trop épaisse, elle peut empêcher la fusion adéquate entre les couches successives de soudure, compromettant la cohésion entre les passes.

Pour prévenir le manque de fusion, il est essentiel de sélectionner les bons paramètres de soudage, de préparer soigneusement les surfaces à souder, d'utiliser une technique de soudage appropriée et de vérifier régulièrement la qualité de la soudure pendant le processus de soudage. En prenant ces mesures préventives, vous pouvez réduire le risque de formation de défauts de manque de fusion et produire des soudures de haute qualité. [33]

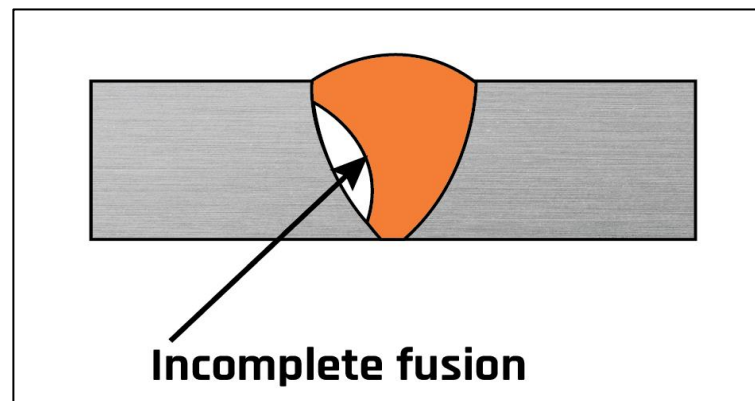


Figure I.16 : Manque de fusion. [34]

I.13.5. Manque de pénétration :

Le manque de pénétration est un défaut dans le soudage où la fusion ne pénètre pas suffisamment dans les pièces à souder, ce qui peut conduire à une soudure insuffisamment solide. Ce défaut est souvent observé dans les soudures réalisées sur des pièces épaisses ou lorsqu'un paramètre de soudage inadéquat est utilisé. [33]

Tableau II.6 : Les causes de manque pénétration et Moyens de prévention. [33]

Les causes de manque pénétration	Moyens de prévention
- Paramètres de soudage incorrects. - Mauvais ajustement. - Conception de joint incorrecte. - Apport de chaleur insuffisant. - Nettoyage inadéquat du métal.	- Un bon nettoyage de la pièce. - Le bon choix du procédé de soudage. - Le bon choix du métal d'apport. - Utilisation des techniques et les paramètres de soudage appropriés. - Contrôler l'apport de chaleur est essentiel pour éviter la surchauffe ou la sous-chauffe du joint lors du soudage.

I.13.6. Caniveaux :

Le caniveau est un défaut caractérisé par une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon de soudage. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à la densité ou à l'épaisseur du métal de base. Le caniveau peut être causé par plusieurs facteurs comme :

- Tension d'arc élevée.
- Le mauvais choix de l'électrode enrobée.
- Mauvaise sélection du gaz de protection.

Pour éviter les caniveaux dans le soudage, il est important de suivre les bonnes pratiques de soudage, telles que le choix des paramètres appropriés, une préparation soignée de la surface à souder, une manipulation précise de l'arc et une inspection régulière de la qualité de la soudure pendant le processus de soudage. En détectant et en corrigeant les problèmes potentiels dès qu'ils se présentent, on peut minimiser le risque de formation de caniveaux et produire des soudures de haute qualité. [30,35]

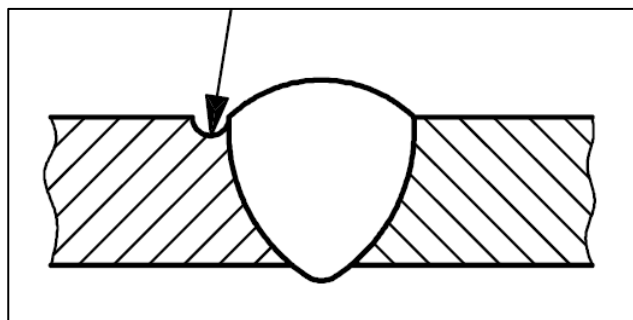


Figure I.17 : Le caniveaux. [36]

I.13.7. Distorsion :

La distorsion dans le soudage fait référence à la déformation ou à la déviation de l'axe des pièces à souder suite à l'application de la chaleur pendant le processus de soudage (Figure I.18). Cette déformation peut se produire en raison de plusieurs facteurs, notamment :

- Différences de température pendant le soudage.
- Vitesse de déplacement lente de l'arc.
- Soudage multi-passes avec électrodes de petit diamètre.
- Contraintes résiduelles élevées dans la plaque métallique à souder. [35]

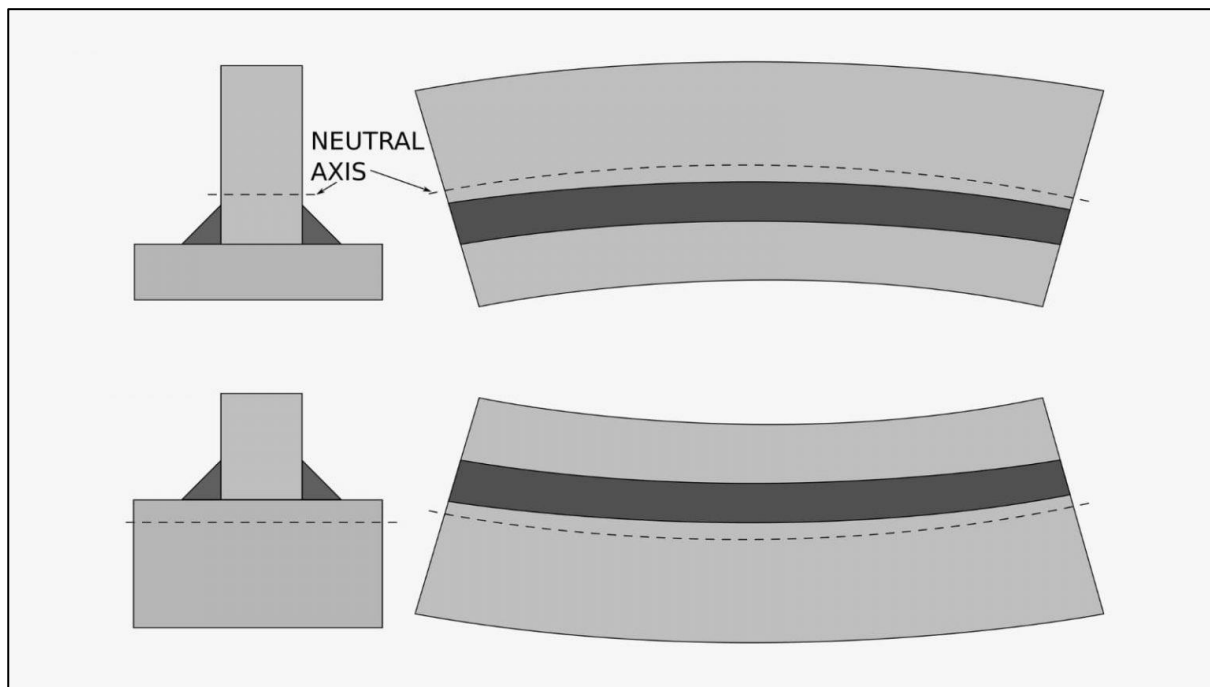


Figure I.18 : La distorsion. [35]

Chapitre II :

Présentation du logiciel ANSYS

II.1. INTRODUCTION :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique utilisé dans plusieurs domaines de l'ingénierie pour résoudre des problèmes complexes de mécanique des structures, de transfert de chaleur, de dynamique des fluides, d'électromagnétisme, et bien plus. Créé par ANSYS Inc., ce logiciel est mondialement reconnu pour sa capacité à effectuer des simulations d'ingénierie par la méthode des éléments finis (MEF).

Il permet de modéliser des systèmes physiques complexes pour prédire leurs comportements sous différentes conditions réelles. L'avantage principal de ce type de simulation est la réduction des coûts et du temps nécessaires pour effectuer des tests physiques en laboratoire.

II.2. FONCTIONS PRINCIPALES D'ANSYS :

Analyse des structures : ANSYS permet d'effectuer des analyses statiques et dynamiques pour évaluer la résistance des structures sous des charges diverses.

Thermique : Simulation de la distribution de température et analyse de la conduction thermique, convection et rayonnement.

Mécanique des fluides (CFD) : ANSYS Fluent et ANSYS CFX permettent des simulations précises des flux de fluides (aérodynamique, hydrodynamique).

Électromagnétisme : Simulations des champs électriques et magnétiques dans des systèmes électriques.

Optimisation : Outils intégrés pour l'optimisation de la conception des produits, permettant d'améliorer les performances en fonction de divers critères.

II.3. DOMAINES D'UTILISATION :

- **Aéronautique et spatial** : Simulation des comportements mécaniques et thermiques des matériaux utilisés dans les avions et les engins spatiaux.

- **Automobile** : Tests de résistance des châssis, analyse de la sécurité des passagers, optimisation aérodynamique.

- **Énergies** : Simulation des turbines, optimisation des échanges thermiques dans les centrales électriques.

- **Électronique** : Analyse de la dissipation thermique dans les circuits et systèmes électroniques.

- **Construction et génie civil** : Tests de résistance des bâtiments, ponts et autres infrastructures.

II.4. ANSYS MECHANICAL :

ANSYS Mechanical est l'un des modules phares du logiciel ANSYS, conçu principalement pour l'analyse des structures mécaniques. Ce module utilise la méthode des éléments finis pour

étudier comment les pièces mécaniques se comportent sous des conditions de contrainte, de température, de vibrations, et bien plus.

II.5. INTERFACE UTILISATEUR :

L'interface d'ANSYS Mechanical est assez intuitive, avec une barre d'outils et une arborescence de projets qui permet de gérer les différentes étapes de la simulation : géométrie, matériaux, maillage, conditions aux limites, et solution.

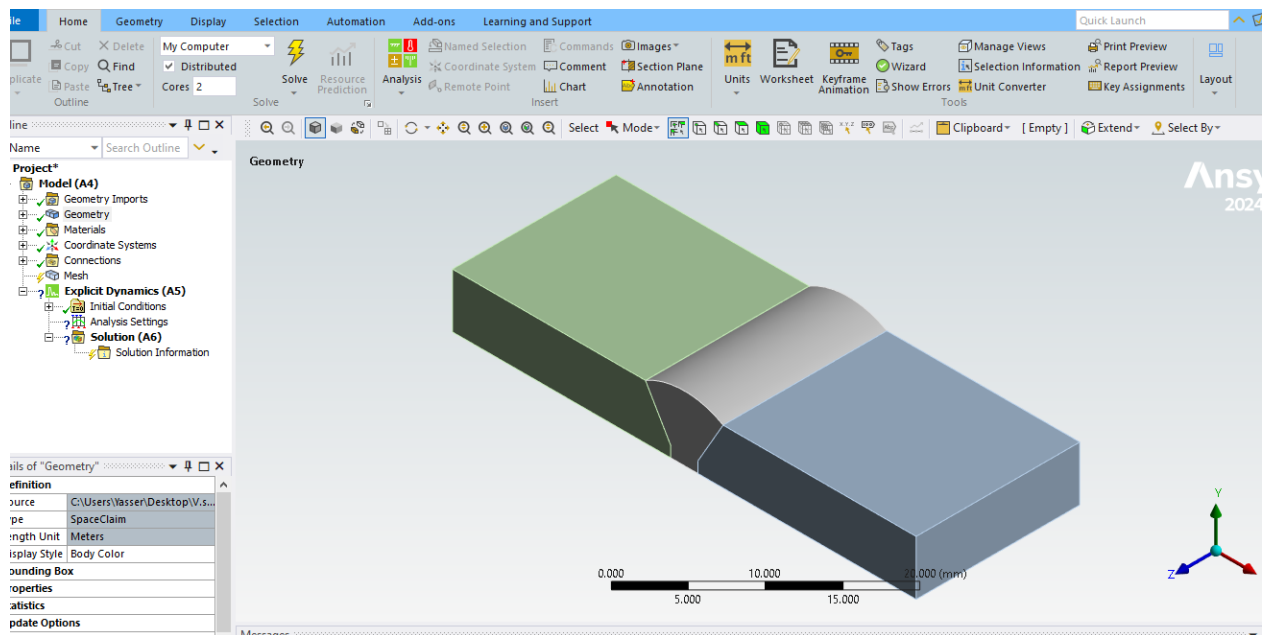


Figure II.1 : L'interface de logiciel ANSYS.

Les étapes principales pour utiliser ANSYS Mechanical sont :

II.5.1. Création de la géométrie dans ANSYS Mechanical :

La première étape cruciale dans toute simulation avec ANSYS Mechanical est la création ou l'importation de la géométrie. La géométrie représente la structure ou le modèle physique que vous souhaitez analyser. ANSYS propose plusieurs méthodes pour travailler avec la géométrie, en fonction des besoins de l'utilisateur. On peut soit créer une géométrie directement dans ANSYS, soit importer un modèle conçu à partir d'un autre logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), comme SolidWorks, CATIA et AutoCAD.

A) Importation de la géométrie :

Beaucoup d'ingénieurs préfèrent concevoir leurs modèles dans des logiciels de CAO externes en raison de leurs interfaces graphiques riches en fonctionnalités. ANSYS permet d'importer ces modèles sous différents formats :

- Formats natifs comme ceux de SolidWorks, Pro/Engineer, ou CATIA.
- Formats standards tels que STEP, IGES, Parasolid ou encore les fichiers STL.

Une fois le modèle importé dans ANSYS Mechanical, il est essentiel de vérifier la qualité de la géométrie avant d'aller plus loin, car des erreurs dans la géométrie (comme des trous ou des entités mal définies) peuvent entraîner des problèmes lors du maillage et des calculs.

B) Création de la Géométrie dans ANSYS :

Si nous ne disposons pas de modèle CAO externe ou si la géométrie est simple que notre cas, il est possible de créer la géométrie directement dans ANSYS via son module intégré DesignModeler ou SpaceClaim.

- Utilisation de DesignModeler :

DesignModeler est l'outil traditionnel d'ANSYS pour la création et la modification de géométries 2D et 3D. Il dispose d'une gamme complète d'outils permettant de construire des géométries mécaniques complexes. Et les étapes principales dans DesignModeler sont :

- **Esquisse (Sketch) :**

La première étape consiste à créer une esquisse 2D. Cela peut se faire sur un plan de référence (XY, XZ, YZ) ou un plan personnalisé. Nous pouvons dessiner des formes basiques comme des lignes, cercles, rectangles, arcs, etc.

- Utilisez l'onglet Sketching pour créer des contours 2D.
- Nous pouvons aussi définir des contraintes géométriques pour assurer la précision de vos dessins (ex. alignement, perpendicularité, etc.).

- **Extrusion / Révolution :**

Une fois l'esquisse créée, il est possible de la convertir en un objet 3D via l'extrusion (pour donner de la profondeur à une esquisse) ou la révolution (pour créer des formes en rotation autour d'un axe). Par exemple, une extrusion peut transformer un rectangle en un bloc solide, tandis qu'une révolution peut transformer un demi-cercle en un cylindre.

- **Opérations de modélisation 3D :**

DesignModeler permet aussi des opérations comme :

Enlèvement de matière : découper ou évider certaines parties de la géométrie.

Fusion : assembler plusieurs objets 3D pour en faire un seul.

Array : créer des motifs répétitifs à partir de la même géométrie.

Symétrie : refléter une géométrie par rapport à un plan.

- **Booléens et modifications géométriques :**

Une fois les solides ou surfaces créés, ANSYS permet d'utiliser des opérations booléennes pour unir, soustraire ou intercepter différentes parties du modèle. C'est particulièrement utile pour combiner plusieurs volumes ou simplifier les zones complexes.

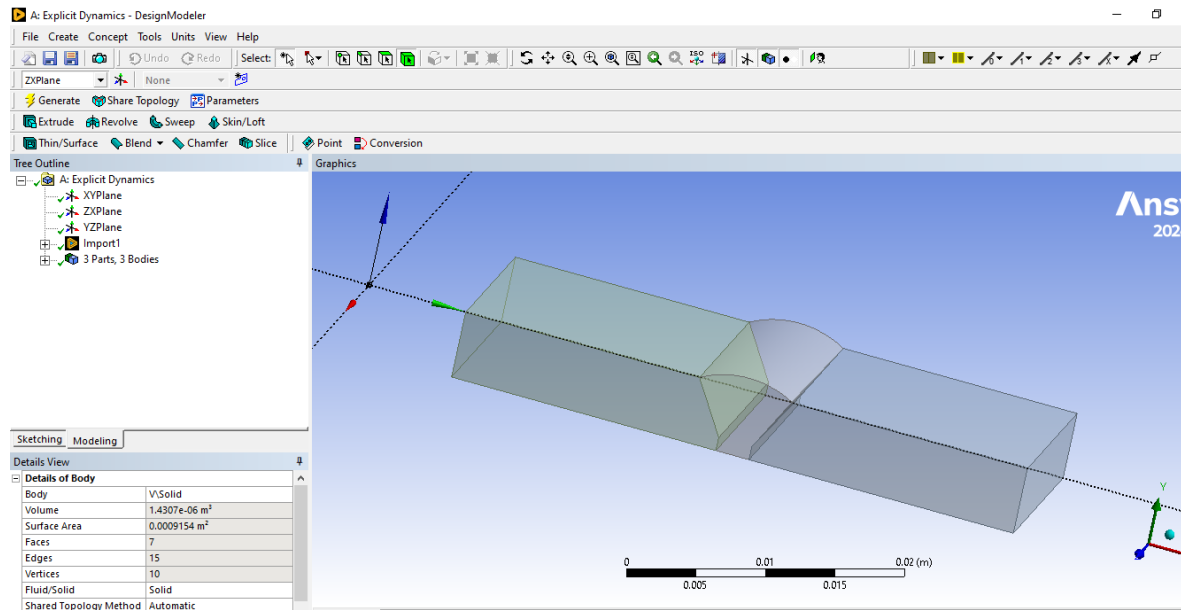


Figure II.2 : L'interface de DesignModeler.

- Utilisation de SpaceClaim :

SpaceClaim est un autre outil de modélisation intégré dans ANSYS, plus récent et intuitif que DesignModeler. Il permet une modélisation directe, ce qui signifie que vous pouvez interagir directement avec la géométrie en la modifiant de manière rapide et flexible, sans avoir besoin de travailler sur des esquisses complexes.

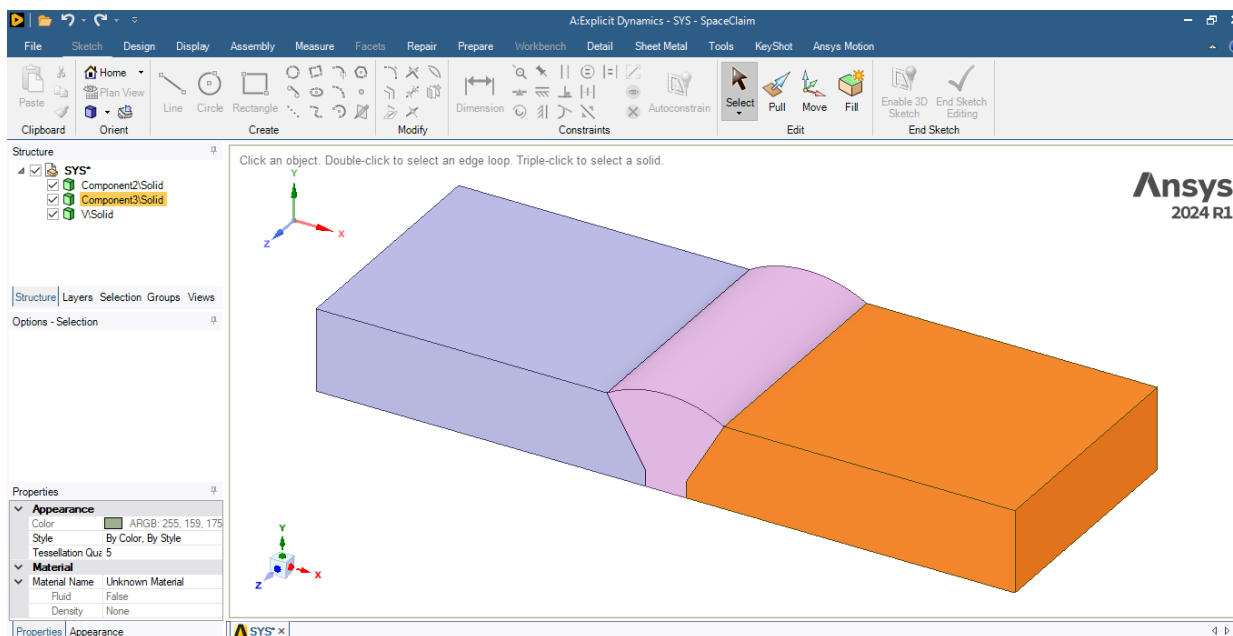


Figure II.3 : L'interface de SpaceClaim

Caractéristiques principales de SpaceClaim :

- **Modélisation directe :** Vous pouvez étirer, repousser ou redimensionner des parties d'un modèle 3D de manière interactive.
- **Simplification géométrique :** Il est facile de nettoyer des modèles importés, en supprimant des petits détails inutiles ou en "réparant" des parties problématiques avant le maillage.
- **Dépouilles, congés et perçages :** SpaceClaim vous permet d'ajouter ou de modifier des +congés (arrondis), des perçages, et d'autres entités de manière très intuitive.

C) Réparation et simplification de la géométrie :

Que la géométrie soit créée ou importée, il est souvent nécessaire de réparer ou simplifier le modèle avant de passer à l'étape de maillage. Cela inclut :

- Suppression de petits détails qui n'ont pas d'impact sur les résultats (comme des petits trous ou des congés très fins).
- Correction des anomalies telles que des intersections ou des surfaces non connectées.
- Détection et fermeture des trous ou espaces ouverts dans les solides ou surfaces.

Simplifier la géométrie peut aider à :

- Réduire la complexité du maillage et accélérer les temps de calcul.
- Éviter les problèmes de convergence dans les simulations.

II.5.2. Définition des matériaux dans ANSYS :

La définition des matériaux dans ANSYS est une étape essentielle pour garantir que les simulations reflètent fidèlement les comportements physiques du modèle sous les conditions de charge, de contrainte, de température, etc. ANSYS permet d'utiliser une vaste base de données de matériaux intégrée, de définir des matériaux personnalisés ou d'importer des données depuis des sources externes.

A) Les propriétés du matériau :

Les matériaux sont définis par leurs propriétés physiques, qui varient en fonction du type d'analyse à réaliser. Voici quelques propriétés couramment utilisées :

- **Propriétés mécaniques :**

- **Module de Young (ou module d'élasticité) :** Il exprime la rigidité du matériau. Plus il est élevé, plus le matériau est rigide.
- **Coefficient de Poisson :** Il définit le rapport entre la contraction latérale et l'extension longitudinale sous une contrainte uniaxiale.
- **Résistance à la traction :** Le stress maximum qu'un matériau peut supporter avant de se rompre.

- Limite d'élasticité : Le point où le matériau cesse de se comporter de manière élastique et commence à se déformer de manière permanente.

- **Propriétés thermiques :**

- Conductivité thermique : Capacité d'un matériau à conduire la chaleur.
- Capacité calorifique : Quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse d'un matériau.
- Coefficient de dilatation thermique : Changement de dimension d'un matériau en fonction des variations de température.

- **Propriétés électriques et magnétiques :**

- Perméabilité magnétique : Capacité d'un matériau à se magnétiser.
- Permittivité : Capacité d'un matériau à se polariser dans un champ électrique.

B) Choix des matériaux dans ANSYS :

ANSYS est livré avec une base de données intégrée qui contient une grande variété de matériaux standards, dont des métaux, des plastiques, des céramiques, des composites et d'autres matériaux industriels courants. Les étapes pour choisir un matériau depuis la base de données ANSYS sont :

1. Une fois la géométrie ou le modèle défini, nous allons dans l'onglet Engineering Data dans ANSYS Workbench.
2. Cliquons sur Engineering Data Sources pour afficher la bibliothèque de matériaux disponibles.
3. Nous sélectionnons la base de données standard d'ANSYS. Et nous verrons une liste de catégories telles que :
 - Acier (Steel)
 - Aluminium
 - Céramique
 - Polymère (Plastics)
 - Alliages (Alloys)
4. Nous cliquons sur le matériau qui nous intéresse pour l'ajouter à notre projet.
5. Nous pouvons ensuite attribuer ce matériau à des parties spécifiques du modèle dans l'onglet Model de Mechanical.

Chaque matériau dans la base de données est associé à un ensemble de propriétés définies qui sont prêtes à être utilisées pour les calculs. Il est important de vérifier que les propriétés nécessaires à notre analyse (mécanique, thermique, etc.) sont bien définies.

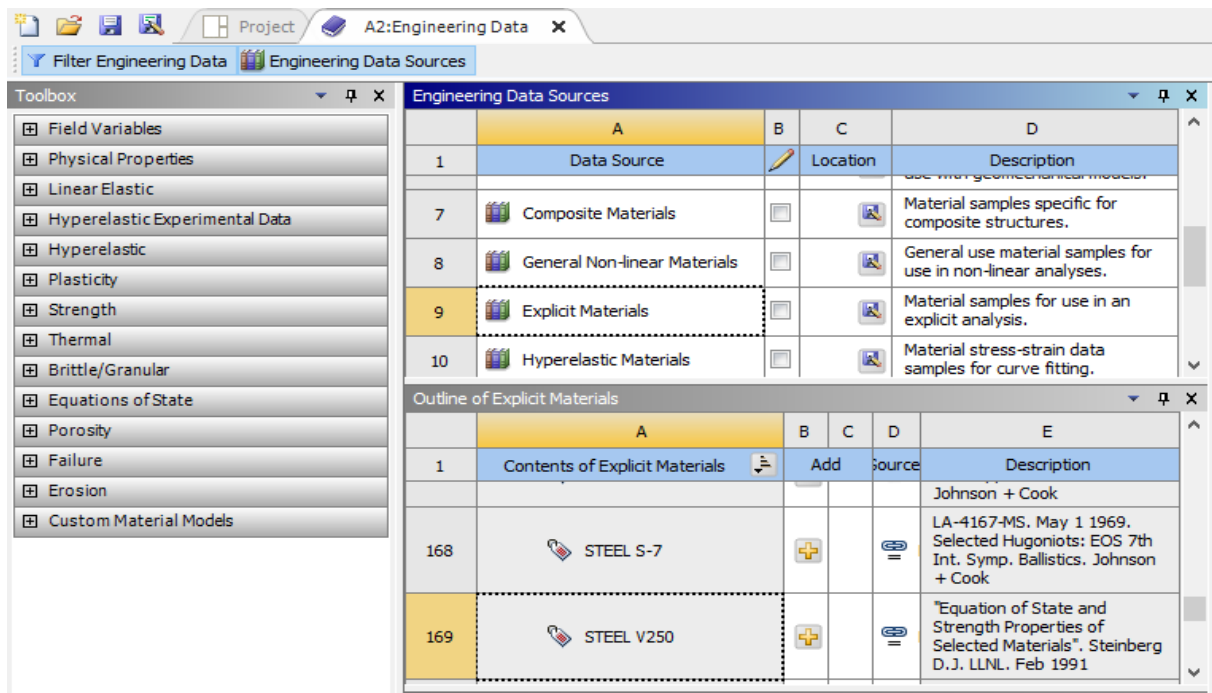


Figure II.4 : La base de donne du ANSYS pour les matériaux.

C) Ajouter un nouveau matériau dans ANSYS :

Si le matériau dont nous avons besoin n'existe pas dans la base de données ANSYS, nous pouvons le définir manuellement en ajoutant ses propriétés spécifiques. Les étapes pour ajouter un nouveau matériau sont :

1- Accéder à l'onglet "Engineering Data":

- Dans ANSYS Workbench, nous ouvrons le module *Engineering Data* en cliquant dessus dans notre projet.

2- Créer un nouveau matériau :

- Sous l'onglet Engineering Data, nous allons dans le menu du milieu et cliquons sur "Click here to add a new material".
 - Nous renommerons notre matériau selon notre besoin (par exemple Acier S235JR).

3- Définir les propriétés mécaniques et thermiques :

- Nous sélectionnons les propriétés que nous souhaitons ajouter au matériau. Nous pouvons le faire à partir du volet gauche comme il est représenté dans la figure 6.". Cela nous permet d'ajouter les propriétés souhaitées comme le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la conductivité thermique, etc.
 - Nous remplissons les valeurs des propriétés spécifiques à notre matériau.
 - Nous pouvons aussi définir des propriétés non linéaires ou des dépendances en température si le matériau se comporte différemment en fonction de la température.

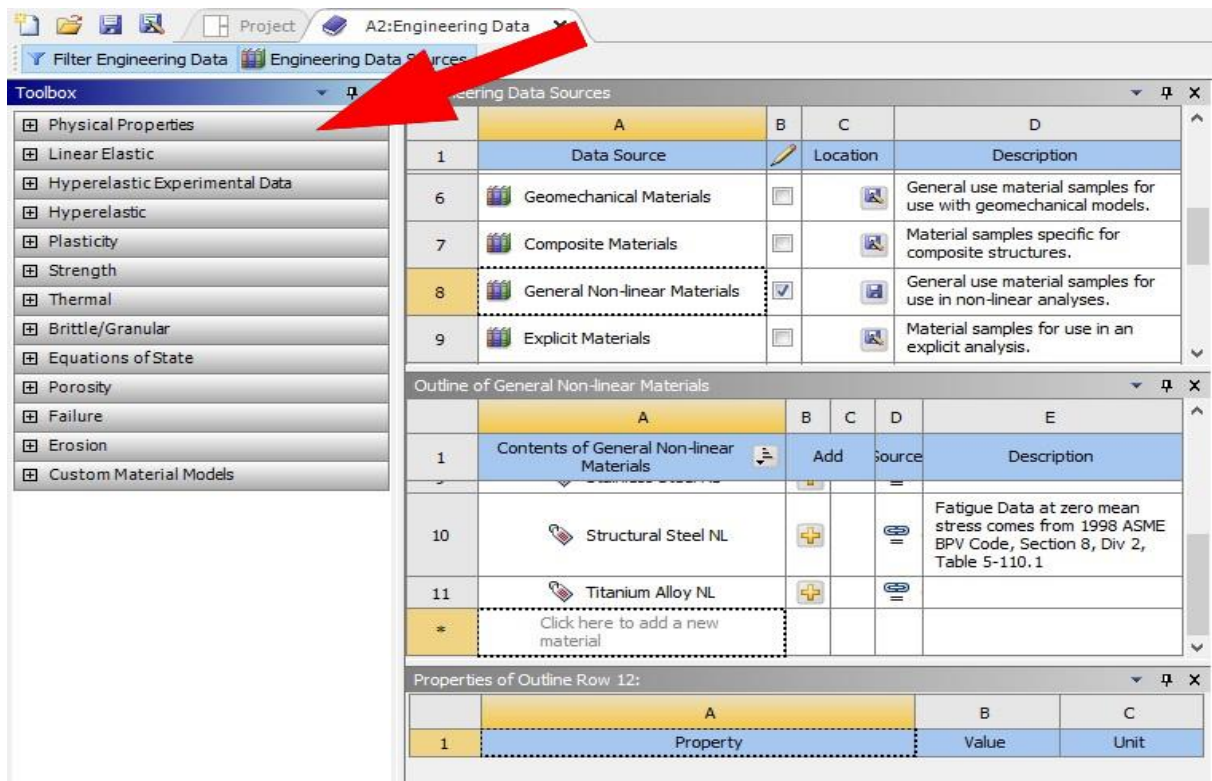


Figure II.5 : Les différents propriétés qui est disponible dans ANSYS.

4- Utiliser le matériau dans une simulation :

- Une fois que notre matériau est défini, il sera disponible dans la liste des matériaux lorsque nous modéliserons une géométrie.
- Dans l'interface Mechanical, sous l'onglet Geometry, nous sélectionnons une pièce et lui affectons le matériau que nous venons de créer.

D) Importation de données matériaux :

ANSYS permet également d'importer des matériaux à partir de bases de données externes ou d'autres logiciels d'ingénierie via des fichiers de données spécifiques (par exemple des fichiers au format .xml, .csv ou d'autres formats standards). Les étapes pour importer des données de matériaux sont :

- 1- Dans l'onglet Engineering Data, nous cliquons sur Import Material Data.
- 2- Nous choisissons le fichier contenant les propriétés du matériau à importer.
- 3- Nous vérifions et ajustons les propriétés pour nous assurer que toutes les informations importées sont correctes.

II.5.3. Le maillage dans ANSYS Mechanical :

Le maillage est une étape essentielle dans le processus de simulation par la méthode des éléments finis (MEF). Le maillage consiste à diviser la géométrie d'un modèle en petits éléments ou volumes appelés "éléments finis" qui permettront de résoudre les équations mathématiques pour prédire le comportement du système sous des charges ou des conditions

spécifiques. Un maillage de haute qualité est crucial pour obtenir des résultats précis dans ANSYS Mechanical.

Le maillage est la base sur laquelle les équations de la mécanique des solides, de la thermique, des fluides ou d'autres domaines sont résolues. Le type et la qualité du maillage influencent directement la précision et la convergence des résultats.

A) Les types de maillage :

ANSYS propose plusieurs types de maillage en fonction de la géométrie et du type de simulation (statique, thermique, dynamique, etc.) :

- Maillage 1D (lignes)

Les éléments 1D sont utilisés pour modéliser des structures linéaires telles que des poutres, des ressorts ou des câbles. Ces éléments sont particulièrement utiles pour des modèles simplifiés où la géométrie peut être représentée comme une série de segments linéaires.

- Maillage 2D (surfaces)

Les éléments 2D, comme les triangles et les quadrilatères, sont utilisés pour modéliser des structures en plan ou des structures très fines. Ils sont utilisés dans des simulations comme les analyses de plaques et coques ou l'analyse thermique bidimensionnelle.

- Maillage 3D (volumes)

Les éléments 3D, tels que les tétraèdres, les hexaèdres, ou les prismatiques, sont utilisés pour modéliser des géométries plus complexes en trois dimensions. C'est le type de maillage le plus couramment utilisé pour des simulations dans ANSYS Mechanical, notamment pour les analyses de forces, de fluides ou de thermiques en 3D.

B) La qualité du maillage :

La qualité du maillage est déterminante pour garantir des résultats précis et une bonne convergence de la solution. Un maillage trop grossier peut entraîner une perte de précision, tandis qu'un maillage trop fin peut augmenter le temps de calcul sans apporter une amélioration significative de la précision.

C) Les méthodes de maillage dans ANSYS Mechanical

ANSYS Mechanical offre différentes méthodes pour générer un maillage de qualité. Voici les options disponibles :

- **Maillage automatique :**

Le maillage automatique est l'option la plus rapide et la plus facile. ANSYS divise automatiquement la géométrie en petits éléments en fonction de critères définis par l'utilisateur (taille de maillage, type d'éléments, etc.).

Une fois la géométrie importée ou créée, nous accédons à l'onglet Mesh (Maillage) dans ANSYS Mechanical. Ensuite, nous sélectionnons la taille des éléments, comme illustré dans la figure II.6. Après cela, nous faisons un clic droit sur Mesh, puis sélectionnons Generate Mesh (Générer le maillage). Le maillage est généré automatiquement en fonction des paramètres par défaut d'ANSYS.

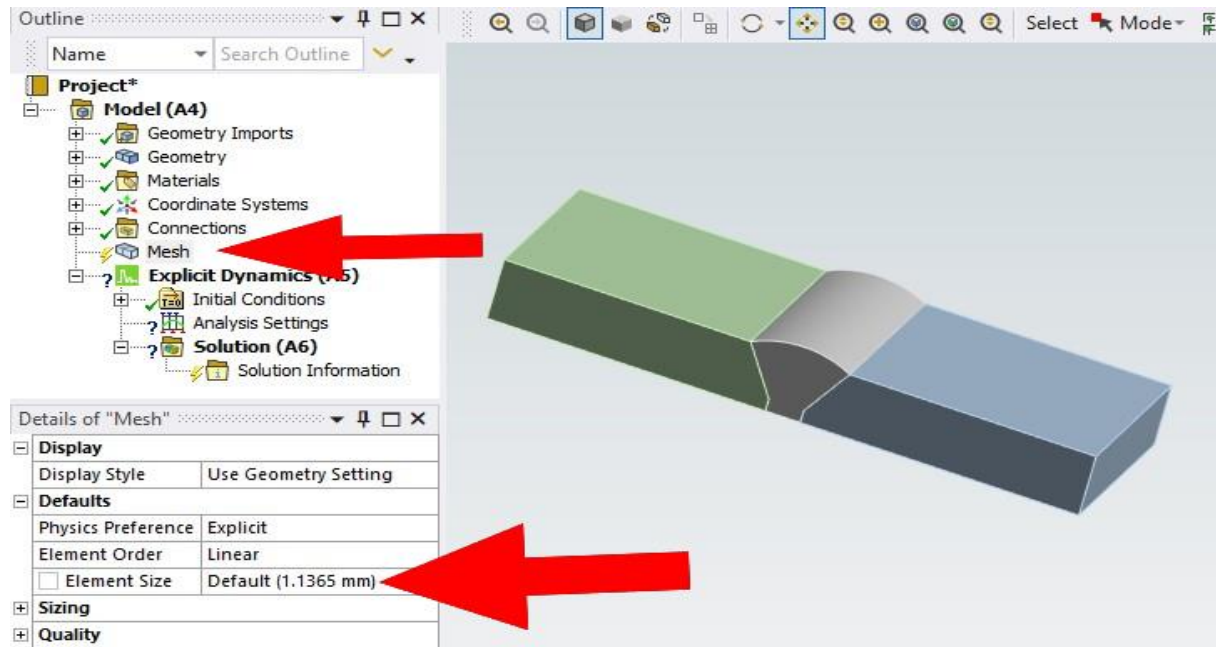


Figure II.6 : La méthode pour sélectionner la taille d'élément.

- **Maillage manuel (maillage contrôlé)**

Pour des simulations plus précises ou des géométries complexes, il peut être nécessaire de contrôler manuellement la génération du maillage. ANSYS nous permet de spécifier la taille du maillage sur des zones spécifiques de la géométrie.

- Sélectionner une zone spécifique:

- Dans l'onglet Mesh, nous sélectionnons une partie de la géométrie sur laquelle nous souhaitons appliquer un maillage plus fin ou plus grossier.
- Nous pouvons définir une taille d'élément spécifique pour ces zones et choisir le type de maillage correspondant à notre géométrie.

- Affiner le maillage:

- Nous utilisons les options comme "Size Function" pour affiner le maillage autour des zones critiques où des gradients de contraintes ou de températures sont attendus.
- "Size Function" offre plusieurs options :
 - Constant: Taille d'élément uniforme.
 - Curvature : La taille des éléments varie en fonction de la courbure de la surface.

- Proximity : Les éléments sont plus fins près des faces ou des points proches.

D) Types d'éléments dans ANSYS :

- **Tetraèdres** : Ces éléments 3D à quatre faces triangulaires sont largement utilisés pour des maillages complexes et irréguliers.

- Avantages : Facile à utiliser pour des géométries complexes.
- Inconvénients : Moins efficaces pour des géométries régulières, avec une précision inférieure dans certains cas.

- **Hexahèdres** : Ces éléments 3D à six faces carrées ou rectangulaires sont plus performants pour des géométries simples.

- Avantages : Plus efficaces pour les calculs, meilleure précision.
- Inconvénients : Nécessitent des géométries plus régulières.

- **Prismes et pyramides** : Utilisés dans des maillages mixtes, surtout dans les maillages de fluides ou de structures.

II.5.4 Insertion des conditions aux limites dans ANSYS Mechanical :

Les conditions aux limites sont des paramètres essentiels à définir dans une simulation par éléments finis, car elles représentent les interactions entre le modèle et son environnement. Dans ANSYS Mechanical, les conditions aux limites peuvent inclure les déplacements, les forces, les moments, et d'autres charges externes. Leur bonne définition est cruciale pour garantir que la simulation reflète fidèlement le comportement réel du modèle sous des conditions spécifiques.

A) Types de conditions aux limites :

Dans ANSYS Mechanical, les conditions aux limites couramment utilisées incluent :

- Déplacements.
- Charges de pression.
- Charges thermiques.
- Conditions de contact.

B) Application des conditions aux limites :

Les déplacements ou les fixations (appelées aussi supports) sont des conditions aux limites qui contraignent certains degrés de liberté du modèle. Cela peut inclure la fixation complète d'un bord ou la limitation des déplacements dans une ou plusieurs directions. Les étapes pour appliquer un déplacement sont :

1- Sélectionner la géométrie à contraindre :

- Dans ANSYS Mechanical, après avoir importé ou créé notre modèle, nous accédons à l'onglet Model (Explicit Dynamics) ou à l'analyse correspondant à notre besoin.
- Dans l'arborescence, nous cliquons avec le bouton droit sur Explicit Dynamics et choisissons Insert pour sélectionner le type de contrainte que nous souhaitons appliquer, comme illustré dans la figure II.7 (par exemple : Fixed Support, Displacement, ou Force).

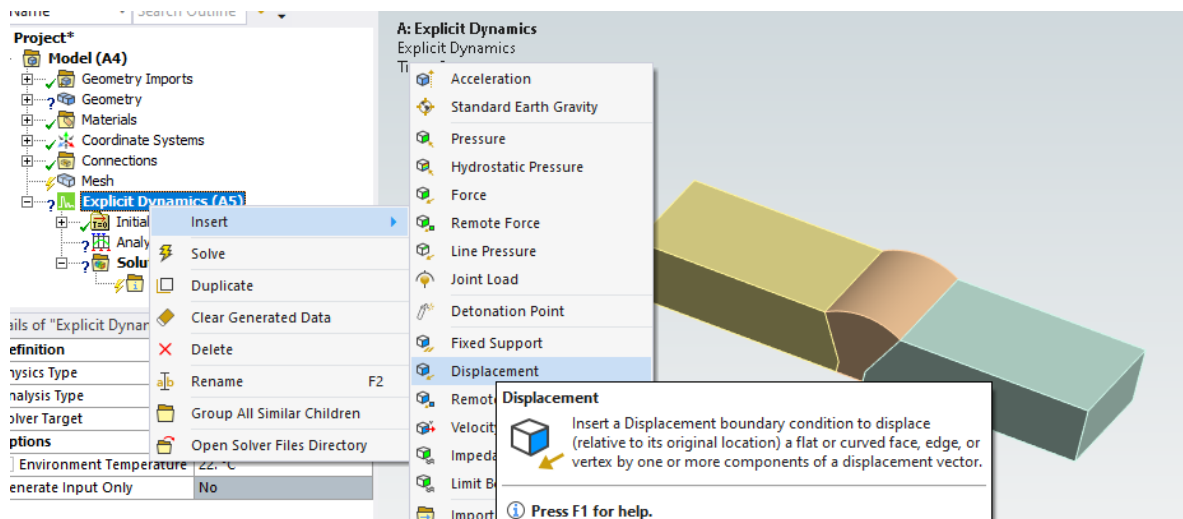


Figure II.7 : La méthode pour appliquer un déplacement.

2- Choix du type de support :

- Fixed Support : Fixe complètement un point ou une surface du modèle en interdisant tout déplacement et rotation. Utilisé généralement pour les points de fixation rigides.
- Displacement : Nous permet de définir un déplacement imposé dans une ou plusieurs directions spécifiques.
- En peut aussi appliquer des Force, Pression et ajouter la gravité.

3- Définir les paramètres de déplacement :

- Une fois la géométrie sélectionnée, nous pouvons spécifier les directions du déplacement à imposer (par exemple, les déplacements selon les axes X, Y, Z).
- Nous pouvons définir la valeur exacte du déplacement imposé ou sélectionner une contrainte en fonction d'autres variables, comme la température ou le temps dans le cadre d'une analyse transitoire.

4- Appliquer la condition:

- Après avoir défini les paramètres, nous cliquons sur OK pour appliquer la condition aux limites.

C) Autres Types de Charges :

- Charges thermiques : Nous pouvons également appliquer des conditions thermiques telles que des températures fixes, des flux de chaleur, ou des transferts de chaleur par convection dans les analyses thermiques.
- Charges dynamiques : Dans des analyses transitoires ou dynamiques, des charges variables dans le temps peuvent être appliquées (par exemple, des forces oscillantes).
- Charges de gravité : Dans ANSYS, nous pouvons ajouter l'effet de la gravité sur tout le modèle en ajoutant une charge de gravité sous l'onglet Loads.

II.5.5. Application des conditions de vitesse et d'accélération dans ANSYS Mechanical :

Les conditions de vitesse et d'accélération sont souvent utilisées dans les simulations transitoires, dynamiques et non-linéaires pour étudier le comportement des structures soumises à des mouvements rapides ou des forces variables dans le temps. Elles permettent de simuler des phénomènes comme les vibrations, les impacts, les chocs ou les variations de vitesses dans un système mécanique.

Dans ANSYS Mechanical, l'application de ces conditions dépend du type d'analyse que nous réalisons (analyses transitoires, modales, ou dynamiques explicites).

A) Types d'analyses utilisant les conditions de vitesse et d'accélération :

Les conditions de vitesse et d'accélération sont principalement utilisées dans les analyses suivantes :

- **Analyse dynamique transitoire** : Pour modéliser le comportement de structures sous des charges dynamiques (forces, impacts) qui varient dans le temps.
- **Analyse modale** : Pour étudier les fréquences naturelles et les modes de vibration d'une structure.
- **Analyse explicite** : Pour modéliser des phénomènes à haute vitesse comme les impacts, les explosions ou les crash-tests.

B) Conditions de vitesse dans ANSYS Mechanical :

Les conditions de Vitesse est utilisée pour définir la vitesse à laquelle une partie ou l'ensemble du modèle se déplace au début d'une analyse transitoire. Cela est particulièrement utile pour les simulations où un objet se déplace lorsqu'une force ou une autre condition est appliquée. Les étapes pour appliquer une condition de vitesse initiale sont :

1. Sélectionner le type d'analyse :

- Dans ANSYS Workbench, choisissons l'analyse Transient Structural ou Explicit Dynamics dans l'arborescence des systèmes d'analyse.

2. Ajouter une vitesse initiale :

- Une fois dans ANSYS Mechanical, cliquons avec le bouton droit sur Initial Conditions (Conditions Initiales) ensuite nous cliquons sur Insert.
- Sélectionnons Velocity (Vitesse) dans le menu déroulant comme illustré dans la figure II.8.

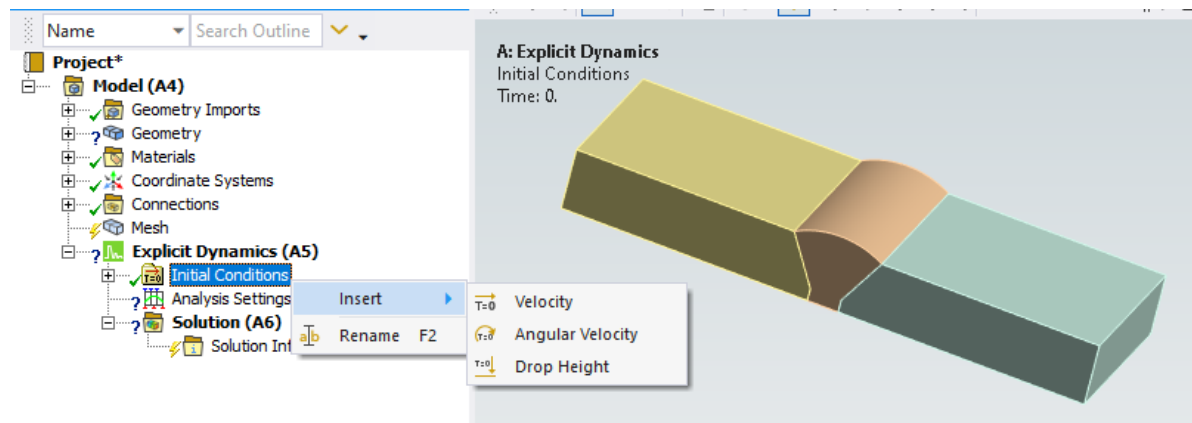


Figure II.8 : La méthode pour appliquer une vitesse.

3. Sélectionner la géométrie à laquelle appliquer la vitesse :

- Choisissons les nœuds, surfaces, ou volumes de notre modèle qui doivent avoir une vitesse. Nous pouvons choisir une partie spécifique du modèle ou l'ensemble de la géométrie.

4. Définir la vitesse :

- Nous pouvons définir la vitesse en fonction des axes (X, Y, Z) ou entrer une valeur de vitesse scalaire si le mouvement est uniforme dans toutes les directions.
- Entrons la valeur de la vitesse en unités de longueur par temps (par exemple, m/s).

5. Valider l'application de la vitesse :

- Après avoir entré la vitesse, cliquons sur OK pour valider l'application.

C) Conditions d'accélération dans ANSYS Mechanical :

Les conditions d'accélération permettent de modéliser des forces inertielles induites par des mouvements accélérés, comme lors d'une collision, d'une décélération rapide, ou de vibrations dues à des phénomènes externes.

- Accélération initiale (Initial acceleration)

L'accélération initiale est utilisée pour définir une accélération présente au début de l'analyse. Cela peut être important dans des simulations où un objet est déjà soumis à une accélération, comme un véhicule en décélération rapide.

- Accélération prescrite (Imposed acceleration)

L'accélération prescrite est une condition qui impose une accélération constante ou variable à une partie du modèle pendant toute l'analyse.

II.5.6. Lancement de la simulation :

Une fois toutes les conditions initiales définies, la simulation peut être lancée. ANSYS va alors résoudre les équations en tenant compte des forces, des déplacements et des autres paramètres définis.

Post-traitement des résultats :

Après la simulation, ANSYS Mechanical fournit des résultats sous forme de graphiques, de cartes de contraintes, de déformations, de déplacements, etc. Cela permet de visualiser :

Les zones critiques où les contraintes sont maximales.

Le comportement en termes de déformation de la structure.

Les résultats thermiques et dynamiques (si applicable).

II.6. CONCLUSION :

ANSYS est un outil puissant et polyvalent pour les ingénieurs et chercheurs qui travaillent dans divers domaines techniques. En particulier, ANSYS Mechanical offre des capacités avancées pour l'analyse des structures, permettant de simuler des environnements complexes et de tester virtuellement les produits avant de passer à la phase de fabrication.

Chapitre III :

Modélisation numérique

III.1. INTRODUCTION :

Au dix-neuvième siècle, les ingénieurs de soudage ont consacré beaucoup de temps et d'efforts au choix du métal d'apport ainsi que du type de chanfrein adapté et d'autres propriétés. Ils ont dû appliquer de nombreuses étapes pour parvenir à mesurer la limite élastique (R_e) et plastique (R_m), mais aujourd'hui, grâce aux avancées technologiques, nous sommes en mesure d'explorer une gamme étendue de métaux d'apport et de tester différents types de chanfreins et obtenir des résultats détaillés sur ce qui arrive à la soudure, dans quelques minutes seulement., grâce à des programmes tels qu'ANSYS. Alors dans ce chapitre nous avons présenté les différents matériaux utilisés et comment nous modélisons les pièces a soudée et les différents joints soudés, ainsi que d'autres propriétés.

III.2. LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA SIMULATION :

III.2.1. Métal de base :

Pour le métal de base nous avons choisi l'acier S235JR pour ses avantages tels que :

- Une bonne soudabilité.
- Bonne résistance mécanique.
- Disponibilité dans le marché algérien.
- Peu coûteux par rapport aux autres métaux.
- Peut être utilisé dans une variété domaine d'applications (la fabrication industrielle et la construction navale...).

Tableau III.1: La composition chimique du métal de base S235JR.

Matériau	Carbone	Manganèse	Phosphore	Souffre	Azote
S235JR	0.17 %	1.40 %	0.045 %	0.045 %	0.009 %

Tableau III.2: Les caractéristiques mécaniques du métal de base.

Matériau	Module de Young	Coefficient de poisson	Limite Elastique	Résistance à la traction	Densité
S235JR	210000 MPa	0.28	235 MPa	360 MPa	7800 Kg/m ³

III.2.2. Métal d'apport :

Pour le métal d'apport nous avons choisi trois différents métaux :

- E6013 pour la simulation de soudage par électrode enrobée.

- ER70S-3 pour la simulation de soudage TIG.
- Fil fourré E71TGS pour la simulation de soudage MIG.

Tableau III.3: La composition chimique du métal d'apport.

Matériau	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
E6013	0.2 %	0.4 %	0.7 %	0.9 %	0.15 %	-	-
ER70S-3	0.07 %	0.65 %	1.1 %	1.6 %	2 %	0.03 %	0.045 %
E71TGS	0.15 %	0.5 %	0.5 %	12 %	0.5 %	0.01 %	0.02 %

Tableau III.4 : Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport.

Matériau	Module de Young	Coefficient de poisson	Limite Elastique	Résistance à la traction	Densité
E6013	210000 MPa	0.28	450 MPa	700 MPa	7800 Kg/m ³
ER70S-3	200000 MPa	0.265	170 MPa	485 MPa	8027 Kg/m ³
E71TGS	215000 MPa	0.28	550 MPa	700 MPa	7700 Kg/m ³

III.3. MODELISATION DES DIFFERENTES PIECES :

III.3.1. Modélisation des différents joints soudés :

La première étape pour réaliser la simulation consiste à modéliser les éprouvettes. Dans notre étude, nous avons six types de joints différents (Plat, V, U, X, K et O), Chaque éprouvette est composée de deux pièces, la longueur de chaque pièce est de 20 mm, 15 mm de largeur et 5 mm d'épaisseur.

La largeur du cordon de soudure est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C = E / 2 \quad (\text{III-1})$$

C : La largeur de cordon.

E : L'épaisseur de la pièce.

$$C = 5 \text{ mm} / 2 = 2.5 \text{ mm}$$

Les éprouvettes sont maintenant prêtes pour la simulation après avoir créé le cordon de soudure et la figure III.1 montre les dimensions de chaque joint.

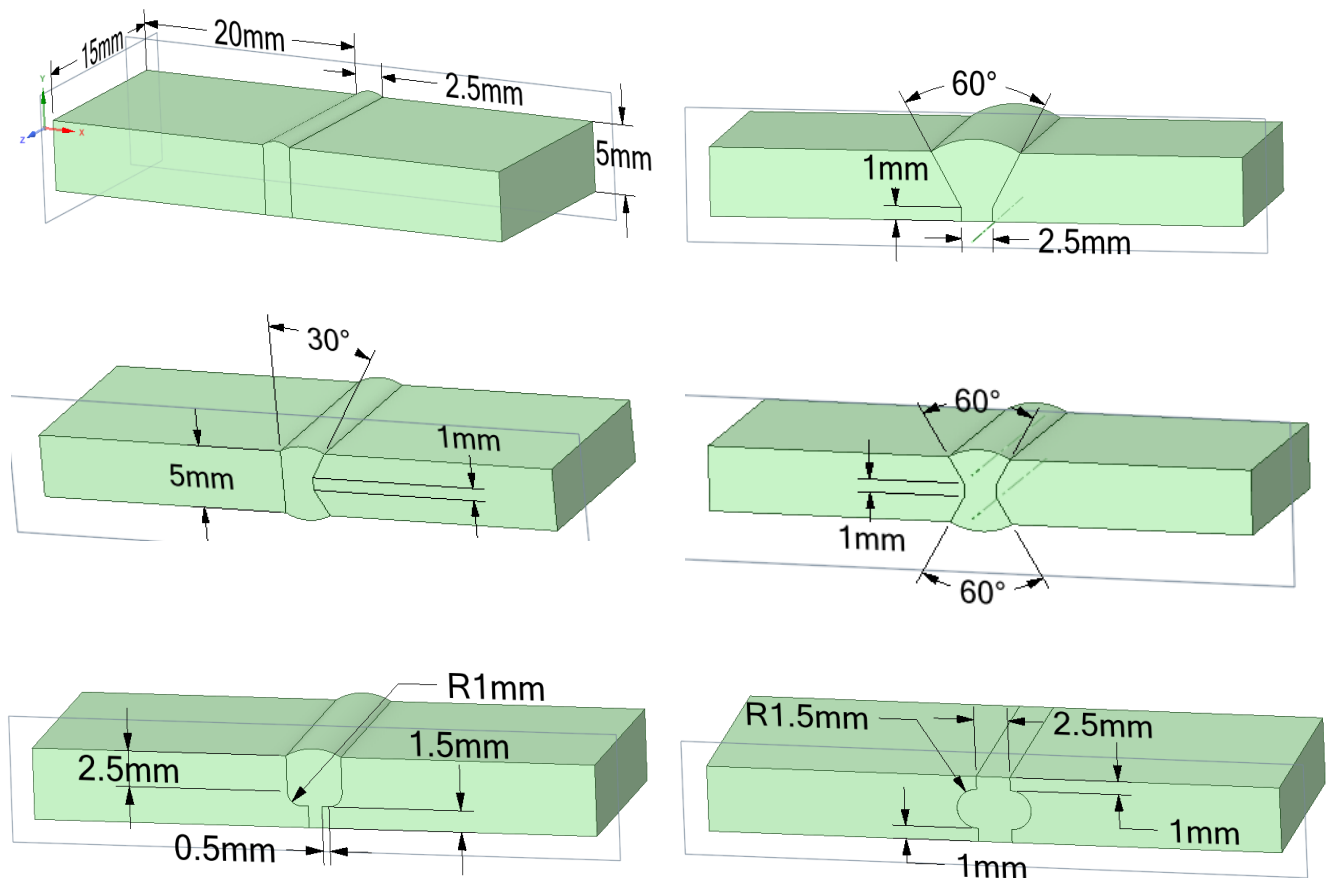


Figure III.1 : Modélisation les différents joints soudés.

III.3.2. Modélisation de différentes épaisseurs :

Pour faire une étude sur l'influence de l'épaisseur sur le comportement mécanique des joints soudés, il est nécessaire de modéliser plusieurs pièces avec des épaisseurs variées. Nous avons donc conçu trois éprouvettes de joints soudés plats avec des épaisseurs de 5, 7 et 9 mm (Figure III.2), Ces trois épaisseurs ont été utilisé pour les différents types de joints.

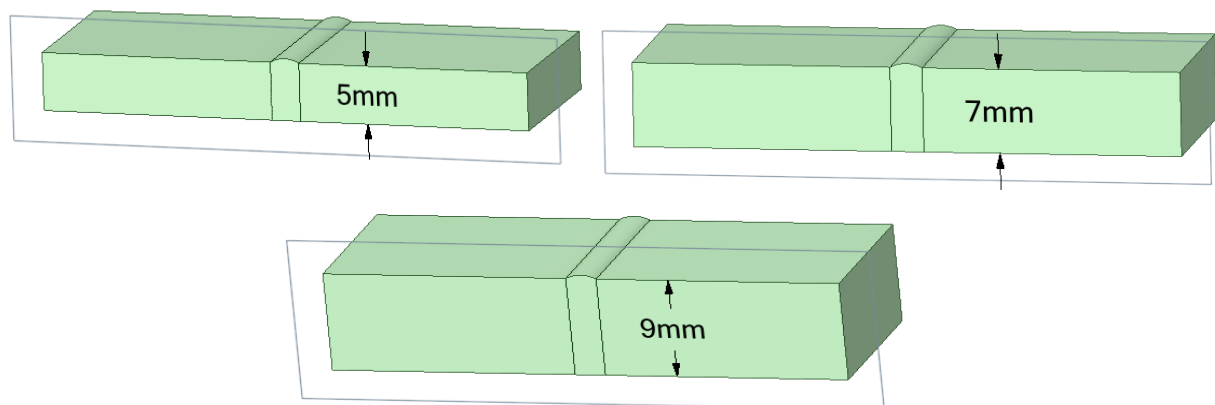


Figure III.2 : Modélisation des éprouvettes avec différents épaisseurs.

III.3.3. Modélisation des différents angles du joint de soudure :

L'angle du joint de soudure est un paramètre critique dans le domaine de la soudure, car il joue un rôle crucial dans la qualité, la résistance et la durabilité des assemblages soudés. Il a un impact significatif sur de nombreux aspects du processus de soudage. Que ce soit en soudure manuelle ou automatisée. Ainsi, comprendre l'impact de l'angle du joint sur la soudure est essentiel pour améliorer les performances de soudage dans diverses applications industrielles et structurelles. Ainsi, nous avons étudié l'effet de l'angle du joint de soudure. Pour cela, nous avons choisi trois angles différents pour modéliser les pièces, comme représenté sur la figure III.3.

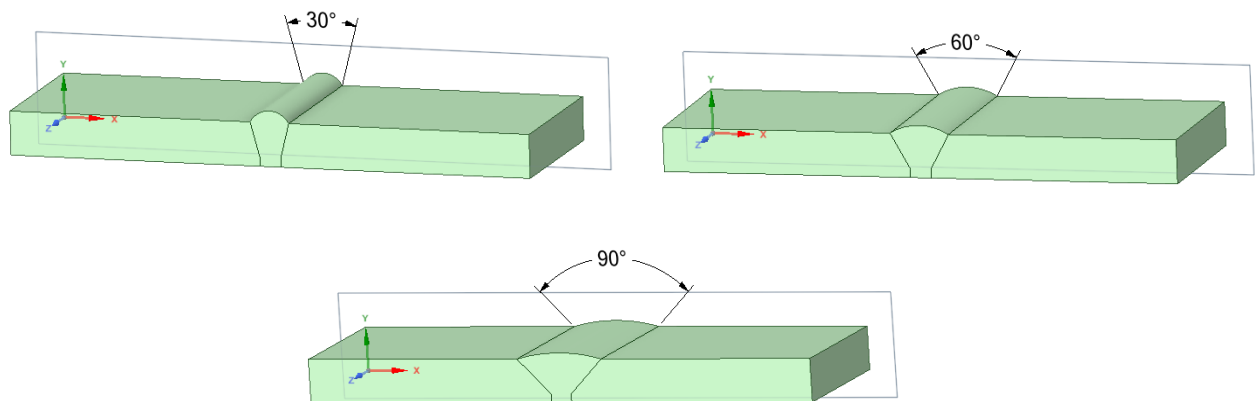


Figure III. 3 : Modélisation des éprouvettes avec différents angles de joint.

III.4. SELECTION DES PARAMETRES DE SIMULATION :

III.4.1. Choix de déplacement pour la simulation :

Le choix du déplacement est crucial lors de la simulation avec ANSYS Mechanical. La valeur et la direction du déplacement déterminent comment les éprouvettes réagissent aux charges appliquées. Que ce soit pour simuler la traction, la déformation d'une éprouvette sous pression ou la réponse d'un joint de soudure soumis à des forces dynamiques, déterminer les déplacements appropriés est essentiel pour obtenir des résultats précis et représentatifs du comportement réel du système étudié. Cette décision impacte directement la précision des analyses de contraintes, des déformations et des déformations résiduelles. Pour cette raison, nous avons effectué des essais sur des éprouvettes avec un joint de soudure en forme de V, avec différents déplacements (0.01/0.02/0.03/0.04 mm), pour choisir le déplacement approprié dans notre étude, et nous avons obtenu les courbes représentées sur la figure III.4.

Nous pouvons déterminer la force appliquée sur l'éprouvette en utilisant la formule suivant :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{III.2})$$

$$F = \sigma \times A \quad (\text{III.3})$$

$$A = L \times l \quad (\text{III.4})$$

σ : La contrainte maximale en Mpa

F : La force appliqué en N

A : La surface en mm²

Après les calculs nous obtenons les résultats suivants :

Tableau III.5 : La valeur de force et contrainte pour chaque déplacement

Déplacement (mm)	0.01	0.02	0.03	0.04
Contrainte (Mpa)	119.4	235.01	275.38	278.15
Force (N)	8955	17625	20653	20861

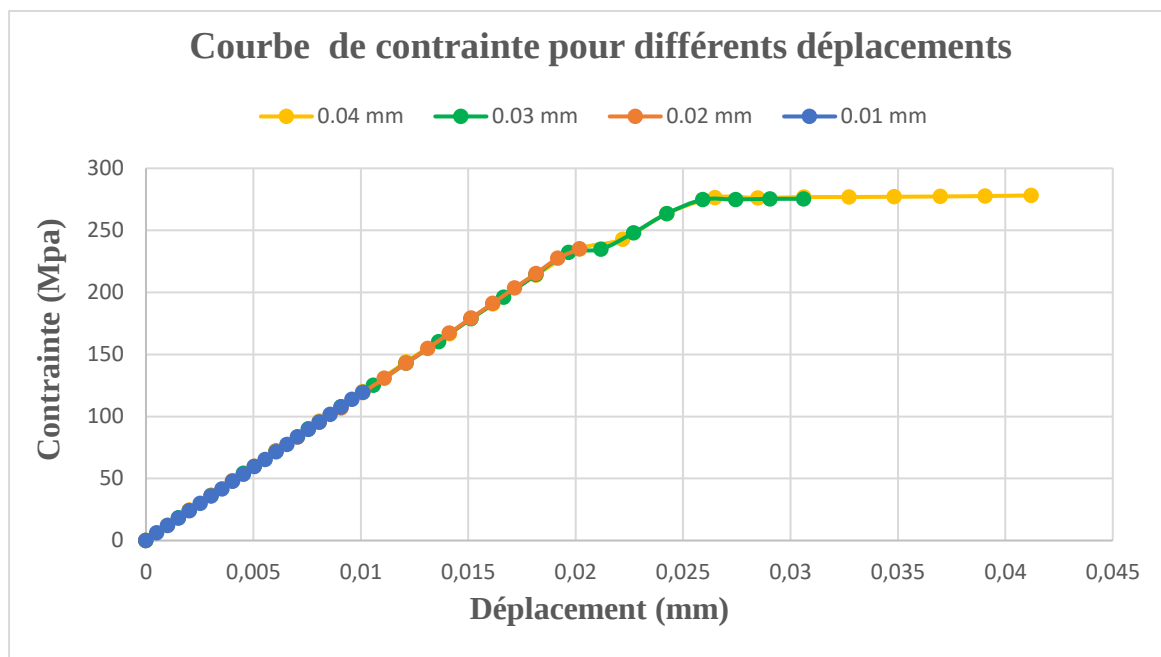


Figure III.4 : Courbe de contrainte pour différents déplacements

Après avoir expérimenté différents déplacements, nous avons obtenu les courbes présentées sur la figure III.4 et nous remarquons que :

- Pour un déplacement de 0,01 mm, nous remarquons que la valeur maximale de la contrainte est de 119,4 MPa, et cette valeur se situe dans la zone élastique.
- Pour un déplacement de 0,02 mm, nous remarquons que la valeur maximale de la contrainte est de 235,01 MPa, et cette valeur reste dans la zone élastique.
- Pour un déplacement de 0,03 mm, nous remarquons que la valeur maximale de la contrainte est de 275,38 MPa, et cette valeur se situe juste après la limite élastique.

- Pour un déplacement de 0,04 mm, nous remarquons que la valeur maximale de la contrainte est de 278,15 MPa, et cette valeur se trouve dans la zone plastique.

Dans le domaine du soudage, il est impératif de respecter la limite élastique du métal utilisé, c'est-à-dire que la contrainte dans les pièces soudées doit rester dans l'état élastique sans provoquer de déformation permanente. Par conséquent, le meilleur déplacement à choisir est de 0,03 mm.

III.4.2. Choix du temps pour la simulation :

Dans l'analyse par éléments finis réalisée avec ANSYS Mechanical, le choix du temps revêt une importance cruciale pour obtenir des résultats précis et significatifs. Le temps détermine la façon dont les charges sont appliquées et la manière dont les résultats sont obtenus tout au long de la simulation. Il existe plusieurs types de temps dans ANSYS Mechanical, tels que le temps statique, le temps dynamique et le temps transitoire. Chacun de ces choix est adapté à des situations spécifiques où les charges varient dans le temps de manière différente, que ce soit de manière constante, périodique ou transitoire. Cependant, il n'existe pas d'option pour saisir directement le temps. Nous pouvons alors déterminer le temps en utilisant l'équation de vitesse suivante :

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{III.5})$$

v : La vitesse en mm/s.

d : Le déplacement en mm.

t : Le temps en s.

Après avoir calculé les différentes vitesses, on obtient les résultats suivants :

Tableau III.6 : La valeur de vitesse pour différents temps.

Temps (s)	15	30	45	60
Vitesse (mm/s)	1.66×10^{-3}	8.33×10^{-4}	5.55×10^{-4}	4.16×10^{-4}

Après avoir calculé la vitesse correspondant à chaque temps, nous avons simulé les éprouvettes avec un joint de soudure en V et un déplacement de 0,03 mm, en entrant la vitesse de déplacement de la pièce. Une fois les résultats obtenus, nous les avons rassemblés dans une courbe (Figure III.5).

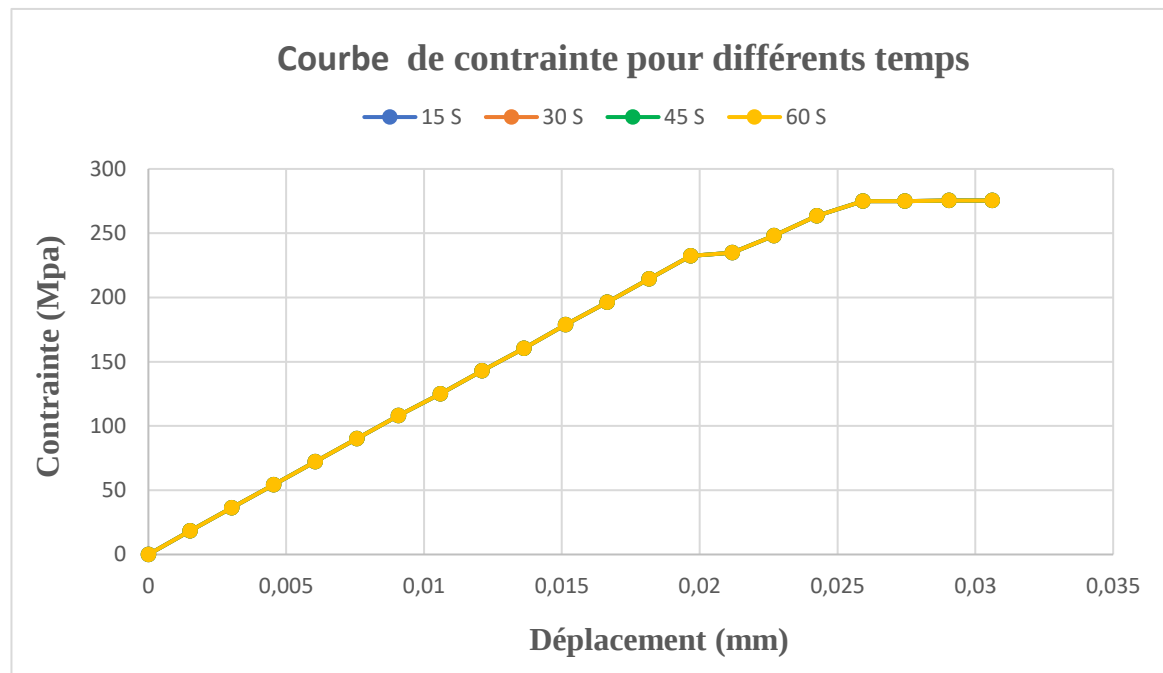


Figure III.5 : Courbe de contrainte pour différents temps.

Au début du déplacement, nous remarquons qu'il n'y a qu'une seule courbe, mais en réalité il y a quatre courbes superposées, et c'est parce qu'elles ont les mêmes résultats. Pour cela, nous concluons que le temps n'a pas d'influence sur notre simulation, et par conséquent, le temps que nous choisissons dans la simulation n'a pas d'importance, Donc ce paramètre temporel sera donc négligé, c'est-à-dire on ne va pas l'étudier.

III.4.3. Choix du maillage :

Dans ANSYS Mechanical, le maillage joue un rôle fondamental en influençant directement la précision, la convergence et la performance des simulations par éléments finis. Le maillage est la discrétisation du domaine géométrique en éléments finis (comme des triangles ou des tétraèdres en 3D) pour permettre la résolution numérique des équations physiques.

Le processus de maillage consiste à subdiviser la géométrie en éléments plus petits afin de représenter avec précision les propriétés du matériau et les conditions aux limites appliquées. Un maillage de haute qualité est essentiel pour obtenir des résultats fiables et précis. ANSYS Mechanical propose plusieurs types de maillages et des outils avancés pour leur création et leur gestion.

- Maillage structuré et non-structuré :

Maillage Structuré : Les éléments finis sont alignés de manière régulière le long de lignes droites, ce qui facilite souvent la convergence numérique mais peut être limitant pour des géométries complexes.

Maillage Non-Structuré : Les éléments finis sont disposés de manière irrégulière, offrant plus de flexibilité pour la modélisation de géométries complexes et la résolution de problèmes non linéaires.

- Maillage 2D et 3D :

Maillage 2D : Utilisé pour modéliser des structures planes en deux dimensions.

Maillage 3D : Utilisé pour modéliser des objets volumétriques en trois dimensions.

- Maillage Tetraédrique et Hexaédrique :

Maillage Tetraédrique : Composé de tétraèdres (quatre faces triangulaires), adapté aux géométries complexes et aux analyses dynamiques.

Maillage Hexaédrique : Composé de cubes ou d'hexaèdres, approprié pour les simulations statiques et les charges uniformes, offrant une meilleure représentation des propriétés matérielles.

Maillage Mixte : Combinaison de différents types d'éléments pour optimiser la représentation géométrique et les conditions aux limites spécifiques du problème.

Le choix du type de maillage dans ANSYS Mechanical dépend étroitement de la nature du problème à résoudre, de la géométrie de la structure, des conditions aux limites et des exigences de précision et de performance.

Dans notre cas, nous avons utilisé un maillage structuré 3D avec des éléments hexaédriques, comme le montre la figure III.6, car nous avons une géométrie volumétrique simple. Pour choisir le meilleur maillage, nous avons essayé différents maillages (0,9 mm, 0,7 mm, 0,5 mm et 0,3 mm) et avons obtenu les résultats représentés dans la figure III.7.

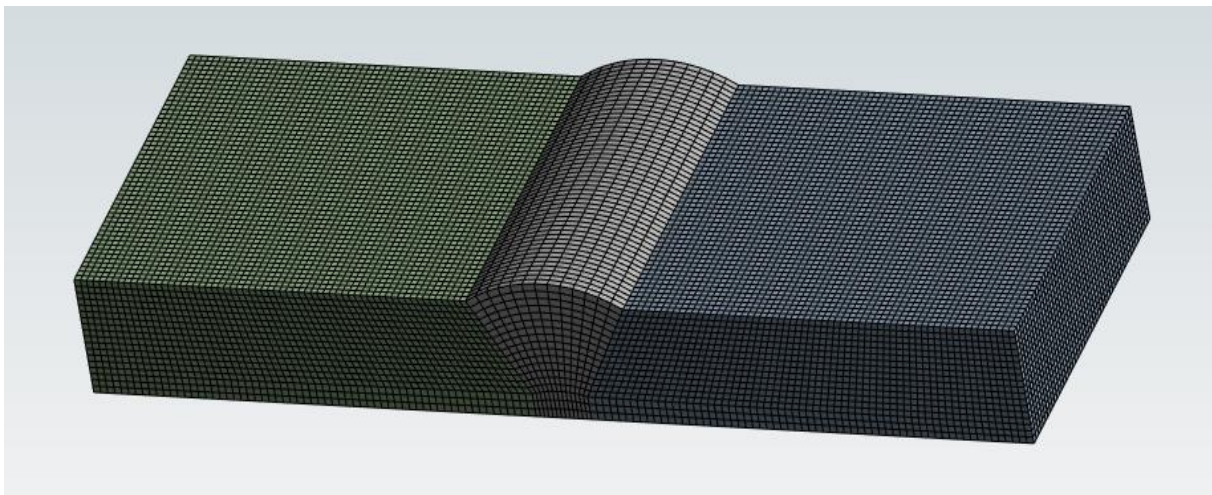


Figure III.6 : L'éprouvette après le maillage.

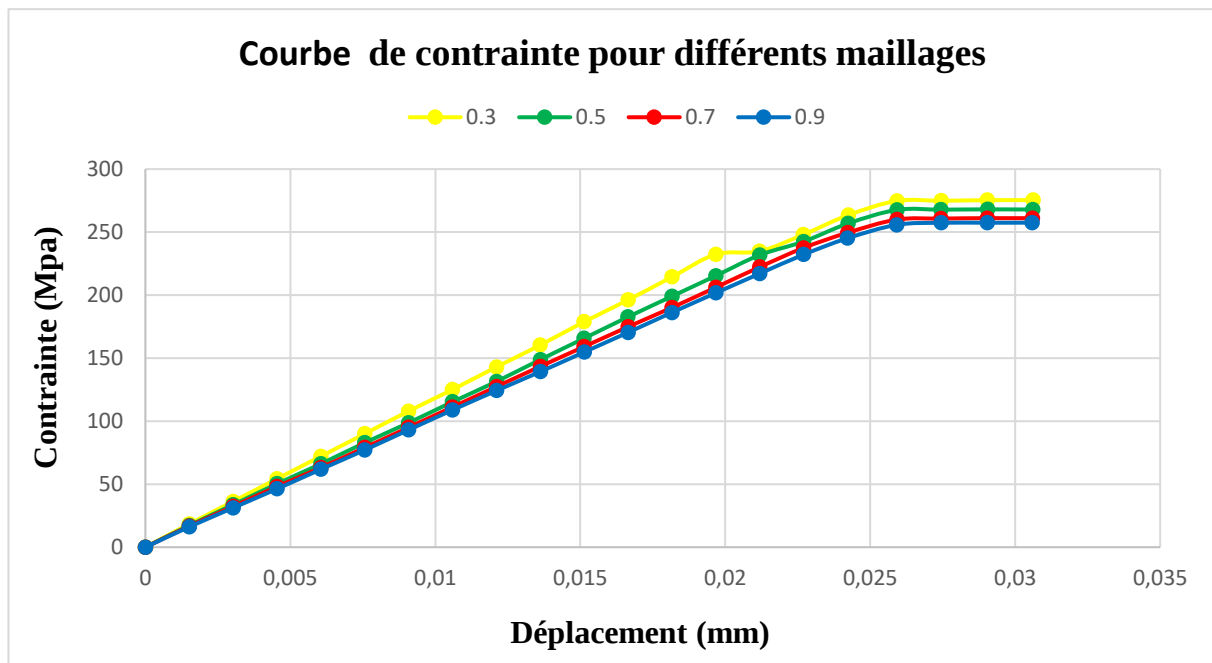


Figure III.7 : Courbe de contrainte pour différents maillages.

Après avoir analysé la figure III.7, on note que la limite élastique pour le maillage de 0,9 mm est de 255,79 MPa, pour le maillage de 0,7 mm la limite élastique est de 259,98 MPa, pour le maillage de 0,5 mm elle est de 267,7 MPa, et pour le dernier maillage de 0,3 mm, la limite élastique est égale à 232,35 MPa.

Nous concluons de ces résultats que plus la taille des éléments diminue, plus la valeur de la contrainte augmente, et cette valeur converge vers la bonne valeur. Par conséquent, la taille d'élément que nous choisirons pour notre simulation est de 0,3 mm. Nous ne pouvons pas choisir une taille d'élément inférieure à celle-ci, car cela nécessite un ordinateur puissant.

Avec un maillage de 0,3 mm, il y a 104 238 éléments, et le temps nécessaire pour terminer la simulation est de 10 heures et 20 minutes.

III.5. SIMULATION DES DIFFERENTS ETUDES :

La dernière étape consiste à démarrer la simulation. Les étapes de simulation sont les suivantes :

- Importer la géométrie (éprouvette plat, V, X, U ...).
- Définir le métal de base (S235 JR).
- Définir le métal d'apport (E6013 / ER70S-3 / E71TGS).
- Déterminer la valeur de la vitesse de déplacement
- Application le déplacement 0.03 mm.
- Application de maillage de 0.3 mm.
- Résolve les résultats.

III.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation ANSYS Mechanical et exploré en détail la modélisation numérique de différents éprouvettes avec ANSYS, en mettant particulièrement l'accent sur la sélection des paramètres essentiels. Nous avons examiné comment ces choix influencent directement la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre présente les résultats de nos simulations numériques portant sur quatre aspects essentiels : l'épaisseur des éprouvettes, les différents métaux d'apport de soudage, les types de joints de soudage et les angles de joints soudés. Chaque paramètre a été étudié pour évaluer son impact sur la performance et la résistance des structures analysées. Ces résultats fournissent une analyse détaillée des comportements observés, dans le but de déterminer et de conclure les choix les plus appropriés à appliquer dans la réalité.

IV.2. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHOIX DU METAL D'APPORT :

Afin de connaître l'effet des différents métaux d'apport, nous avons étudié trois types différents de métaux d'apport. Le premier est le E6013, utilisé dans le soudage à l'électrode enrobée, le deuxième est le E71TGS, utilisé dans le soudage MIG, et le dernier est le ER70S-3, utilisé dans le soudage TIG. Après la simulation, nous avons collecté les résultats dans une courbe présentée à la figure IV.1, et les figures IV.2, IV.3 et IV.4 montrent la concentration des contraintes dans l'éprouvette.

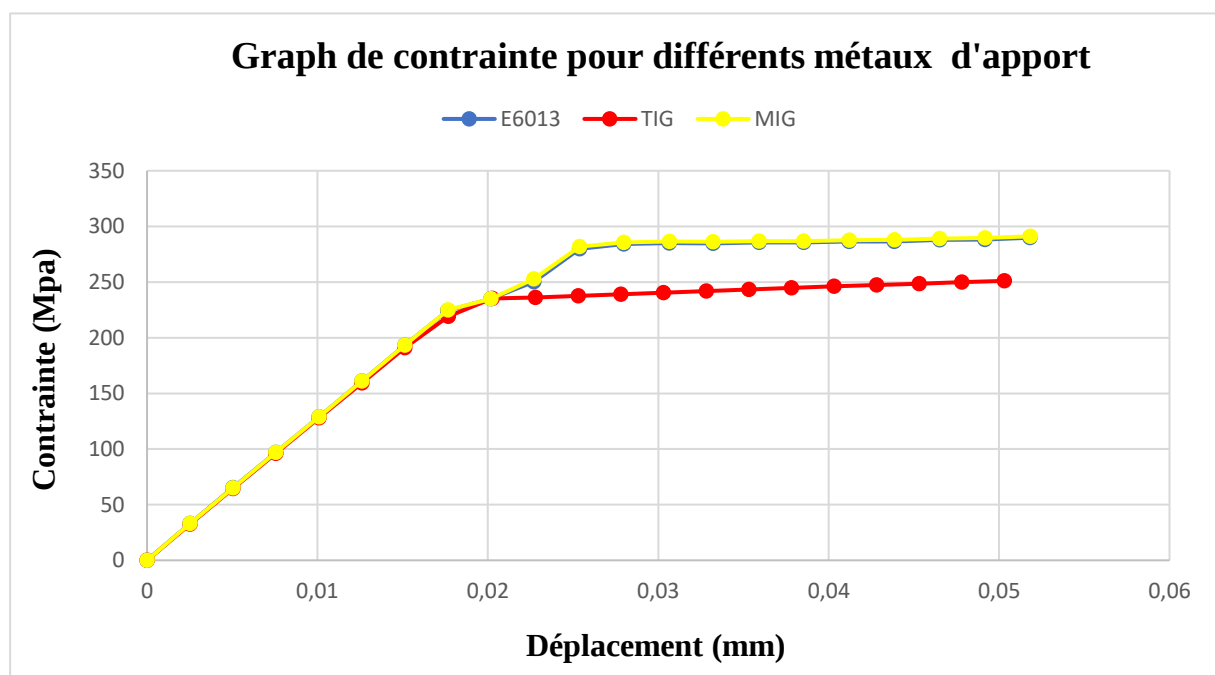


Figure IV.1 : Graph de contrainte pour différents métaux d'apport.

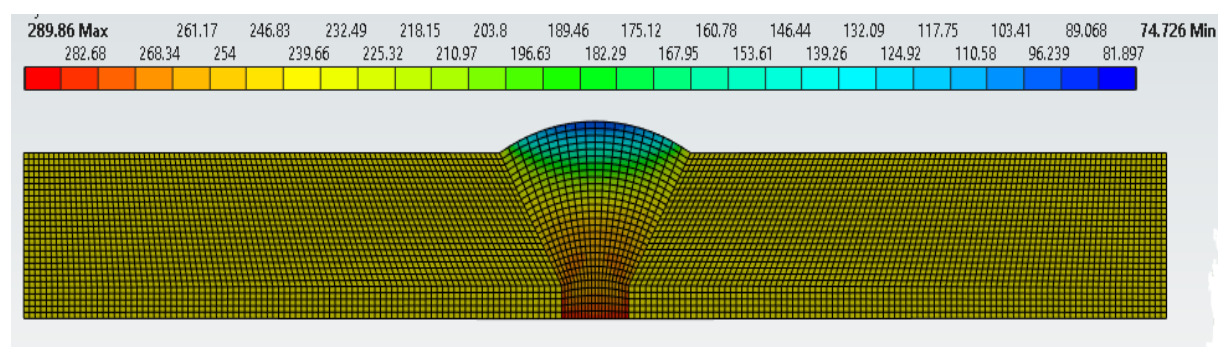


Figure IV.2 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport E6013.

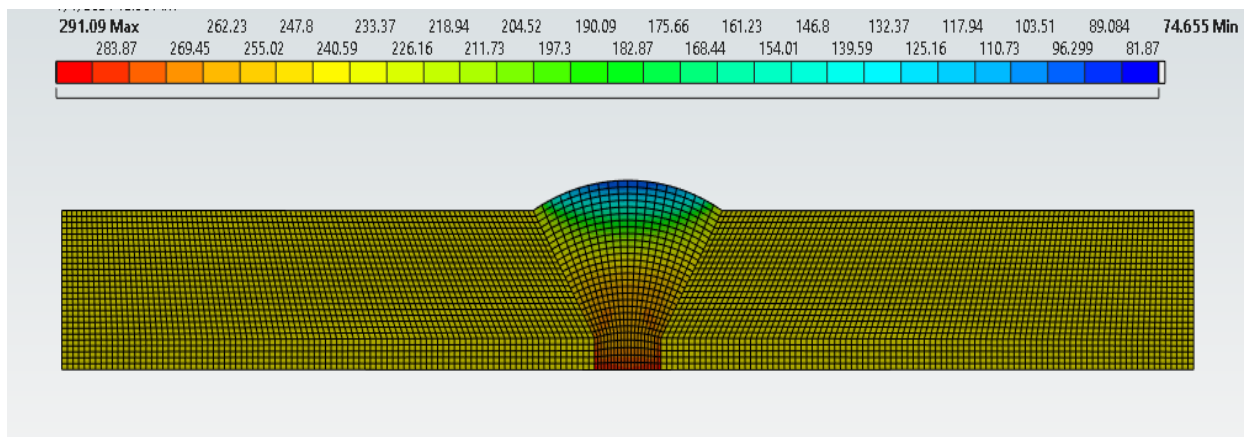


Figure IV.3 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport E71TGS.

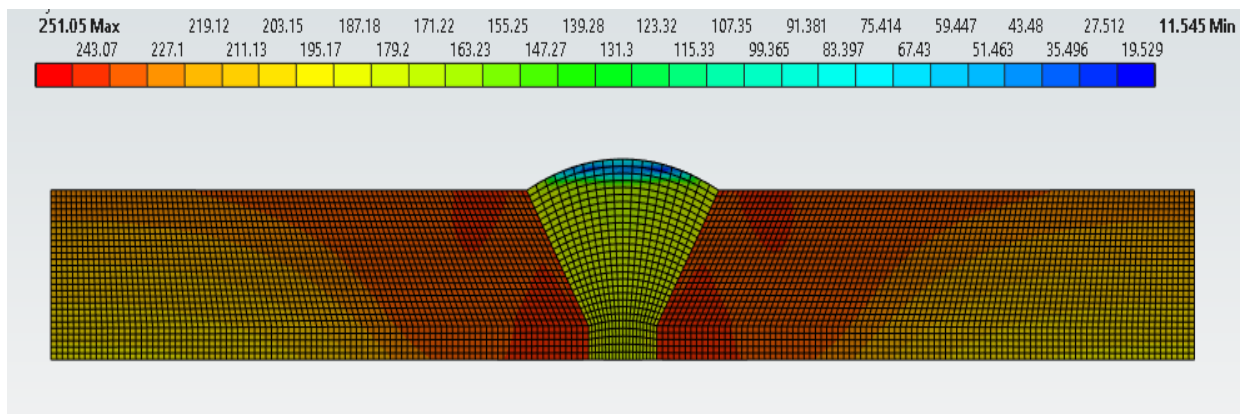


Figure IV.4 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec le métal d'apport ER70S-3.

Après avoir analysé les figures IV.2, IV.3 et IV.4, nous faisons les observations suivantes :

- Lors de l'utilisation des métaux d'apport E6013 et E71TGS, nous remarquons que la concentration des contraintes se produit principalement dans la racine du métal fondu.
- Lors de l'utilisation du métal d'apport ER70S-3, la concentration des contraintes se fait dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

La figure IV.1 représente l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement jusqu'à la limite élastique des éprouvettes soudées, et nous observons ce qui suit :

- Les résultats pour les soudures réalisées avec E6013 et E71TGS sont très proches, puisque la limite élastique maximale est estimée à 281,73 MPa, avec un déplacement de 0,025 mm.
- Initialement, les valeurs de contrainte pour le soudage avec ER70S-3 étaient proches de celles des deux autres métaux, mais la limite élastique était inférieure, étant estimée à 235,08 MPa, avec un déplacement de 0,02 mm.

IV.3. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHOIX DU JOINT DE SOUDURE :

L'étude de l'effet du changement de joint de soudure revêt une importance cruciale dans l'industrie. La qualité et la durabilité des soudures sont directement influencées par le type de joint utilisé, ce qui peut affecter non seulement la solidité structurelle mais aussi la performance globale du produit final. C'est pourquoi nous avons simulé différents types de joints soudés représentés dans les figures IV.5 jusqu'à IV.10 afin de déterminer quel est le meilleur choix.

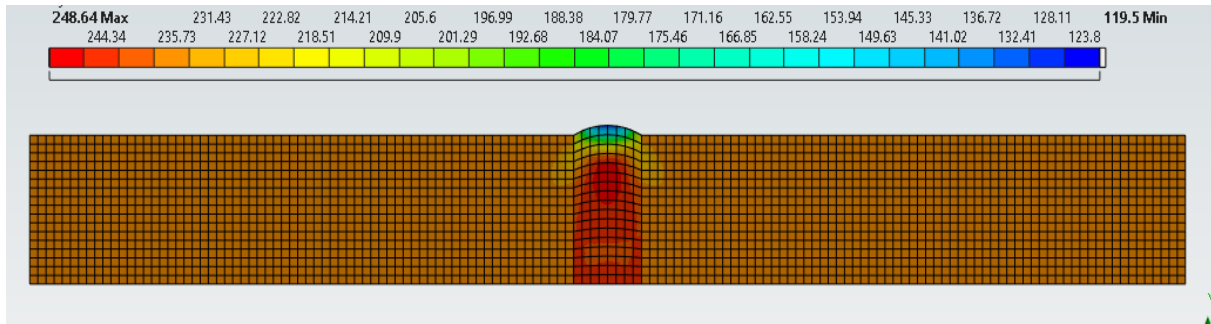


Figure IV.5 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat.

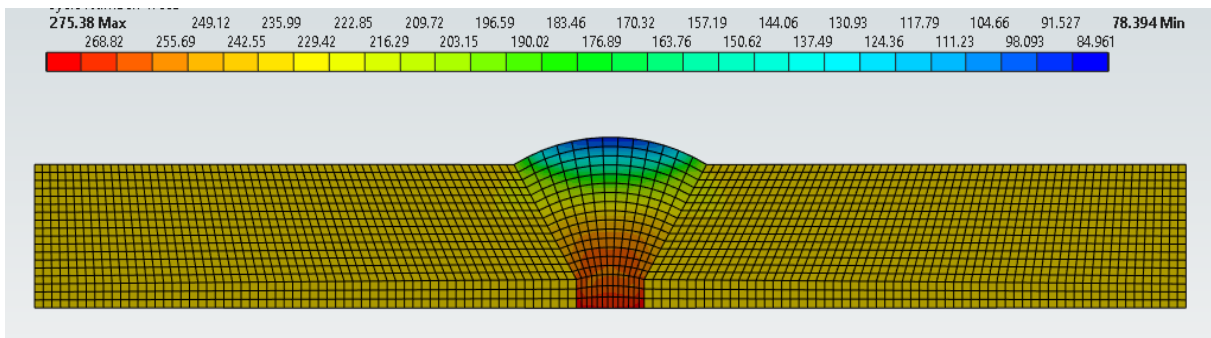


Figure IV.6 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en V.

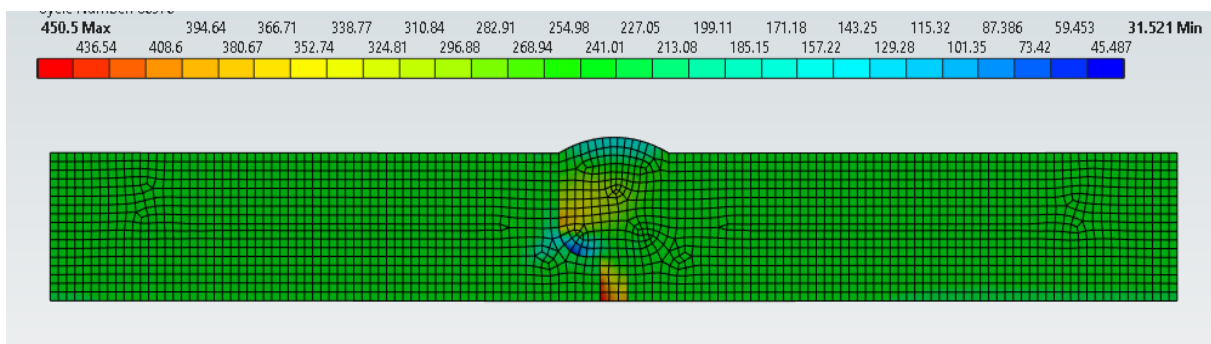


Figure IV.7 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en U.

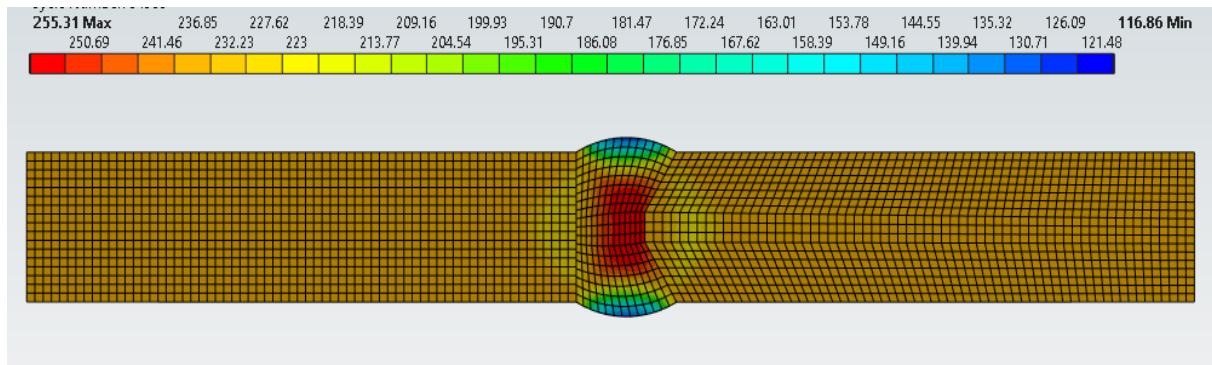


Figure IV.8 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en K.

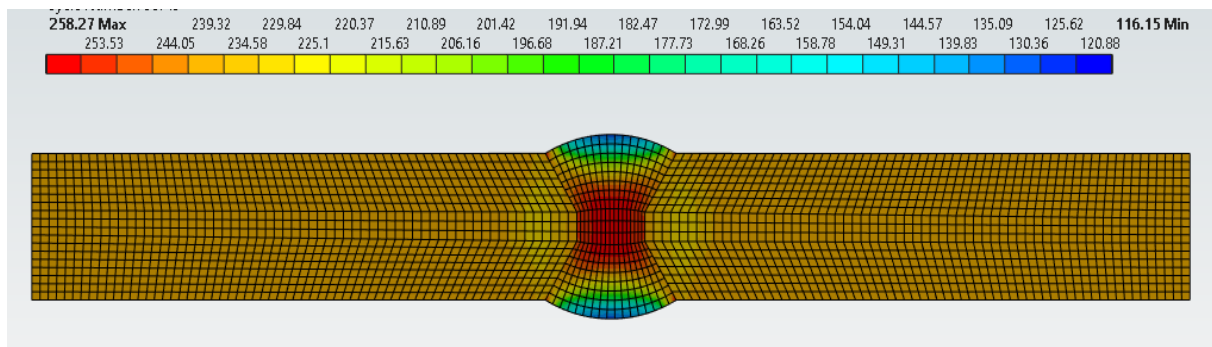


Figure IV.9 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en X.

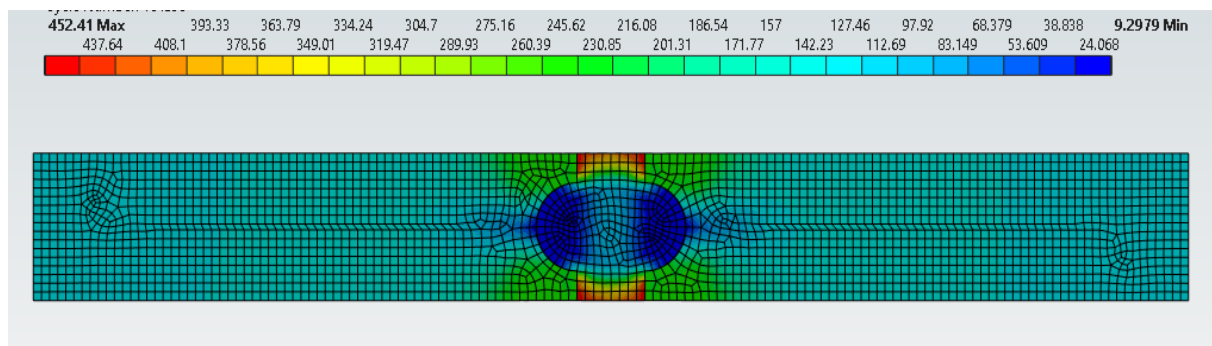


Figure IV.10 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure en O.

Après avoir analysé les figures ci-dessus, nous constatons les observations suivantes :

- Lors du soudage avec un joint plat, les contraintes sont concentrées au centre du métal fondu.
- Avec un joint en V, la concentration des contraintes se situe dans la racine du métal fondu.
- Pour un joint en U, la concentration des contraintes se fait également dans la racine du métal fondu.
- Dans le cas d'un joint K, la concentration des contraintes se trouve au centre du métal fondu.
- Lors du soudage avec un joint en X, les contraintes sont concentrées au centre du métal en fusion.

- Enfin, pour un joint O, la concentration des contraintes est située au-dessus et à la racine du métal fondu.

Pour évaluer la différence de contrainte entre les différents types de joints de soudure, nous avons regroupé les résultats dans une courbe présentée dans la figure IV.11.

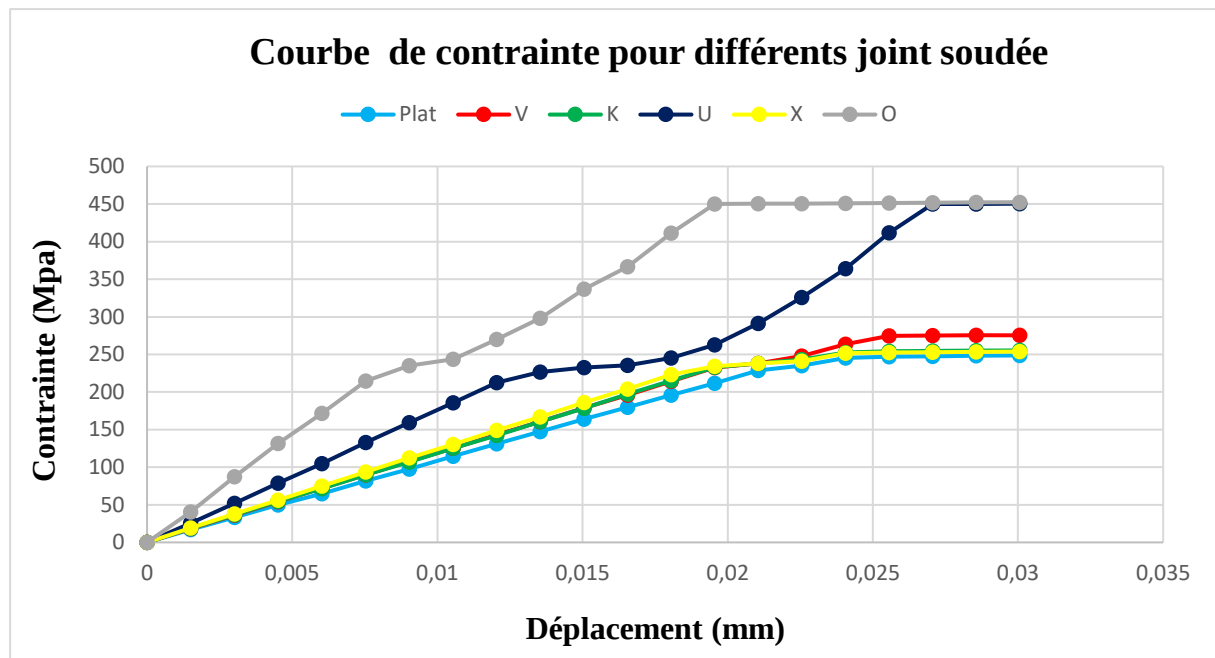


Figure IV.11 : Courbe de contrainte pour différents joint soudée.

- Sur la figure IV.11, nous remarquons que la plus grande valeur de la limite élastique est obtenue lors du soudage avec un joint O, estimée à 450 MPa avec un déplacement de 0,019 mm.

- La deuxième courbe correspond au soudage avec un joint U, où la limite élastique est de 449,9 MPa avec un déplacement de 0,027 mm.

- Ensuite, trois courbes présentent des résultats similaires : le soudage avec un joint V, K et X. La comparaison se fait en deux parties :

- La première partie, allant du déplacement de 0 mm à 0,021 mm, montre que la contrainte de soudage avec un joint X est la plus élevée, suivie par les joints V et K, qui ont des valeurs presque identiques. À partir du déplacement de 0,021 mm, une nouvelle comparaison commence.
- Dans la deuxième partie, la contrainte du soudage avec un joint V devient la plus élevée, avec une limite élastique estimée à 274,82 MPa. Ensuite, le joint K suit avec une limite élastique de 254,23 MPa, et enfin, le joint X avec une limite élastique de 252,7 MPa et un déplacement de 0,025 mm.

- Enfin, le soudage avec un joint plat présente la plus faible limite élastique, estimée à 252,7 MPa avec un déplacement de 0,025 mm.

IV.4. ÉTUDE DE L'EFFET DU CHANGEMENT DE L'ÉPAISSEUR DES ÉPROUVETTES :

L'étude de l'effet du changement d'épaisseur des éprouvettes dans le domaine du soudage est essentielle pour comprendre comment les variations dimensionnelles influencent la qualité et la résistance des soudures. Cette analyse vise à examiner de manière approfondie l'impact de l'épaisseur des éprouvettes sur les propriétés mécaniques et la résistance des joints soudés.

IV.4.1. L'effet du changement de l'épaisseur des éprouvettes avec joint plat :

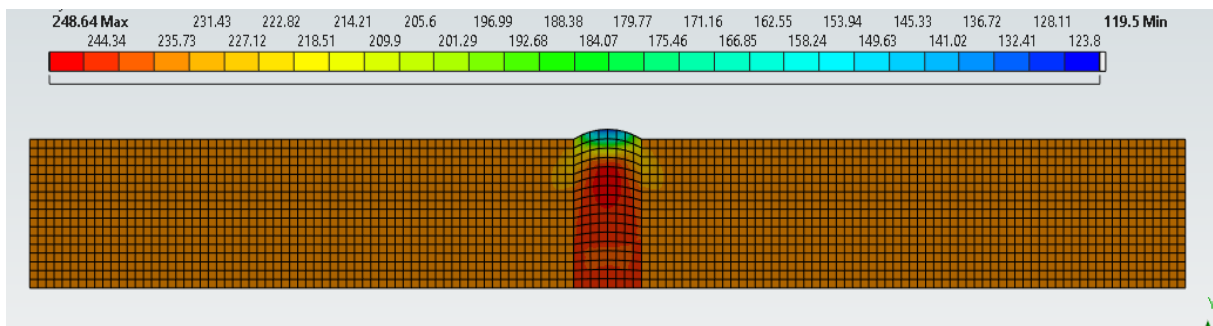


Figure IV.12 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 5 mm d'épaisseur.

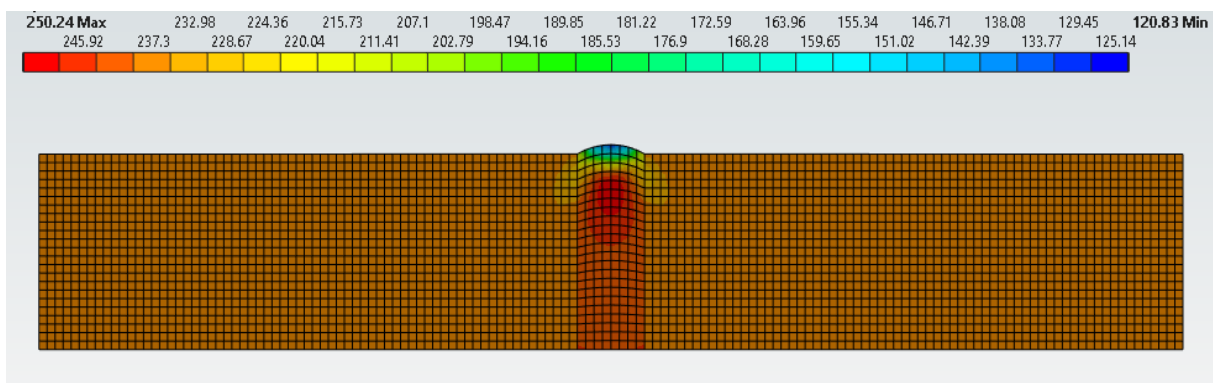


Figure IV.13 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 7 mm d'épaisseur.

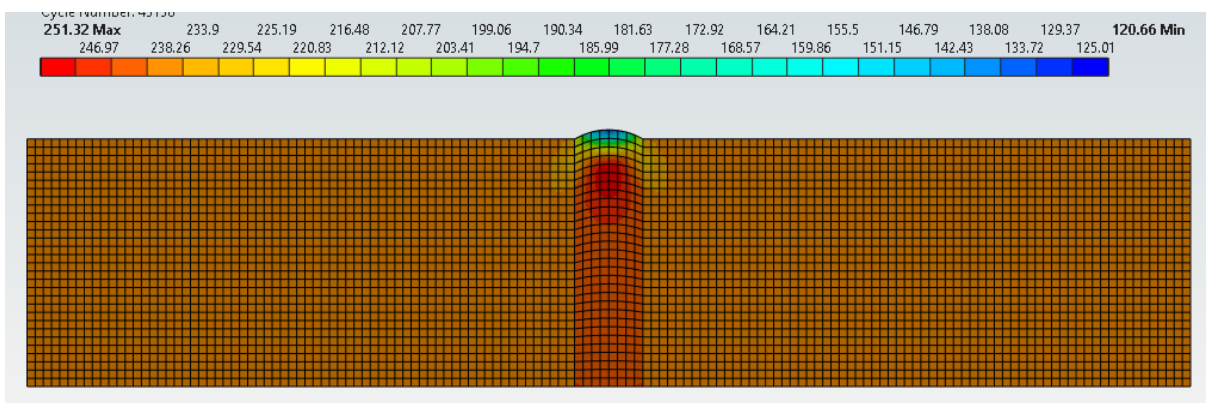


Figure IV.14 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint de soudure plat et 9 mm d'épaisseur.

On remarque que la contrainte est concentrée au centre du métal fondu dans l'éprouvette d'une épaisseur de 5 mm. Quant aux éprouvettes d'épaisseurs 7 mm et 9 mm, la contrainte est concentrée au-dessus du centre du métal fondu.

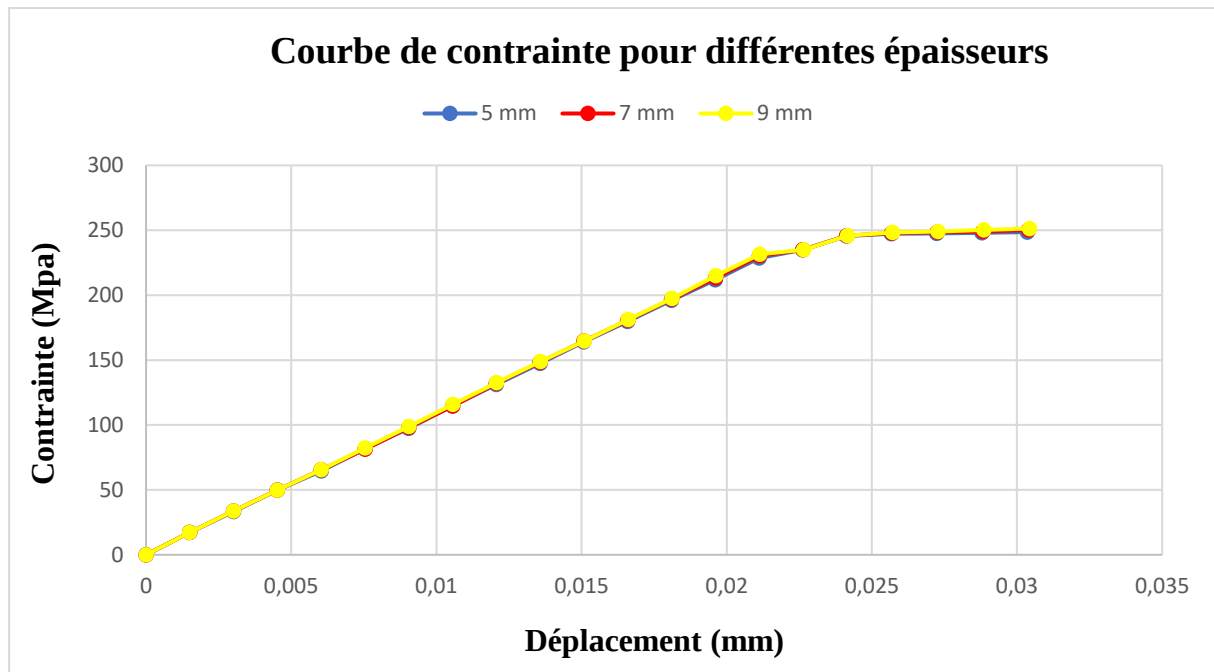


Figure IV.15 : Courbe de contrainte pour différentes épaisseurs avec joint plat.

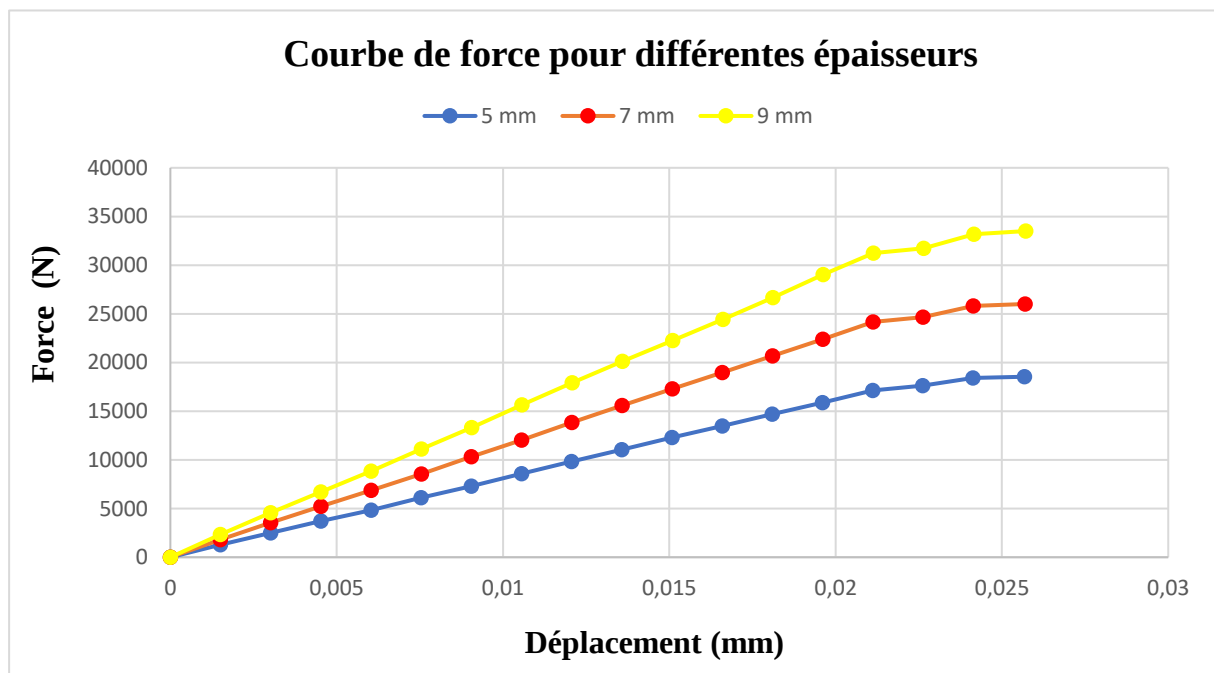


Figure IV.16 : Courbe de force pour différentes épaisseurs avec joint plat.

La figure IV.15 montre comment les contraintes évoluent avec l'augmentation du déplacement pour différentes épaisseurs. On observe que les résultats des contraintes pour les différentes épaisseurs sont similaires, avec des limites élastiques estimées à 247,2 MPa, 247,74 MPa et 248,18 MPa respectivement pour les épaisseurs de 5 mm, 7 mm et 9 mm.

Après analyse de la courbe de force représentée dans la figure IV.16, nous remarquons que la plus grande force est appliquée à l'éprouvette de 9 mm d'épaisseur, avec une valeur de la limite élastique estimée à 33 504,3 N. Ensuite, pour l'éprouvette de 7 mm d'épaisseur, la force appliquée est de 26 012,7 N. Enfin, la force la plus faible est appliquée à l'éprouvette de 5 mm, estimée à 18 540 N, avec un déplacement de 0,025 mm pour les trois épaisseurs.

IV.4.2. Effet du changement de l'épaisseur des éprouvettes avec joint V :

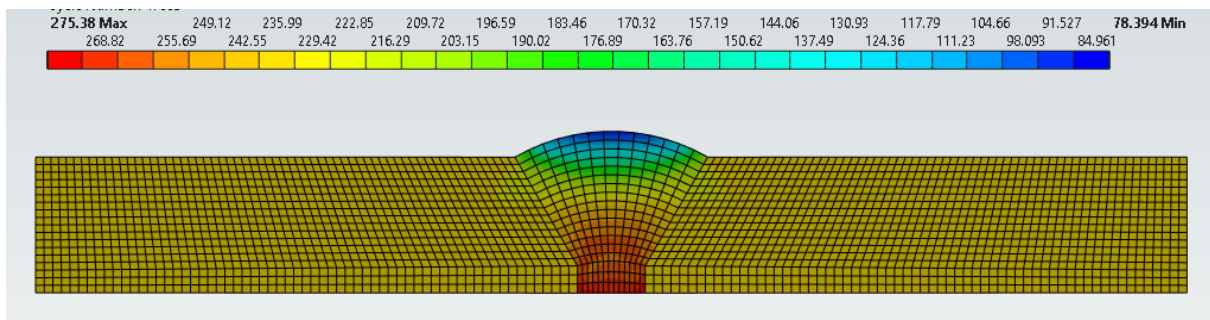


Figure IV.17 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 5 mm d'épaisseur.

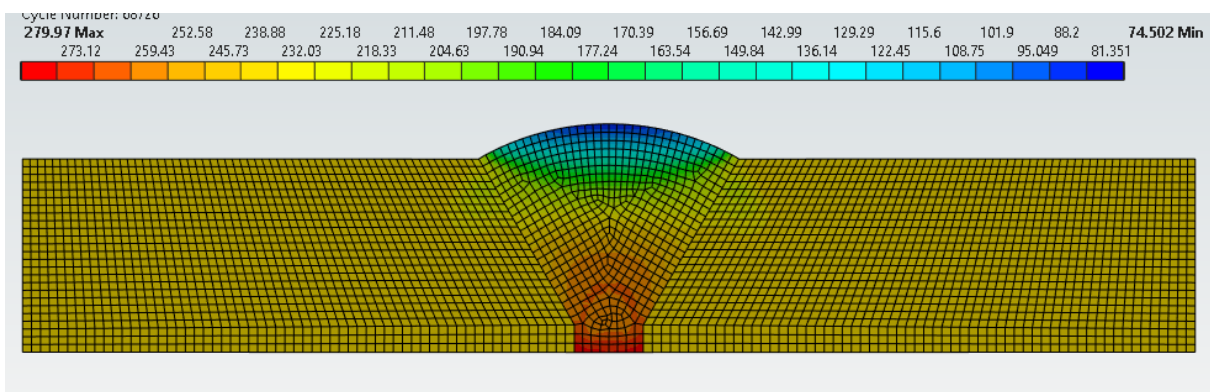


Figure IV.18 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 7 mm d'épaisseur.

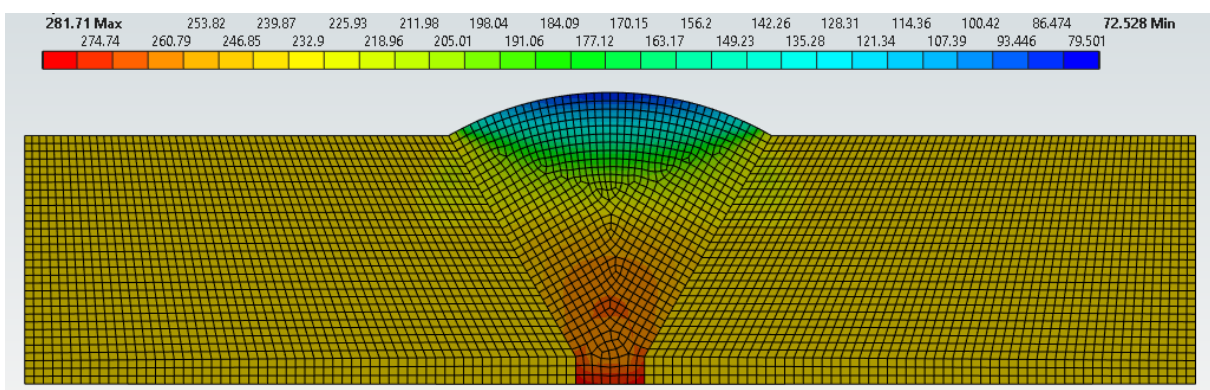


Figure IV.19 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un joint V et 9 mm d'épaisseur.

À partir des figures IV.17, IV.18 et IV.19, on observe que les contraintes se concentrent au même endroit, indépendamment de l'épaisseur des éprouvettes, à savoir à la racine du métal fondu.

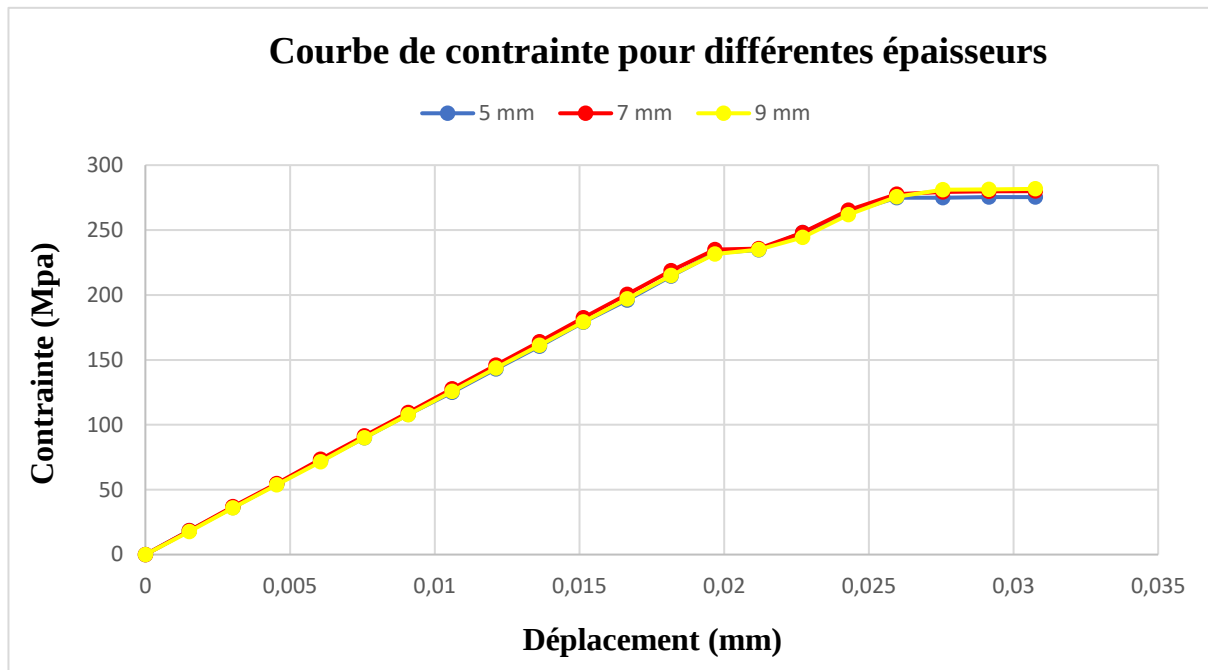


Figure IV.20 : Courbe de contrainte pour différentes épaisseurs avec joint en V.

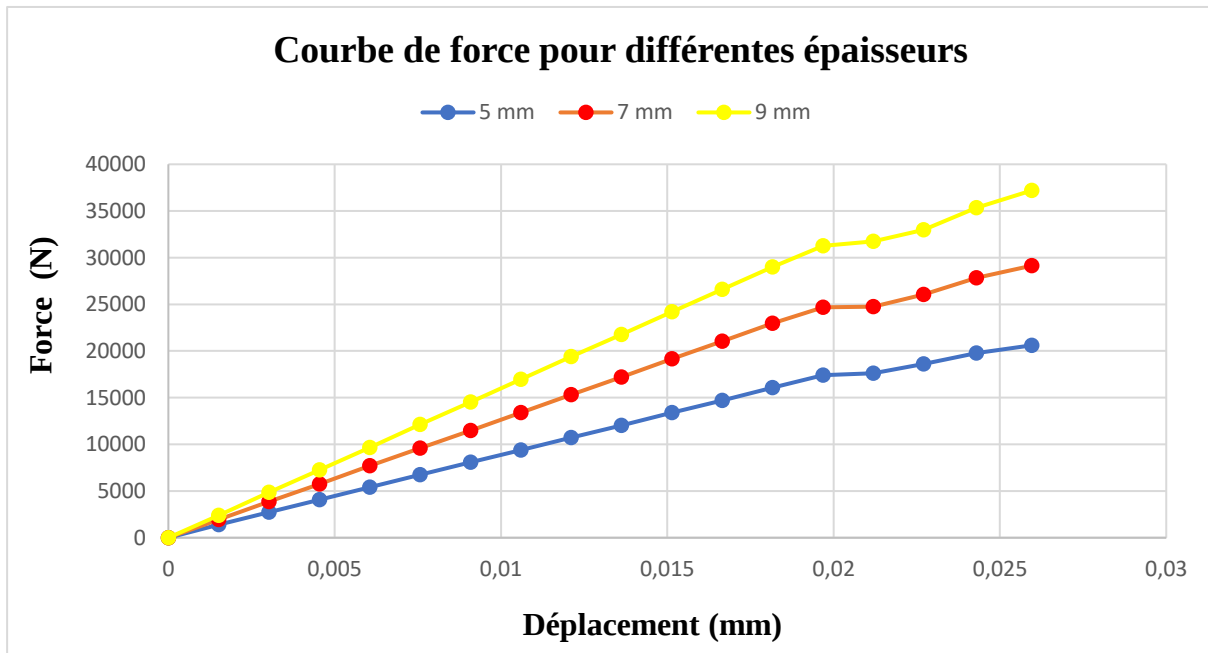


Figure IV.21 : Courbe de force pour différentes épaisseurs avec joint en V.

La figure IV.20 illustre l'évolution des contraintes en fonction de l'augmentation du déplacement pour différentes épaisseurs. On constate que les résultats des contraintes étaient proches pour les épaisseurs de 5 mm, 7 mm et 9 mm, et le tableau IV.1 montre les résultats extraits des figures IV.20 et IV.21.

Tableau IV.1 : Tableau représentant les résultats des figures IV.20 et IV.21

Épaisseur (mm)	5	7	9
Déplacement (mm)	0.026	0.026	0.026
Limite élastique (Mpa)	274.82	277.56	275.58
Force (N)	20611.5	29143.8	37203.3

On remarque donc que la force augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, mais la contrainte reste approximativement la même valeur.

IV.5. ÉTUDE L'EFFET DU CHANGEMENT DE L'ANGLE DU JOINT DE SOUDURE :

L'angle du joint de soudure joue un rôle crucial dans la qualité et la performance des soudures métalliques. Ce paramètre influence directement la distribution des contraintes, ainsi que la résistance mécanique de la structure soudée. Dans ce chapitre, nous explorons l'impact significatif du changement de l'angle du joint de soudure sur divers aspects de la soudure. Et nous analysons et discutons des résultats obtenus à partir de différentes simulations.

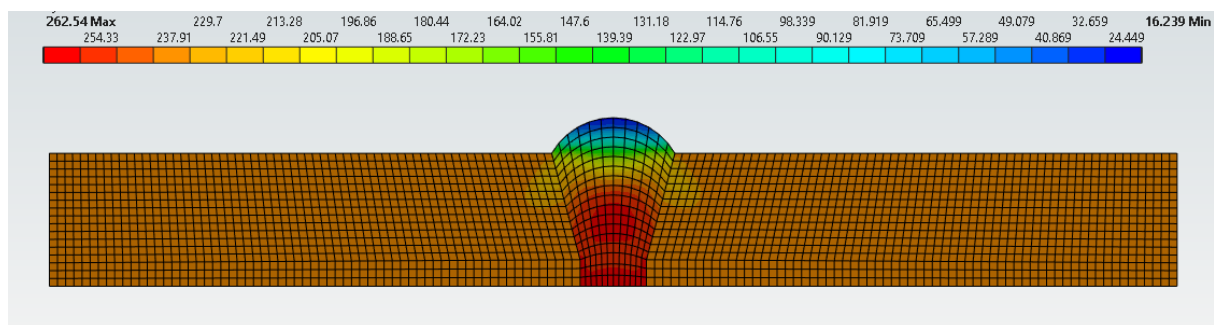


Figure IV.22 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 30°.

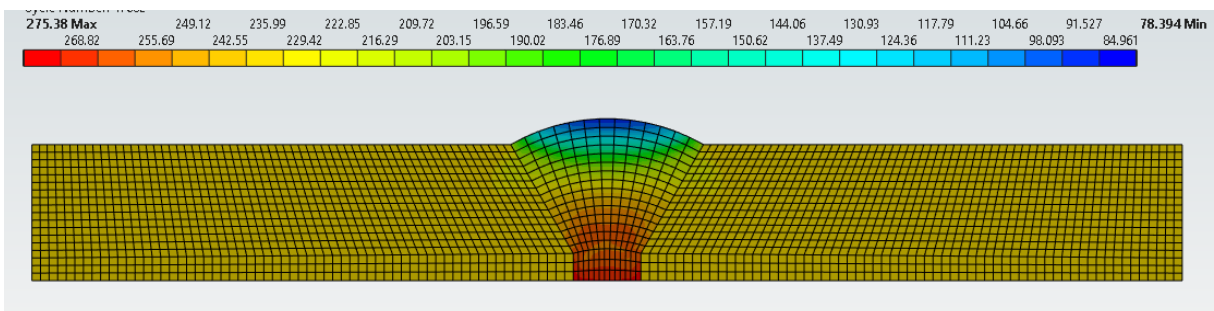


Figure IV.23 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 60°.

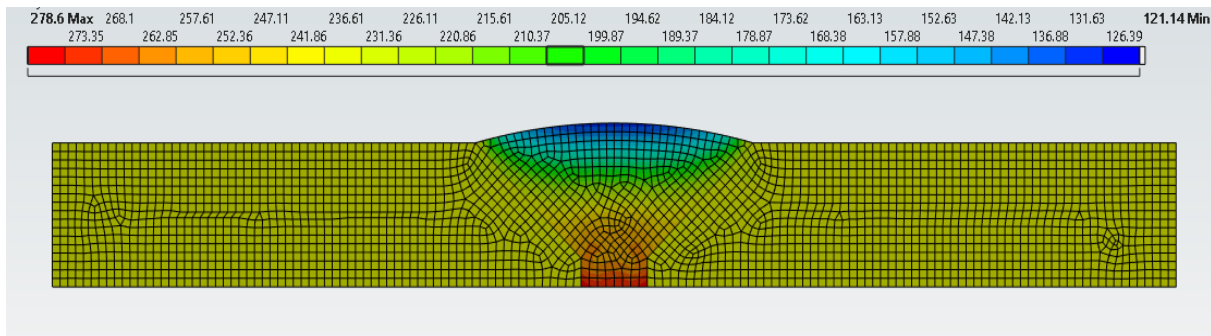


Figure IV.24 : Concentration de contrainte dans l'éprouvette avec un angle de 90° .

À partir de figure IV.22, IV.23 et IV.24 on observe que les contraintes se concentrent au centre du métal fondu avec un angle de 30° , mais avec l'angle 60° et 90° la contrainte est concentrée à la racine du métal fondu.

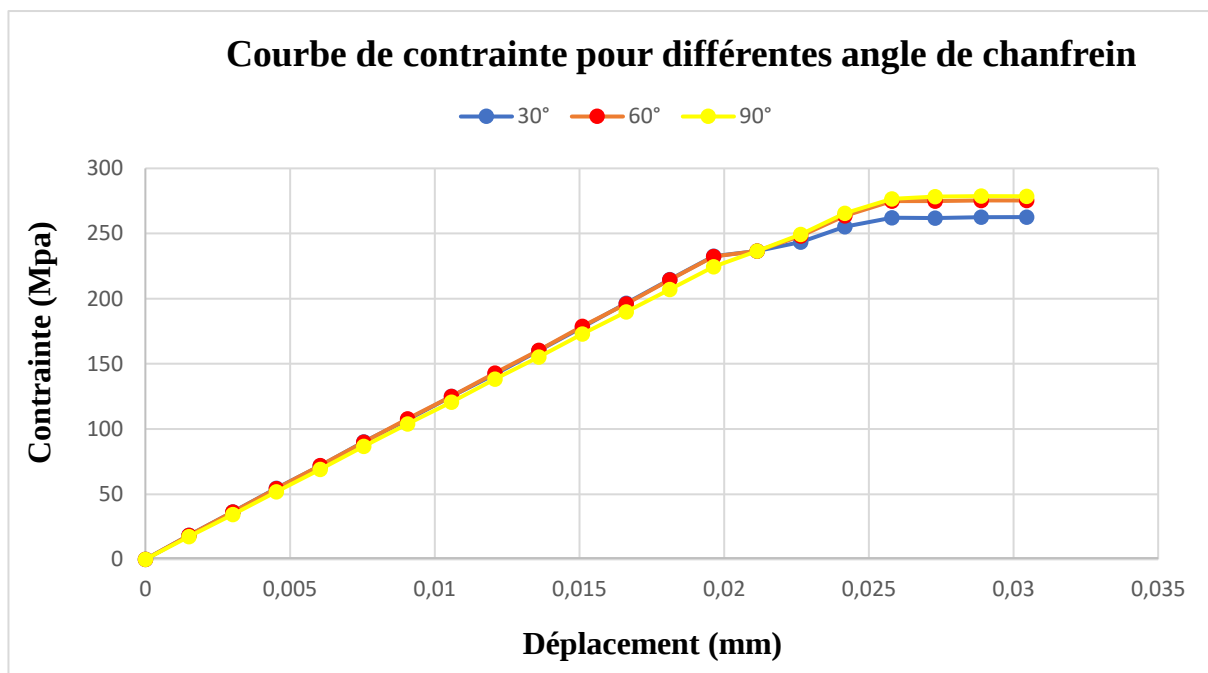


Figure IV.25 : Courbe de contrainte pour différents angles de chanfrein.

Après avoir analysé la courbe de la figure IV.25, nous remarquons que les résultats des contraintes pour les trois angles sont proches, et la comparaison sera faite en trois parties :

- Le déplacement est inférieur de 0.021 mm : dans ce cas, les angles de 30° et 60° montrent des résultats similaires, tandis que l'angle de 90° présente des résultats inférieurs par rapport aux autres.
- Le déplacement est de 0.021 mm : dans ce cas, les résultats de contrainte pour les trois angles sont les mêmes

- Le déplacement est supérieur de 0.021 mm : dans ce cas, la contrainte est la plus grande pour l'angle de 90°, avec une limite élastique de 276.71 MPa, suivie par l'angle de 60° avec une limite élastique de 274.82 MPa, et enfin la contrainte la plus faible est observée pour l'angle de 30°, avec une limite élastique estimée à 262.2 MPa.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail vise à analyser numériquement l'effet de la forme du joint soudé sur le comportement mécanique des pièces soudées. Après avoir simulé l'essai de traction de différentes pièces avec le programme ANSYS Mechanical et étudié l'effet de plusieurs paramètres mécanique notamment, le métal d'apport, la chanfrein, l'épaisseur des pièces soudés et l'angle de soudage afin de conclure ces effets sur les différents résultats. Au final, nous avons conclu ce qui suit :

- La valeur de déplacement appropriée doit être choisie en fonction du type d'étude que l'on souhaite. Dans notre cas, nous avons choisi un déplacement estimé à 0,03 mm car notre étude était dans la zone élastique.
- Le facteur temps n'a aucun effet sur le comportement mécanique des joints soudés. Peu importe son augmentation ou sa diminution, cela ne modifie pas les résultats obtenus.
- Plus la valeur du maillage est petite, plus les résultats de la simulation seront précis, mais la durée de la simulation augmentera et un ordinateur plus puissant sera nécessaire.
- Le type de métal d'apport a un impact significatif sur le comportement mécanique des joints soudés. Dans notre étude, les métaux E6013 et E71TGS se sont avérés être les meilleurs choix.
- Le type de joint de soudure influe sur le comportement mécanique des joints soudés, les joints U et O sont plus résistantes que celles avec des joints V, X et K et le joint plat c'est le moins résiste.
- L'épaisseur influe sur le comportement mécanique des joints soudés, Plus l'épaisseur est grande, plus l'application de forces est importante.
- L'angle du joint de soudure influe sur le comportement mécanique des joints soudés, Plus l'angle de soudage est élevé, plus il est résistant.

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance cruciale de la forme du joint soudé dans le domaine du soudage. À travers une analyse numérique approfondie, nous avons pu observer comment différentes configurations de joints influencent significativement sur le comportement mécanique des pièces assemblées. Le choix judicieux de la forme du joint peut non seulement améliorer la résistance à la déformation des structures soudées, mais aussi garantir une qualité optimale et une durabilité accrue. Pour les praticiens et les chercheurs dans le domaine du soudage, cette étude offre des perspectives précieuses pour optimiser les processus de fabrication et assurer la fiabilité des structures métalliques assemblées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Bénissais "Le soudage", édition OPU - R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979
- [2] Jean-Michel Bergheau, Professeur des universités, Ecole d'ingénieurs de Saint-Étienne
Article : traité génie mécanique BM 7 758
- [3] Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). Welding metallurgy and weldability of stainless steels. 10-14
- [6] R. Varisellaz, « Soudage, éléments de conception et de réalisation » deuxième édition, Génie Mécanique, Dunod, Paris 1987.
- [7] Roland Cazes, technique de l'ingénieur soudage à l'arc, B7730, 10/08/1995.
- [12] Camille Routhier, Gilles Desjardins, Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage 2010
- [17] R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979
- [19] Imad Abbas,guide CND les techniques de contrôle non destructif de la soudure, Pôle d'Innovation nationale de l'Artisanat " Travail des Métaux "CFMICampus des métiers79200 Parthenay.Septembre 2009.

REFERENCES WEBOGRAPHIS

- [4] https://www.reddit.com/r/Welding/comments/1mzw5e/autogenous_weld/?rdt=62849
- [5] <https://medium.com/@social.nikitengineers/exploring-the-benefits-of-orbital-welders-nikit-engineers-robotic-welding-automation-solutions-in-a106f627ecbd>
- [8] <https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>
- [9] <https://www.agripartner.fr/le-choix-de-ses-equipements-de-soudure-p-101920>
- [10] <https://www.soudeurs.com/site/les-electrodes-enrobees-pour-le-soudage-leurs-caracteristiques-et-leurs-choix-444/>
- [11] <https://primeweld.com/blogs/news/welding-electrodes-welding-rod-sizes-and-uses>
- [13] https://esab.com/lv/eur_en/esab-university/blogs/mig-welding-techniques-advantages-and-applications/
- [14] <https://alroys.com/what-is-mig-welding-and-how-does-it-work/#:~:text=MIG%20welding%20uses%20a%20constant,weld%20pool%20from%20atmo spheric%20contamination.>
- [15] <https://www.rocdacier.com/cours-soudure-mig/>
- [16] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-procede-de-soudage-mig-mag-gmaw>
- [18] <https://alroys.com/what-is-mig-welding-and-how-does-it-work/#:~:text=MIG%20welding%20uses%20a%20constant,weld%20pool%20from%20atmo spheric%20contamination.>
- [20] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/le-soudage-tig-de-metaux#:~:text=Le%20TIG%20est%20souvent%20utilis%C3%A9,une%20meilleure%20ma%C3%A9trise%20du%20proc%C3%A9d%C3%A9.>
- [21] <https://www.isgroupe.com/fr/blog/le-soudage-tig-groupe-institut-de-soudure#:~:text=II.-,Principes%20du%20proc%C3%A9d%C3%A9%20TIG,de%20fusion%20et%20ses%20abords>
- [22] <https://www.har-tech.com/soudage-tig/>
- [23] <https://www.tra-c.com/fr/article/soudage-tig/>
- [24] https://fr.freepik.com/vecteurs-premium/5-types-joints-soudage-procedes-soudage-type-ange-soudage-filet_95277546.htm
- [25] <https://www.arccaptain.com/blogs/article/different-types-of-welds-and-joints>
- [26] <https://austech.nc/wp-content/uploads/2017/06/Positions-de-soudage.pdf>
- [27] <https://vector-welding.fr/position-de-soudage-explication/>
- [28] <https://www.systemweld.com/guide-position-de-soudage/>
- [29] <https://www.axxair.com/fr/blog/differentes-positions-de-soudage-orbital>

- [30]https://www.melody-in-blues.org/downloads/D%C3%A9fautes%20de%20Soudure%201032_01_06_chap6.pdf
- [31] <https://pdfcoffee.com/ogec-defauts-de-soudure-fissures-pdf-free.html>
- [32]<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/8367/8367-les-principaux-defauts-et-risques-lies-au-soudage-ensps.pdf>
- [33]<https://www.arccaptain.com/fr/blogs/article/weld-defects#:~:text=Il%20existe%20plusieurs%20causes%20d,une%20vitesse%20de%20soudage%20incorrecte.>
- [34]<https://welding.org.au/articles/the-seven-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>
- [35] <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-welding-defects/>
- [36]<https://www.controle-visuel.com/controle-soudures/quels-defauts-controle-visuel-soudures/>