

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Genie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : Technologie
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Construction Mécanique
Thème

**Impact du soudage sur les propriétés mécaniques des joints
en C48.**

Présenté Par :

- 1) M. SIBACHIR Abderrahmane
- 2) M. BENDAHMANE Youcef

Devant le jury composé de :

Dr. BAHRAM Kaddour	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BELGHOUL Hakima	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatris
Dr. CHERIET Nour EL HOUDA	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Au terme de ce travail, avons toute chose, je remercie ALLAH, le tout puissant, pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience.

Le présent mémoire a été dirigé par **Madame CHERIET Nour EL HOUDA**, Maître Assistant « B » à l'université Belhadj Bouchaib –Ain Temouchent- C'est grâce à elle, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu le finaliser. J'exprime mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements.

Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury le Président **Mr. BAHRAM Kaddour** qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance ainsi qu'au **Dr. BELGHOUL Hakima** d'avoir accepté d'examiner notre travail, Je tiens à remercier tous mes professeurs pour leurs connaissances qu'ils ont données tous les cinq ans sans ennui.

Merci à vous tous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A Mon Père qui m'a toujours guidé et soutenu

A Ma Mère qui a été toujours à mes côtés

A Tous La Famille

A tous Mes amis Sans exception

ملخص

تقدم هذه الدراسة تحليلاً باستخدام برنامج (ABAQUS) لدراسة السلوك الميكانيكي لعينة شد ملحومة مصنوعة من مادة الحديد (C48)

تُحلل هذه الدراسة السلوك الميكانيكي لتجميع ملحوم من خلال الجمع بين النمذجة بالعناصر المنتهية (MEF) تحت أحمال ساكنة باستخدام برنامج (ABAQUS) وأحمال دورية باستخدام (AFGROW). يهدف البحث إلى تحديد المناطق الحرجة، ولا سيما منطقة التأثير الحراري (ZAT)، وتقييم تأثيرها على المقاومة الميكانيكية. تكشف النتائج أن منطقة ZAT تُظهر تركّزات عالية للإجهادات، وتشوهات بلاستيكية، وتلفاً يتجاوز بكثير ما هو موجود في المعدن الأساسي، مما يجعلها المنطقة الأكثر عرضة للفشل. كما تم الكشف عن تدرجات موضعية في الإجهاد داخل هذه المنطقة، مما يؤكد تأثير التباينات الميكروهيكلية الناتجة عن عملية اللحام. تؤكد هذه الملاحظات على أهمية تحسين التصميم وعمليات اللحام بهدف تقليل تركّزات الإجهاد في منطقة ZAT، وبالتالي تعزيز متانة التجميعات الملحومة.

الكلمات المفتاحية: اللحام، السلوك الميكانيكي، MEF، ZAT، الإجهادات، التشوه البلاستيكي، التعب، ABAQUS، AFGROW.

Résumé

Cette étude analyse le comportement mécanique d'un assemblage soudé en combinant une modélisation par éléments finis (MEF) sous chargements statiques (via ABAQUS) et cycliques (via AFGROW). L'objectif est d'identifier les zones critiques, notamment la zone affectée thermiquement (ZAT), et d'évaluer leur impact sur la résistance mécanique. Les résultats révèlent que la ZAT présente des concentrations de contraintes, des déformations plastiques et un endommagement bien supérieur à ceux du métal de base, en faisant la région la plus vulnérable. Des gradients de contraintes localisés y ont également été détectés, confirmant l'influence des hétérogénéités microstructurales induites par le soudage. Ces observations soulignent l'importance d'optimiser la conception et le procédé de soudage pour atténuer les concentrations de contraintes dans la ZAT, améliorant ainsi la durabilité des structures soudées.

Mots-clés : Soudage, comportement mécanique, MEF, ZAT, contraintes, déformation plastique, fatigue, ABAQUS, AFGROW.

Abstract

This study analyzes the mechanical behavior of a welded assembly by combining finite element modeling (FEM) under static loading (via ABAQUS) and cyclic loading (via AFGROW). The objective is to identify critical zones—especially the heat-affected zone (HAZ)—and assess their impact on mechanical strength. The results reveal that the HAZ exhibits stress concentrations, plastic deformations, and damage significantly higher than those in the base metal, making it the most vulnerable region. Localized stress gradients were also detected there, confirming the influence of microstructural heterogeneities induced by welding. These observations emphasize the importance of optimizing welding design and process to mitigate stress concentrations in the HAZ, thereby improving the durability of welded structures.

Keywords: Welding, mechanical behavior, FEM, HAZ, stress, plastic deformation, fatigue, ABAQUS, AFGROW.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Sommaire</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : Procédés de soudage et interactions métallurgiques</i>	3
1. Introduction :.....	4
2. Définition et principes du soudage :	4
2.1. Le soudage autogène :.....	4
2.2. Le soudage hétérogène :.....	5
3. Les différents procédés de soudage.....	6
3.1. Soudage à l'arc électrique :.....	6
3.2. Soudage par résistance électrique :	9
3.3. Soudage Laser :	12
3.4. soudage au chalumeau:.....	13
4. Effets thermiques du soudage	18
4.1. Cycle thermique du soudage :	18
4.2. Zone affectée thermiquement (ZAT).....	20
5. Impact du soudage sur la microstructure de l'acier :	20
5.1. Défauts liés au soudage :.....	20
6. Conclusion :	23
<i>Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux</i>	25
1. Introduction.....	26
2. Propriétés mécaniques des métaux :.....	26
3. Les essais mécaniques :.....	27
3.1. Essais de traction :.....	27
3.2. Essai de fatigue	40
4. Conclusion.....	51
<i>Chapitre III :simulation numérique</i>	52
1. Introduction :.....	53
2. Présentation des logiciels :.....	53

2.1. ABAQUS :	53
2.2. AFGROW :	54
3. Simulation Numérique de soudage (Détails, Étapes et Analyse Approfondie.)	55
3.1. la simulation de l'essais de traction :	55
3.2. Essais de fatigue :	61
4. Résultats et discussion :	64
4.1. Résultats d'essais de traction :	64
4.2. Résultats de la simulation de l'essai de fatigue	68
Conclusion générale	71
Bibliographie	74

Liste des figures

Figure 1: Types de soudures autogènes [1].....	5
Figure 2: types de soudures hétérogènes [1]	5
Figure 3 : soudage T.I.G [4].....	7
Figure 4 : Soudage avec électrode enrobée.....	8
Figure 5: soudage MIG/MAG [4]	9
Figure 6 : Soudage par points.....	11
Figure 7: Soudage à la molette.....	11
Figure 8: soudage par faisceau laser [8].....	13
Figure 9 : soudure au chalumeau.....	15
Figure 10 : les composants de chalumeau	16
Figure 11 : Cycle thermique du soudage [11]	19
Figure 12: les zones de la soudure [3].....	19
Figure 13: Soufflures dans les soudures.....	21
Figure 14 : inclusions dans les soudures	22
Figure 15: Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique	28
Figure 16: Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6 [16]	28
Figure 17: essai expérimental de traction.....	29
Figure 18: Diagramme charge-allongement de traction [19]	30
Figure 19: Courbe contrainte-déformation du comportement fragile [26].....	37
Figure 20: Courbe contrainte-déformation du comportement ductile [26]	39
Figure 21: Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire [26].....	40
Figure 22: Les 3 phases de la rupture par fatigue.....	41
Figure 23: essai de fatigue.....	42

Figure 24: Cycle de contrainte en fatigue.	44
Figure 25: définitions des différents paramètres caractérisant une boucle d’hystérésis	45
Figure 26: Allure de la courbe de Wöhler	46
Figure 27: Période d’initiation de fissure et de croissance [30].	47
Figure 28: Direction de propagation des fissures [31].	48
Figure 29 : Direction de propagation d’une fissure dans un alliage d’aluminium (Al4,5%Zn-1,25%Mg) [31].	48
Figure 30: Modes de fissuration : a) mode I, b) mode II et c) mode III.	49
Figure 31: La courbe de fissuration par fatigue d’une fissure longue [33, 34].	51
Figure 32: Dimensions des éprouvettes sans soudage.	56
Figure 33 : Les éprouvettes modélisées avec ABAQUS sans soudage.....	56
Figure 34: Dimensions de l’éprouvette soudée.	57
Figure 35: L’éprouvette modélisée avec ABAQUS avec soudage.	57
Figure 36: Lois de comportements des trois matériaux MB, MF et ZAT	58
Figure 37: Le maillage choisi pour l’éprouvette soudée.	59
Figure 38: Le maillage choisi pour L’éprouvette sans soudure.	59
Figure 39: Choix de type de contact entre les zones de soudage.	60
Figure 40: Condition initiale.	61
Figure 41: dimensionnement de l’éprouvette CT.....	62
Figure 42: modélisation de l’éprouvette dans AFGROW	62
Figure 43: les propriétés mécaniques de l’éprouvette dans AFGROW.....	63
Figure 44: les paramètres de chargement cyclique de l’éprouvette dans AFGROW	64
Figure 45 : Courbes contrainte –déformation de Métal de base (résultats de simulation et d’expérimentale)	65
Figure 46: résultats expérimentale (contraintes-déformations) des trois éprouvettes (MB, MF et zat)	66
Figure 47: les Coubes de simulations (contraintes-déformations) des trois éprouvettes (MB, MF et ZAT)	67

Figure 48: Courbe contrainte –déformation des éprouvettes soudée et non soudée (résultats de simulation)
.....68

Figure 49: la courbe $a=f(N)$ (résultats de simulation AFGROW).....69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Représentation graphique des déplacements du chalumeau. [9]17

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques du matériau C4857

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le soudage est un procédé d'assemblage largement utilisé dans des domaines industriels tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale et les structures métalliques. Néanmoins, le soudage entraîne des modifications microstructurales et mécaniques substantielles des matériaux, en particulier des aciers, causées par des cycles thermiques sévères. Ces modifications peuvent affecter négativement les propriétés mécaniques localement : résistance, ductilité, et résistance à la fatigue, entre autres, en compromettant la durée de vie de la connexion. Ces transformations peuvent altérer localement les propriétés mécaniques, notamment la résistance, la ductilité et la tenue en fatigue, compromettant ainsi la durabilité des assemblages.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact du soudage sur les propriétés mécaniques des aciers, en mettant l'accent sur les zones critiques telles que la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT). Pour ce faire, le travail est structuré en trois chapitres principaux

Le premier chapitre : aborde une étude approfondie des procédés de soudage, en mettant en lumière leurs principes, leurs avantages et leurs limites. Une attention particulière est portée sur le soudage au chalumeau (soudage oxyacétylénique), méthode largement utilisée dans les ateliers de maintenance et pour les réparations. Nous examinons en détail les paramètres opératoires (température de flamme, vitesse de soudage, composition du gaz) et leur impact sur les transformations microstructurales dans la zone soudée. Les effets thermiques caractéristiques de ce procédé - notamment le gradient de chaleur important et le cycle de refroidissement lent - sont analysés pour leur rôle dans la formation de phases métallurgiques critiques (comme la martensite ou les carbures) et leur influence sur la dureté, la résilience et la résistance à la corrosion de l'acier. Des études de cas illustrent comment ces modifications affectent les propriétés mécaniques finales du joint soudé.

Le deuxième chapitre : est consacré à l'analyse approfondie du comportement mécanique des assemblages soudés. Une attention particulière est portée sur deux essais mécaniques clés : l'essai de traction quasi-statique pour caractériser la réponse élasto-plastique du matériau (limite d'élasticité, résistance à la rupture, allongement à rupture), et les essais de fatigue pour évaluer la tenue en service sous chargements cycliques. Ces investigations expérimentales permettent de quantifier l'effet du soudage sur les propriétés mécaniques globales, tout en identifiant les paramètres critiques influençant l'initiation et la propagation des fissures.

Le troisième chapitre : présentera une analyse approfondie des résultats expérimentaux et numériques issus des essais mécaniques et des simulations par éléments finis. Les données de traction et de fatigue seront systématiquement confrontées aux observations microstructurales (transformations de phase dans la ZAT) afin d'établir des corrélations précises entre l'hétérogénéité structurale du joint soudé et ses propriétés mécaniques globales

Cette étude vise à fournir une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement dans les assemblages soudés, afin de proposer des solutions d'optimisation pour améliorer leur fiabilité. Les résultats obtenus pourront contribuer à une meilleure sélection des paramètres de soudage, des matériaux et des traitements post-soudage, dans le but de minimiser les effets néfastes du procédé sur les propriétés mécaniques.

***Chapitre I : Procédés de
soudage et interactions
métallurgiques***

1. Introduction :

En fabrication mécanique, les assemblages indémontables sont fréquemment réalisés par des procédés de soudage. Contrairement au rivetage, au sertissage, au collage ou au boulonnage, le soudage permet d'assurer une continuité physique et chimique entre les pièces assemblées. Avec le temps et l'évolution des techniques, le terme "soudage" s'est généralisé pour désigner l'ensemble des procédés utilisés pour créer une soudure, tandis que le mot "soudure" désigne désormais le joint obtenu. [1]

Ce chapitre explore en détail les procédés de soudage, en présentant leurs types fondamentaux et leurs définitions précises. Nous aborderons également les interactions métallurgiques complexes qui se produisent lors de l'assemblage des matériaux, un aspect crucial pour comprendre la qualité et les propriétés finales des soudures.

2. Définition et principes du soudage :

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assurer la continuité entre parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assembler la continuité entre les parties à assembler.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones [2]. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects :

2.1. Le soudage autogène :

Dans ce procédé le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Donc c'est une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler. Les figures, a et b représentent des types de soudures autogènes.

[3]

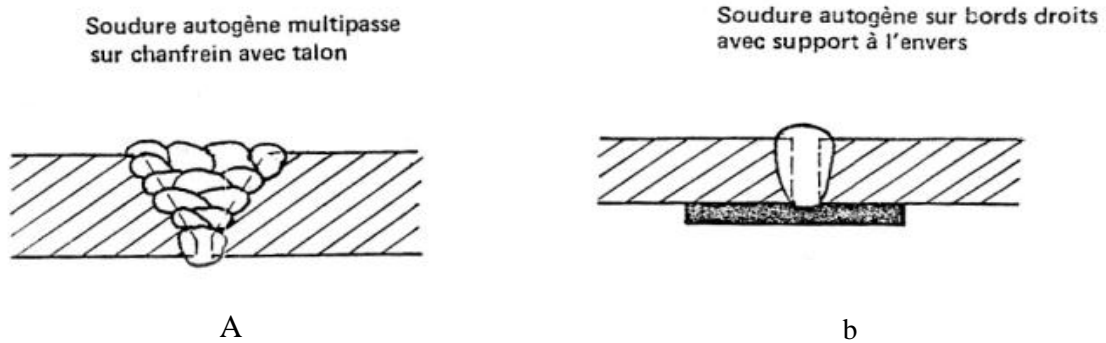


Figure 1: Types de soudures autogènes [1]

2.2. Le soudage hétérogène :

Le soudage est hétérogène lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler. [3]

Dans ce procédé on distingue :

- **Le brasage fort** : température de fusion du métal $> 450^{\circ}\text{C}$, avec utilisation du décapant Borax.
- **Le brasage tendre** : température de fusion du métal $< 450^{\circ}\text{C}$, avec utilisation du décapant Borax.
- **Le soudo-brasage** : réalisé généralement au chalumeau. La température à obtenir varie suivant les métaux à souder : Acier et fonte : 600 à 900°C , Cuivre : 850 à 900°C , Aluminium 600°C

Les figures c et d montrent deux types de soudures hétérogènes.

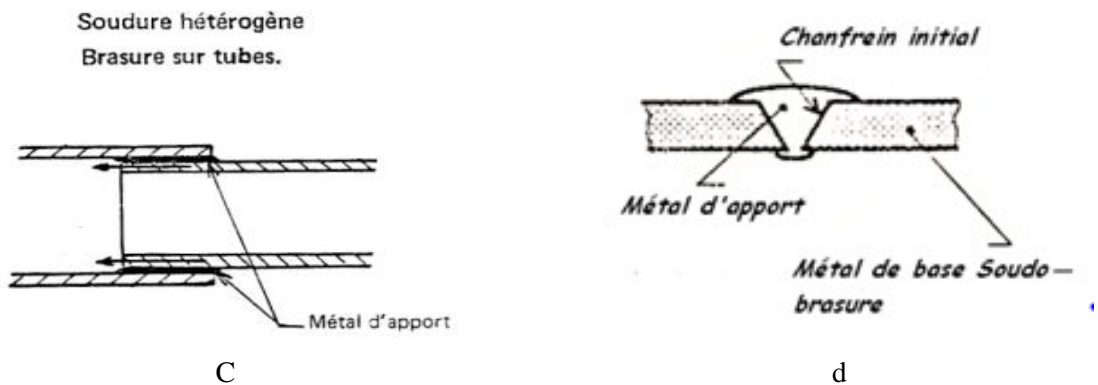


Figure 2: types de soudures hétérogènes [1]

Le soudo-brasage et le brasage s'appliquent lorsque :

- Les métaux de base ne sont pas soudables, par exemple : les aciers à outils.
- Les joints sont difficiles à exécuter (faibles dimensions des pièces à souder).
- Les métaux de base sont différents.

Il n'est pas impératif de conserver les propriétés mécaniques des métaux de base.

Les définitions générales s'appliquent à un grand nombre de matériaux. On soude les métaux, mais on soude aussi le verre, les matières plastiques etc. Par définition même, le soudage s'oppose à d'autres opérations d'assemblage qui n'assurent pas la continuité de la matière entre les parties à assembler, qu'il y ait discontinuité géométrique, comme dans le rivetage, le sertissage, le boulonnage, etc., ou qu'il y ait discontinuité de nature chimique comme dans le collage. [3]

3. Les différents procédés de soudage

Actuellement il existe plusieurs dizaines de procédés de soudage et parmi lesquels on peut citer :

3.1. Soudage à l'arc électrique :

Le soudage à l'arc électrique est un procédé couramment utilisé dans de nombreux domaines en raison de sa simplicité et de son efficacité. Il repose sur la création d'un arc électrique entre deux éléments :

1. Le métal de base : c'est la pièce que l'on souhaite souder.
2. L'électrode : c'est le métal d'apport qui sert à générer l'arc et à remplir la jointure.

L'électrode peut être soit consommable, comme dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée, où elle fond pendant le processus, soit non consommable, comme dans le soudage TIG, où une électrode en tungstène est utilisée.

L'arc électrique, qui peut atteindre des températures supérieures à 5 000 °C, fait fondre localement le métal de la pièce à souder ainsi que l'électrode, créant ainsi une fusion qui, une fois refroidie, forme une soudure solide et résistante. Dans ce procédé on peut citer :

3.1.1. Soudage au gaz inerte de tungstène (T.I.G) :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), ou soudage à l'arc avec électrode en tungstène sous gaz inerte, utilise une électrode réfractaire (qui ne fond pas) et un bain de fusion qui est protégé par un gaz inerte, tel que l'argon ou un autre gaz similaire. Cette protection gazeuse empêche l'oxydation du métal en fusion et garantit une soudure propre et de qualité.

Chapitre I : Procédés de soudage et interactions métallurgiques

Ce procédé est de plus en plus privilégié pour le soudage de matériaux exigeants, tels que les aciers alliés, l'aluminium, le cuivre et ses alliages, ainsi que les alliages de nickel. Le soudage TIG offre une grande précision et permet de réaliser des soudures très fines et esthétiques. De plus, il permet de souder des matériaux de diverses épaisseurs, avec une excellente maîtrise de la chaleur.

Le TIG est de plus en plus utilisé pour remplacer le chalumeau, en particulier pour des applications où une soudure de haute qualité est nécessaire, notamment dans les industries aérospatiale, automobile, et de la métallurgie

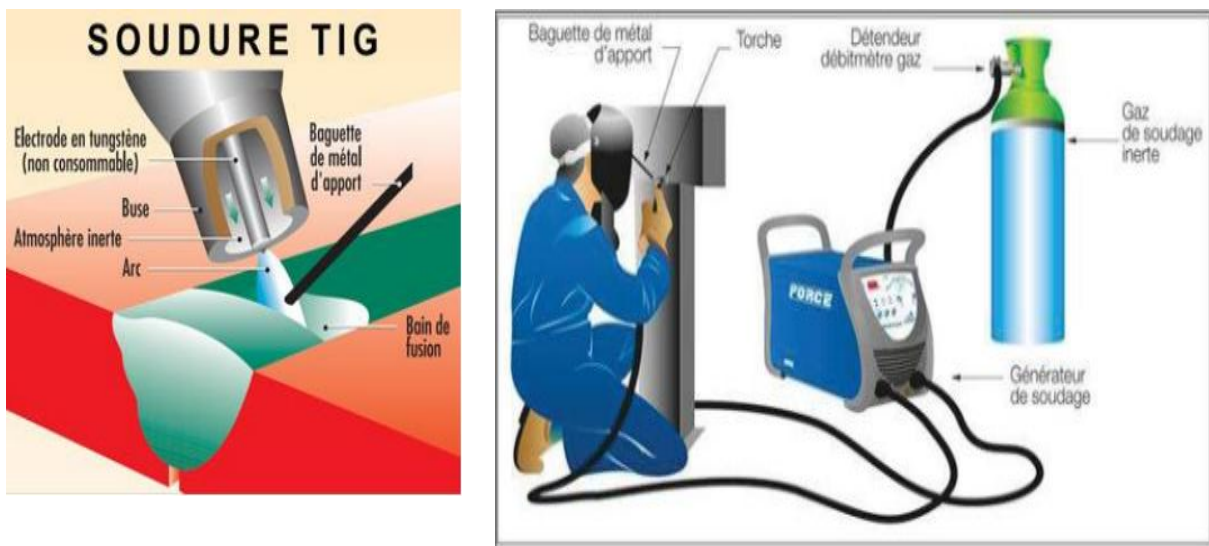


Figure 3 : soudage T.I.G [4]

Le procédé de soudage présente plusieurs avantages notables : il permet un travail fin et précis, offre une large gamme d'épaisseurs et garantit de très bonnes qualités de joint. Il se distingue également par ses bonnes caractéristiques mécaniques et la possibilité de souder dans toutes les positions, tout en assurant un aspect de cordon très satisfaisant. De plus, ce procédé est automatisable, ce qui représente un atout pour la production industrielle. Toutefois, il comporte aussi certains inconvénients : il est déconseillé dans les environnements poussiéreux ou enfumés, le coût des équipements reste élevé, et le procédé est relativement lent. Par ailleurs, une préparation des joints est nécessaire à partir de 3 mm d'épaisseur, et des déformations peuvent apparaître sur les pièces soudées.

3.1.2. Soudage avec électrode enrobée :

Le soudage avec électrode enrobée utilise une électrode recouverte d'un enrobage qui, lorsqu'il fond, forme un laitier protecteur sur le métal en fusion. Ce laitier protège la soudure de l'oxydation et des impuretés de l'air pendant le refroidissement, ce qui garantit la qualité de la liaison.

Au cours des dernières trois décennies, ce procédé a connu d'importants progrès, notamment grâce aux nouvelles technologies de fabrication des électrodes, qui ont amélioré la performance et la fiabilité du soudage. L'un des principaux avantages du soudage à l'électrode enrobée est sa rapidité d'exécution. Cela est dû au fait que l'apport de chaleur est très localisé, ce qui permet d'effectuer des soudures rapidement tout en maintenant une haute qualité.

Ce procédé est très polyvalent et est largement utilisé dans la construction, la réparation et dans des conditions où une bonne mobilité est requise, car il ne nécessite pas de gaz de protection externe, contrairement à d'autres méthodes comme le TIG. [5]

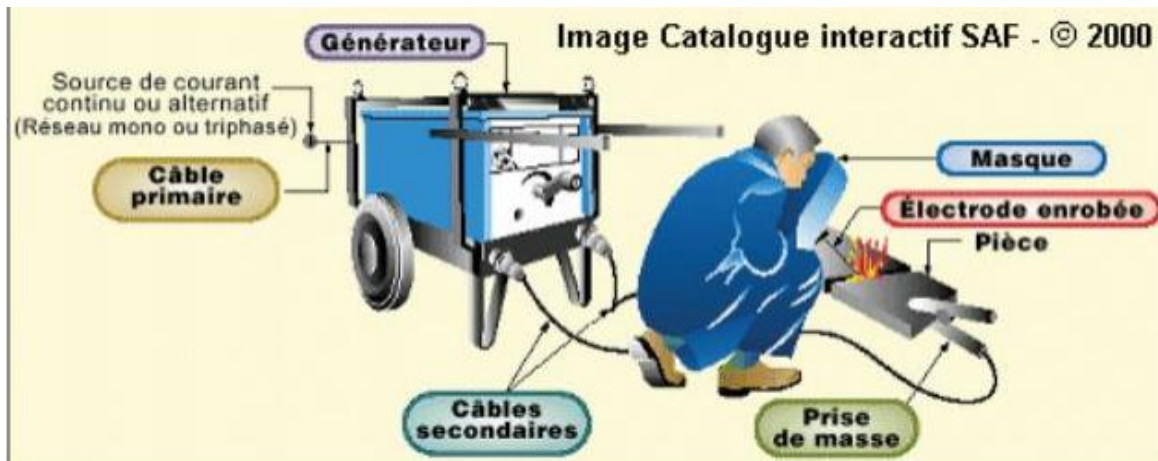


Figure 4 : Soudage avec électrode enrobée [4]

3.1.3. Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G) :

Le soudage MIG (Metal Inert Gas), ou soudage avec fil électrode sous protection gazeuse, utilise un fil électrode qui est alimenté en continu au niveau de l'arc électrique. Ce fil fond et se

transforme en métal d'apport, fusionnant avec la pièce à souder pour former la soudure. Le bain de fusion est protégé par un gaz inerte (comme l'argon ou l'hélium) qui empêche l'oxydation du métal en fusion et garantit la qualité de la soudure.

Le procédé MIG est très apprécié pour sa vitesse de soudage élevée et sa polyvalence, permettant de souder presque tous les types de métaux, y compris l'acier, l'aluminium et certains alliages. La rapidité d'exécution est un des grands avantages de ce procédé, ce qui le rend particulièrement adapté pour des applications industrielles et des environnements de production à grande échelle.

Grâce à son efficacité et à sa capacité à produire des soudures propres et uniformes, le soudage MIG est largement utilisé dans l'automobile, la construction métallique et d'autres secteurs où des soudures rapides et de qualité sont requises

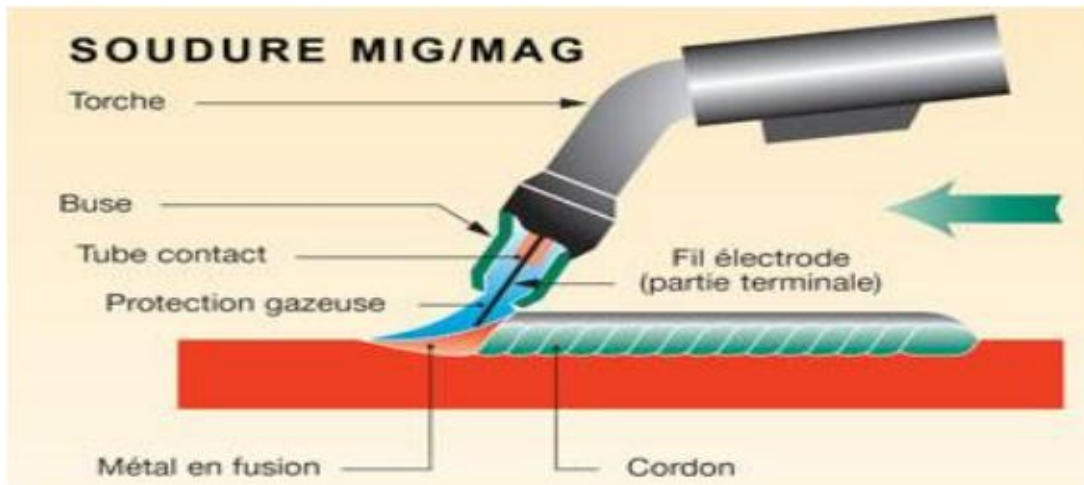


Figure 5: soudage MIG/MAG [4]

Le procédé de soudage MIG-MAG présente à la fois des avantages et des inconvénients. Parmi les principaux atouts, on trouve l'utilisation d'une bobine de fil qui permet un soudage en continu, ce qui favorise une excellente productivité. Ce procédé génère également peu de fumée, rendant les conditions de travail plus agréables. En revanche, il comporte certaines contraintes : il nécessite une bouteille de gaz de protection, ce qui peut compliquer la logistique, et il doit être réalisé en intérieur afin d'éviter les perturbations aux courants d'air. De plus, la maîtrise de la pénétration est indispensable, car un réglage inadapté peut entraîner des défauts de collage au lieu d'une soudure solide et fiable.

3.2. Soudage par résistance électrique :

Le soudage par résistance électrique repose sur l'effet de Joule pour générer la chaleur nécessaire au processus de fusion. Cet effet est décrit par la formule suivante

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Où **Q** est la chaleur générée, **I** est l'intensité du courant, **R** est la résistance électrique, et **t** est le temps durant lequel le courant circule.

Dans ce procédé, l'intensité du courant et la durée de son passage jouent un rôle crucial. En ajustant ces paramètres, on peut contrôler la quantité de chaleur générée et, par conséquent, la qualité et la résistance de la soudure.

Le soudage par résistance est principalement utilisé pour assembler des pièces par recouvrement, c'est-à-dire lorsque les pièces sont superposées et que la chaleur est appliquée directement aux zones de contact. Ce procédé est largement utilisé dans les industries où une grande précision est nécessaire, comme dans l'assemblage de tôles fines, particulièrement dans l'automobile (soudures de carrosserie, par exemple).

Il existe plusieurs variantes de ce procédé, comme le soudage par points, le soudage par chevauchement, et le soudage par bosses, en fonction du type de connexion et des pièces à assembler. [6]

Dans ce procédé on distingue :

3.2.1. Soudage par points :

Le soudage par points est un procédé de soudage par résistance électrique, largement utilisé pour assembler des tôles métalliques, notamment dans l'industrie automobile. Il repose sur l'application simultanée d'une pression mécanique et d'un courant électrique intense pour créer une fusion localisée entre les pièces à assembler

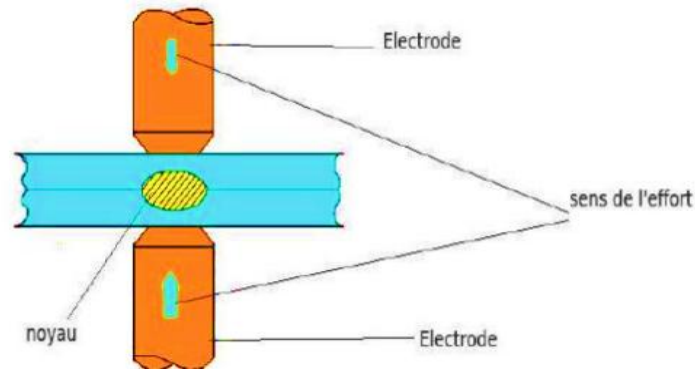


Figure 6 : Soudage par points [4]

3.2.2. Soudage à la molette :

Le soudage à la molette est une variante du soudage par résistance, utilisant des électrodes rotatives pour réaliser des soudures continues et étanches sur des tôles métalliques. Ce procédé est particulièrement adapté pour l'assemblage de tôles fines, notamment dans l'industrie automobile, la fabrication de réservoirs ou de canettes

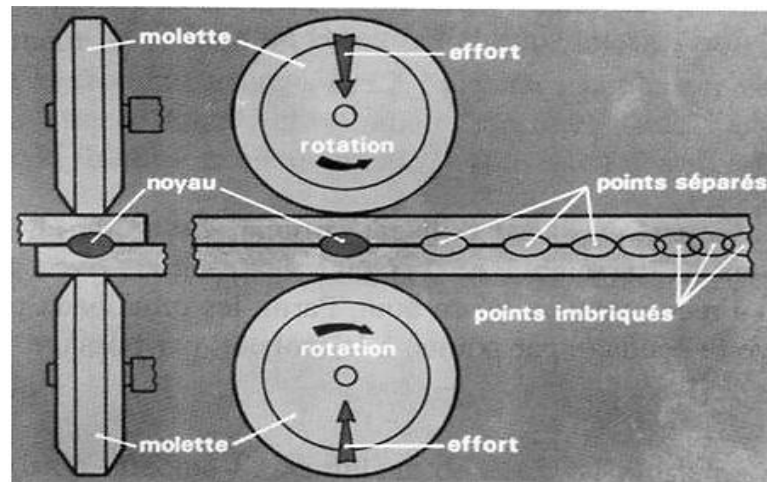


Figure 7: Soudage à la molette [4]

3.2.3. Soudage en bout par étincelage :

Ce procédé de soudage par résistance est essentiellement utilisé pour le reboutage des tubes. Les bords à souder sont rapprochés sous-tension et des arcs s'amorcent successivement provoquant la fusion des bords. Le soudage a lieu alors par forgeage, les deux pièces à souder étant comprimées l'une contre l'autre.

3.2.4. Soudage par induction :

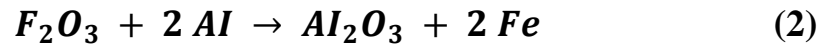
Dans ce procédé, l'énergie provient du courant électrique généré dans les pièces à souder par l'application d'un champ magnétique intense à haute fréquence

3.2.5. Soudage par friction :

Le principe repose sur le fait qu'une pièce reste fixe tandis que l'autre effectue un mouvement de rotation et est mise en contact avec la première. L'énergie thermique générée par le frottement permet d'atteindre la température nécessaire pour le forgeage.

3.2.6. Aluminothermie :

Ce procédé repose sur la chaleur générée par la réaction chimique suivante :



La réaction est initiée à l'aide soit de poudre, soit d'une résistance électrique. L'aluminothermie est principalement utilisée pour le soudage des rails de chemin de fer.

3.2.7. Soudage par ultra-sons :

Ce procédé utilise l'énergie de vibration produite par un appareil électroacoustique. Il est utilisé surtout dans l'industrie nucléaire et en électrotechnique pour les soudages des feuilles d'aluminium, de molybdène, de platine etc. Il est très employé pour assembler les matières plastiques.

3.3. Soudage Laser :

Le laser est une source de rayonnement lumineux, monochromatique et spatialement cohérent. Dans les machines de soudage, le rayonnement est focalisé pour obtenir de grandes densités de puissance, suffisantes pour le soudage industriel des alliages. Cette puissance permet de générer un capillaire rempli de vapeurs métalliques dont les parois sont tapissées de métallique de en fusion. Le bain de fusion ainsi créé est déplacé et le métal liquide se solidifie après le passage du faisceau assurant la continuité métallurgique entre les pièces. Le capillaire a un rôle très important en soudage laser car il permet un transfert de l'énergie directement au cœur du matériau. L'interaction du faisceau laser avec les vapeurs métalliques conduit à une ionisation partielle qui forme un plasma composé de vapeurs ionisées à l'intérieur du déchole et en surface du bain de fusion. Le plasma de surface constitue une seconde source de chaleur, elle est responsable de la morphologie de la partie supérieure du cordon. Ce plasma joue un rôle bénéfique pour l'échauffement du métal, mais peut absorber une part importante de l'énergie du faisceau laser Un flux de gaz inerte (Ar ou He) soufflé l'endroit de l'impact du laser permet de maîtriser ce plasma et protéger le métal de l'oxydation. [7]

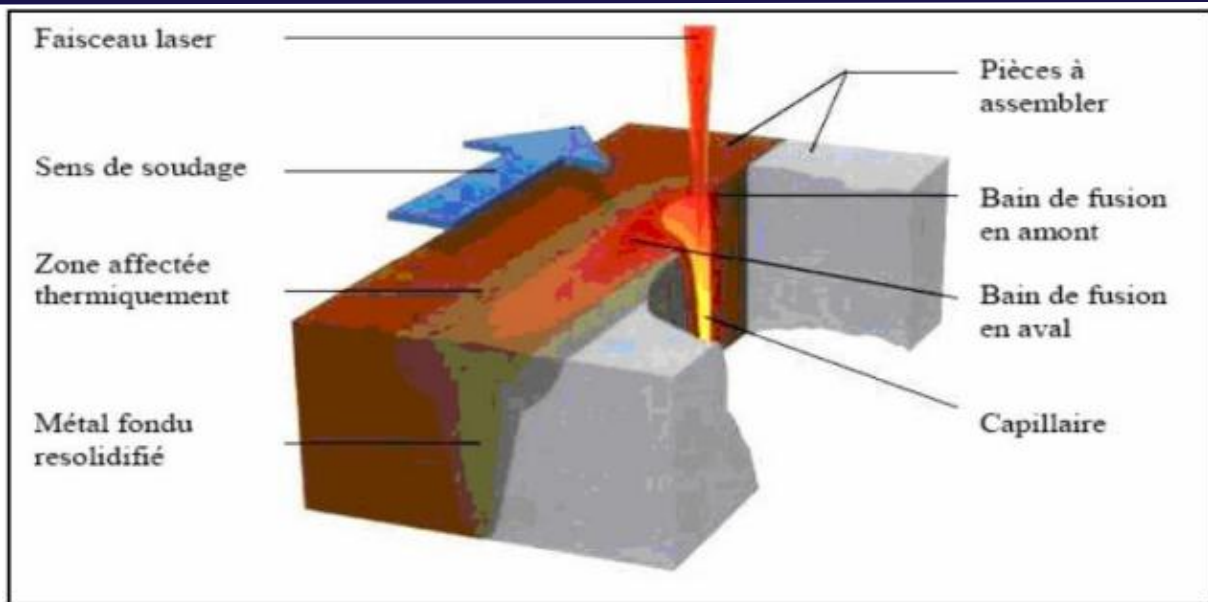


Figure 8: soudage par faisceau laser [8]

Le procédé de soudage laser présente de nombreux avantages qui en font une technique prisée dans diverses industries, notamment l'automobile, l'aéronautique et la microélectronique. Parmi ses atouts majeurs figurent une vitesse d'exécution élevée, une grande précision, et une propreté remarquable du joint soudé. L'absence de métal d'apport réduit les risques de contamination, tandis que la faible zone affectée thermiquement (ZAT) limite les déformations des pièces. De plus, le soudage laser permet l'assemblage de matériaux dissemblables et offre la possibilité de réaliser des soudures étanches, même dans des zones d'accès restreint grâce à la finesse du faisceau. La solidité mécanique des joints obtenus est également un avantage notable. Cependant, cette technologie comporte aussi des inconvénients. Le coût d'acquisition et de maintenance des équipements laser est relativement élevé, ce qui peut représenter un frein pour certaines entreprises. La mise en œuvre du procédé nécessite un niveau de formation important pour les opérateurs, et une préparation précise des joints est indispensable pour garantir la qualité des soudures. Par ailleurs, des mesures de sécurité strictes sont requises en raison de la nature invisible et énergétique du faisceau laser, impliquant l'utilisation de protections spécifiques souvent coûteuses.

3.4. soudage au chalumeau:

Le soudage au chalumeau, également connu sous le nom de soudage oxyacétylénique, est un procédé d'assemblage thermique qui s'applique aux tôles et aux tubes de même matière dont l'épaisseur reste inférieure ou égale à 7mm. Est une méthode de soudage qui utilise une flamme produite par la combustion d'un mélange d'oxygène et d'acétylène pour chauffer et fondre les

métaux à assembler. Cette technique est appréciée pour sa polyvalence et sa capacité à souder divers matériaux tels que l'acier, l'aluminium et le cuivre, ainsi que pour des applications de coupe et de brasage.

Il existe deux techniques différentes de soudage oxyacétylénique :

- ✓ **Sans métal d'apport** : Cela consiste à réaliser un cordon avec le chalumeau sur le matériau de base, mais sans apport de métal (les deux matériaux sont chauffés jusqu'à leur point de fusion).
- ✓ **Avec métal d'apport** : Cela consiste à fusionner les bords des pièces créant ainsi un bain de fusion, dans lequel est rajouté le métal d'apport sous forme de baguette.

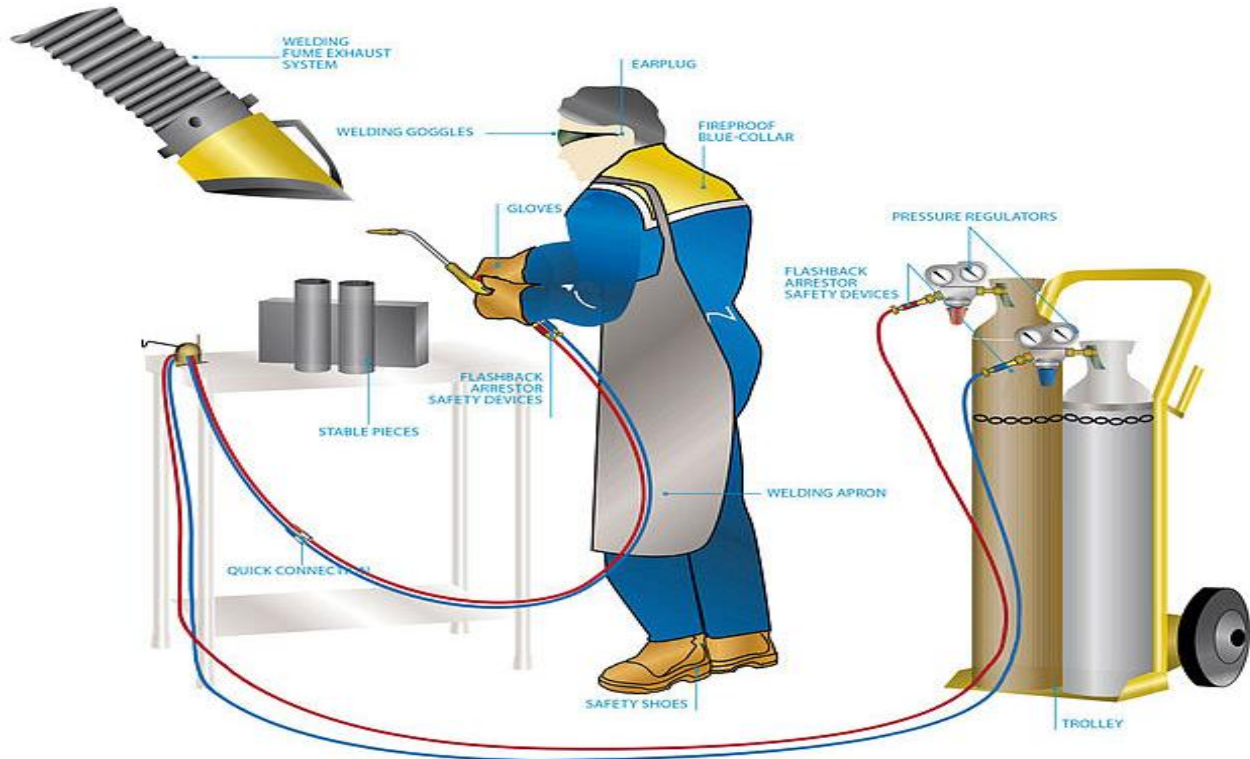


Figure 9 : soudure au chalumeau [8]

3.4.1. Principe du soudage au chalumeau :

On peut produire cette flamme en brûlant un gaz combustible dans l'air. Cependant, l'air contenant environ 80 % d'azote, un gaz inerte qui ne participe pas à la combustion, l'idée a émergé d'utiliser un autre comburant : l'oxygène. Ainsi, la flamme oxyacétylénique, atteignant une température élevée d'environ 3000 °C, résulte de la combustion d'un mélange d'acétylène et d'oxygène dans des proportions précises.

a) Mélange des gaz : Le soudeur commence par mélanger l'oxygène et l'acétylène dans des proportions adaptées pour créer une flamme neutre, qui est idéale pour le soudage.

- **L'oxygène (O_2) :**

L'oxygène est un gaz incolore, inodore et sans saveur. Il est obtenu par l'électrolyse de l'eau ou par liquéfaction de l'air qui en contient 1/5 de son volume. Il doit être d'une pureté très élevée de 99 %, car un oxygène moins pur entraîne une augmentation de la consommation de l'acétylène.

- **L'acétylène (C_2H_2) :**

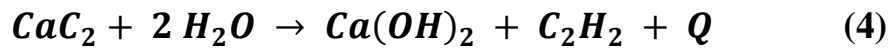
L'acétylène (C_2H_2) est un hydrocarbure gazeux, incolore avec un pouvoir calorifique de

14000 calories / m³ et dont l'odeur est désagréable (odeur d'œil). Il est dangereux au point de vue déflagration, il explose en présence d'une décharge électrique ou de feu. Un mélange d'oxygène et d'acétylène peut exploser à la pression atmosphérique s'il ne contient que très peu d'acétylène.

Industriellement l'acétylène utilisé pour le soudage et l'oxycoupage est fabriqué à partir du carbure de calcium (CaC_2), lequel est obtenu à partir d'un mélange de carbone (coke) et de chaux vive à très haute température, la réaction chimique qui s'y produit est la suivante :



Ensuite l'acétylène est obtenu dans des générateurs par la décomposition chimique du carbure de calcium avec l'eau selon la réaction suivante :



- b) **Allumage de la flamme** : Après avoir ouvert les robinets des bouteilles de gaz, le robinet d'acétylène est ouvert en premier, puis enflammé. Ensuite, le robinet d'oxygène est ouvert pour ajuster le mélange et obtenir la flamme souhaitée.
- c) **Application de la chaleur** : La flamme est dirigée vers les pièces à assembler, provoquant leur fusion locale. Si un métal d'apport est utilisé, il est introduit manuellement dans le bain de fusion créé par la chaleur de la flamme.



1-Bouton permettant le réglage de l'acétylène (0,5 Bars)

2-Bouton permettant le réglage de l'oxygène (1,5 Bars)

3-La lance

4-La buse

5-Raccord acétylène (tuyau rouge)

6-Raccord oxygène (tuyau bleu)

Figure 10 : les composants de chalumeau

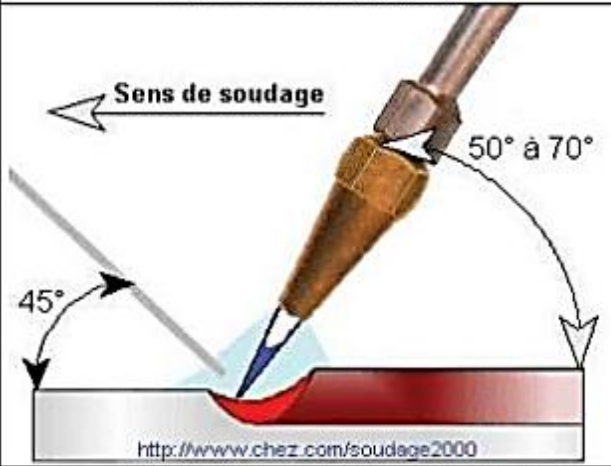
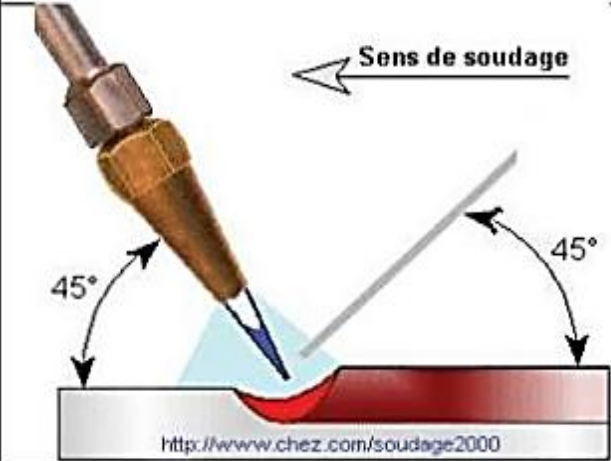
3.4.2. Opérations de soudage :

L'opération de soudage consiste à assembler durablement deux ou plusieurs pièces en utilisant généralement la chaleur pour créer une liaison solide et continue et se fait avec deux sens de déplacement du chalumeau de soudage sont :

- Le soudage à gauche / en avant
- Le soudage à droite / en arrière

Le tableau : Illustre le schéma graphique et les avantages et inconvénients des deux sens de déplacement.

Tableau 1 : Représentation graphique des déplacements du chalumeau. [9]

LE SOUDAGE A GAUCHE / EN AVANT	
Représentation graphique	Avantages et inconvénients
	<p>La méthode à gauche permet d'obtenir des cordons de très bel aspect. La pénétration est améliorée.</p>
LE SOUDAGE A DROITE / EN ARRIERE	
	<p>La méthode à droite permet d'obtenir des vitesses de soudage plus importantes, une bonne maîtrise de la pénétration du cordon, un aspect des cordons satisfaisant.</p>

3.4.3. Domaine d'application

Ce procédé est aujourd'hui utilisé par les plombiers, les chauffagistes, les frigoristes, les fabricants de métaux, les serruriers et les bricoleurs. Il s'agit le plus souvent de brasage ou de saoudo-brasage.

Quant au coupage oxyde-flamme, il est notamment utilisé dans les industries de démolition d'ouvrages métalliques. Ce procédé fait appel à une flamme oxydé-combustible et à de l'oxygène pur comme jet de coupage pour séparer le métal.

4. Effets thermiques du soudage

4.1. Cycle thermique du soudage :

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé [10].

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé. La Figure 11 synthétise ces transformations:

- 1 – Dilatation Ac1 : Détensionnement
- 2 – Ac3 : austénisation (changement de maille).
- 3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.
- 4 – Solidification Ar3 : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – Transformations allotropiques Ar1: trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

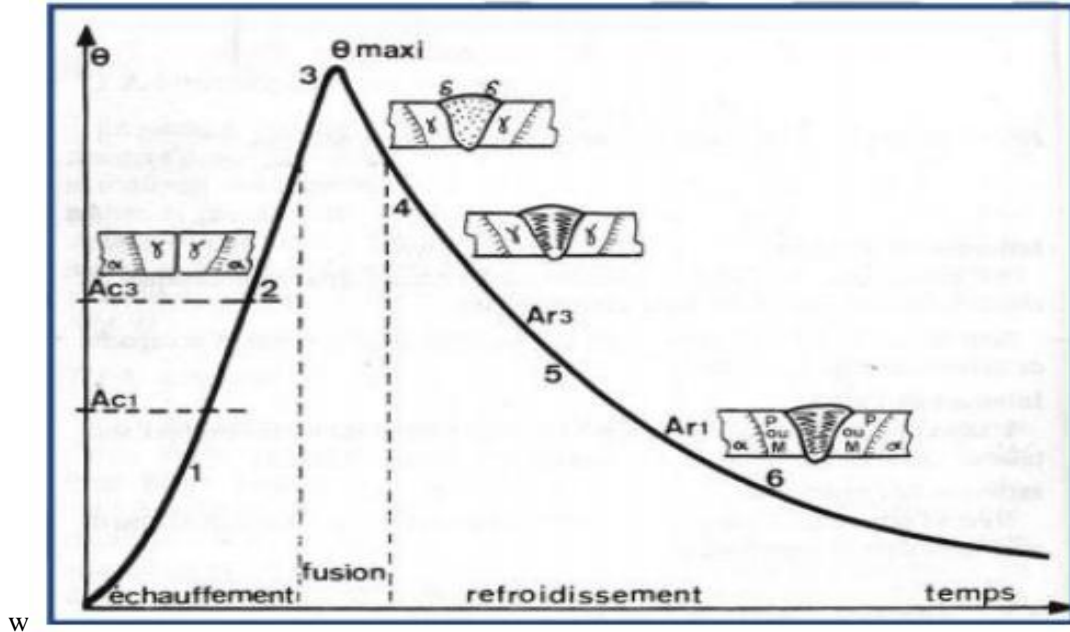


Figure 11 : Cycle thermique du soudage [11]

La métallurgie du soudage renseigne sur les caractéristiques d'un acier, qui sont fonction de sa structure, de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition de l'acier et du traitement thermique qu'il subit.

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage [11].

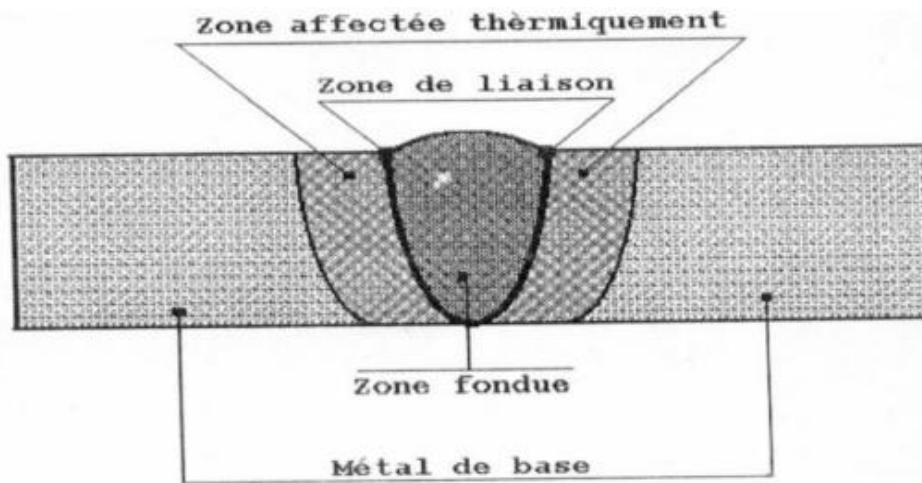


Figure 12: les zones de la soudure [3]

On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé (figure.12) :

- Le métal de base (MB)
 - La zone affectée thermiquement (ZAT)
 - La zone de liaison (ZL)
 - La zone fondue (ZF)
- Métal de base (MB) : Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
 - Zone affectée thermiquement (ZAT) : La zone affectée thermiquement est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base
 - Zone de liaison (ZL) : Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
 - Zone fondue (ZF) : Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification.

4.2. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée par la chaleur (ZAT) est une zone de métal non fondue qui a subi des changements dans les propriétés des matériaux en raison de son exposition à des températures élevées. Ces changements dans la propriété du matériau sont généralement le résultat du soudage ou de la découpe à haute température. Le ZAT est la zone entre la soudure ou la coupe et la base, métal-mère.

La zone ZAT peut varier en gravité et en taille en fonction des propriétés des matériaux, de la concentration et de l'intensité de la chaleur et du procédé de soudage ou de découpe utilisé

5. Impact du soudage sur la microstructure de l'acier :

5.1. Défauts liés au soudage :

Les défauts des soudures peuvent être divisés en deux catégories : les défauts internes comme les fissures à chaud, les fissures à froid, les fissures au réchauffage et les porosités etc. ; et les défauts ayant une origine purement opératoire tels que caniveaux, manque de pénétration, collage. [12]

5.1.1. Défauts des cavités

Ce sont des défauts volumiques, elles comprennent :

- **Défauts des soufflures** : Les soufflures sont des défauts fréquents en soudage sphériques, formés par des bulles de gaz enfermées dans le cordon, si elles sont visibles en surface (débouchantes) on parle des piqûres et si elles sont allongées, on parle, à des soufflures vermiculaires.

Leurs causes sont dues à des courants d'air, un manque de gaz de protection, ou des impuretés dans le joint à souder. Les piqûres sont causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

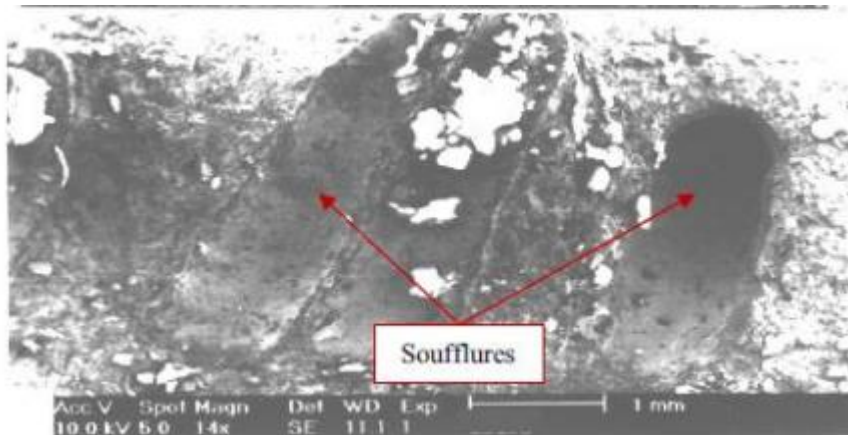


Figure 13: Soufflures dans les soudures [9]

- **Défauts des retassures**: Les retassures sont des espaces vides apparaissant lors d'un retrait du métal en se refroidissant.
- **Défauts des inclusions**: Les inclusions c'est l'incorporation dans le cordon, d'un composé étranger. Types d'inclusions.
 - a - Inclusion solide: Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (poussière).
 - b- Inclusion de laitier: Les inclusions de laitier peuvent être alignées, isolées ou distribuées aléatoire.
 - c- Inclusion métallique: Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu.Ces défauts sont détectés par le contrôle visuel et le contrôle radiographie et ultrasons.

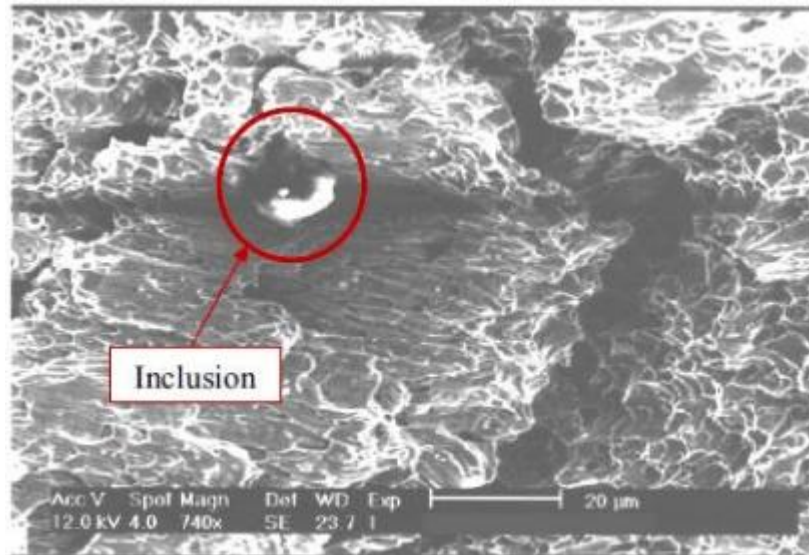


Figure 14 : inclusions dans les soudures [9]

5.1.2. Les fissures

Connues comme des discontinuités brutales dans un matériau; ce sont les plus fréquents défauts dans la soudure. Elles sont divisées en deux catégories selon leur Orientation:

a- Les fissures longitudinales (parallèle à l'axe de la soudure): sont le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées dans les soudures de fortes sections.

b- Les fissures transversales (perpendiculaires à l'axe de la soudure) : sont le résultat des contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité.

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

a- Fissures à chaud: survient au moment de la solidification du bain de fusion, elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Elles peuvent être internes ou déboucher en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces inter-dendritiques et suivent donc les directions de solidification.

b- Fissures à froid: elles apparaissent à la phase de refroidissement, vers 200°C ou moins.

Elles se développent dans la zone de soudage et la zone affectée thermiquement. Les méthodes de détection des fissures sont: l'examen visuel, magnétique ou ressuage pour les fissures débouchant en surface; et l'examen par ultrasons ou radiographie pour fissures internes. Donc pour éviter les fissures il faut Choisir un métal d'apport approprié et effectuer un préchauffage approprié ainsi qu'une bonne préparation des joints.

5.1.3. Morsures et les Caniveaux

- a- Une morsure défaut est un creusage ou insuffisance du métal de base sur une partie du cordon.
- b- Un caniveau est une morsure de grande taille due à une chaleur élevée du métal d'apport.

5.1.4. Défaut de manque de fusion

Les manques de fusion ou collages sont des manques ou absence de contact entre le métal fondu et le métal de base, ces manques conduisent à des mauvaises continuités métallurgiques entre les métaux à assembler ce qui diminue la section efficace de la soudure.

5.1.5. Défauts de pénétration

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration.

- a- L'excès de pénétration est un surplus du métal d'apport à la racine ou à la surface du cordon,
- b- Le manque de pénétration signifie insuffisance du métal d'apport au-dessus ou au-dessous de cordon

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et le contrôle radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).

5.1.6. Défauts de géométries des cordons

Ce sont des défauts où les déformations du cordon sont lié à la mauvaise préparation des pièces à unir, ils peuvent être: des défauts d'alignement ou des défauts angulaires.

Défaut d'alignement : Il est remarqué en une soudure bout à bout quand les pièces à unir sont mal bridées le pointage est insuffisant.

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

5.1.7. Défauts des projections

Les projections sont des particules métalliques en fusion projeté pendant le soudage qui adhère au métal de base ou au cordon solidifié. Ils sont causés par un courant fort, un arc long.

6. Conclusion :

Les procédés de soudage et leurs interactions métallurgiques jouent un rôle essentiel dans l'assemblage des matériaux métalliques, en assurant des liaisons permanentes et fiables. La diversité des techniques disponibles, telles que le soudage à l'arc, le soudage par friction ou le soudage plasma, permet de répondre à des exigences variées en termes de résistance mécanique, d'étanchéité et de durabilité. Le choix du procédé approprié dépend de nombreux facteurs,

notamment la nature des matériaux à assembler, les contraintes mécaniques et thermiques, ainsi que les considérations économiques et environnementales. Par ailleurs, la compréhension des phénomènes métallurgiques associés au soudage, tels que la formation de la zone affectée thermiquement ou les transformations de phases, est cruciale pour garantir la qualité des assemblages et prévenir les défauts. Ainsi, une maîtrise approfondie des procédés de soudage et de leurs implications métallurgiques est indispensable pour optimiser les performances des structures soudées et assurer leur fiabilité à long terme.

***Chapitre II : Comportement
mécanique des matériaux***

1. Introduction

L'acier est reconnu pour sa résistance élevée, sa ductilité et sa ténacité. Ces propriétés le rendent adapté à une large gamme d'applications, des structures de bâtiments aux composants automobiles. Les principales sollicitations mécaniques que l'acier peut subir incluent la traction, la compression, la flexion, le cisaillement et la torsion.

Sous l'effet de ces sollicitations, l'acier présente un comportement élastique jusqu'à une certaine limite, appelée limite d'élasticité. Au-delà de cette limite, il entre dans un domaine plastique où des déformations permanentes se produisent. La courbe contrainte-déformation de l'acier illustre ces différentes phases, mettant en évidence des points clés tels que la limite d'élasticité, la résistance maximale et l'allongement à la rupture. [13]

Ce chapitre a pour objectif de présenter les lois de comportement mécanique des aciers. Une attention particulière est portée à la description des essais de traction et de fatigue, ainsi qu'à la compréhension de l'endommagement induit par la fatigue.

2. Propriétés mécaniques des métaux :

Les métaux se distinguent par un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui influencent leur soudabilité ainsi que leur rôle dans les assemblages. Parmi ces caractéristiques, la **fragilité** désigne la tendance d'un métal à se casser sans se déformer, tandis que la **ductilité** reflète sa capacité à s'étirer en fils fins sans se rompre, qualité essentielle dans les procédés de mise en forme comme le tréfilage. La **ténacité**, quant à elle, combine résistance et ductilité, exprimant la capacité du métal à absorber de l'énergie avant rupture, ce qui est crucial pour les pièces soumises à des chocs. La **malléabilité** désigne l'aptitude à se déformer sous compression, utile dans les opérations de forge ou de laminage. L'**élasticité** permet au métal de reprendre sa forme initiale après une déformation temporaire, propriété recherchée dans les ressorts ou pièces vibrantes. La **dureté** exprime la résistance à la rayure ou à la pénétration, déterminant la résistance à l'usure. La **résistance à l'abrasion**, liée à la dureté, est essentielle pour les composants en contact avec d'autres surfaces ou soumis à des frottements. La **résistance à la corrosion** permet au métal de résister aux agents chimiques ou à l'humidité, prolongeant ainsi sa durée de vie, notamment dans les environnements agressifs. Le **point de fusion** est également déterminant, car il influence les méthodes de soudage ou de fusion : plus il est élevé, plus le métal nécessite des conditions thermiques spécifiques. Enfin, le **magnétisme** est une propriété de certains métaux comme le fer, le nickel ou le cobalt, qui peuvent interagir avec des champs

magnétiques ou produire eux-mêmes un champ, ce qui est utile ou contraignant selon les applications. Toutes ces propriétés doivent être prises en compte pour choisir un métal en fonction de ses exigences fonctionnelles et des contraintes de fabrication.

3. Les essais mécaniques :

Essais mécaniques Ce sont des expériences importantes dans le domaine des sciences de l'ingénieur L'objectif est de caractériser les lois de comportement des substances.

L'essai de traction seul permet de déterminer les propriétés mécaniques Couramment utilisé dans RDM. [14]

3.1. Essais de traction :

L'essai de traction est l'un des essais mécaniques les plus couramment utilisés pour caractériser les propriétés d'un matériau. Il consiste à appliquer deux forces de tension, égales en intensité et de sens opposés, à une éprouvette. Ces forces sont alignées selon l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette, assurant ainsi une sollicitation axiale pure. Au cours de l'essai, on mesure en temps réel l'allongement Δl de l'éprouvette.

Cependant, pour que les résultats obtenus soient représentatifs du matériau lui-même indépendamment de la forme ou des dimensions de l'éprouvette il est nécessaire de transformer les données brutes. Pour cela, la force appliquée F est rapportée à la section initiale S de l'éprouvette, ce qui permet de calculer la contrainte nominale, une grandeur normalisée exprimée en N/mm^2 (ou MPa). [15]

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Et on apporte l'allongement Δl à la longueur initiale entre repères l_0 , pour obtenir la déformation nominale ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique (fig. 14).

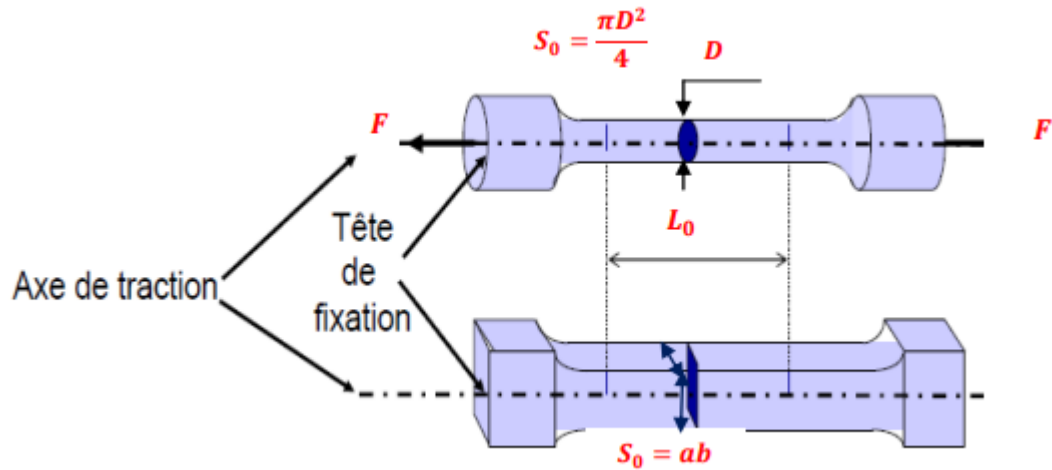


Figure 15: Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique

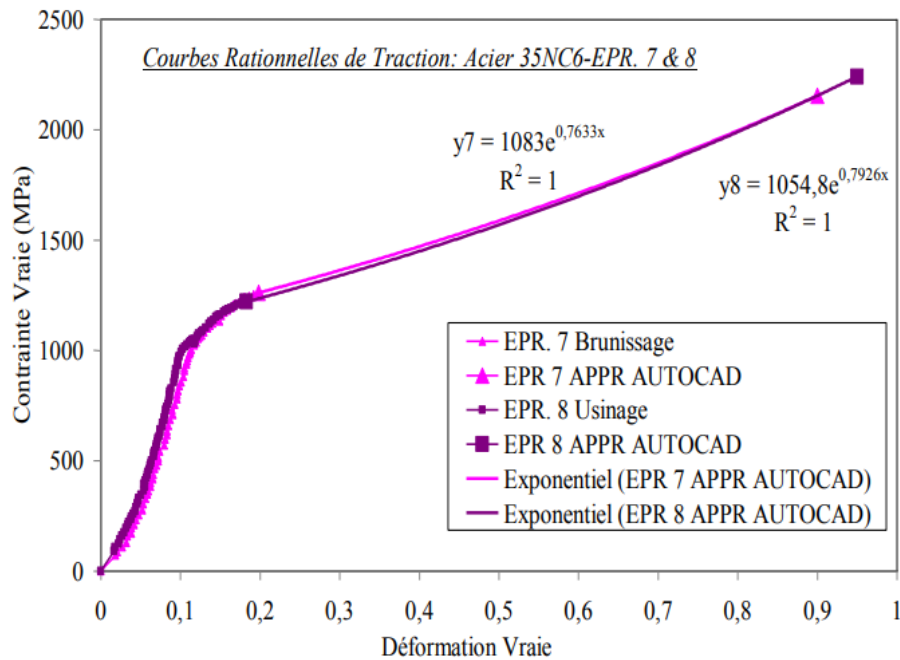


Figure 16: Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6 [16]

3.1.1. Protocole expérimental :

Un essai de traction classique consiste à appliquer une force de traction axiale P sur une éprouvette de forme cylindrique. Un extensomètre axial (ou jauge de déformation) est fixé entre deux points M et N , séparés initialement par une longueur L_0 . Sous l'effet de la charge, cette distance augmente d'une valeur δ . Un second extensomètre peut être utilisé pour mesurer la déformation radiale, car le rayon initial r_0 diminue d'une quantité δr , ce qui entraîne une réduction de la section transversale A (variation notée ΔA). Cet essai fournit des données essentielles pour caractériser les propriétés mécaniques du matériau. Les résultats sont

généralement représentés sous la forme d'une courbe appelée **courbe de traction**, où la **contrainte normale** σ est portée en ordonnée (axe vertical) et la **déformation unitaire** ε en abscisse (axe horizontal). La contrainte normale σ est définie comme le rapport entre la force appliquée P et la section initiale A , tandis que la déformation unitaire ε correspond au rapport entre l'allongement δ et la longueur initiale L_0 . [17] :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Et la déformation

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (6)$$

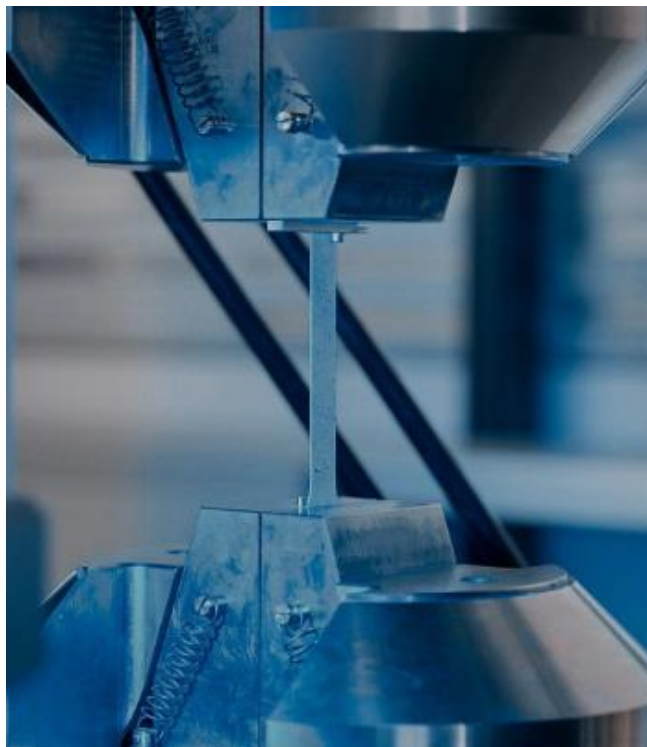


Figure 17: essai expérimental de traction [17]

3.1.2. Courbe de traction

Une courbe contrainte-déformation est une représentation graphique qui décrit le comportement mécanique d'un matériau soumis à une charge croissante. Elle permet d'analyser la manière dont le matériau réagit sous différentes sollicitations telles que la traction, la compression, le cisaillement, la flexion ou encore la torsion [18] (voir figure 15).

Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons aux courbes contrainte-déformation obtenues lors d'essais de traction. Ces courbes représentent la contrainte normale σ , exprimée en

mégapascals (MPa), en fonction de la déformation unitaire ε , exprimée en pourcentage (%), selon la relation suivante :

$$\sigma \text{ (MPa)} = f(\varepsilon \text{ (\%)})$$

O-A Zone élastique : Dans cette phase, le matériau se déforme élastiquement en réponse à la contrainte appliquée. Cela signifie que la déformation est réversible et que le matériau reprendra sa forme initiale lorsque la charge sera retirée.

A-B Limite d'élasticité : C'est le point où la déformation élastique devient plastique. Si la charge est enlevée avant d'atteindre ce point, le matériau reviendra à sa forme originale sans déformation permanente. Si la charge continue, la déformation plastique commence.

B-C Zone de déformation plastique : Dans cette phase, le matériau subit une déformation plastique et la déformation devient permanente. Le stress peut augmenter sans que la tension augmente proportionnellement.

Après **C fractures** : Point où le matériau se brise. La rupture peut être ductile (étirement du matériau avant rupture) ou fragile (rupture sans grande déformation préalable). [19]

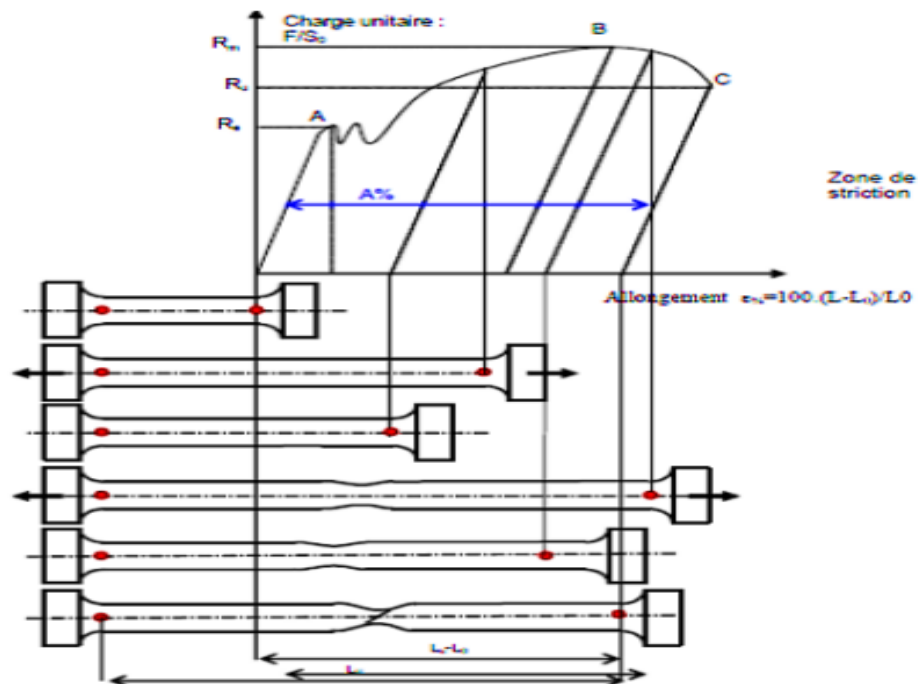


Figure 18: Diagramme charge-allongement de traction [19]

3.1.3. Limite d'élasticité R_e

La limite d'élasticité (ou point d'élasticité) correspond au point de la courbe contrainte-déformation où la déformation élastique cesse et où débute la déformation plastique. Autrement dit, c'est à partir de ce point qu'une déformation permanente subsiste, même après suppression de la charge.

Bien que souvent confondue avec la limite élastique, la limite d'élasticité est une valeur conventionnelle déterminée de manière plus précise. Elle est obtenue en traçant une droite parallèle à la portion linéaire (élastique) de la courbe, mais décalée de 0,2 % de déformation (soit $\varepsilon=0,002$) le long de l'axe des abscisses. Le point où cette droite coupe la courbe contrainte-déformation d'origine est appelé le point de limite d'élasticité conventionnelle.

3.1.4. Point de contrainte ultime R_m

Le point de contrainte ultime R_m également appelé résistance à la traction ultime, correspond à la valeur maximale de contrainte atteinte sur la courbe contrainte-déformation. Il s'agit du sommet de la courbe, au-delà duquel le matériau commence à se contracter localement : ce phénomène est appelé la striction ou necking (formation d'un « cou »).

Il est important de noter que, même si R_m représente la contrainte maximale observée sur la courbe, ce n'est pas nécessairement la contrainte réelle la plus élevée subie par le matériau. En effet, après ce point, la section efficace de l'éprouvette diminue fortement, ce qui rend la contrainte apparente (calculée avec la section initiale) inférieure à la contrainte réelle au point de rupture, qui tient compte de cette réduction de section.

3.1.5. Loi de Hooke

Dans la première partie linéaire de la courbe contrainte-déformation, il existe une relation de proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ε . Cette relation est décrite par la loi de Hooke, un principe fondamental de la mécanique des matériaux qui définit le comportement élastique des matériaux déformables.

Formulée au XVIIe siècle par le physicien britannique Robert Hooke, cette loi énonce que :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Où E est le module d'élasticité ou module de Young, qui représente la rigidité du matériau. Plus la valeur de E est élevée, plus le matériau est rigide ; une valeur faible indique un matériau plus souple.

La loi de Hooke n'est valable que dans la limite élastique du matériau, c'est-à-dire tant que la déformation est réversible. Au-delà de cette limite, le matériau entre en déformation plastique, et la relation contrainte-déformation devient non linéaire. Il est donc important de noter que la loi de Hooke a ses limites, notamment en cas de grandes déformations ou pour des matériaux non linéaires tels que les polymères ou certains métaux sous conditions extrêmes.

3.1.6. Module de Young

Le module de Young, également appelé module d'élasticité longitudinale ou module de traction, est une constante physique qui caractérise la rigidité d'un matériau soumis à une traction ou à une compression. Il décrit la relation entre la contrainte appliquée et la déformation élastique résultante dans la zone linéaire du comportement du matériau.

Ce concept a été formulé par le physicien britannique Thomas Young (1773–1829), qui a observé que, dans la limite des petites déformations, le rapport entre la contrainte de traction et la déformation unitaire reste constant, tant que la déformation reste réversible (élastique) et que la limite d'élasticité n'est pas dépassée.

Cette relation est exprimée par la loi de Hooke, formulée comme :

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$

Où :

- E est le module de Young (en Pa ou N/m^2),
- σ la contrainte normale (en Pa),
- ϵ la déformation unitaire (sans dimension).

Le module de Young permet ainsi de quantifier la rigidité d'un matériau : plus E est élevé, plus le matériau est rigide ; à l'inverse, un module faible indique un matériau plus souple. [20]

D'après l'équation aux dimensions, le module de Young est homogène à une pression, ou plus précisément une contrainte. L'unité internationale est donc le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général donné en méga pascal (MPa) ou newton par millimètre carré (N/mm²).

3.1.7. Coefficient de Poisson ν

Le coefficient de Poisson est un paramètre mécanique fondamental qui caractérise la contraction transversale d'un matériau lorsqu'il est soumis à une traction ou compression longitudinale. En d'autres termes, il exprime la tendance d'un matériau à se rétrécir dans les directions perpendiculaires à l'axe de la charge lorsqu'il est étiré, ou à s'élargir lorsqu'il est comprimé.

Ce coefficient est noté par la lettre grecque ν (nu) et a été introduit par le mathématicien français Denis Poisson (1781–1840), à partir de considérations théoriques basées sur la structure moléculaire de la matière.

Il est défini par la relation suivante :

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (9)$$

Où :

- $\varepsilon_{transversal}$ est la déformation perpendiculaire à la direction de la charge,
- $\varepsilon_{longitudinal}$ est la déformation dans la direction de la charge.

Le signe négatif reflète le fait que les déformations longitudinales et transversales ont des sens opposés (par exemple, allongement axial et rétrécissement radial lors d'un essai de traction).

La valeur du coefficient de Poisson varie généralement entre 0 et 0,5 pour la majorité des matériaux usuels. S'il est égal à 1/2, le matériau est parfaitement incompressible. [21].

Par exemple :

- Métaux : environ 0,3
- Caoutchouc : proche de 0,5 (quasi-incompressible)
- Verre ou céramiques : environ 0,2. [22]

3.1.8. Critère de plasticité

Un critère de plasticité est une loi ou une condition mathématique qui définit la surface de plasticité d'un matériau, c'est-à-dire la frontière entre son comportement élastique et son comportement plastique. Cette surface délimite les combinaisons de contraintes à partir desquelles le matériau commence à se déformer de manière irréversible.

Les critères de plasticité ont été initialement développés pour décrire le comportement des métaux ductiles, mais leur usage s'est progressivement étendu à d'autres matériaux, notamment les sols et les roches, dans le cadre de la mécanique des milieux continus ou de la géo mécanique, où ils sont utilisés comme critères de rupture.

Il existe plusieurs critères de plasticité selon le type de matériau étudié, parmi les plus connus:

- Critère de Von Mises (ou critère de distorsion), adapté aux matériaux métalliques isotropes,
- Critère de Tresca, plus simple mais souvent plus conservatif que celui de von Mises,
- Critères de Mohr-Coulomb et Drucker-Prager, couramment utilisés pour les sols et les roches.

Chaque critère exprime une équation définissant une surface dans l'espace des contraintes, en dehors de laquelle le comportement du matériau cesse d'être purement élastique. [23]

3.1.9. Critère de Tresca

Le critère de Tresca, formulé en 1864 par le scientifique français Henri Tresca, est l'un des premiers modèles de plasticité développés pour prédire le comportement plastique des matériaux ductiles. Il repose sur la notion de contrainte de cisaillement maximale, et postule que la déformation plastique commence lorsqu'elle atteint une certaine valeur critique.

Mathématiquement, la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} est définie comme :

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (10)$$

Où :

- σ_1 est la contrainte principale maximale,
- σ_3 est la contrainte principale minimale.

Le critère de Tresca stipule que la plastification débute lorsque cette contrainte de cisaillement maximale atteint une valeur seuil notée τ_e , appelée contrainte de cisaillement équivalente :

$$\tau_{max} \geq \tau_e \quad (11)$$

Dans le cas d'un essai de traction uni axiale, la plastification est observée sur des plans inclinés à 45° par rapport à l'axe de chargement, ce qui correspond aux plans de cisaillement maximal. Cette observation expérimentale confirme la validité du critère pour les matériaux ductiles. [24]

$$\frac{1}{2} \sup |\sigma_1 - \sigma_{111}| \leq \tau_e \text{ Ou } \sup |\sigma_1 - \sigma_{111}| \leq \sigma_e \quad (12)$$

La déformation plastique commence lorsque la contrainte de cisaillement atteint une valeur critique.

3.1.10. Critère de Von Mises

Le critère de Von Mises, également appelé théorie de l'énergie de distorsion maximale, a été formulé en 1913 par le mathématicien autrichien Richard von Mises. Il permet de prédire le début de la déformation plastique dans un matériau, notamment les matériaux ductiles, soumis à un état de contrainte complexe.

Contrairement à d'autres critères qui se basent uniquement sur des contraintes maximales (comme celui de Tresca), le critère de Von Mises s'appuie sur la distribution de l'énergie de déformation, en particulier l'énergie de distorsion, qui correspond à la partie de l'énergie responsable du changement de forme (et non de volume) du matériau.

Le critère postule que la plastification commence lorsque cette énergie atteint une valeur critique, et que la contrainte équivalente de Von Mises atteint la limite d'élasticité en traction simple. Il est exprimé par :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (13)$$

Où :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sont les contraintes principales.

La condition de plasticité s'écrit alors :

$$\sigma_{eq} \geq \sigma_y \quad (14)$$

Avec σ_y la limite d'élasticité du matériau.

Ce critère est particulièrement apprécié pour sa précision dans l'analyse de structures soumises à des efforts multiaxiaux, car un état de contrainte purement hydrostatique (identique dans toutes les directions) n'entraîne pas de plastification, ce qui est en accord avec les observations expérimentales. [24]

Ce critère repose sur l'hypothèse que dans un état d'élasticité, la contrainte de cisaillement maximal sur tous les points d'un milieu quelconque est la même et est égale à la moitié de la contrainte d'élasticité obtenue à partir d'un test de tension uni-axiale pour le matériau donné.

En 3D, il y a élasticité si au moins l'une des inégalités suivantes est satisfaite :

$$2|\tau_1| = |\sigma_2 - \sigma_3| \geq \sigma_y \quad (15)$$

$$2|\tau_2| = |\sigma_3 - \sigma_1| \geq \sigma_y \quad (16)$$

$$2|\tau_3| = |\sigma_1 - \sigma_2| \geq \sigma_y \quad (17)$$

En d'autres termes, l'élasticité repose sur la contrainte de cisaillement maximal qui est égale à la moitié de la différence entre les contraintes principales maximale et minimale.

Conformément à ce critère, la contrainte principale intermédiaire n'influence pas l'état d'élasticité. [25]

3.1.11. Comportements mécaniques :

a) Comportement fragile

Le comportement fragile désigne la tendance d'un matériau à se rompre brutalement lorsqu'il est soumis à une charge, sans passer par une phase de déformation plastique. En d'autres termes, ces matériaux cassent sans avertissement préalable, c'est-à-dire sans allongement ni déformation visible avant la rupture.

Des exemples typiques de matériaux fragiles incluent le verre, les céramiques et certains polymères rigides (voir figure 19). Ces matériaux présentent une limite élastique très élevée, mais une ductilité très faible, voire nulle.

Cette fragilité s'explique par la difficulté de déplacement des dislocations à température ambiante. En effet, la structure atomique de ces matériaux repose souvent sur des liaisons covalentes fortes ou une alternance régulière de charges ioniques, ce qui bloque les plans de glissement nécessaires à la déformation plastique. Ainsi, lorsqu'une contrainte est appliquée, l'énergie ne peut pas être dissipée par déformation, et le matériau se fracture rapidement. [26]

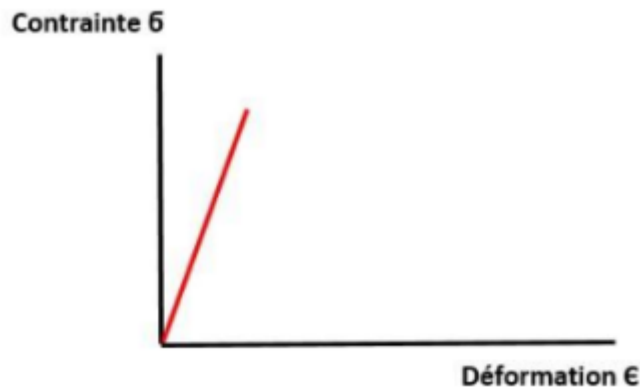


Figure 19: Courbe contrainte-déformation du comportement fragile [26]

b) Le comportement ductile

Le comportement ductile d'un matériau fait référence à sa capacité à subir une déformation plastique irréversible sans se casser. Cette déformation plastique suit généralement une déformation élastique réversible, ce qui signifie qu'un matériau peut d'abord se déformer de manière réversible sous l'effet de contraintes. Cependant, une fois que la limite élastique est atteinte, la déformation devient permanente et le matériau ne retrouve plus sa forme initiale.

✓ **La ductilité :**

La ductilité mesure cette capacité à se déformer sans rupture. Elle peut être exprimée de plusieurs manières :

- **En pourcentage de réduction de la section transversale :** Cela indique la diminution de la surface de la section du matériau dans la zone où il subit la plus grande déformation avant la rupture.
- **En pourcentage d'allongement :** Cela représente l'étirement du matériau avant de se rompre.

✓ **L'importance de la ductilité :**

La ductilité est essentielle dans de nombreuses applications industrielles, comme la fabrication de pièces de machines, de structures métalliques, ou de câbles. Un matériau ductile est particulièrement recherché lorsqu'il est nécessaire de supporter de grandes déformations sans se casser, par exemple dans la construction ou les composants automobiles.

Les matériaux ductiles sont également plus faciles à façonner, souder et usiner. À l'inverse, un matériau fragile (faible ductilité) risque de se briser sous de faibles contraintes après une déformation minimale.

✓ **Exemples de matériaux ductiles :**

- Acier doux
- Aluminium
- Cuivre

En somme, un matériau ductile est capable de supporter de grandes déformations plastiques avant la rupture, ce qui le rend adapté à des applications où la résistance à la rupture n'est pas le seul critère important. (Figure 20)

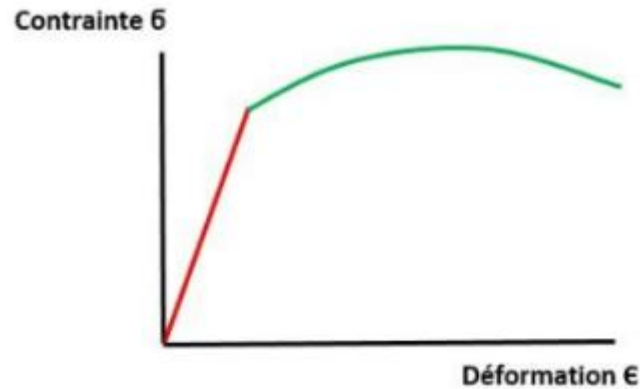


Figure 20: Courbe contrainte-déformation du comportement ductile [26]

C) Comportement non linéaire

Les matériaux élastiques non linéaires sont des matériaux dont la relation entre la charge et le déplacement ne suit pas la loi de Hooke. Contrairement aux matériaux élastiques linéaires, leur réponse mécanique n'est pas proportionnelle à la contrainte appliquée. Ces matériaux peuvent supporter des charges très importantes tout en conservant un comportement élastique, c'est-à-dire qu'ils reprennent leur forme initiale une fois la charge retirée, même après de grandes déformations.

Dans certains cas, ces déformations peuvent dépasser 100 %, et parfois même atteindre jusqu'à 700 %, sans entraîner de rupture. Une caractéristique importante de ces matériaux est leur incompressibilité : malgré les changements de forme sous contrainte, leur volume global reste pratiquement constant.

Cette combinaison de forte élasticité et d'incompressibilité est essentielle dans la modélisation de leur comportement contrainte-déformation, notamment dans des domaines comme la biomécanique, le caoutchouc ou certains polymères souples. [27] (figure 21)

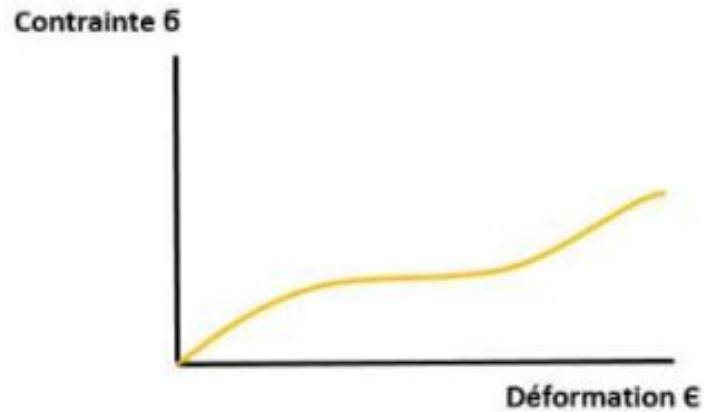


Figure 21: Courbe contrainte-déformation du comportement élastique non linéaire [26]

3.2. Essai de fatigue

Toute pièce mécanique est soumise, durant son fonctionnement normal, à un certain nombre de sollicitations de causes variables, se traduisant le plus souvent par des variations cycliques de contraintes.

L'endommagement par fatigue, mené jusqu'à la ruine, comprend trois périodes d'importance variable selon les matériaux et les caractéristiques de sollicitations :

- Période de germination ou période d'amorçage
- Période de propagation
- Rupture brutale

En fait, dans le matériau, des microfissures s'amorcent et se propagent de plus en plus vite (de 10^{-7} mm/cycle à 10^{-3} mm/cycle). Dès que la section résiduelle est trop faible par rapport à la sollicitation, la rupture brutale de la structure s'ensuit.

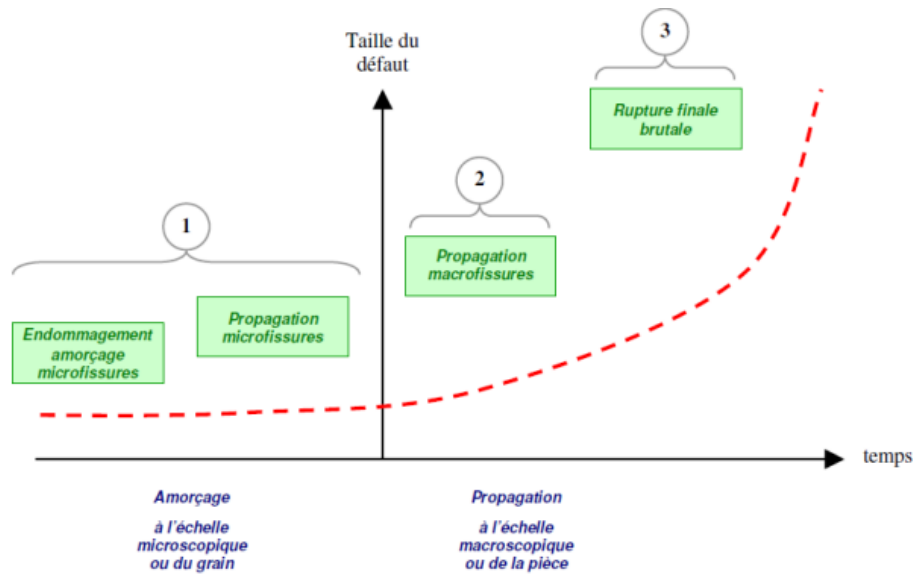


Figure 22: Les 3 phases de la rupture par fatigue

3.2.1. Protocole expérimental :

L'essai consiste à soumettre une série d'éprouvettes à des cycles répétitifs de sollicitations.

Plusieurs types d'essais de fatigues peuvent être distingués selon le type de sollicitation à savoir:

- Fatigue en traction-compression
- Fatigue en torsions alternées
- Fatigue en flexion.

Généralement les sollicitations sont appliquées d'une façon sinusoïdale en fonction du temps.

On définit N le nombre de cycles et N_f le nombre de cycles à la rupture.



Figure 23: essai de fatigue

3.2.2. Contraintes appliquées

Lors des essais de fatigue, la contrainte imposée à l'éprouvette varie généralement de manière quasi sinusoïdale au fil du temps. Cette forme d'application est principalement dictée par les capacités techniques des machines d'essai, ainsi que par des considérations pratiques liées au traitement et à l'analyse des résultats.

La contrainte considérée dans ce contexte est une contrainte globale, déterminée en fonction de la section de la pièce selon les principes de la résistance des matériaux, et en supposant un comportement élastique du matériau. Elle est habituellement exprimée en mégapascals (MPa) ou en newtons par millimètre carré (N/mm^2) [27]

3.2.3. Cycle de contrainte en fatigue

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types :

- Traction – compression
- Flexion plane
- Flexion rotative
- Flexion trois points

- Torsion

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum σ_{max} et par un minimum σ_{min} [27]

On en déduit :

- La contrainte moyenne :

$$\sigma_{moy} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (18)$$

- L'amplitude de contrainte :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (19)$$

- L'étendue de variation de contrainte

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (20)$$

3.2.4. Rapport de charge R

Le rapport de charge, noté R, est défini comme le quotient de la contrainte minimale (σ_{min}) par la contrainte maximale (σ_{max}) appliquées au cours d'un cycle de fatigue :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (21)$$

Ce paramètre est essentiel pour caractériser le type de sollicitation cyclique subi par un matériau.

Il influence significativement la durée de vie en fatigue et est utilisé pour interpréter les résultats des essais, notamment à travers les courbes de Wöhler

Dans la Figure 24, les différents termes et symboles associés au cycle de contrainte sont illustrés, permettant une meilleure compréhension des variations de contraintes au cours des cycles

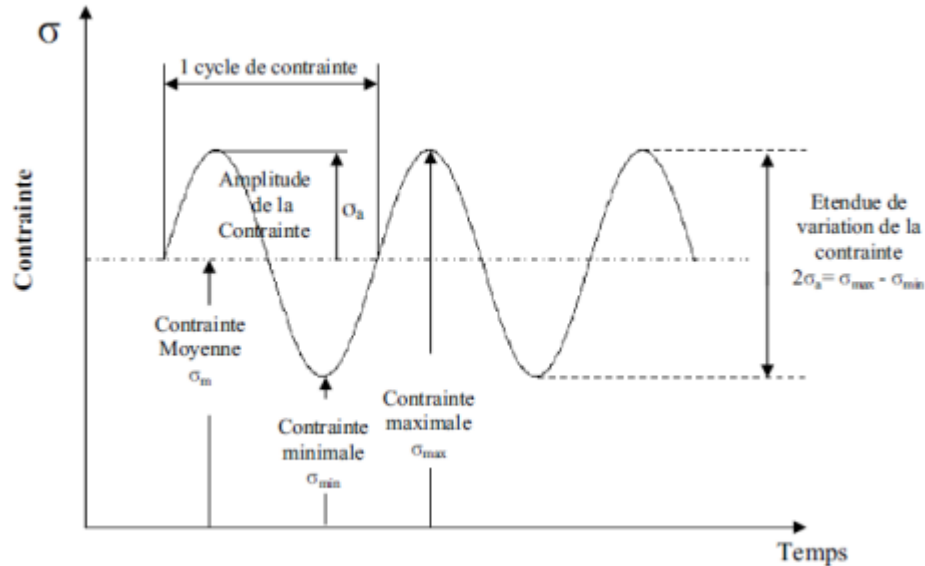


Figure 24: Cycle de contrainte en fatigue.

3.2.5. Comportement sous sollicitation cyclique

Lorsqu'un matériau est soumis à des sollicitations cycliques, l'enregistrement de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation au cours d'un cycle permet de tracer une boucle d'hystérésis, comme illustré dans la Figure 25. Cette boucle reflète le comportement du matériau face aux chargements répétés.

Au début de l'essai, la forme et la taille de la boucle d'hystérésis peuvent évoluer en raison de phénomènes tels que le durcissement ou l'adoucissement cyclique. Après un certain nombre de cycles, la boucle tend à se stabiliser, indiquant que le matériau a atteint un état d'équilibre sous les conditions de chargement imposées. Cette phase est connue sous le nom de stabilité cyclique

La surface de la boucle d'hystérésis représente l'énergie dissipée par cycle, principalement sous forme de chaleur, et est un indicateur de l'endommagement progressif du matériau. Une augmentation de cette surface au fil des cycles peut signaler une accumulation de dommages, tandis qu'une diminution peut indiquer une adaptation du matériau au chargement.

L'analyse de l'évolution des boucles d'hystérésis est essentielle pour comprendre la durabilité des matériaux et prédire leur durée de vie en service [28]

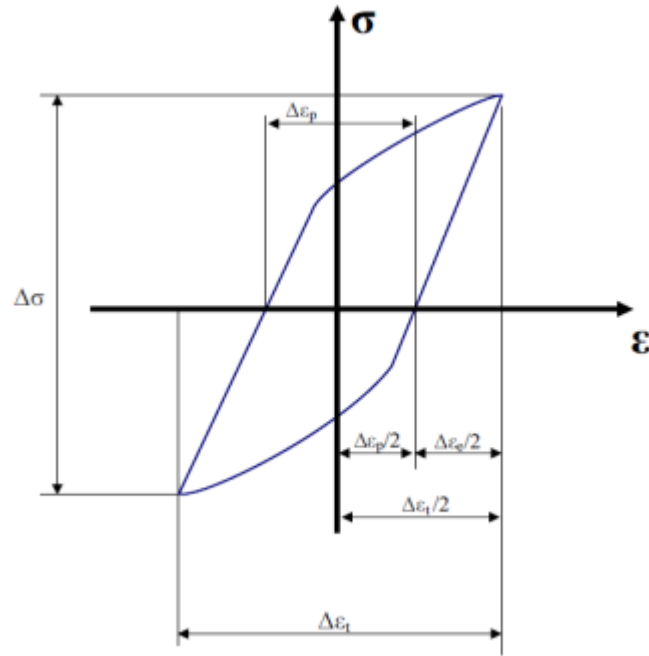


Figure 25: définitions des différents paramètres caractérisant une boucle d'hystérésis

Pour caractériser le comportement cyclique d'un matériau, les paramètres suivants sont couramment utilisés :

- Etendue de variation de la contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ (22)

- Amplitude de contrainte : $\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) = \frac{\Delta\sigma}{2}$ (23)

- Contrainte moyenne : $\sigma_{moy} = \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min})$ (24)

- Rapport de contrainte :

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (25)$$

- Etendue de variation de la déformation : $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$ (26)

- Amplitude de déformation : $\varepsilon_a = \frac{1}{2}(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) = \frac{\Delta\varepsilon}{2}$ (27)

- Déformation moyenne : $\varepsilon_{moy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min})$ (28)

- Rapport de déformation :

$$R_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{min}} \quad (29)$$

3.2.6. Courbe de Wöhler (courbe $\sigma - N$)

Cette courbe est appelée courbe S.N (Stresses- Number of cycles) dans les pays anglo-saxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule courbe qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans tout le domaine de fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques NR est le nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre NR est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (σ_a, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure suivante [29]:

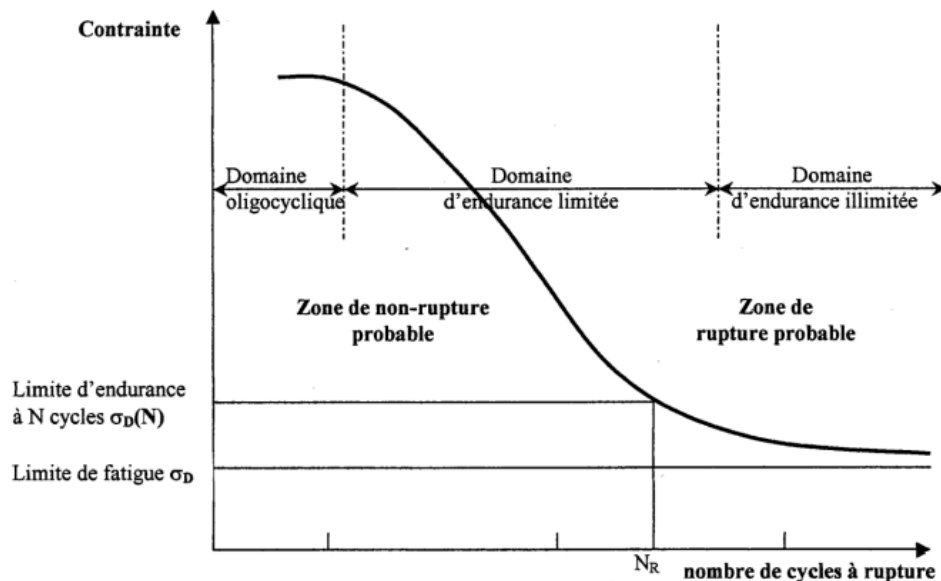


Figure 26: Allure de la courbe de Wöhler

- Limite de fatigue : c'est la contrainte pour laquelle aucune rupture n'est observée après un nombre de cycle N infini,
- Limite d'endurance : la limite d'endurance correspond à la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte lorsque le nombre de cycles devient très grand.

Dans le cas des aciers, cette limite d'endurance peut être réellement approchée avec 10^7 cycles.

- Durée de vie : c'est le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette rompt.

3.2.7. Endommagement par fatigue

La durée de vie en fatigue jusqu'à la rupture regroupe deux périodes : la période d'initiation des fissures et la période de croissance des fissures. La différenciation entre les deux périodes est importante car plusieurs conditions de surface affectent la période d'initiation, tel que la rugosité, mais ont une influence négligeable sur la période de croissance des fissures qui est lent, en raison des effets des microstructures, par exemple les joints des grains. Cependant, après l'apparition d'une croissance de microfissure loin du site de nucléation, on observe une croissance plus régulière. Diverses étapes pour les deux périodes sont indiquées à la figure 26. Le nombre de cycle pour la durée de vie à la rupture en fatigue, Nt est la somme de nombre des cycles d'initiation, Ni et de propagation, Np , c'est-à-dire :

$$Nt = Ni + Np \quad (30)$$

Les environnements corrosifs peuvent affecter l'initiation et la croissance des fissures, mais d'une manière différente pour les deux périodes [30].

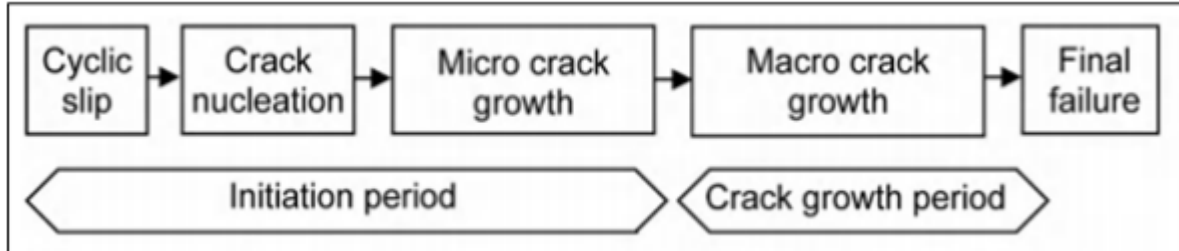


Figure 27: Période d'initiation de fissure et de croissance [30].

3.2.8. Amorçage

Il y a trois manières différentes d'amorçage dans les matériaux métalliques cristallins :

- L'amorçage par glissement cyclique.
- Amorçage à partir des micro-hétérogénéités.
- Amorçage à partir des particularités géométriques

3.2.9. Propagation de fissures

L'étape de propagation des fissures apparaît après l'amorçage sous sollicitation cycliques.

Dans cette étape les joints de grains peuvent jouer deux rôles, le premier comme un obstacle qui arrête la propagation et le deuxième comme des chemins de fissuration à température élevée ou en milieu corrosif. En chargement uniaxial, les microfissures ont un angle de 45° par rapport au

sens d'application de contrainte (stade 1). Par contre, le dégagement de la fissure principale fait un angle de 90° à l'axe de sollicitation (stade 2) (figure 28). La figure 29 présente un exemple de la direction de propagation d'une fissure dans un alliage d'aluminium (Al-4,5%Zn-1,25%Mg) [31].

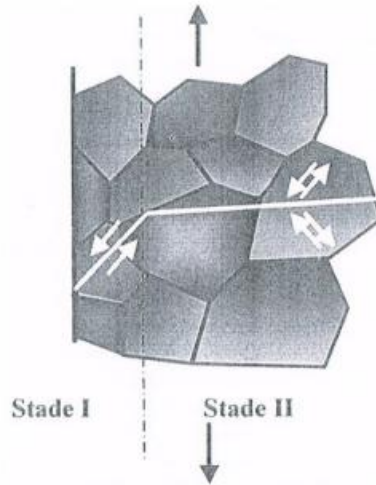


Figure 28: Direction de propagation des fissures [31].

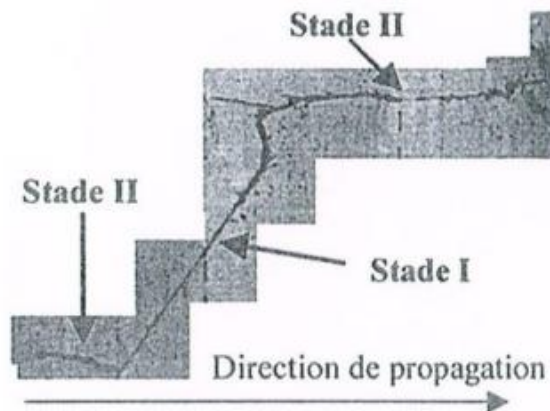


Figure 29 : Direction de propagation d'une fissure dans un alliage d'aluminium (Al4,5%Zn-1,25%Mg) [31].

a) Modes de fissuration

Selon le déplacement des lèvres de la fissure on peut définir trois modes de fissuration correspondent à chacun. Le mode I est caractérisé par le facteur d'intensité des contraintes K_I et concerne l'ouverture perpendiculaire des lèvres de la fissure par rapport au plan de la fissure. Le mode II (K_{II}) induit un cisaillement plan des lèvres de la fissure, et le mode III (K_{III}) provoque un cisaillement anti-plan. La figure 30 présente les trois modes.

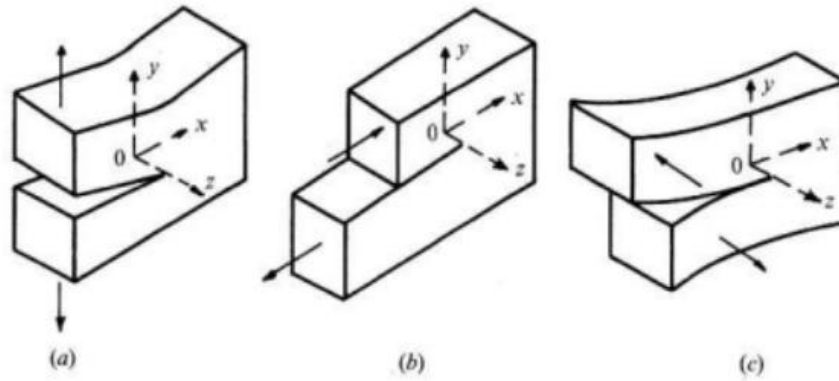


Figure 30: Modes de fissuration : a) mode I, b) mode II et c) mode III.

b) Courbes de propagation des fissures

L'interprétation de la courbe d'endommagement se base sur l'existence d'une taille critique des fissures, qui dépend de la contrainte maximale, et leur propagation serait irréversible et conduirait à la rupture. Si les fissures débouchent en surface, on peut les observer à partir d'une longueur de 0,01 et 0,1 mm. On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les divers niveaux de contrainte de la courbe d'endurance et tracer les courbes de propagation des fissures. Ces courbes indiquent que l'importance relative d'amorçage et propagation, dépend de l'amplitude de la contrainte maximale. Par exemple, pour les contraintes élevées, l'amorçage correspond à 10 % et la propagation à 90 % de la durée de vie. Par contre, pour les contraintes voisines de la zone d'endurance, l'amorçage correspond à 80 ou 90 % et la propagation à 20 ou 10 % [32].

c) Les lois de la vitesse de fissuration

Nombreux chercheurs ont proposé différentes formules pour la vitesse de propagation à partir de la mesure des longueurs de fissures observées sur des éprouvettes en cours de fatigue. Si N est le nombre de cycles, σ la contrainte maximale des cycles, et a la longueur de la fissure, on peut citer:

1) La formule de Frost et Dugdale :

$$da / dN = A\sigma_a^3 \quad (31)$$

Où A est une constante qui dépend du matériau et de la contrainte moyenne.

Cette formule est valable pour les fissures petites par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

2) La formule de McEvily et Illg :

$$da / dN = f(K_t, \sigma_n) \quad (32)$$

Où σ_n est la contrainte nominale dans la section fissurée, et K_t le facteur de concentration de contrainte élastique théorique de Neuber.

3) Dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique, Boettner, Laird et McEvily ont proposé la formule (32) :

$$da / dN = A (\varepsilon_t \sqrt{a})^n \quad (33)$$

Où A est une constante, ε_t la déformation plastique totale par cycle; n a été trouvé voisin de 2, quel que soit le matériau.

4) La mécanique de la rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et brutale des fissures de fatigue. Expérimentalement, Paris et al (1960) [33, 34] ont proposé d'utiliser le Facteur d'Intensité de Contraintes d'Irwin [35] pour caractériser l'avancée de fissure par cycle. Ils ont établi une relation entre l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK et la vitesse de propagation da/dN pour tracer la courbe de fissuration (Figure 31).

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (34)$$

Où C et m sont des constantes qui dépendent du matériau ; ΔK l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte. La vitesse de fissuration dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique est accéléré où K se rapproche de K_c (le facteur d'intensité de contrainte qui cause la rupture finale) et ΔK_{th} (le seuil d'amplitude du facteur d'intensité de contrainte). Par contre, il apparaît un seuil au-dessous duquel la fissure ne se propage pas, pour les faibles valeurs de ΔK [32].

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = (1 - R) K_{max} \quad (35)$$

Si $K_{min} < 0$ alors $\Delta K = K_{max} \quad (36)$

Ou $\Delta K = \beta \sqrt{\pi a} (K_{max} - K_{min}) \quad (37)$

$$\beta = \left(\frac{D}{d} + \frac{1}{2} + \frac{3d}{8D} - 0.36 \frac{d^2}{D^2} + 0.73 \frac{d^3}{D^3} \right) \times \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (38)$$

Où D est le diamètre extérieur de la fissure et d est le diamètre au fond de la fissure.

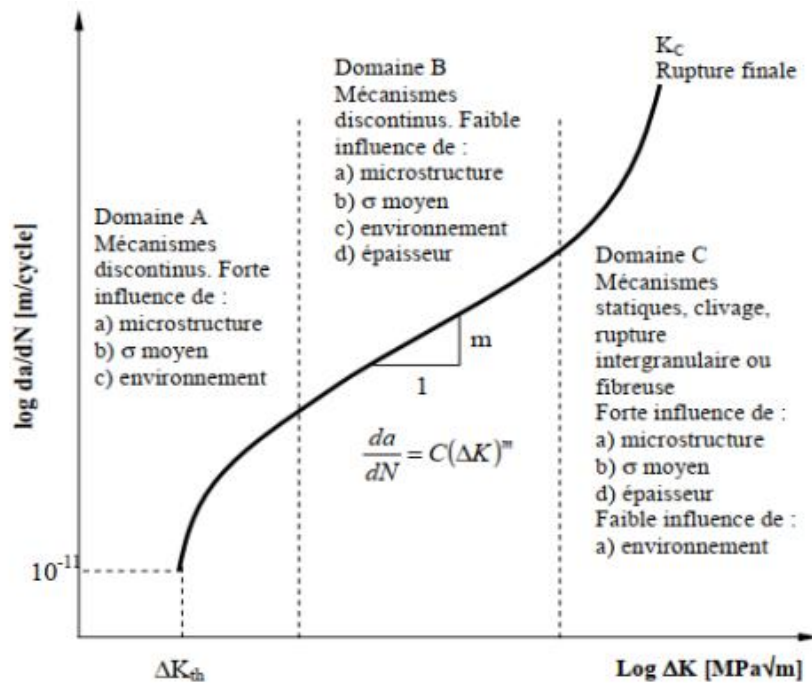


Figure 31: La courbe de fissuration par fatigue d'une fissure longue [33, 34].

4. Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir les bases théoriques et expérimentales nécessaires à la compréhension du comportement mécanique des aciers, en se focalisant particulièrement sur les essais de traction et de fatigue et L'analyse des lois de comportement et des mécanismes d'endommagement La modélisation numérique de ces essais sur une éprouvette soudée, qui sera présentée dans le chapitre suivant, vise à valider les approches théoriques et à quantifier précisément la dégradation des propriétés mécaniques dans les différentes zones du joint.

***Chapitre III :simulation
numérique***

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes étapes de la simulation numérique des modèles développés dans le but d'étudier l'effet du soudage sur les structures mécaniques. L'accent est mis sur la mise en œuvre des modèles dans un environnement numérique, en détaillant les choix de modélisation, la préparation des géométries, le maillage, les conditions aux limites, ainsi que l'analyse des résultats. Cette démarche vise à évaluer l'influence du soudage sur le comportement mécanique global des structures.

2. Présentation des logiciels :

2.1. ABAQUS :

ABAQUS est un logiciel de simulation numérique fondé sur la méthode des éléments finis. Il est couramment utilisé pour résoudre divers types de problèmes, notamment :

- les analyses structurales (calculs de champs de déformations et de contraintes),
- le transfert thermique,
- la diffusion de masse,
- la mécanique des sols,
- les phénomènes acoustiques,
- ainsi que la piézoélectricité.

Ce logiciel offre la possibilité de combiner plusieurs modèles de comportement mécanique afin de reproduire au mieux le comportement réel des matériaux. Il est capable de simuler un large éventail de matériaux tels que les métaux, le béton, les composites, les polymères, etc.

Dans le cadre de notre étude, nous adoptons un modèle élasto-plastique pour représenter le comportement mécanique des matériaux. Ces derniers sont supposés isotropes, tandis que les effets thermiques et la viscosité des matériaux sont négligés.

Le fonctionnement d'ABAQUS repose sur trois étapes principales (ABAQUS, 2014).

2.1.1. Le prétraitement : Lors de cette première étape, le modèle représentant le problème physique de la pièce ou de la structure à analyser est défini. Cette modélisation inclut la géométrie, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, les chargements ainsi que le maillage. Le modèle est généralement élaboré de manière graphique à l'aide de l'interface

ABAQUS/CAE (ABAQUS, 2014), qui permet une préparation complète des données nécessaires à la simulation.

2.1.2. La simulation : Cette seconde étape consiste à résoudre les équations issues du modèle physique à l'aide d'une des deux approches disponibles dans ABAQUS : la méthode standard (implicite) ou la méthode explicite, selon la nature du problème étudié. Il s'agit de la phase la plus consommatrice en temps, car la durée de calcul dépend de plusieurs facteurs : la complexité du modèle, la puissance de calcul de la machine, ainsi que le niveau de précision souhaité. Les résultats obtenus au terme de cette phase sont enregistrés dans un fichier de sortie (généralement nommé *job.odb*), qui sera ensuite exploité lors de l'étape de post-traitement (ABAQUS, 2006).

2.1.3. Le post-traitement : Le post-traitement constitue la phase d'exploitation des résultats issus de la simulation. Il permet d'accéder aux **efforts internes, déformations et contraintes** dans les différents éléments du modèle. Cette étape comprend également l'analyse graphique des résultats : visualisation des champs de déformation, répartition des contraintes, coupes, animations, et autres illustrations nécessaires à l'interprétation du comportement de la structure étudiée. Ces outils facilitent l'évaluation de la performance mécanique du système simulé et permettent de valider ou d'ajuster le modèle selon les besoins.

2.2.AFGROW :

Est un logiciel spécialisé dans l'analyse de la croissance des fissures de fatigue et la prédiction de la durée de vie des structures métalliques. Principalement utilisé dans l'**industrie aérospatiale** pour évaluer la durabilité des avions, il peut être appliqué à tout type de structure métallique soumise à la fissuration par fatigue, comme dans l'industrie pétrolière et gazière.

AFGROW intègre plusieurs modèles de croissance des fissures (notamment les équations de Forman, Walker, Harter-T, NASGRO, et une méthode par table de correspondance) ainsi que des modèles d'interaction de charge pour simuler la retardation de croissance. Il offre aussi des capacités avancées comme l'analyse des contraintes résiduelles, la modélisation de réparations collées, et la possibilité de définir des solutions personnalisées pour les facteurs d'intensité de contraintes. Le logiciel inclut des outils pour le filtrage des spectres de charge, le comptage des cycles, et l'export automatique des résultats vers Microsoft Excel. Son interface graphique permet une animation en temps réel de la croissance des fissures et des représentations graphiques des résultats [36]

3. Simulation Numérique de soudage (Détails, Étapes et Analyse Approfondie.)

3.1. la simulation de l'essais de traction :

3.1.1. Préparation d'un modèle :

Afin de mieux visualiser et comprendre l'effet du soudage sur les propriétés de la structure, la simulation numérique est organisée en deux parties :

a) La première partie :

Cette étude modélise des éprouvettes de traction simple, non soudées, mais présentant des propriétés mécaniques variées. Ces propriétés sont associées aux différentes zones typiques d'un joint soudé : le métal de base (MB), le métal fondu (MF) et la zone affectée thermiquement (ZAT).

b) La seconde partie :

Dans cette partie, une éprouvette soudée est modélisée. Les conditions de soudage sont intégrées pour observer les modifications induites sur le comportement mécanique de la structure. Cette simulation met en évidence l'impact réel du soudage sur les performances de la structure.

3.1.2. La création géométrique :

Afin de simuler l'essai de traction, deux types d'éprouvettes ont été modélisés avec ABAQUS:

a) Le premier type sont trois éprouvettes de traction de mêmes dimensions, sans soudage. Avec des différentes **propriétés mécaniques** qui sont détaillées dans le tableau 2 :

- **Première éprouvette** : avec les propriétés mécaniques de MB (métal de base) (figure 33)
- **Deuxième éprouvette** avec les propriétés mécaniques de MF (métal fondu) (figure 33)
- **Troisième éprouvette** : avec les propriétés mécaniques de la Zat (la zone affectée thermiquement) (figure 33)

b)Deuxième type: c'est une éprouvette de traction qui contient une soudure au milieu. (figure35).

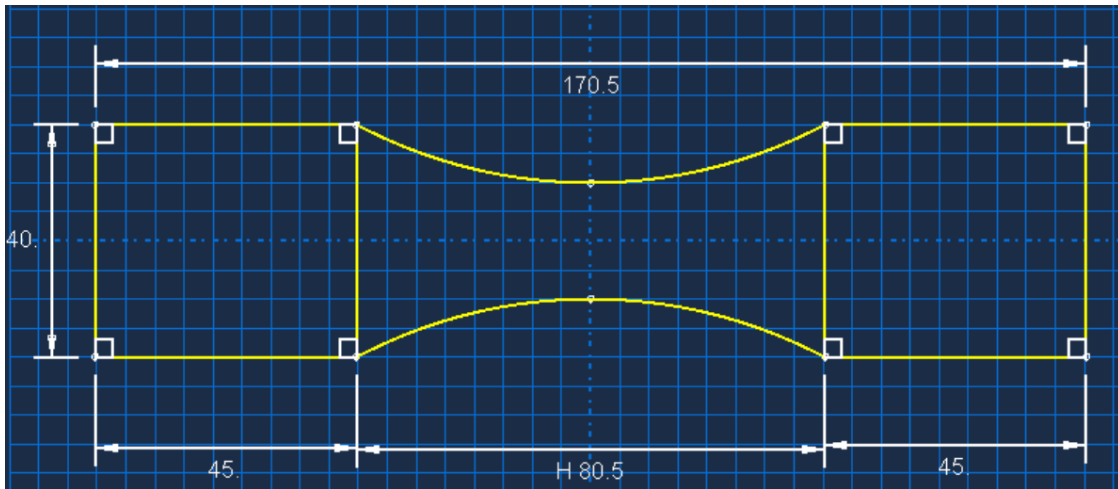


Figure 32: Dimensions des éprouvettes sans soudage.

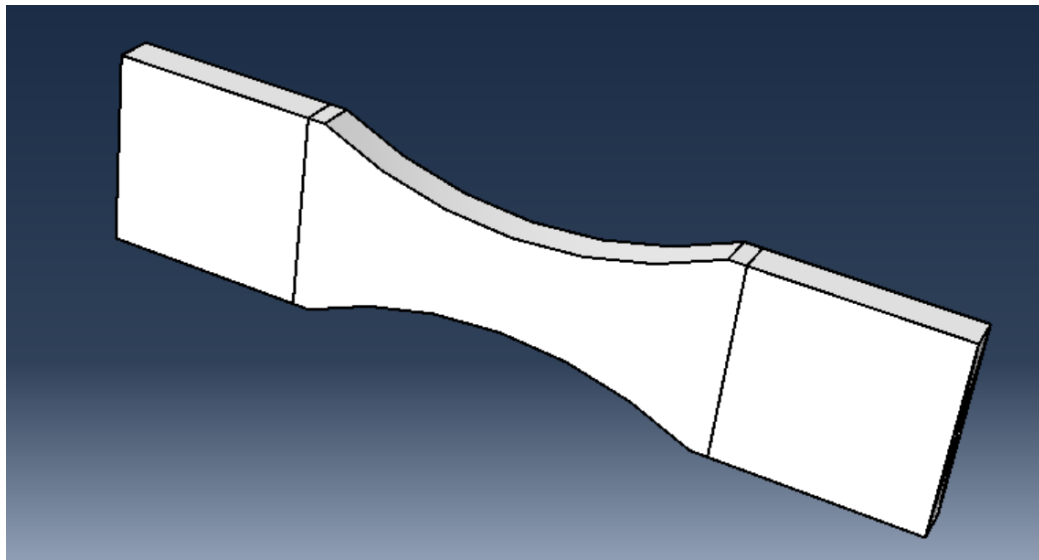


Figure 33 : Les éprouvettes modélisées avec ABAQUS sans soudage.

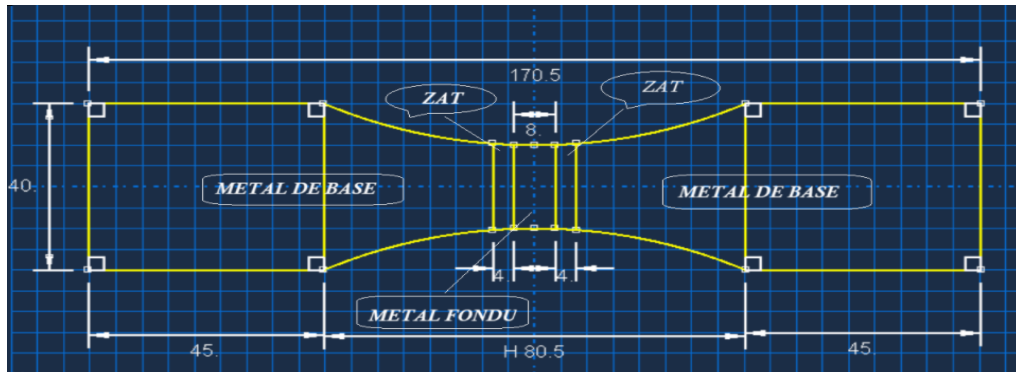


Figure 34: Dimensions de l'éprouvette soudée.

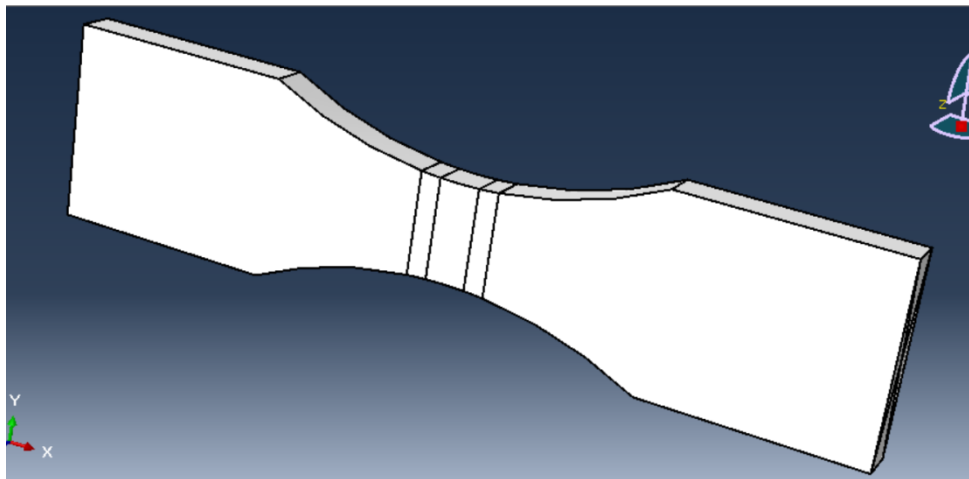


Figure 35: L'éprouvette modélisée avec ABAQUS avec soudage.

3.1.3. Propriétés physiques du matériau

Une fois le modèle géométrique de la pièce défini, il est nécessaire de lui associer un modèle mathématique décrivant le comportement mécanique ou thermique des matériaux utilisés.

Le tableau 2 donne des valeurs typiques des caractéristiques mécaniques et des propriétés de mise en œuvre.

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques du matériau C48

Matériaux	Propriétés mécaniques				
	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	K	n
Métal de Base (MB)	445	760	40	836	0,302
Métal fondu (MF)	420	720	35	1009	0,508
Zone affectée thermiquement (ZAT)	325	660	30	980	0,401

Les graphes suivants représentent les lois de comportement de notre matériau. Ils sont obtenues quand nous introduisant les caractéristiques mécaniques au logiciel (figure 36).

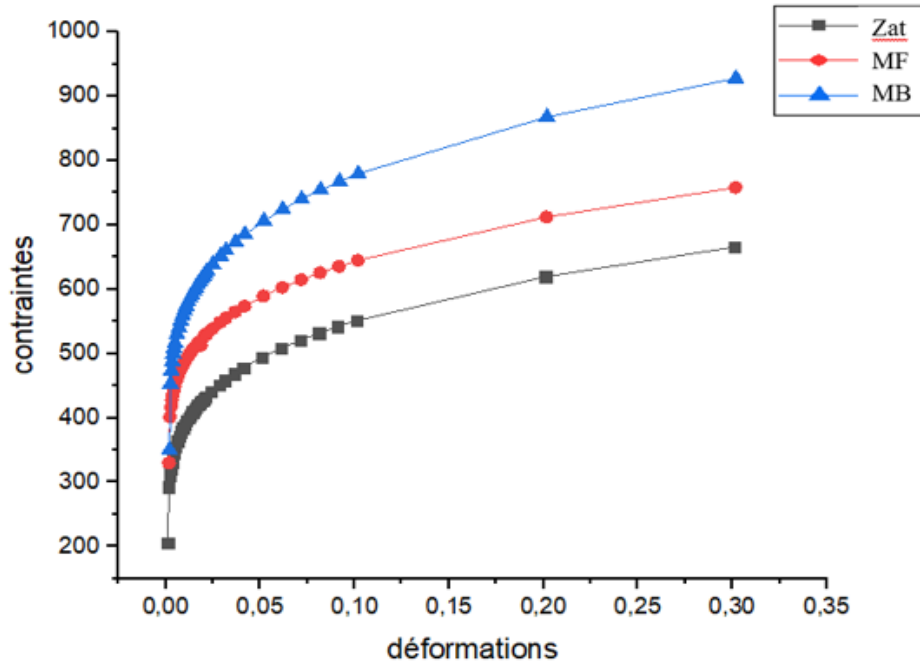


Figure 36: Lois de comportements des trois matériaux MB, MF et ZAT
(Résultats expérimentales) [37]

3.1.4. Maillage du modèle

Le maillage constitue l'une des étapes les plus sensibles dans un processus de calcul par éléments finis. La qualité du maillage a un impact direct sur la précision et la fiabilité des résultats obtenus. Cette étape consiste à choisir le type d'éléments de discrétisation ainsi que leur taille, en fonction de la géométrie de la pièce et des phénomènes physiques à modéliser.

Nous avons choisi un maillage spécial, pour donner plus de précision aux résultats. (Figure37)

Il y a deux méthodes utilisées pour créer un maillage sur ABAQUS, soit automatique ou manuelle.

Le maillage automatique donne un maillage homogène et continu soit gros ou fin sur toute la pièce, mais pour notre cas, nous avons utilisé la méthode manuelle pour assurer un raffinement de maillage à la surface la plus faible.

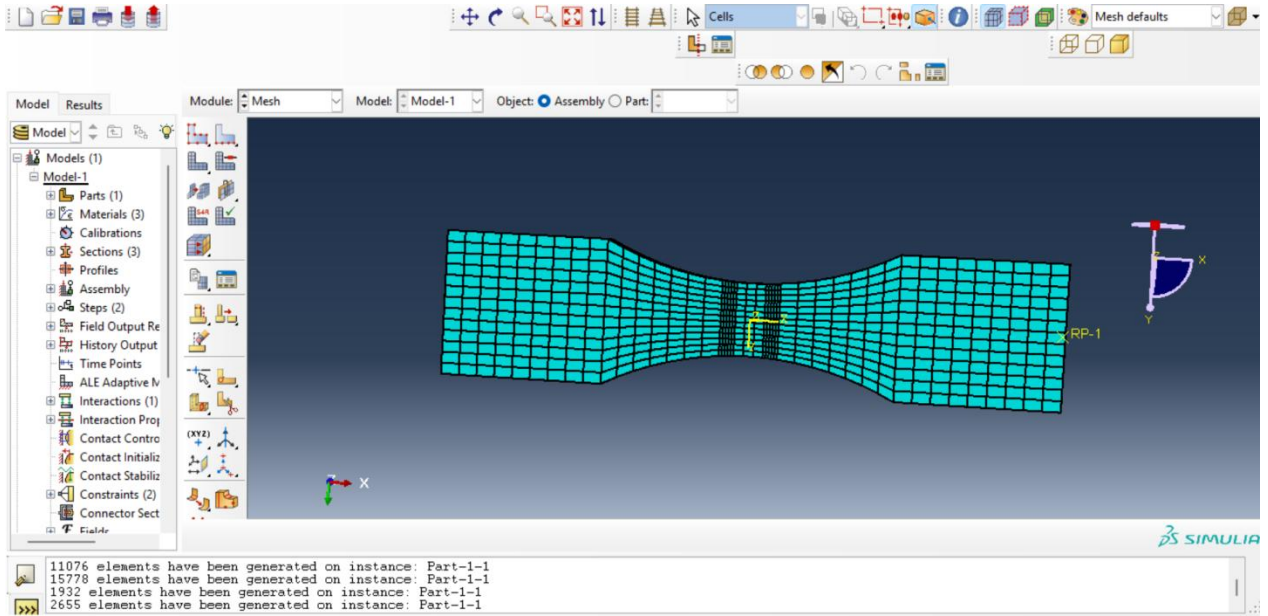


Figure 37: Le maillage choisi pour l'éprouvette soudée.

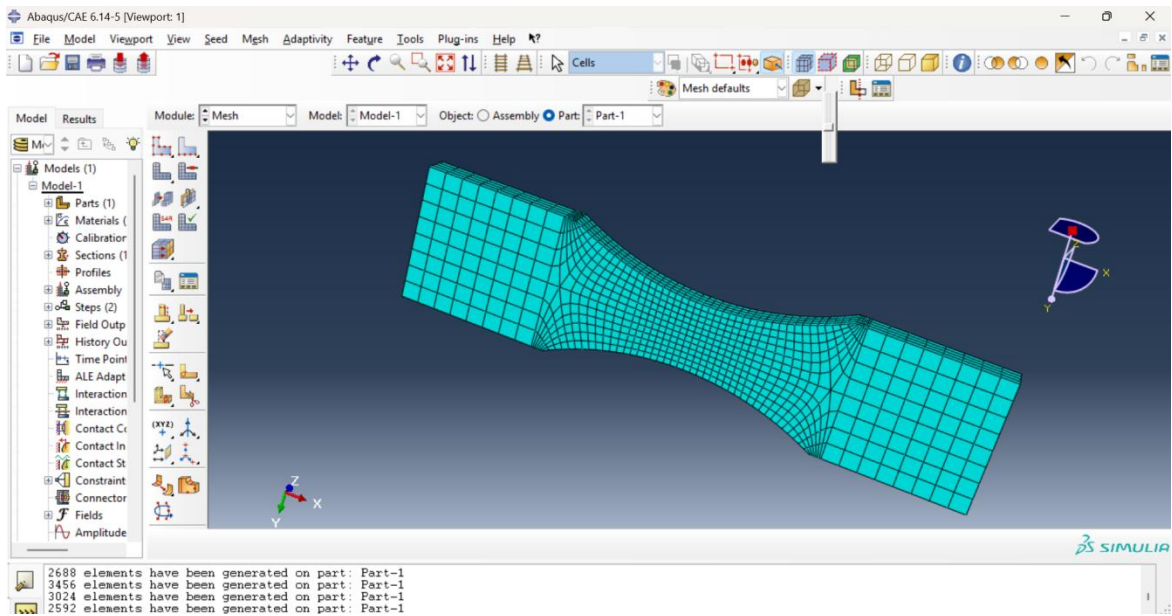


Figure 38: Le maillage choisi pour L'éprouvette sans soudure.

3.1.5. Conditions aux limites

Pour résoudre les équations du modèle par la méthode des éléments finis, il est indispensable de définir les conditions aux limites et les chargements appliqués à la pièce. Les conditions aux

limites servent à restreindre certains déplacements ou rotations, reproduisant ainsi les appuis ou les liaisons mécaniques de la structure réelle. Les chargements, quant à eux, représentent les sollicitations exercées sur la structure. Ils peuvent prendre diverses formes : **forces ponctuelles, pressions, moments, accélérations**, etc. Leur bonne définition est essentielle pour garantir la justesse des résultats de déformation et de contrainte obtenus.

Le choix de la méthode de contact appropriée entre des zones d'un joint soudé en Abaqus dépend de plusieurs facteurs, notamment de la nature du joint, des charges appliquées et du niveau de précision souhaité. Pour notre cas, nous avons choisi le type de joint bout à bout pour cette méthode permet de de bien simuler le contact entre les surfaces de notre joint soudée

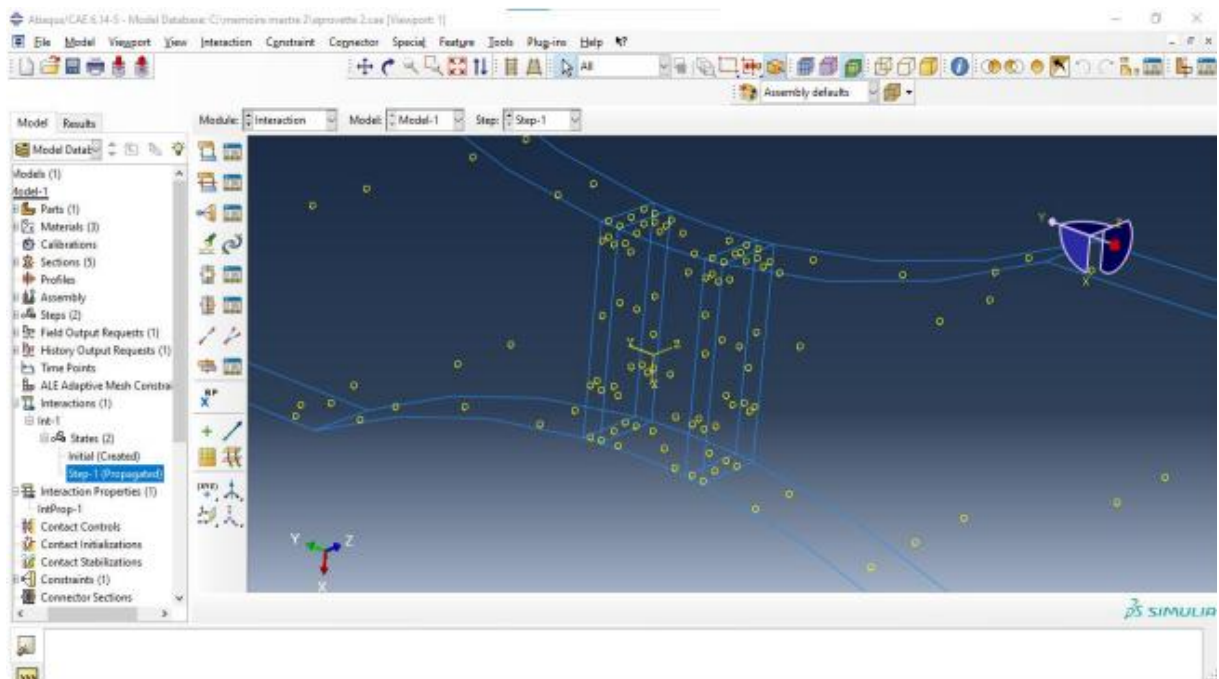


Figure 39: Choix de type de contacte entre les zones de soudage.

Pour la fixation et le chargement initial de l'éprouvette (figure.40)

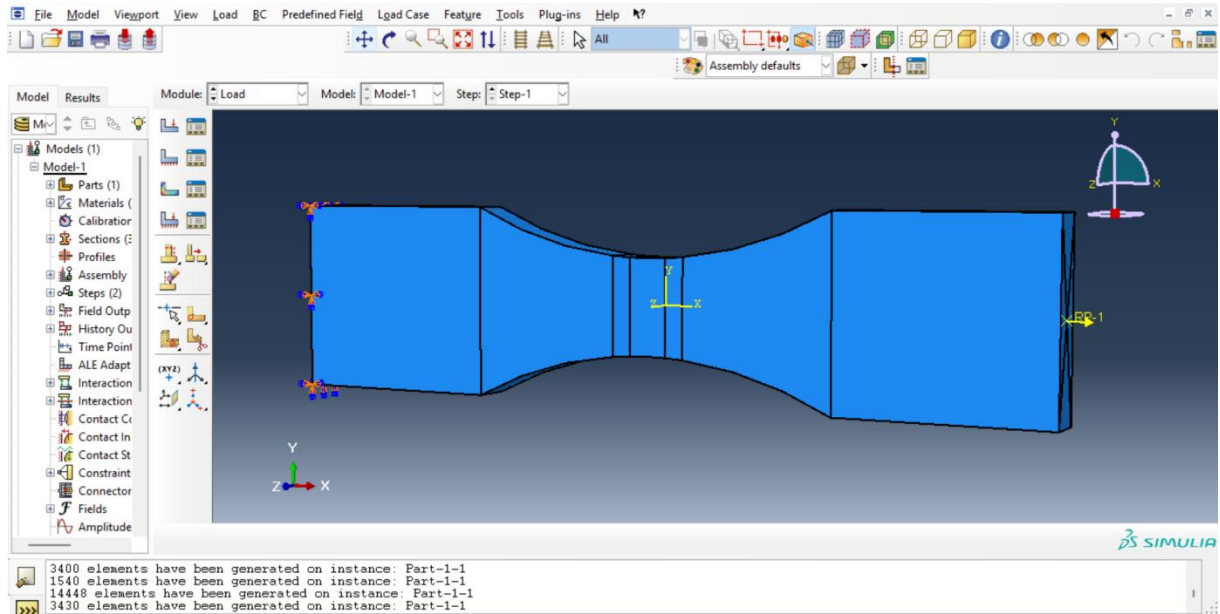


Figure 40: Condition initiale.

3.2. Essais de fatigue :

3.2.1. Préparation de modèle

Pour simuler l'essai de fatigue et la rupture dès 3 l'éprouvettes (MB, MF et zat), le logiciel AFGROW a été utilisé, en suivant les étapes ci-dessous :

a) Création géométrique :

Il existe plusieurs types d'éprouvettes couramment utilisées pour les essais de fatigue et de mécanique de la rupture. Chaque type est conçu pour simuler des conditions de chargement spécifiques ou pour des objectifs particuliers (par exemple, initiation de fissure, propagation de fissure, ténacité à la rupture).

Dans notre l'éprouvette CT a été choisi, puis en a crier un près fissure pour simuler la rupture. Les dimensions de l'éprouvette illustrées dans la figure (41) :

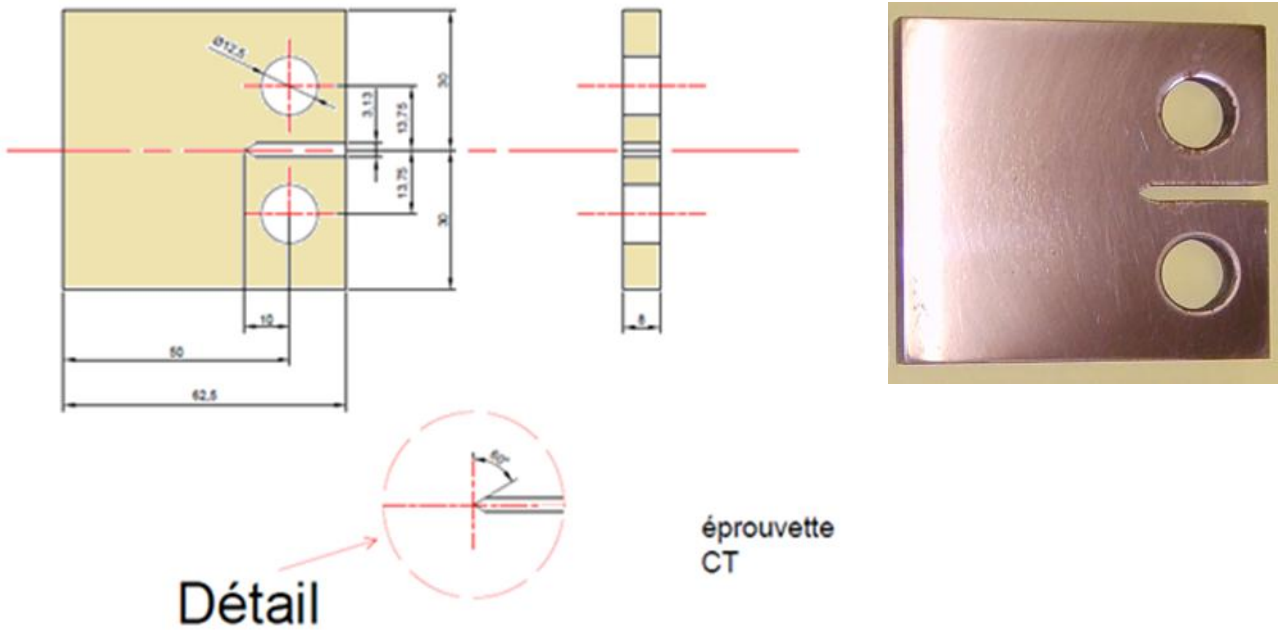


Figure 41: dimensionnement de l'éprouvette CT.

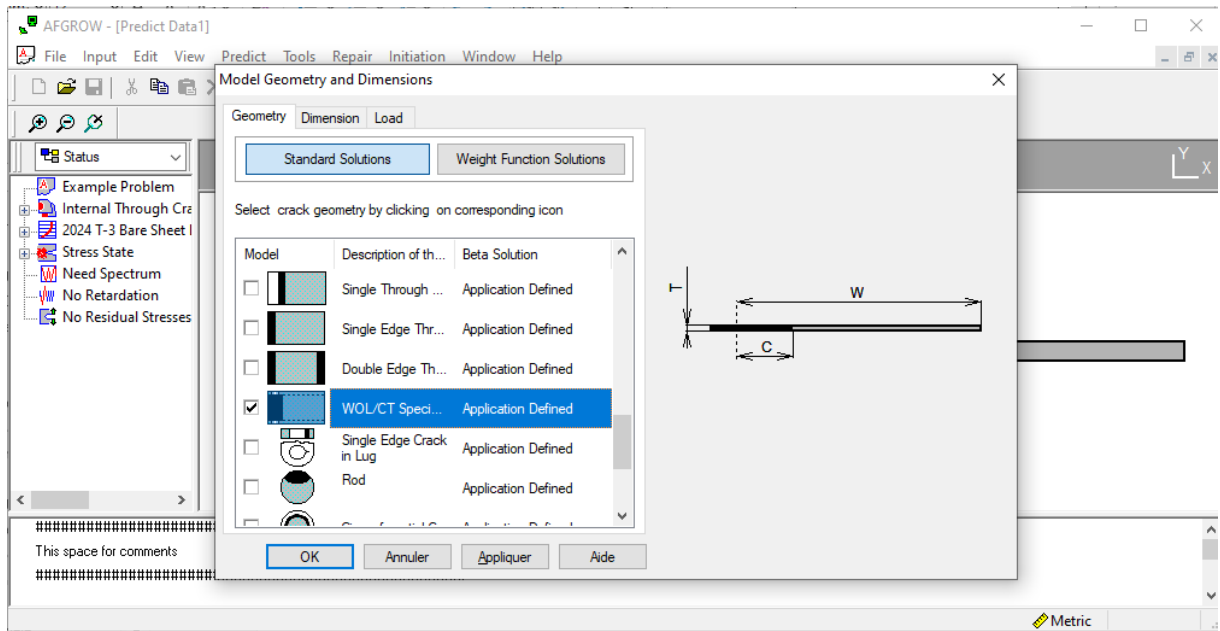


Figure 42: modélisation de l'éprouvette dans AFGROW

b) Propriétés des matériaux :

Les propriétés mécaniques des trois éprouvettes CT, correspondant aux différents matériaux du joint soudé (MB, MF et la ZAT), ont été introduites dans le logiciel AFGROW (figure43).

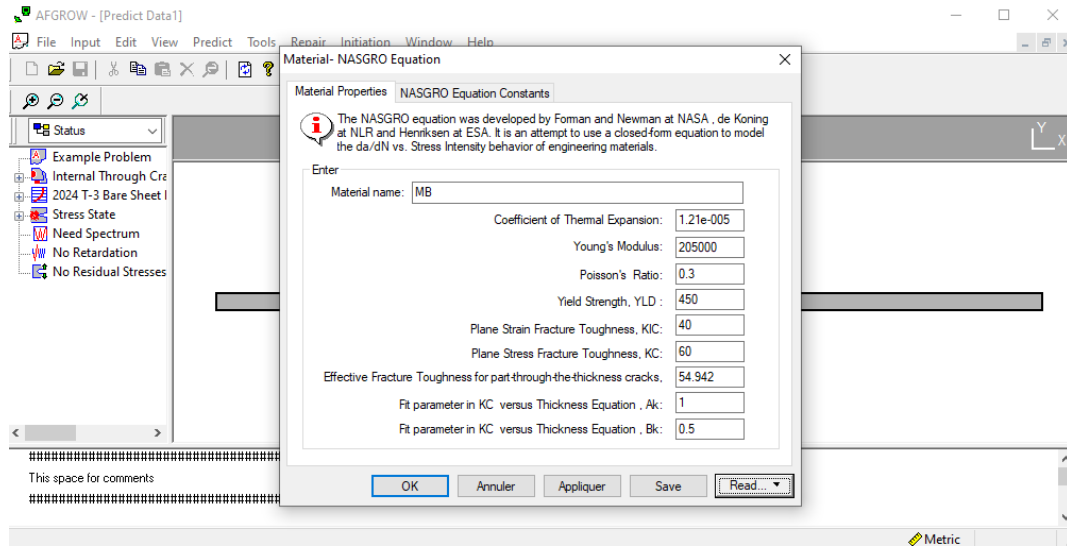


Figure 43: les propriétés mécaniques de l'éprouvette dans AFGROW.

c) Chargement :

Les données de chargement cyclique ont été introduites pour simuler un essai de fatigue (figure 44).

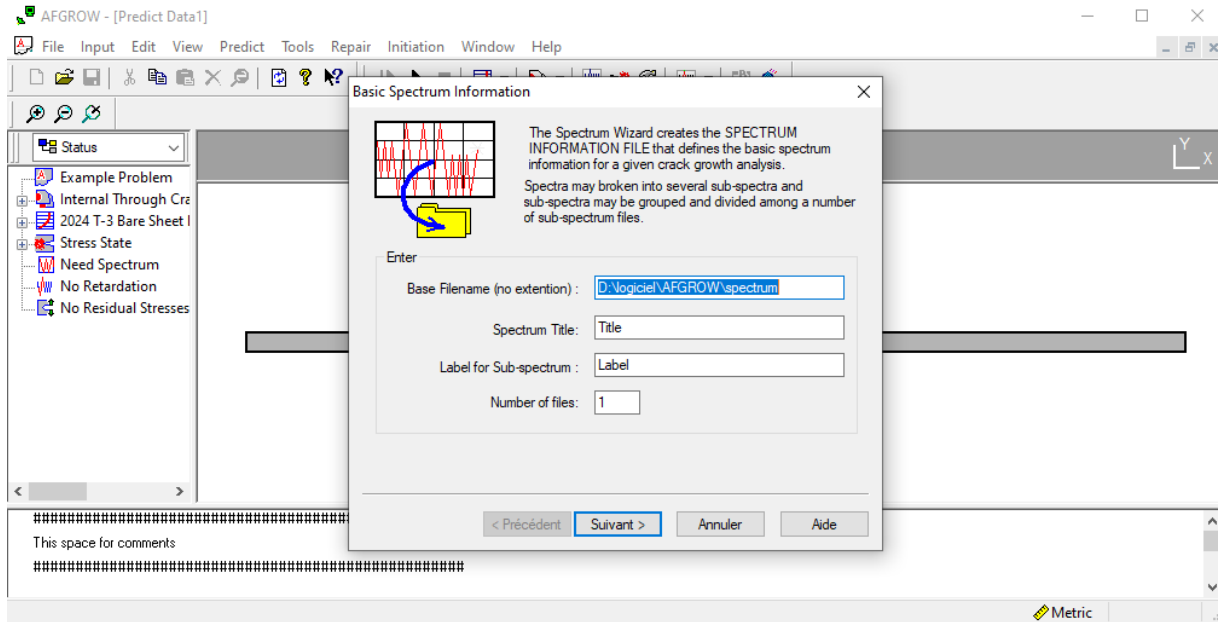


Figure 44: les paramètres de chargement cyclique de l'éprouvette dans AFGROW

4. Résultats et discussion :

4.1. Résultats d'essais de traction :

Les paragraphes suivants présentent les résultats de simulation et l'analyse de comportement mécanique des zones de joint soudé.

4.1.1. Les premières éprouvettes (sans soudage) :

Afin de valider notre simulation, nous avons réalisé une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques obtenus pour une éprouvette du métal de base C48.

La figure ci-dessous montre que les deux courbes (résultats expérimentaux et de simulation) présentent une allure similaire, tant sur le plan de la forme que du comportement global. Un léger écart est toutefois observé, ce qui peut être attribué à certaines simplifications du modèle numérique ou à des variations expérimentales. Cette bonne concordance confirme la fiabilité de notre approche de simulation pour représenter le comportement mécanique du matériau étudié.

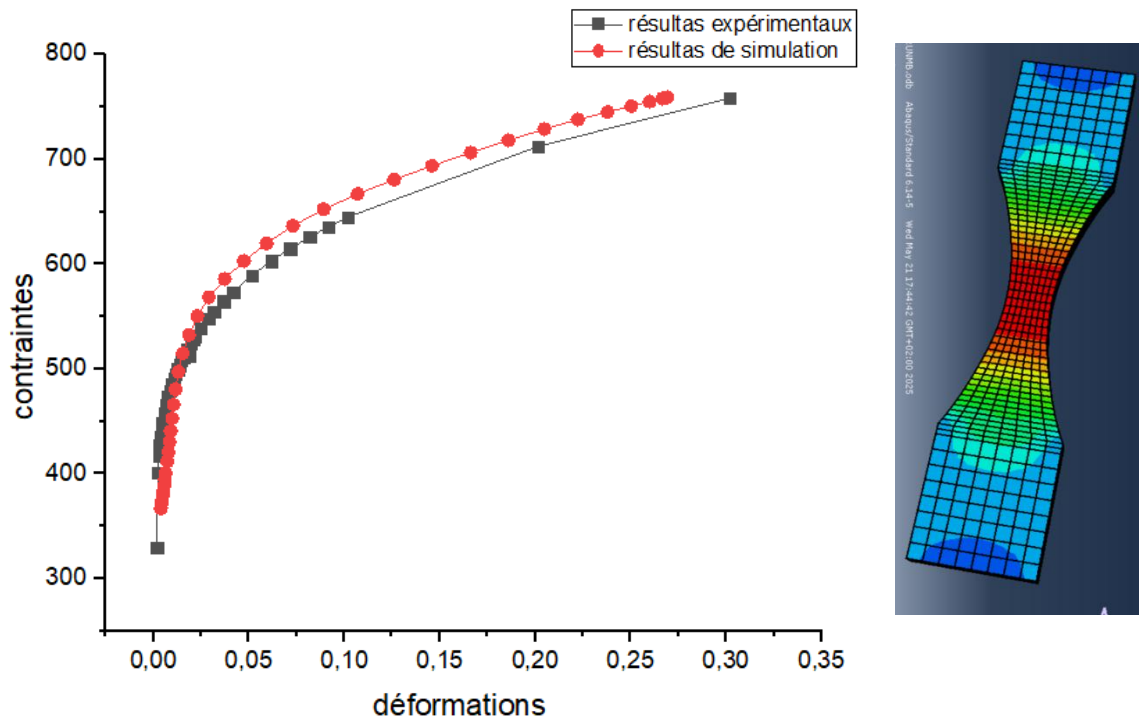


Figure 45 : Courbes contrainte –déformation de Métal de base (résultats de simulation et d’expérimentale)

Les figures présentées ci-dessous comparent les courbes contrainte-déformation obtenues expérimentalement (figure 46) avec celles issues de la simulation numérique (figure 47) pour les éprouvettes prélevées de métal de base (MB), le métal fondu (MF) et la zone affectée thermiquement(ZAT).

1. On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation, aussi bien en termes de forme générale des courbes que de valeurs caractéristiques telles que la limite d'élasticité et la résistance maximale. Les écarts observés restent faibles et peuvent être attribués à certaines hypothèses de modélisation ou à des incertitudes expérimentales.
2. À partir de ces résultats, il apparaît clairement que la ZAT est la zone qui subit la plus grande déformation. Ce comportement s'explique principalement par les modifications microstructurales engendrées par le procédé de soudage. En effet, la ZAT est soumise à un cycle thermique intense, susceptible de provoquer des transformations métallurgiques majeures telles que la recristallisation, l'agrandissement des grains ou encore la formation de phases plus fragiles ou

mécaniquement moins performantes. Ces altérations affectent directement les propriétés mécaniques locales de l'acier, notamment la limite d'élasticité et la ductilité. Par conséquent, le procédé de soudage modifie significativement la microstructure du matériau, rendant la ZAT plus vulnérable à la déformation sous l'effet des sollicitations mécaniques — un phénomène clairement mis en évidence par les résultats de simulation.

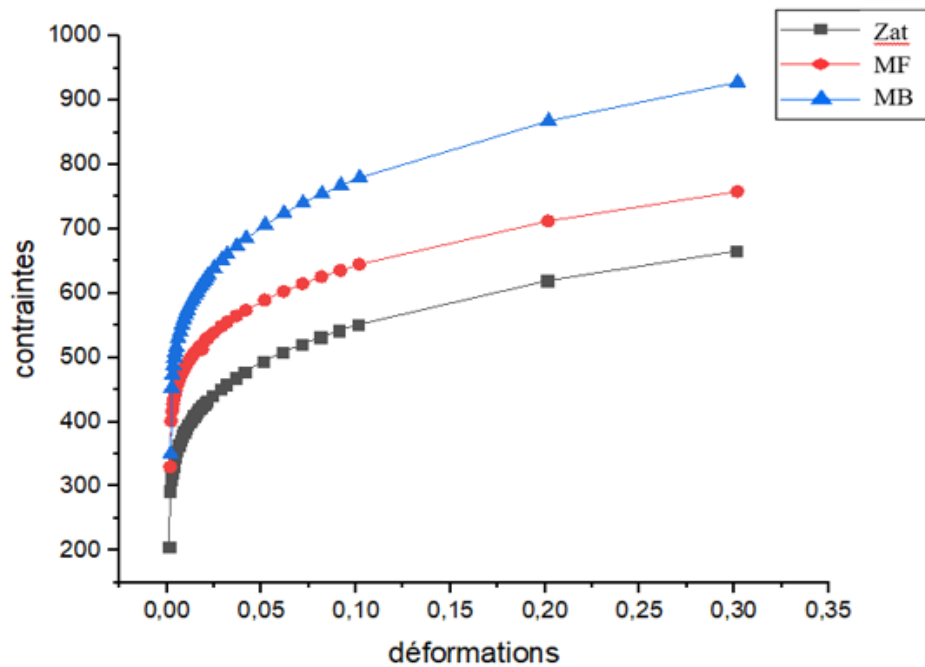


Figure 46: résultats expérimentale (contraintes-déformations) des trois éprouvettes (MB, MF et zat)

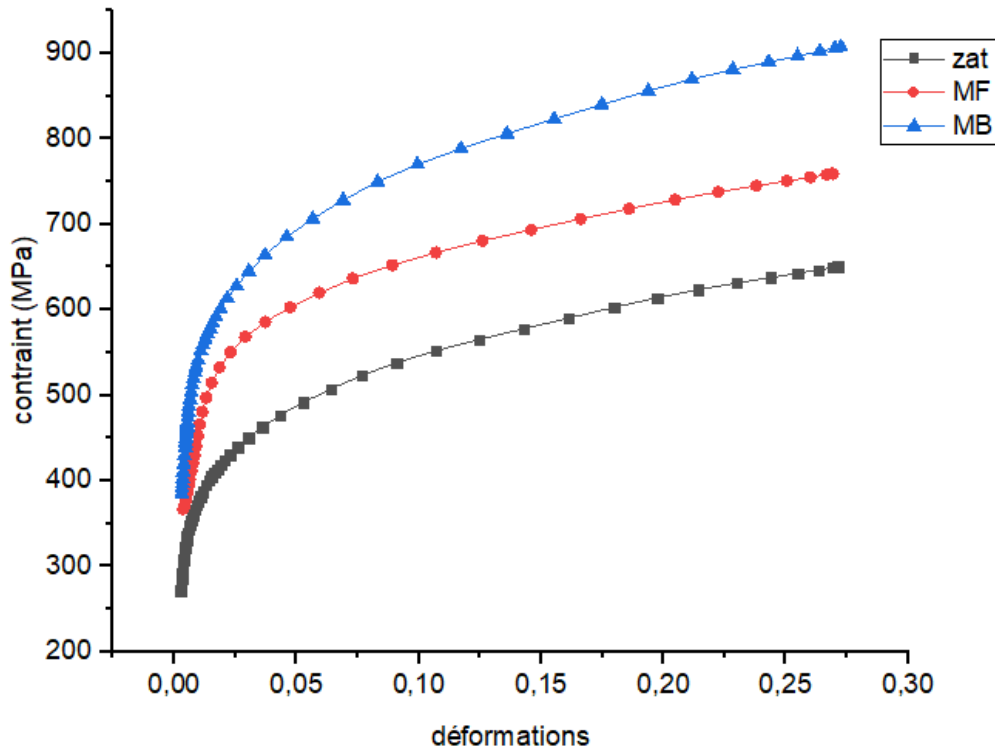


Figure 47: les Coubes de simulations (contraintes-déformations) des trois éprouvettes (MB, MF et ZAT)

4.1.2. Deuxième éprouvettes (les éprouvettes soudées)

La figure ci-dessous compare les courbes contrainte-déformation d'une éprouvette soudée et d'une éprouvette non soudée. On observe que l'éprouvette non soudée possède de meilleures propriétés mécaniques, notamment une limite d'élasticité et une résistance maximale plus élevées. Cela signifie que ce matériau peut supporter des efforts plus importants avant de se déformer de manière irréversible ou de rompre.

En revanche, l'éprouvette soudée présente une réduction notable de ces propriétés, ce qui indique que le soudage a affaibli localement le matériau. Ce phénomène s'explique par les transformations microstructurales provoquées par la chaleur intense du soudage, notamment dans la ZAT et le métal fondu.

Fait intéressant, les deux courbes se superposent presque dans la zone élastique, ce qui signifie que la rigidité initiale (module d'élasticité) reste similaire dans les deux cas. Cependant, dès que le matériau entre en phase plastique (déformation permanente), un écart se forme entre les deux courbes : la courbe de l'éprouvette soudée montre une plus grande déformation pour une

contrainte donnée. Cela met en évidence que le soudage affecte surtout la résistance plastique du matériau, en diminuant sa capacité à supporter les charges après la limite d'élasticité.

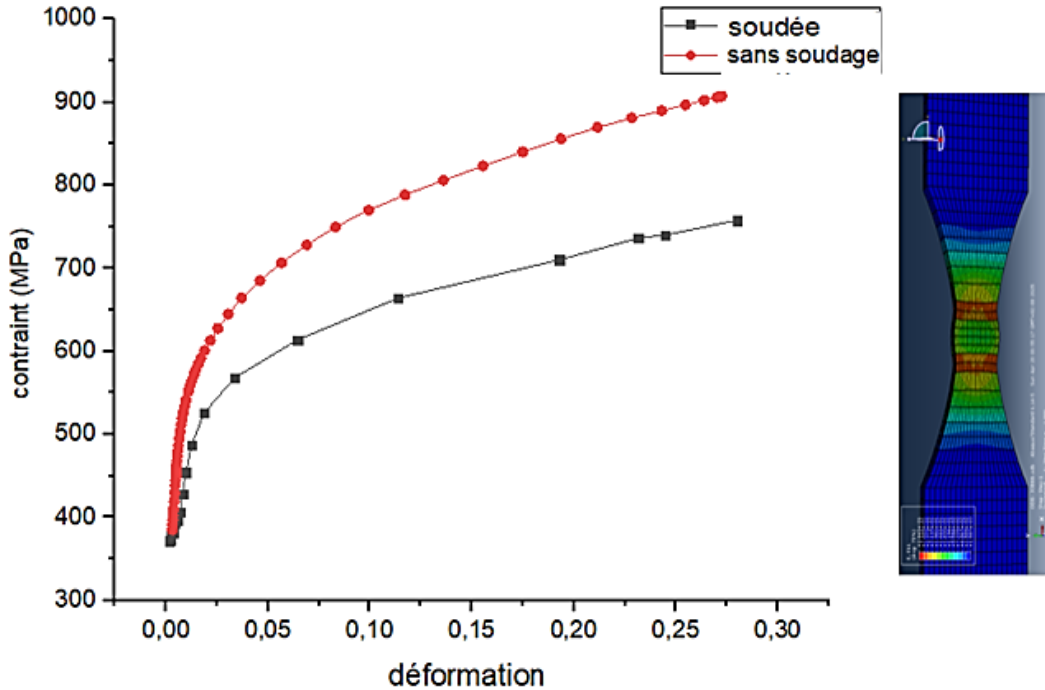


Figure 48: Courbe contrainte –déformation des éprouvettes soudée et non soudée (résultats de simulation)

4.2. Résultats de la simulation de l'essai de fatigue

La courbe suivante (figure 49) représente l'évolution de la longueur de fissure (a) en fonction du nombre de cycles (N) pour trois éprouvettes prélevées dans différentes zones du joint soudé : la première dans la zone de métal de base (MB), la deuxième dans la zone de métal fondu (MF) et la troisième dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

On observe que :

1. **L'éprouvette de métal de base (MB)** présente généralement une meilleure résistance à la propagation de fissures, avec une croissance plus lente de a en fonction de N , en raison de sa microstructure homogène et de ses propriétés mécaniques optimales (résistance élevée, bonne ténacité).
2. **L'éprouvette de métal fondu (MF)** montre souvent une propagation plus rapide des fissures, liée aux hétérogénéités microstructurales (dendrites, porosités) et aux contraintes résiduelles issues du processus de soudage.

3. L'éprouvette de ZAT présente un comportement intermédiaire ou plus critique selon le gradient thermique subi, avec possiblement une fragilisation due aux précipitations ou aux transformations de phase locales.

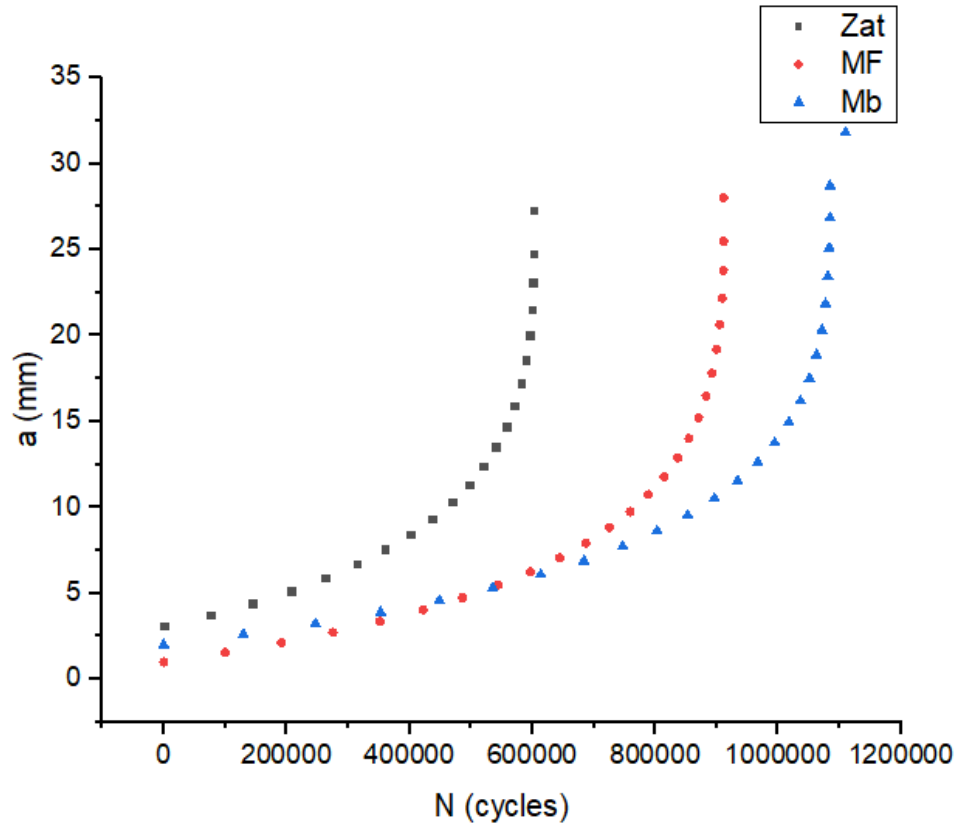


Figure 49: la courbe $a=f(N)$ (résultats de simulation AFGROW).

En conclusion, la comparaison des trois courbes met en évidence l'influence déterminante de la microstructure et des propriétés mécaniques locales sur la tenue en fatigue du joint soudé, avec des performances décroissantes potentiellement $MB > MF > ZAT$, selon les conditions de soudage et de sollicitation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie du comportement mécanique d'un joint soudé en utilisant une approche numérique par éléments finis, implémentée sous les logiciels Abaqus et AFROW. L'objectif principal était d'évaluer l'influence du procédé de soudage sur les propriétés mécaniques du matériau, en nous focalisant sur la résistance à la traction et la tenue en fatigue.

Deux configurations d'éprouvettes ont été analysées :

- La première portait sur des éprouvettes de traction présentant des propriétés distinctes selon les zones du joint soudé : MB (Métal de Base), MF (Métal Fondu) et ZAT (Zone Affectée Thermiquement).
- La seconde comparait directement une éprouvette soudée à une éprouvette non soudée, afin d'isoler l'effet du soudage sur le comportement mécanique.

Les résultats ont mis en évidence une hétérogénéité marquée des propriétés mécaniques entre les différentes zones du joint soudé. En particulier, la ZAT a montré une résistance mécanique nettement inférieure à celle du MB et du MF, en raison des transformations microstructurales induites par les gradients thermiques lors du soudage. Ces transformations incluent une recristallisation partielle, une croissance des grains et une modification de la distribution des précipités, altérant ainsi la résistance et la ductilité du matériau.

Par ailleurs, la comparaison entre éprouvettes soudées et non soudées a révélé une réduction significative de la résistance à la traction dans le cas des assemblages soudés. Cette dégradation est attribuée aux contraintes résiduelles, aux défauts microscopiques (tels que les porosités ou les microfissures) ainsi qu'à l'apparition de phases fragiles dans la microstructure.

Ces résultats soulignent l'importance d'une modélisation fine du comportement des joints soudés, intégrant à la fois une loi de comportement adaptée et des conditions aux limites. Une telle approche est essentielle pour optimiser la conception des structures soudées et améliorer leur fiabilité en service, notamment sous chargements cycliques.

Perspectives :

- Extension à l'étude des effets d'environnement (corrosion-fatigue)
- Développement de lois d'endommagement spécifiques pour les zones soudées
- Intégration de l'approche dans des outils de conception assistée par ordinateur

Cette étude démontre l'importance d'une approche multidisciplinaire pour évaluer la durabilité des assemblages soudés, combinant caractérisation microstructurale, essais mécaniques et modélisation numérique. Les résultats obtenus fournissent des bases solides pour l'amélioration de la fiabilité des structures soudées dans les applications critiques.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Définition du soudage, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/soudage/73591> , Consulter le 27/02/2020.
- [2] L'appareil de soudage, <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage>, Consulter le 27/02/2020.
- [3] :S. Bénissais "Le soudage", édition OPU (Figure I.01) [4] - R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979
- [4] SOUDAG<<<https://fr.wikibooks.org/wiki/Soudage/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s>>>, avril 2019
- [5] : soudage à l'arc électrique << <http://www.lyc-de-gaullepulversheim.acstrasbourg.fr/HUMEZ/ASSEMBLAGE/Soudagearc.htm>>>, avril 2019
- [6] « Livret Soudage par Resistance» SD sevice édition 2016 ; 85
- [7] : D. Dangoise, D. Hennequin et V. Zahlé, "Les laser"; Duodi, Paris (2004)
- [8] : A. Belhadj; thèse de doctorat: " Contribution é l'étude expérimentale et numérique du soudage laser: application aux alliages de magnésium"; École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers France (2009)
- [9] : Klas Weman , <<PROCÉDÉS DE SOUDAGE >>, Dunod, Paris, 2012
- [10] : R. BLONDEAU, «Métallurgie et mécanique du soudage, » Hermès Science publication, Paris (2001), p.50-67.
- [11] R. VARISELLAZ Soudage : Eléments de conception de réalisation (Duodi 1987).
- [12] CSMOFMI, Soudage et assemblage-soudage, Guide d'auto-apprentissage, Bibliothèque et Archives Canada, 2010, 157 p
- [13] : M .ABDERRAHIM, «Étude Du Comportement En Fatigue Des Aciers Pour Pipelines », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université De Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, (2013).
- [14] : SAIM.A et BOUZIANE.A ;Etude et réalisation d'une machine de traction manuelle ;mémoire de master ;2017-2018
- [15] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques,2007.
- [16] F. yahamdi, modélisation des courbes de tractions et évaluation du coefficient d'écroutissement des aciers traitée par brunissage, Université Badji Mokhtar Annaba; 2008.
- [17] Principe de l'essai de traction, roc Dacier, 2017

- [18] What Is Stress-Strain Curve? - xometry.com.
<https://www.xometry.com/resources/3dprinting/stress-strain-curve/>. Le 29/02/2024
- [19] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007
- [20] Fiche compact 5 CNC
- [21] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir1975 [22] Coefficient de Poisson : qu'est-ce que c'est ? - FUTURA.com.
<https://www.futurasciences.com/sciences/definitions/physique-coefficient-poisson-2068/>. Le 22/02/2024.
- [23] EDGAR S. Bain, Functions of the alloying Elements in steel, Pitsburg, Pa., U.S.A., 1939.
- [24] Jean-Pierre basset, Patrice Cartraud, Christian Jacquot, Antoine Leroy, Bernard Peseux, pierre
 Vaussy Introduction à la résistance des matériaux centrale Nantes
- [25] Modèle de plasticité de Tresca- 2018 SolidWorks.com.
https://help.solidworks.com/2018/French/SolidWorks/cworks/c_Plasticity_Tresca_Model.htm?t=P&value=4. Le 27/03/2024
- [26] G FRADE, Métallographie essais mécaniques, 1970.
- [27] Abdulkader ZALT, Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type caisson, Metz le 18/10/2012.
- [28] C.LALANNE. Dommage par fatigue. Vibration et chocs mécanique, Paris, 1999.
- [29] David Pigneaux. Effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés en aciers. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2002. Français.
- [30] Jaap Schijve, Fatigue of Structures and Materials (2009) page 15.
- [31] Gilbert. Henaff, Frank. Morel (2005), Fatigue des Structures, Endurance, critères de dimensionnement, propagation des fissures, rupture.
- [32] Bathias, C. et J.P. Bâillon, J ; (1997) La Fatigue des Matériaux et des Structures, Ed.2 Paris : Hermès.
- [33] Paris P, Gomez M, Anderson W. A rational analytic theory of fatigue. Trends Eng 13

1961:9-14.

[34] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation law. J Basic Eng Trans ASME 1963:528-534.

[35] Irwin GR. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics 1957;361.

[36] "AFGROW.net," AFRL/VASM, 2025. [Online]. Available: <https://www.afgrow.net/about.aspx>.

[37] CHERIET Nour El Houda (2012). Simulation de la durée de vie d'une structure mécanique soudée sollicitée en mode vibratoire. Mémoire de Magister. UNIVERSITÉ SIDI BEL ABBES.