

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 Génie mécanique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie mécanique

Domaine :Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème :

Endommagement des joints soudés

Présenté Par :

- 1) AID Yousra Rihem
- 2) BERAKNE Khadidja

Devant le jury composé de :

Dr BELGHOUL Hakima	M C B UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr OUARI Mohamed Amine	M C B UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr ELAHMAR Kadi	M C B UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir fournis de la patience au moment de besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté contre le désespoir, et de nous avoir permis d'en arriver là.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur Dr EL-Ahmar kadi maitre conférence à l'université de Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent, d'avoir accepté de nous encadrer, orienter et surtout on le remercie pour sa disponibilité au cours de la préparation de notre mémoire.

Ce travail a été réalisé pour l'obtention du diplôme de fin d'études en Master II, option Génie mécanique.

Merci également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail, d'assister à la soutenance et d'enrichir ce dernier via leurs commentaires.

Nous ne pourrions pas mettre fin à ces remerciements sans associer nos familles et nos amis pour leurs encouragements.

Nous vous disons tous MERCI

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mon père ABDELKADER, mon précieux offre du dieu, et mon adorable mère DIDI RAHMOUNA, ce travail représente l'abolissement du leur soutien qu'ils prodigués tout au long de ma scolarité, mes remerciements ne pourront jamais égaler leur amour, encouragements et sacrifices.

A mes deux chers frères MOHAMED et ABDELWADOUD et ma grande mère MAHDJOUR ZAHRA.

A mes chères amies Maroua, Manel Et Ahlem pour leurs encouragements, conseils et leur soutien moral.

A mon binôme Berkane Khadidja

A toutes ces âmes je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect.

Yousra

Je dédie ce modeste travail :

Aux êtres qui me sont les plus chers mes parents «Abderrahmane et BENSAFI Fatiha»

Sources de mes joies, secrets de ma force.

Vous serez toujours le modèle Papa, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté,

Maman dans ta bonté, ta patience et ton dévouement pour Nous.

Merci pour tous vos sacrifices pour que vos enfants Grandissent et prospèrent Merci de trimer
sans relâche, malgré les péripéties de la vie Au bien être de vos enfants Merci

d'être tout simplement mes parents, C'est à vous que je dois cette réussite et je suis fier de
vous l'offrir

Je demande à dieu le tout puissant de vous accorder la santé, le bonheur et une longue vie et
faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

Les personnes avec qui j'ai passé le plus de temps dans ma vie et qui ont toujours été là pour
moi : mon frère défunt «Abderrahim», que Dieu lui accorde le paradis éternel ; mon cher frère
«Saidou» et sa femme «Ferial» ; ma chère sœur «Fatima», ainsi que leurs enfants qui ont
apporté de la joie à notre vie, «Yacine» et «Amira» ; et a tout le reste de ma famille.

A mes chers amis et camarades avec qui j'ai passé de bons moments et particulièrement mon
binôme Yousra

Ainsi que tous mes enseignants durant tout mon cursus.

Et a toutes les personnes que j'aime et ceux qui m'aiment

KHADIDJA

ملخص

اللحام هو عملية تجميع معروفة جدًا في الصناعة الميكانيكية، ولهذا السبب تهتم العديد من الدراسات والأبحاث بهذا المجال، وقد سمح تنوع العمليات للباحثين بتعميق أبحاثهم في إنهار الهياكل الملحومة وتلفها. ولتحقيق هذه الغاية، فإن الهدف من أطروحتنا هو دراسة الأضرار التي لحقت بالوصلات A48-AP الملحومة من الفولاذ.

الهدف من هذا المشروع هو تسليط الضوء على تأثير عدم تجانس البنية المجهرية للمفاصل الملحومة على السلوك الميكانيكي للهيكل، بالإضافة إلى محاكاة عددية بواسطة تطبيق طريقة العناصر محدودة على عينات متماثلة المحور لنموذج تأثير عدم التجانس على تلف الهيكل الملحوم.

Résumé

Le soudage est un procédé d'assemblage très connu dans l'industrie mécanique, pour cela diverses études et recherches sont intéressées par ce domaine, la variation des procédés a permis aux chercheurs d'approfondir leurs recherches dans la rupture et l'endommagement des structures soudées. A cet effet, le but de notre thèse est l'étude d'endommagement des joints soudés d'un acier A48-AP.

L'objectif de ce manuscrit est de mettre en évidence l'influence de l'hétérogénéité de la microstructure des joints soudés sur le comportement mécanique de la structure, ainsi qu'une simulation numérique par éléments finis est appliqué sur des éprouvettes axisymétriques entaillées pour modéliser l'effet d'hétérogénéité sur l'endommagement de la structure soudée.

Abstract

Welding is a very well-known assembly process in the mechanical industry, for this reason various studies and research are interested in this area, the variation of the processes has allowed researchers to deepen their research into the rupture and damage of welded structures. To this end, the aim of our thesis is the study of damage to welded joints of A48-AP steel.

The objective of this manuscript is to highlight the influence of the heterogeneity of the microstructure of the welded joints on the mechanical behavior of the structure, as well as a numerical simulation by finite elements is applied on notched axisymmetric specimens to model the effect of heterogeneity on the damage of the welded structure.

Liste des tableaux

- I. **TABLEAU I:** ABAQUE DU SOUDAGE TIG
- II. **TABLEAU II:** Composition chimique de l'acier utilisé (A48-AP).
- III. **TABLEAU III:** Composition chimique du Métal d'apport (ou Métal fondue)
- IV. **TABLEAU IV:** propriétés mécanique de l'acier A48 (MB, MF et ZAT)

Liste des figures

FigI.1 : Géométrie d'une éprouvette avec fissure centrale	17
FigI.2 : Modes de fissuration	18
FigII.1 : le Diagramme Fer-Carbone	24
FigII.2 : Composition type d'une installation manuelle de soudage ARC (MMA)	27
FigII.3 : schéma de transfert du métal soudage ARC (MMA)	28
FigII.4 : facteur de marche du soudage à l'arc	29
FigII.5 : tableau de sélection du courant en fonction de l'épaisseur de tôle	30
FigII.6 : Composition type d'une installation manuelle de soudage TIG	31
FigII.7 : schéma de transfert du métal de soudure TIG	31
FigII.8 : ABAQUE DU SOUDAGE TIG sur Acier inoxydable.....	32
FigII.9 : ABAQUE DU SOUDAGE TIG sur l'aluminium	32
FigII.10 : Composition type d'une installation manuelle de soudage MIG/MAG.....	33
FigII.11 : schéma de transfert de métal de soudage MIG/MAG.....	33
FigII.12 : SAW – Soudage à l'Arc Submergé	34
FigII.13 : principe de fonctionnement soudage par Friction Malaxage.....	34
FigII.14 : Défauts de Fissures	35
FigII.15 : Défauts de Soufflures	36
FigII.16 : Défauts d'Inclusions.....	37
FigII.17 : Défauts de Retassures et Criques	37
FigII.18 : Mesure de la dilution.....	41
FigIII.1 : L'interface de Abaqus	48
FigIII.2 : le profil de contraintes	51
FigIII.3 : la Géométrie de l'éprouvette AE	52
FigIII.4 : Maillage de l'éprouvettes AE.	53
FigIII.5 : Courbe pour l'acier A48 (MB, MF et ZAT).....	55
FigIII.6 : Eprouvette entaillé de type sablier avec un rayon de courbure R (mm).....	55
FigIII.7 : Géométrie schématique d'une éprouvette AE.	56
FigIII.8 : Champs des déformations pour les différentes zones	57
FigIII.9 : Champs des déformations pour les trois zones à l'étape A	58
FigIII.10 : Champs des déformations pour les trois zones à l'étape B	59
FigIII.11 : Champs des déformations pour les trois zones a l'étape C	60
FigIII.12 : Champs des déformations pour différentes étapes de la matière ZAT-ZAT	61
FigIII.13 : Evolution de la contrainte équivalente en fonction de la déformation.	62
FigIII.14 : Evolution des contraintes - déformations en fonction du temps.....	64

Liste des abréviations

MB : Métal de base

MF : Métal fondue

ZAT : Zone affecté thermique

$\bar{\sigma}_{zz}$: La contrainte axiale moyenne

(r) : Le rayon de courbure des lignes isostatiques

(ρ) : Le rayon de courbure

σ_m : Contrainte moyenne

σ_{eq} : Contrainte équivalente de Von Mises.

β : le taux de triaxialité des contraintes.

K : facteur d'intensité de la contrainte.

G : l'énergie de rupture

(K_{Ic}, G_c) : la ténacité à la rupture.

Table des matières

Remerciements	1
Dédicaces	2
ملخص	4
Résumé	5
Abstract	6
Liste des tableaux	7
Liste des figures	8
Liste des abréviations	9
Introduction Générale	12
Introduction générale	13
CHAPITE I : Mécanique de la rupture	13
I. INTRODUCTION	15
II. HISTORIQUE	16
1) Fatigue des structures - Propagation des fissures de fatigue	17
a) Essais de fissuration	17
b) Mode de fissuration	18
c) Endommagement en pointe de fissure	18
2) Mécanisme de propagation	19
3) Objectifs de la mécanique de la rupture des matériaux	19
CHAPITE II : Le Soudage	20
I. Introduction	21
II. Historique du soudage	22
III. Le soudage	23
1) À quoi consiste le soudage	23
2) Principe du soudage	23
3) Quelques applications courantes du soudage	25
4) Pourquoi le Soudage est-il Essentiel ?	26

5) Procédés et types de soudures	27
a) SOUDAGE ARC (MMA)	27
b) SOUDURE À L'ARC	28
c) SOUDAGE TIG	30
d) SOUDAGE MIG/MAG	33
e) SAW – Soudage à l'Arc Submergé	34
f) FSW – Soudage par Friction Malaxage	34
6) Les défauts de soudage	35
7) Avantages du Soudage	38
IV. Le brasage	39
1. Quelle est la différence entre brasage et soudage ?	40
2. Principe de La Dilution	40
a) Définition	40
d) Importance du taux de dilution	41
Chapitre III : Partie Expérimentale	42
I. Introduction	43
II. Le logiciel Abaqus	45
1. L'interface d'ABAQUS	47
2. Mécanique des éprouvettes entaillées	49
3. Choix des géométries	52
III. Etude expérimentale	54
1) Conditions de l'étude	54
2) Analyse des résultats	55
3) Analyse numérique du comportement mécanique des joints soudés	56
1.1. Analyse numérique du modèle élasto-plastique	57
Conclusion Générale	66
Références	67

Introduction Générale

Introduction générale

Dans divers domaines tels que le génie mécanique, le soudage est couramment pratiqué, y compris dans des secteurs « critiques » tels que l'aviation et l'industrie nucléaire. Les assemblages produits par les techniques précédemment citées doivent être fiables même dans des conditions d'utilisation qui peuvent entraîner des impacts environnementaux souvent dévastateurs. Il est donc essentiel de comprendre les phénomènes de rupture au sein de ces assemblages fabriqués.

Le soudage est une méthode de fusion irréversible qui permet d'unir de manière solide deux éléments, généralement en liant des atomes par le biais de la chaleur, de la pression ou d'une combinaison des deux. Bien qu'il soit principalement destiné aux matériaux métalliques, certaines techniques requièrent également le soudage de non-métaux tels que les polymères, le verre ou le caoutchouc.

Ce mémoire s'inscrit dans une approche scientifique interdisciplinaire, car il traite de divers domaines tels que la science des matériaux, la mécanique de la rupture et la modélisation numérique.

Il se compose de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre se focalise sur la définition et les objectifs de la mécanique de la rupture..
- Le chapitre deux se concentre sur l'examen des techniques de soudage standard et leurs principes, en soulignant leurs imperfections.
- Le troisième chapitre illustre un essai de traction sur une éprouvette cylindrique. Nous allons exploiter les résultats d'un essai de traction réel pour réaliser la simulation de ce test et pour effectuer une comparaison entre les réponses expérimentale et numérique.

CHAPITE I : Mécanique de la rupture

I. INTRODUCTION

Ainsi, avant d'examiner les notions de mécanique de la rupture, nous devrions définir la ténacité d'un matériau comme la capacité de résister à la rupture fragile. Au sens strict, la rupture fragile peut se produire sans défaut. Cependant, dans le domaine du génie civil, la plupart des bris fragiles sont déclenchés par un défaut qui, à son tour, est souvent, sinon toujours, une fissure due à la fatigue.

En fin de compte, il est difficile de vraiment séparer les deux phénomènes, à savoir la rupture fragile et la fatigue. En outre, pour comprendre la rupture fragile, il est également important de comprendre ce qui se produit avant cette phase critique, même si c'est le phénomène de fatigue lui-même causé par l'effet de charges successives. Plus important encore, tout le processus se manifeste probablement avec le développement initial, suivi de l'expansion subséquente, des fissures. À noter également que cette structure de déclenchement spécifique peut avoir des différences significatives en fonction des facteurs qui affectent le même phénomène de fatigue, bien que fondamentalement liés à son utilisation initiale. Par exemple, le problème de la fatigue est crucial dans le domaine de la mécanique en raison de la pression immense subie par les avions, les voitures, les moteurs, etc. On peut également observer des fissures liées à la fatigue dans le secteur du génie civil. L'apparition de fissures dans certains éléments structurels peut être causée par le passage de poids lourds ou de trains sur les ponts, en plus des opérations de levage et du déplacement de charges effectuées par les grues.

La défaillance de l'élément peut présenter un caractère ductile, fragile ou mixte. Enfin, l'interruption de l'élément est « liée » à tout le processus d'évolution de la fissure, puisque sa taille et sa forme la facilitent. Pour cette raison, lors de la discussion du phénomène de rupture, qu'il s'agisse d'un matériau fragile ou ductile, l'image de l'étape de la propagation en fatigue suscite une compréhension plus claire.

II. HISTORIQUE

Les premières recherches scientifiques connues sur la mécanique de la rupture ne remontent qu'à la fin du 16eme siècle avec les travaux de Léonard de Vinci, dont il a découvert les effets d'échelles en rupture.

Et plus le volume de la pièce est important, plus la contrainte de rupture est faible. Donc ce phénomène est expliqué aujourd'hui par la Mécanique Probabiliste de la Rupture.

On remarque aussi qu'au 19eme siècle au début de l'utilisation intensive des matériaux métalliques (Ponts, Bâtiments, Marine, Chemins de fer, etc....) il y avait un accroissement spectaculaire du nombre de ruptures « accidentelles » en service (Explosion de chaudières de bateaux à vapeur, ruptures d'équipements de chemins de fer). Tous cela est attribué à la mauvaise conception au niveau du dessin, la mise en évidence de défauts préexistants ayant provoqué l'amorçage de fissures. Le remède apporté a été un plus grand soin aux niveaux de l'élaboration des matériaux et de la production des pièces.

Après la 2ème guerre mondiale, les constructions mécano-soudées ont évolué notamment dans les domaines concernant le génie maritime et les travaux publics, ce qui a provoqué de nombreuses ruptures en service. L'exemple des Bateaux de débarquement "LIBERTY SHIPS" construits par les USA pendant la seconde guerre mondiale. Sur 2500 exemplaires construits : 145 se sont cassés en deux, 700 ont eu des ruptures très sérieuses sous l'effet de charges en service relativement faibles

Ces problèmes ont pu provoquer :

L'intensification des recherches concernant le comportement des matériaux :

- mise en évidence de ruptures à caractère fragile provoquées par des défauts internes (ex : fissures à la reprise de soudures) ;
- le caractère fragile des ruptures est accentué lorsque la température d'utilisation diminue ;
- le caractère fragile des ruptures est d'autant plus marqué que le niveau de résistance à la rupture est élevé.

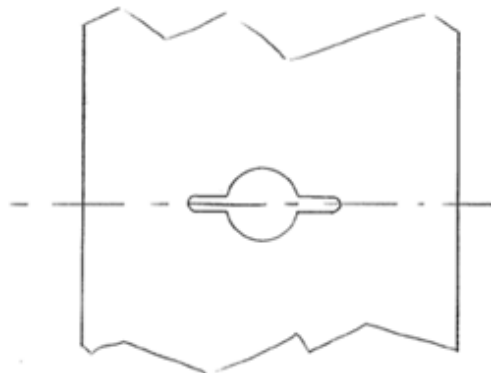
1) Fatigue des structures - Propagation des fissures de fatigue

La durée de vie en fatigue se décompose en deux composantes, la durée d'amorçage et la durée de propagation. Tout matériau étant susceptible de comporter des défauts (inclusions, microfissures, zones de déformation plastique, concentrations de contraintes, corrosion,...) on doit dans la pratique tenir compte de leur durée de propagation.

Cette dernière dépend, entre autre, de paramètres matériaux que l'on peut déterminer par des essais en laboratoire.

a) Essais de fissuration

Typiquement ces essais se font sur une tôle avec une fissure centrale (Center Crack Tension) chargée en traction oscillante. On mesure l'évolution de la longueur de la fente (2a) en fonction du nombre de cycles. Cette longueur se mesure soit optiquement soit en fonction de paramètres électriques.

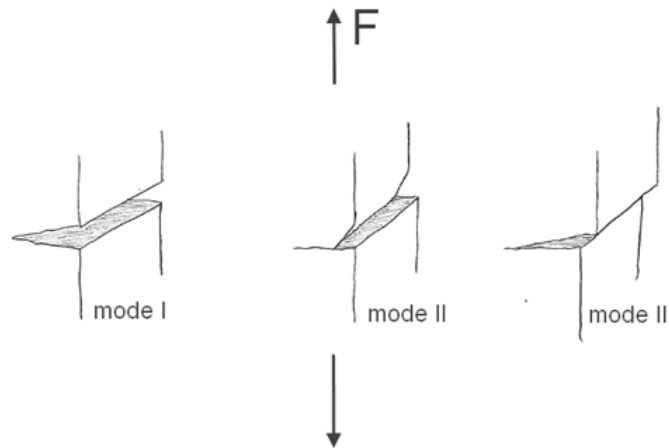


FigI.1 : géométrie d'une éprouvette avec fissure centrale

Pour chaque niveau de chargement on peut ainsi en déduire une vitesse de propagation da/dN en fonction de la longueur de la fissure. Sous cette forme les résultats d'essais de fissurations ne sont pas facilement exploitables, puisque qu'ils sont fonction de la taille de la fente et des conditions d'essai (amplitude de contrainte, géométrie,...). On verra ci-dessous une expression plus générique de ce type de résultats, grâce à l'utilisation du facteur d'intensité de contrainte K .

b) Mode de fissuration

Généralement la fissure se propage de manière perpendiculaire à la force macroscopique appliquée sur le matériau, il s'agit du mode I. Le chemin de fissuration peut cependant évoluer suivant d'autres directions, en cisaillement dans le plan pour le mode II, et en cisaillement hors plan pour le mode III.



FigI.2 : modes de fissuration

c) Endommagement en pointe de fissure

Si on considère une fissuration en mode I, la théorie de l'élasticité nous donne le champ de contrainte aux environs de la pointe de la fissure qui se réduit, lorsque $\theta=0$ (i.e. dans le plan de propagation de la fissure) à l'expression :

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

D'après cette relation la contrainte tend vers l'infini lorsque r tend vers 0. En réalité il y a un moment où la contrainte dépasse la limite élastique et on observe la formation d'une zone plastique, avec redistribution des contraintes locales. Des analyses microstructurales ou des simulations par éléments finis montrent que la zone plastifiée a une géométrie complexe, avec des branches rayonnant depuis la pointe de fissure.

2) Mécanisme de propagation

Les ruptures en fatigue présentent généralement des stries sur la surface de fracture. Cependant ces stries ne sont pas présentes lorsque la rupture se passe sous vide. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer la formation de ces stries, dont le modèle de Laird ou celui de Pelloux. Ce mécanisme concerne le domaine II (domaine de Paris).

Proche du seuil les mécanismes sont différents, à ce niveau on n'observe plus de stries ; la distance de propagation par cycle déduite des valeurs macroscopiques est alors de l'ordre des distances interatomiques. La propagation est alors discontinue et régie par d'autres mécanismes (Trans-granulaires, ou selon des plans cristallographiques simples). [1]

3) Objectifs de la mécanique de la rupture des matériaux

La mécanique de la rupture se consacre principalement à l'étude, à la prévision et à la prévention de la rupture des matériaux et structures présentant des anomalies telles que des fissures ou des incisions, tout en considérant ces anomalies lors de l'analyse de leur résistance.

Cette discipline a les objectifs spécifiques suivants :

- Saisir les processus de propagation des fissures dans divers matériaux (tels que les métaux, les composites, les polymères, etc.).
- Identifier les conditions critiques de rupture : cela englobe le calcul des paramètres d'intensité de contrainte (K), de l'énergie de rupture (G), ou encore de la ténacité à la rupture (K_{Ic} , G_c), en fonction de l'approche sélectionnée (linéaire élastique ou non linéaire).
- Évaluation de la fiabilité des structures endommagées : l'analyse de la rupture aide à déterminer si une structure avec une fissure peut rester opérationnelle en toute sécurité ou si elle est susceptible de se briser soudainement.
- Élaborer des critères de dimensionnement sûrs en tenant compte des défauts initiaux (propre à la production ou à l'utilisation) dans les calculs.
- Améliorer les techniques d'inspection et de maintenance : en identifiant les fissures cruciales, nous pouvons orienter plus efficacement les inspections et allonger la longévité des structures.
- Participer à la prévention des accidents industriels : en anticipant le comportement lors de la rupture, la mécanique de la rupture est essentielle en matière d'ingénierie de sécurité.

CHAPITE II : Le Soudage

I. Introduction

Le soudage est un processus qui consiste à joindre deux ou plusieurs pièces métalliques en utilisant la fusion locale des matériaux. Cette technique est nécessaire dans le secteur industriel, car elle permet de créer des assemblages solides et durables capables de résister à des conditions variées, comme des charges mécaniques élevées, des variations thermiques et des environnements corrosifs. Grâce à sa polyvalence, le soudage joue un rôle central dans de nombreux secteurs de production et des installations.

L'importance du soudage se manifeste dans sa faculté à faciliter la production de produits de dimensions variées et de configurations complexes, satisfaisant ainsi les besoins particuliers de chaque utilisation. Cette méthode est essentielle pour l'édification des équipements comme les constructions et les ponts, dans lesquels la solidité des structures est vitale. Elle est également indispensable pour la construction de véhicules, y compris les voitures, les navires et les avions, assurant tant la robustesse que la sécurité.

Dans le secteur pétrolier et gazier, le soudage est employé pour connecter des pipelines, garantissant l'imperméabilité et la capacité à supporter des pressions élevées indispensables pour le transport sécurisé des fluides. De plus, le soudage joue un rôle crucial dans la production d'équipements de précision tels que les appareils médicaux, où l'exigence de qualité des soudures est essentielle pour garantir leur sécurité et leur performance.

Le soudage offre une variété de techniques adaptées à différentes exigences, comme le soudage à l'arc, le soudage MIG/MAG, le soudage TIG, le soudage par résistance et le soudage au laser. Chaque technique présente des bénéfices particuliers, que cela concerne la vitesse, l'exactitude, le coût ou les sortes de matériaux qui peuvent être soudés. Cette gamme de méthodes offre aux ingénieurs et aux experts la possibilité de sélectionner la technique la plus appropriée pour chaque projet.

Au final, le soudage est bien plus qu'une simple méthode d'assemblage. C'est un outil fondamental pour l'industrie, la construction et la technologie moderne. Sa capacité à produire des connexions solides, même dans des configurations complexes, fait de cette technique un pilier essentiel de l'innovation et de la production industrielle.

II. Historique du soudage

Le soudage est une science très ancienne qui prend son origine dans l'Antiquité. Depuis cette époque, un principe a continué à traverser le fil du temps : chauffer le fer pour le rendre malléable peut permettre sous certaines conditions de réaliser des assemblages. Malheureusement l'oxydation du fer ne permet pas de trouver des traces plus anciennes. La découverte du principe du soudage vient probablement des peuples primitifs différents à des époques similaires.

La colonne de Delhi, en Inde, érigée au IV^{ème} siècle est un acte fondateur du soudage.

Afin de mieux comprendre l'utilité du soudage, revenons un peu sur l'évolution et les faits historiques importants de cette science :

- Vers 1810 que Sir Humphry Davis découvre l'arc électrique. En approchant 2 conducteurs sous tension, un arc se crée en produisant une lumière vive et émettant beaucoup de chaleur.
- Une des premières utilisations pratiques serait dans les lampes d'éclairage public en 1881 grâce à des électrodes de carbone. C'est également à cette époque que les premières tentatives de soudage à l'arc ont commencé.
- En 1907, le suédois O. Kjellberg crée l'électrode enrobée qui a permis le développement du champ d'application du soudage. Notamment pendant la première guerre mondiale, sur la fabrication militaire et navale.
- Après la guerre, trois grandes catégories de soudage sont en développement : le soudage au chalumeau, le soudage à l'arc, ainsi que le soudage par résistance. Le soudage au chalumeau est la plus récente par l'invention de la flamme oxyacétylénique en 1895 par le français Le Chatelier alors Le soudage par résistance aurait été développé par J.Joule dans les années 1850.
- A partir de 1920, le développement des différents types d'assemblage augmente grâce au principe d'enrobage par extrusion. Se développe également en parallèle, le soudage à l'arc sous atmosphères contrôlées (TIG / Plasma, MIG / MAG).
- En 1935, les prémices du soudage à l'arc sous flux arrivent.
- Dans les années 1950, le soudage à faisceau d'électrons est découvert. Ce procédé oblige une atmosphère sous vide. [2]

III. Le soudage

1) À quoi consiste le soudage

Le soudage implique la création d'un lien métallique entre des composants, qu'ils soient similaires ou non. On désignera alors les soudures comme homogènes ou hétérogènes, respectivement.

Une soudure est le résultat du soudage réalisé par un soudeur. Une soudure consiste à faire fondre le métal de base (avec ou sans métal d'apport) afin de réaliser la jonction entre les éléments. Lorsque l'on fait fondre un métal d'apport à une température inférieure à la température de fusion du métal de base pour réaliser la jonction, il s'agit alors d'une brasure. L'apport de métal est un ajout de matière externe qui contribue à la fabrication du joint. Il a un impact sur la composition chimique et les propriétés mécaniques.

2) Principe du soudage

Le soudage repose sur deux principes fondamentaux : la fusion et la solidification. Bien que ces étapes soient séparées, elles sont étroitement interconnectées et se complètent mutuellement afin de garantir une soudure de haute qualité. La connaissance des processus de fusion et de solidification apporte une meilleure compréhension des caractéristiques finales de la soudure, tandis que le recours au diagramme fer-carbone facilite la prévision et l'ajustement des modifications microstructurales des métaux concernés.

- **La Fusion :**

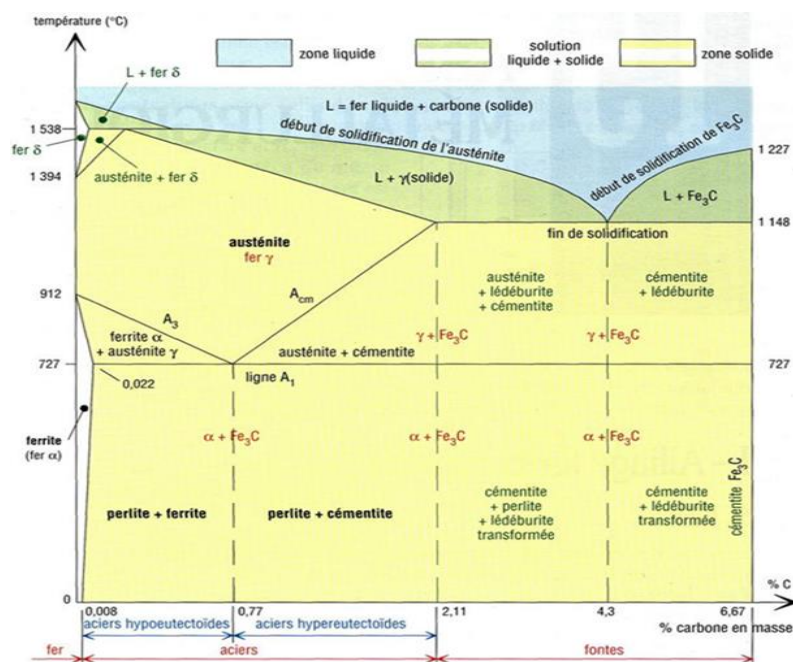
- **Chauffage des Métaux :** Les métaux sont chauffés jusqu'à ce qu'ils atteignent leur point de fusion, créant ainsi une zone de fusion. Cela peut être réalisé en utilisant diverses sources de chaleur, notamment des arcs électriques, des lasers, des gaz chauds, et d'autres méthodes.
- **Transformation Liquide :** À haute température, les métaux passent de l'état solide à l'état liquide. Cela signifie que les atomes et les molécules des métaux se déplacent de manière désordonnée, ce qui permet aux surfaces de se mélanger et de fusionner.

• La Solidification

- Refroidissement Rapide : Après la fusion, les métaux refroidissent rapidement, ce qui induit la solidification. Le refroidissement rapide est essentiel pour la création de liaisons solides. Plus le refroidissement est rapide, plus les grains métalliques ont une structure fine, ce qui contribue à renforcer la soudure.
- Création de Liaisons Solides : Le refroidissement rapide permet la solidification des métaux, créant ainsi une liaison solide entre les pièces. La solidification peut être contrôlée pour obtenir différentes structures microscopiques, ce qui a un impact sur les propriétés mécaniques de la soudure.

• Relation avec le Diagramme Fer-Carbone

Le diagramme fer-carbone joue un rôle crucial dans la compréhension de la solidification et des transformations microstructurales qui se produisent après la fusion. Il représente la relation entre la composition chimique du fer et les différentes phases métalliques qui apparaissent à diverses températures. Cet outil est particulièrement utile pour prévoir les transformations lors du refroidissement et adapter le processus de soudage afin d'obtenir la microstructure souhaitée, comme la perlite, la martensite ou la bénite, influençant ainsi la résistance et la dureté de la soudure finale.



FigII.1 : le Diagramme Fer-Carbone

3) Quelques applications courantes du soudage

Le champ d'application du soudage est très varié et s'étend sur plusieurs domaines. Parmi eux, on retrouve notamment :

- La construction métallique, la chaudronnerie, l'industrie automobile.
- En construction métallique, le soudage est un important moyen d'assemblage. Il permet de faire un assemblage permanent et continu qui ne contient aucun jeu.
- le soudage est incontournable dans la chaudronnerie. Il permet d'assembler les éléments de la structure à réaliser avec des matériaux différents (étain, acier, cuivre, plomb, etc.).
- l'industrie automobile utilise le soudage dans plusieurs étapes de la construction d'une automobile : carrosserie, réservoir, châssis, radiateur, tuyauterie, etc. La construction automobile utilise de l'acier à très haute résistance qui nécessite plusieurs types de soudage.
- Fabrication d'équipements industriels : Les machines, les réservoirs, les pipelines et d'autres équipements industriels sont souvent assemblés par soudage. Ces équipements doivent résister à des conditions de travail rigoureuses, et le soudage garantit leur durabilité et leur performance.
- Polyvalence : Le soudage permet d'assembler des pièces métalliques de formes diverses pour créer des structures sophistiquées. Cela inclut la construction navale, la fabrication d'aéronefs, la production d'équipements médicaux de haute précision et bien d'autres domaines. La flexibilité du soudage permet de répondre aux besoins spécifiques de chaque projet. [3]

4) Pourquoi le Soudage est-il Essentiel ?

- **Solidité et Durabilité**

Le soudage crée des joints solides et durables, ce qui est essentiel pour la fabrication d'équipements industriels robustes. Les soudures résistent aux contraintes mécaniques, aux vibrations, aux charges statiques et dynamiques, ainsi qu'aux variations de température. Cela garantit la solidité et la durabilité des produits finis.

- **Réduction des Coûts**

Le soudage permet de réparer et de prolonger la durée de vie des pièces usées, évitant ainsi le remplacement coûteux. Cette capacité de réparation est particulièrement avantageuse pour les industries à forte intensité de capital, car elle permet d'optimiser l'utilisation des équipements existants et de réduire les coûts de maintenance.

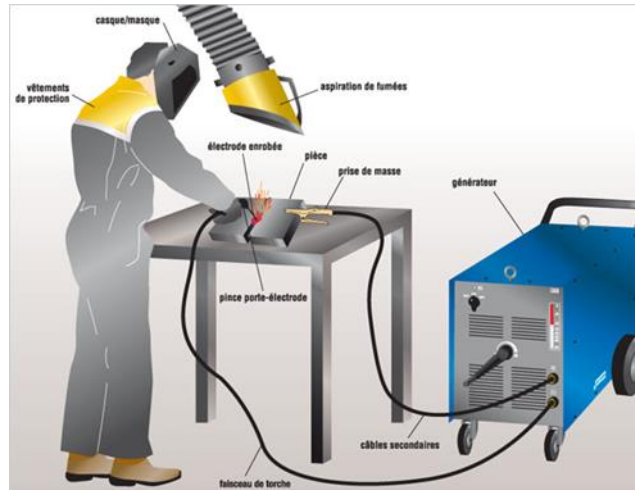
- **Diversité de Matériaux**

Une caractéristique essentielle du soudage est sa capacité à joindre une grande variété de matériaux. Il ne se limite pas seulement aux métaux, mais peut également être utilisé pour assembler des métaux à d'autres matériaux, tels que des plastiques et des composites. Cette polyvalence facilite la conception de produits innovants, car il est possible de combiner des matériaux aux propriétés spécifiques pour répondre aux besoins de chaque application.

5) Procédés et types de soudures

Couramment utilisés pour les structures métalliques :

a) SOUDAGE ARC (MMA)



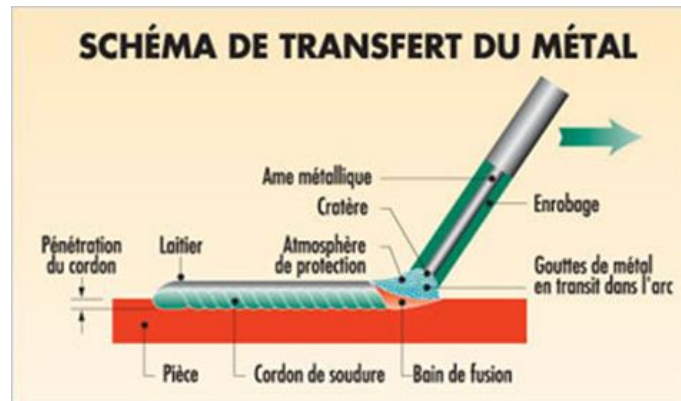
FigII.2 : Composition type d'une installation manuelle de soudage ARC (MMA)

PRINCIPE DU PROCEDE

Le métal d'apport est transféré par un arc électrique jaillissant entre l'âme de l'électrode enrobée et la pièce.

La chaleur dégagée par l'arc électrique fait fondre simultanément, le métal de base (la pièce), l'âme métallique et l'enrobage de l'électrode, créant ainsi le bain de fusion qui recueille les gouttes de métal d'apport et de laitier fondus transférées dans le plasma de cet arc.

Une partie des constituants de l'électrode est volatilisée, contribuant à créer l'atmosphère dans laquelle l'arc jaillit. L'enrobage fondu, de faible densité recouvre le bain de fusion formant le laitier qui protège le métal déposé pendant et après la solidification.



FigII.3 : schéma de transfert du métal soudage ARC (MMA)

b) SOUDURE À L'ARC

- Dynamisme d'amorçage : Facilite l'amorçage par une surintensité au démarrage. Il peut être automatique ou réglable en face avant.
- Arc Force : Permet d'éviter les collages dans le bain lors du soudage. Un système électronique détecte le rapprochement anormal entre l'âme métallique et la pièce à souder et apporte une énergie supplémentaire pour rétablir des conditions normales.
- Tension à vide U_0 : C'est la tension entre les bornes de soudage et de masse du générateur. Elle doit être supérieure à la tension d'amorçage des électrodes (indiquée sur chaque paquet d'électrodes).
- Rendement d'une électrode : L'adjonction de poudre de fer dans l'enrobage permet d'augmenter le rendement de métal déposé.
- Préconisations de réglages : Formule permettant d'approcher le bon réglage de l'intensité suivant le diamètre de l'électrodes : $(\varnothing - 1) \times 50 = \text{Intensité de soudage}$.

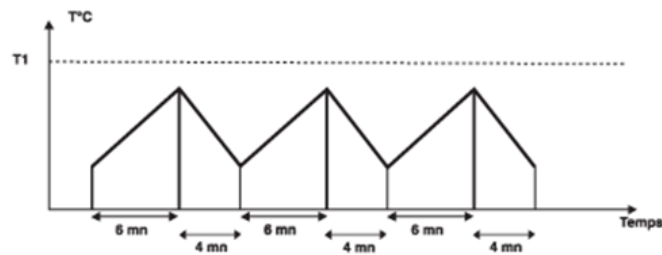
FACTEUR DE MARCHE

Le facteur de marche est défini par la norme EN 60974-1.

Cycle de fonctionnement 10 minutes.

A température ambiante 40 °C.

T1 : Température de déclenchement par la sécurité thermique.



FigII.4 : facteur de marche du soudage à l'arc

INDICE DE PROTECTION IP

Signification : IP21 ou 2 3 :

2 Signifie qu'un objet de plus de 12,5 mm de diamètre ne peut pénétrer, ni venir en contact avec un élément interne sous tension dangereuse.

3 Signifie que la source de courant est protégée contre toute détérioration en cours d'utilisation par de l'eau tombant en pluie avec un angle maximal de 60°.

1 Signifie que la source de courant est protégée contre les chutes d'eau verticales.

ÉLECTRODES ENROBÉES

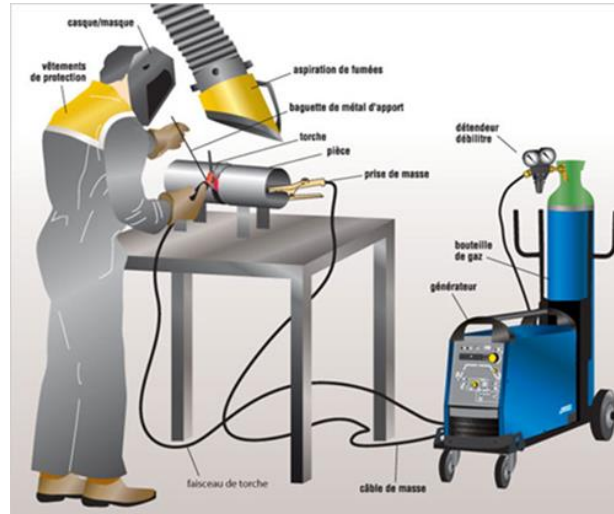
Les électrodes sont constituées d'une baguette métallique appelée AME et d'un revêtement adhérent.

Rôle de l'enrobage

Favoriser l'amorçage de l'électrode.

Protéger le métal déposé contre l'oxydation de l'air ambiante (formation de laitier).

Apporter des caractéristiques mécaniques au métal déposé.



FigII.6 : Composition type d'une installation manuelle de soudage TIG

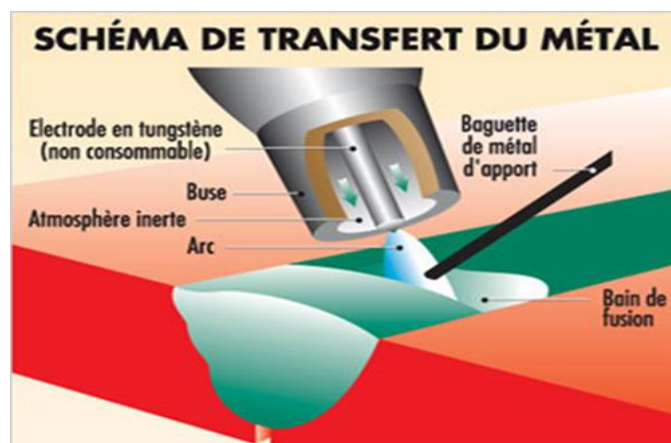
PRINCIPE DE SOUDAGE TIG

Notre gamme de poste à souder TIG

Un arc électrique est établi entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder.

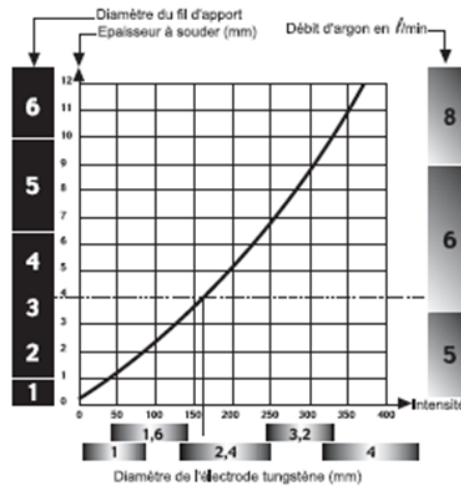
L'électrode, le métal d'apport en cours de fusion, le bain de fusion et les zones avoisinantes sont protégés contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air par une atmosphère de gaz neutre, généralement de l'argon.

Par commodité, ce procédé est désigné sous le nom de TIG, initiales des mots anglais "TungstenInertGas".

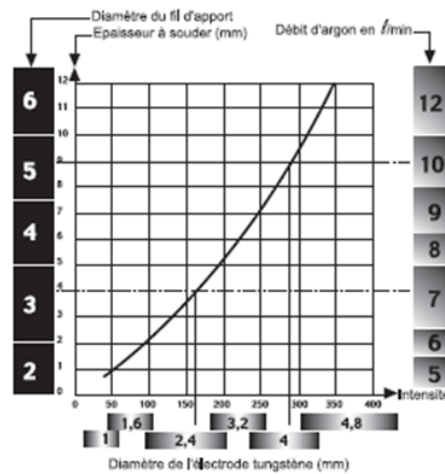


FigII.7 : schéma de transfert du métal de soudure TIG

ABAQUE DU SOUDAGE TIG



FigII.8 : ABAQUE DU SOUDAGE TIG sur Acier inoxydable

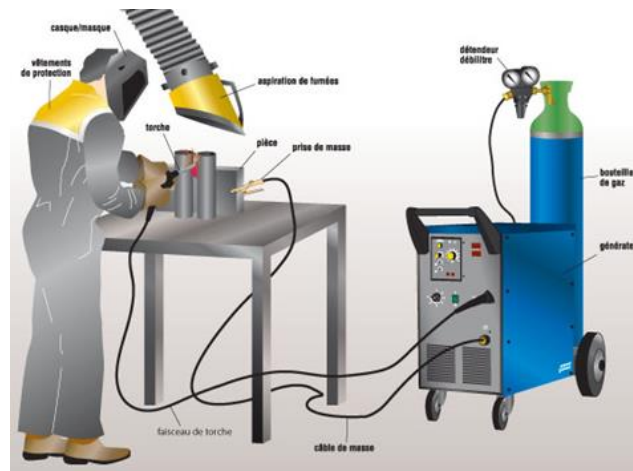


FigII.9 : ABAQUE DU SOUDAGE TIG sur l'aluminium

Tableau I

Exemple sur FigII.8	Exemple sur FigII.9
Epaisseur à souder : 4 mm	Epaisseur à souder : 9 mm
Diamètre du fil d'apport : 3 mm	Diamètre du fil d'apport : 5 mm
Diamètre de l'électrode : 2,4 mm	Diamètre de l'électrode : 4 mm
Intensité de soudage : 160 A	Intensité de soudage : 280 A
Débit d'argon : 6 l/min	Débit d'argon : 10 l/min

d) SOUDAGE MIG/MAG



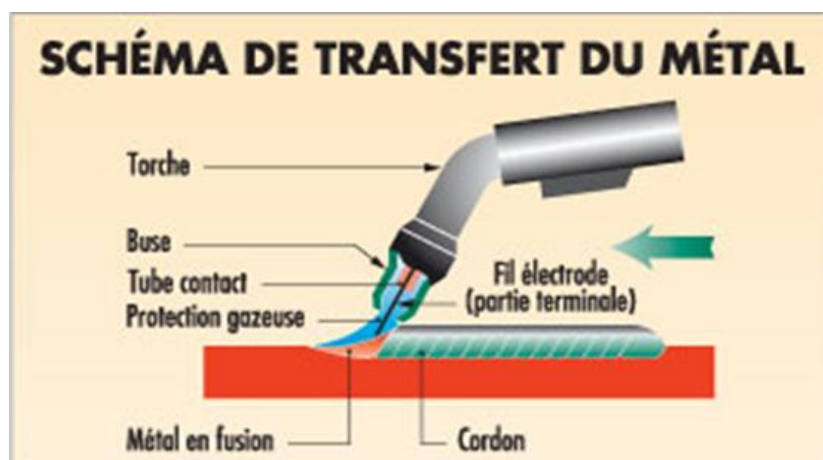
FigII.10 : Composition type d'une installation manuelle de soudage MIG/MAG

PRINCIPE DES PROCÉDES MIG MAG

Les procédés de soudage MIG MAG mettent en œuvre un arc sous une protection gazeuse. L'électrode est fusible et sert de métal d'apport. L'électrode, le métal transféré dans l'arc et le bain de fusion sont protégés de l'air ambiant par un flux de gaz qui est inerte dans le cas du soudage MIG et actif dans le cas du soudage MAG.

Cette définition explique les noms MIG, de l'anglais "Métal InertGas", et MAG "Metal Active Gas".

En soudage manuel, ces produits sont appelés "semi-automatiques" par ce que le fil est dévidé automatiquement dès l'amorçage de l'arc. [4]

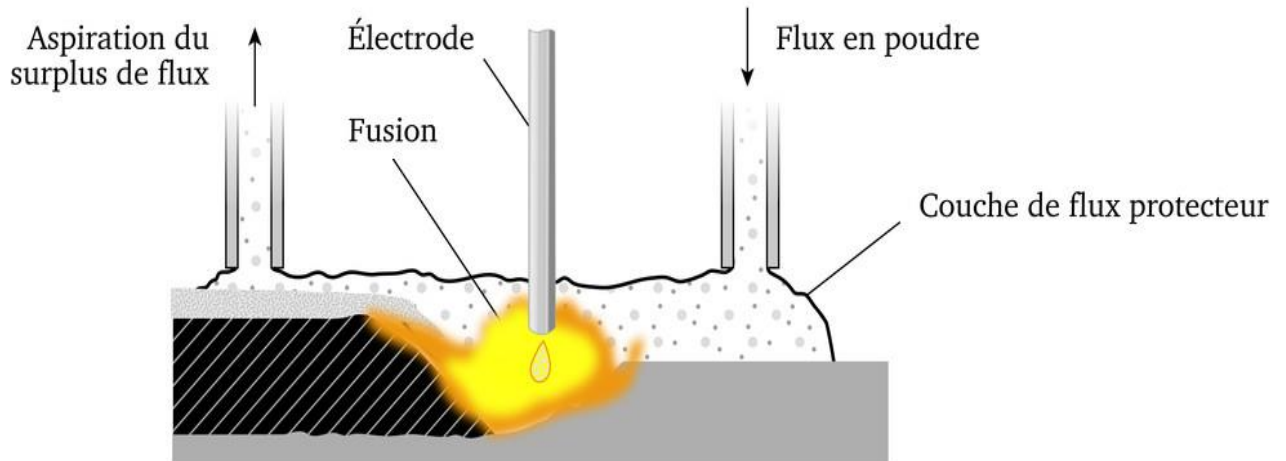


FigII.11 : schéma de transfert de métal de soudage MIG/MAG

e) SAW – Soudage à l’Arc Submergé

Principe de fonctionnement

Le procédé SAW repose sur la création d’un arc électrique entre un fil électrode consommable et la pièce à souder, mais l’arc est entièrement recouvert d’un flux granuleux.

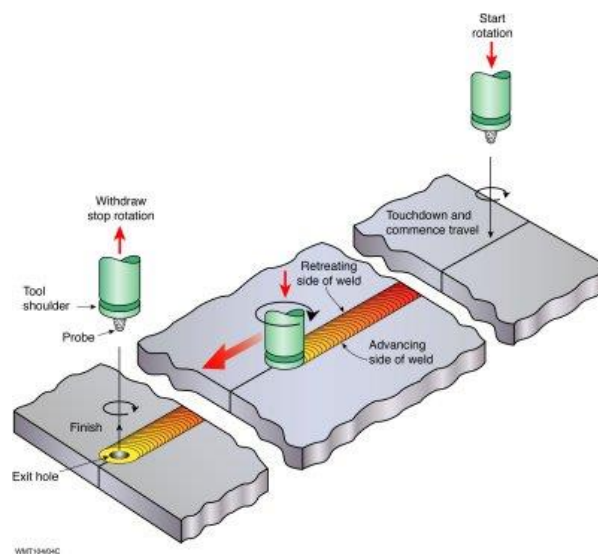


figII12 : SAW – Soudage à l’Arc Submergé

f) FSW – Soudage par Friction Malaxage

Principe de fonctionnement

Le FSW est un procédé de soudage à l’état solide : les matériaux ne fondent pas. Le soudage est réalisé par l’action mécanique d’un outil rotatif qui chauffe et malaxe les matériaux.



FigII.13 : principe de fonctionnement soudage par Friction Malaxage

6) Les défauts de soudage

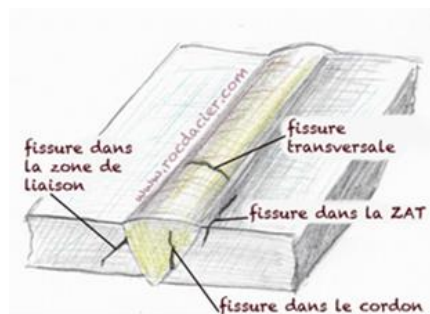
Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Sont exposés dans cette ressource les défauts les plus courants en fonction du métal

Travaillé ou du procédé de soudage utilisé.

Ce sont :

Défauts de Fissures

Les fissures dans une soudure sont des ruptures linéaires dans le matériau, qui peuvent se former dans le cordon de soudure lui-même, dans la zone de liaison entre les pièces, ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Elles sont de différentes formes, y compris les fissures transversales, longitudinales et verticales.



FigII.14 : Défauts de Fissures

Causes possibles

Des tensions résiduelles résultant d'un refroidissement non uniforme ou de réglages de soudage inappropriés.

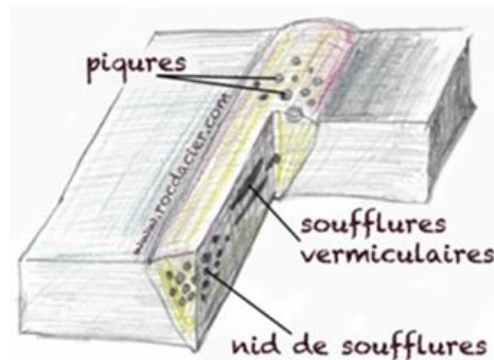
Il existe des contraintes mécaniques trop importantes.

Refroidissement excessif ou insuffisant.

Usage de matériaux qui ne sont pas compatibles ou de mauvaise qualité.

Défauts de Soufflures

Les soufflures ou cavités sont des imperfections de soudure caractérisées par la présence de trous, de vides ou de poches d'air à l'intérieur du cordon de soudure ou à sa surface. Elles peuvent varier en taille, de petites bulles à de plus grandes cavités, et peuvent affecter la qualité et la résistance de la soudure.



FigII.15 : Défauts de Soufflures

Causes possibles

Préparation inadéquate des bords à souder, tels que des surfaces non nettoyées ou mal chanfreinées.

Il y a des contaminants comme la rouille, l'huile ou la peinture sur les surfaces destinées au soudage.

Usage inapproprié du courant de soudure.

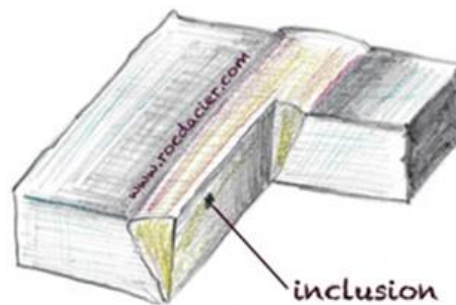
Protection insuffisante due à un débit inapproprié ou une composition de gaz inadéquate.

La pollution ferreuse

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage. Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

Défauts d'Inclusions

Les inclusions dans une soudure sont des impuretés étrangères telles que des particules de laitier, des fragments de métal non fusionnés ou d'autres matériaux étrangers qui sont emprisonnés dans le cordon de soudure.



FigII.16 : Défauts d'Inclusions

Causes possibles

Introduction de polluants ou d'impuretés dans la zone de soudage.

Élimination inadéquate du laitier ou des scories entre les passes de soudure.

Il y a de la saleté ou de la graisse sur les surfaces à souder.

Défauts de Retassures et Criques

Les retassures sont des interruptions ou des encoches dans le cordon de soudure, créant des zones de discontinuité visibles. Les criques sont de petites fissures superficielles.



FigII.17 : Défauts de Retassures et Criques

Causes possibles

Tensions résiduelles excessives dans la soudure.

Refroidissement inapproprié, entraînant des contraintes internes.

Utilisation de métaux d'apport incompatibles.

Présence de contaminants ou d'impuretés. [5]

7) Avantages du Soudage

Le soudage offre une gamme d'avantages importants :

- Le soudage est essentiel pour mener à bien des projets architecturaux audacieux comme les ponts, les immeubles de grande hauteur et les structures complexes.
- Ingénierie Créative, grâce à sa capacité de joindre avec précision et robustesse des composants métalliques, permet aux ingénieurs de réaliser des conceptions avant-gardistes et visuellement captivantes.
- Le soudage offre la possibilité d'incorporer des aspects de conception avancés qui répondent aux enjeux structurels et aux besoins en termes de durabilité, facilitant ainsi la réalisation de structures combinant solidité et raffinement.
- Chaque procédé de soudage est extrêmement ajustable, s'adaptant aux exigences précises de chaque projet, offrant ainsi un degré maximal de flexibilité tant dans la conception que l'exécution des assemblages.
- le soudage peut être modifié pour se conformer à des critères stricts et à des configurations diversifiées. Cette flexibilité du soudage en fait un instrument indispensable pour créer des solutions personnalisées dans des domaines aux demandes diversifiées, tels que le bâtiment, les transports et la fabrication d'équipements spécialisés.

IV. Le brasage

Le brasage est le plus ancien procédé d'assemblage métallurgique, utilisé il y a 4 000 ans sous l'ère des pharaons pour assembler des objets de la vie courante (plateaux, vases) en alliage de cuivre, des armes (manche de dague, épée) ou encore des pièces d'ornement et des parures en or. Il trouve maintenant sa place dans des applications techniques et à forte valeur ajoutée.

Présentant des avantages certains et quelques inconvénients, il est souvent employé lorsqu'il faut assembler des matériaux dissimilaires, afin que l'application envisagée bénéficie des propriétés physiques de chacun des substrats, notamment :

- titane et alliage d'aluminium pour l'aéronautique,
- carbure de tungstène à matrice cobalt et acier C-Mn pour les outils de décolletage,
- alliage de cuivre et alumine pour le spatial,
- céramique et acier inoxydable pour le nucléaire.

Le brasage est donc présent partout, de la bijouterie à l'aéronautique, et sa maîtrise peut lui autoriser certaines applications où les sollicitations thermomécaniques peuvent se situer à la limite de la rupture du métal de base

Nous verrons que le brasage fait intervenir des phénomènes :

- de mouillage,
- de capillarité,
- de diffusion,
- de dissolution

On distingue diverses formes de brasage : le brasage à basse température, et le brasage à haute température. Le brasage fort requiert des températures de fusion comprises entre 600°C et 1000°C, tandis que le brasage tendre implique une fusion du métal d'apport à une température ne dépassant pas 450°C. [6]

1. Quelle est la différence entre brasage et soudage ?

Le brasage et le soudage sont deux procédés utilisés pour assembler des matériaux dans différents secteurs industriels ou artisanaux, tels que la plomberie (tubes et raccords).

Le soudage est une opération qui permet de joindre des pièces à souder.

Une soudure s'obtient par fusion des matériaux (métal de base) et métal d'apport dans la plupart des procédés (Flamme, TIG, MIG/MAG). Les températures élevées sont celles qui correspondent à la température de fusion des métaux.

Le brasage est une opération d'assemblage qui s'obtient par fusion d'un métal d'apport (par exemple à base d'argent ou étain) sans fusion du métal de base. Le point de fusion du métal d'apport doit donc être à une température inférieure à celle du métal de base.

➤ Remarque

Pour assembler les pièces métalliques, on utilise usuellement le soudage. La dénomination soudage est utilisée pour définir le procédé et soudure pour le produit ou résultat du procédé de soudage. De même on appelle brasage le procédé, le résultat obtenu est appelé brasure. [7]

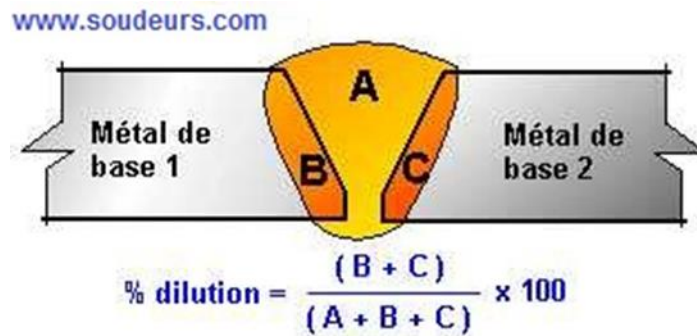
2. Principe de La Dilution

a) Définition

Au cours du processus de soudage, une partie des métaux de base est chauffée jusqu'à fusion par la source thermique, ce qui provoque un mélange avec le métal déposé pour créer la zone fondue

b) Mesure de la dilution

Le pourcentage de dilution indiqué correspond au rapport entre le total des volumes de métaux de base fondus et la totalité du volume fondu incluant le métal d'apport A et les métaux de base B et C. Le pourcentage est établi sur la base d'une coupe macrographique.



FigII.18 : Mesure de la dilution

c) Variation du taux de dilution

Le taux de dilution varie suivant le procédé de soudage utilisé :

- Procédé TIG (141) : dilution d'environ 15 à 30 %
- Procédé ARC E.E. (111) : dilution de 10 à 35%
- Procédé MAG (135) : dilution de 20 à 40%
- Procédé A.S.F. (121) : dilution de 60 à 80%

Le taux de dilution d'un soudage sans métal d'apport est de 100% et celui d'un soudo-brasage est de 0% (il n'y a pas fusion des bords).

La dilution varie suivant la géométrie des bords à souder. Elle varie aussi suivant l'énergie de soudage appliquée (intensité, tension, vitesse de soudage)

d) Importance du taux de dilution

Il est essentiel de calculer le taux de dilution lors du soudage de matériaux différents (hétérogènes ou mixtes) et d'aciers plaqués, afin de comprendre les structures métallurgiques des zones fusionnées. Elle offre la possibilité de choisir le type de métal d'apport à employer pour améliorer la soudabilité métallurgique du joint, en se basant sur le diagramme de Schaeffler.

Chapitre III : Partie Expérimentale

I. Introduction

Dans cette étude, l'analyse et la modélisation du comportement mécanique des joints soudés ont été effectuées à l'aide d'Abaqus, en complément de l'analyse expérimentale par une approche numérique. Le but est d'examiner l'impact des facteurs de soudage et des conditions de charge sur la résistance à la rupture et la répartition des tensions dans les zones affectées par la chaleur et les cordons de soudure.

L'emploi d'Abaqus a rendu possible une reproduction précise du comportement observé en laboratoire, l'identification des zones sensibles et l'exploration de divers scénarios de dégradation. L'approche intégrée, alliant expérimentation et simulation, est désormais une méthode essentielle pour la conception, l'optimisation et la fiabilité des structures soudées.

Dans le domaine de l'ingénierie mécanique contemporaine, la fiabilité et l'efficacité des structures métalliques sont des enjeux primordiaux, particulièrement lorsqu'elles font face à des charges complexes susceptibles d'entraîner des phénomènes de fissuration ou de rupture. Les soudures, plus particulièrement, constituent des points névralgiques dans les montages, où les tensions et les imperfections susceptibles de provoquer des détériorations ont tendance à se regrouper.

Pour une analyse précise du comportement mécanique de ces zones, il est essentiel d'utiliser des outils numériques avancés qui peuvent modéliser la géométrie complexe des soudures, les caractéristiques non linéaires des matériaux et les conditions de chargement réalistes. Abaqus, logiciel de calcul par éléments finis développé par Dassault Systèmes, s'impose comme l'un des outils les plus puissants et les plus polyvalents dans ce domaine.

Grâce à son architecture modulaire (notamment Abaqus/CAE, Abaqus/Standard et Abaqus/Explicit), ce logiciel permet la simulation avancée des comportements mécaniques, en intégrant des phénomènes tels que :

- la plasticité,
- le contact non linéaire,
- la propagation de fissures,
- et les lois d'endommagement progressif.

Dans cette étude, l'analyse et la modélisation du comportement mécanique des joints soudés ont été effectuées à l'aide d'Abaqus, en complément de l'analyse expérimentale par une approche numérique. Le but est d'examiner l'impact des facteurs de soudage et des conditions de charge sur la résistance à la rupture et la répartition des tensions dans les zones affectées par la chaleur et les cordons de soudure.

L'emploi d'Abaqus a rendu possible une reproduction précise du comportement observé en laboratoire, l'identification des zones sensibles et l'exploration de divers scénarios de dégradation. L'approche intégrée, alliant expérimentation et simulation, est désormais une méthode essentielle pour la conception, l'optimisation et la fiabilité des structures soudées.

II. Le logiciel Abaqus

Abaqus est un progiciel de calcul d'éléments finis qui a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) devenu ABAQUS, Inc depuis 30 ans en début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005. ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

ABAQUS est donc un progiciel de calcul éléments finis qui se compose de trois produits :

ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- ABAQUS/Standard : est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
 - ABAQUS/Explicit : est un solveur qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.
 - ABAQUS/CAE : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les para-métrisations.

La gestion de l'interface graphique est assurée par fox-toolkit. [8]

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

En 2005, ABAQUS, Inc. a été acquise par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA. Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement).

La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, les matériaux, les chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. [9]

Il faut savoir que le prétraitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels.

ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

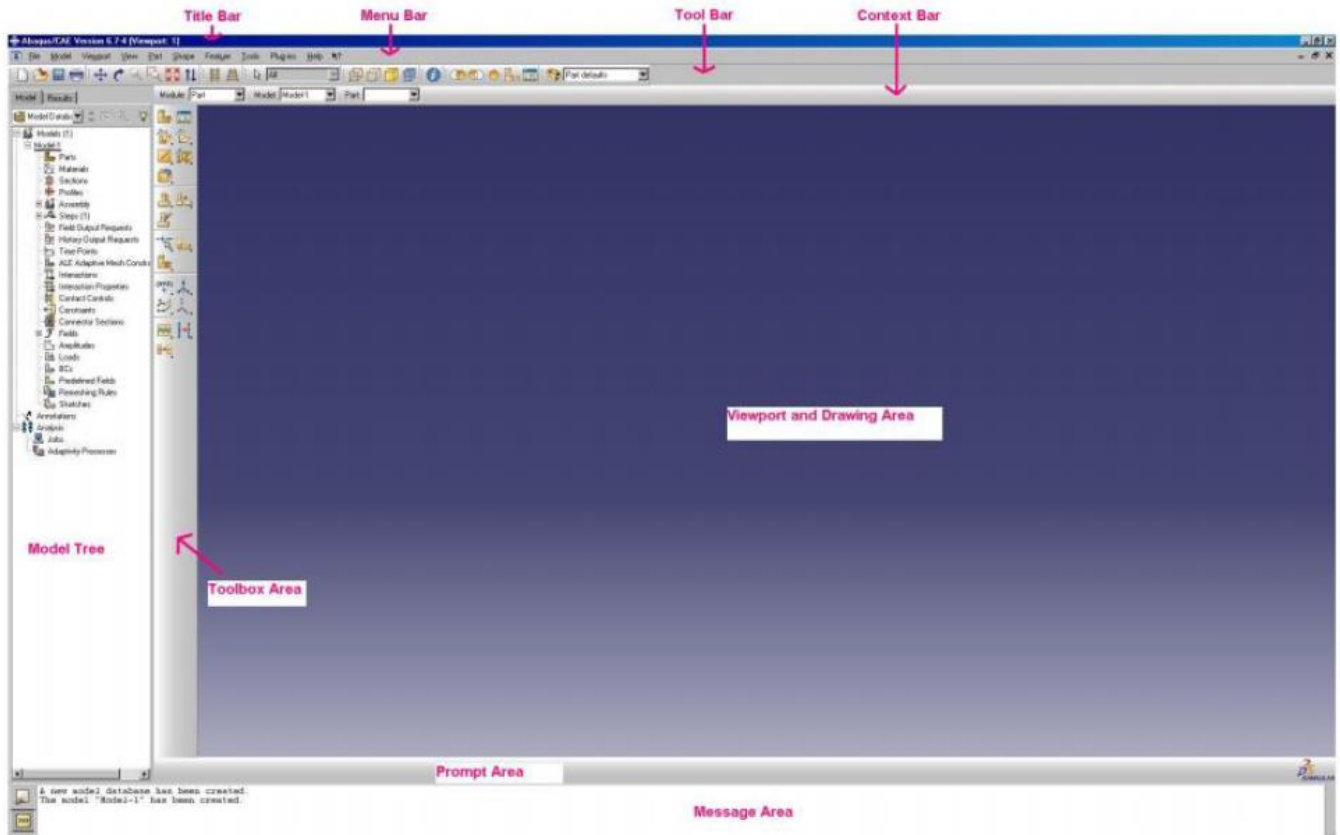
- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats. [10] , [11].

1. L'interface d'ABAQUS

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivants :

- la fenêtre d'affichage graphique.
- une première barre de menus en haut : ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve.
- une deuxième barre horizontale d'outils : y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)
- une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
 - Plus important :
- on dispose à gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve. ATTENTION : les icônes comportant une petite flèche en bas à droite () cachent d'autres icônes ! Il faut maintenir enfoncée la touche M1 de la souris sur l'icône pour voir apparaître les icônes cachées et pouvoir sélectionner les outils correspondants. Présentation du logiciel. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel ABAQUS vous parle : les messages affichés à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise. Lisez-les, suivez-les attentivement, ils vous seront d'une grande aide.
- Enfin, une fenêtre en-dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc. [12].

L'interface Abaqus est illustrée dans la figure suivante :



FigIII.1 : L'interface de Abaqus

2. Mécanique des éprouvettes entaillées

En travaillant sur des éprouvettes axisymétriques entaillées (AE), il est possible d'étudier des sollicitations multiaxiales, uniquement en utilisant un essai de traction. Ces éprouvettes permettent l'étude des conditions de contraintes planes et déformations planes.

Pour une éprouvette entaillée, tant que la limite d'élasticité n'est pas dépassée la contrainte est maximale en fond d'entaille par phénomène de concentration des contraintes. La limite d'élasticité est donc atteinte en premier à cet endroit. Si l'éprouvette continue à être déformée, la zone déformée plastiquement s'étend et finit par envahir toute la section entaillée. La charge atteint alors la charge limite de l'éprouvette, elle est supérieure à ce qu'elle serait sans défaut (entaille). Considérons pour cela tout d'abord un cylindre de matière dans la partie entaillée de l'éprouvette ; s'il était isolé, il s'allongerait selon son axe et se contracterait selon son diamètre de façon à conserver un volume constant. Inclus dans l'entaille, entre les deux parties non entaillées qui restent élastiques et se déforment peu, il ne peut que se contracter de la même façon et il apparaît donc des contraintes radiales de tension. Pour satisfaire le critère de plasticité (Von Mises ou Tresca), il est nécessaire d'augmenter d'autant la contrainte axiale. Ainsi, la déformation plastique confinée élève le niveau général des contraintes et le taux de tri-axialité des contraintes β . Celui-ci est défini par la relation (60) :

$$\text{a) } \beta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}$$

σ_m : Contrainte moyenne

σ_{eq} : Contrainte équivalente de Von Mises.

Pour une éprouvette cylindrique comportant une gorge de rayon à fond d'entaille (R) laissant subsister un col de rayon (a) dans la section minimale (Figure 30), le calcul des répartitions de contraintes et des déformations est compliqué et ne peut être complètement résolu analytiquement. Des hypothèses simplificatrices sont nécessaires comme celle de l'égalité entre les déformations radiales et tangentielles dans la section minimale où $Z=0$. Il en résulte que les contraintes radiales et tangentielles sont égales et que le déviateur est indépendant de la coordonnée radiale (r) dans cette section. Avec ces hypothèses, les équations de l'équilibre et le critère de plasticité, il est démontré que :

$$\text{b) } \frac{d\sigma_{rr}}{dr} = -\frac{\sigma_{eq}}{\rho}$$

Avec (r) le rayon de courbure des lignes isostatiques, là où elles interceptent le plan $Z = 0$. Bridgman [63] a supposé que les lignes isostatiques peuvent être assimilées à des cercles qui coupent à angle droit la surface de l'entaille qui est torique [20]. Le rayon de courbure (ρ) est donné par la relation (62) :

$$\text{c) } \rho = \frac{a^2 + 2aR - r^2}{2r}$$

L'intégration de l'équation différentielle (61) conduit à (63) :

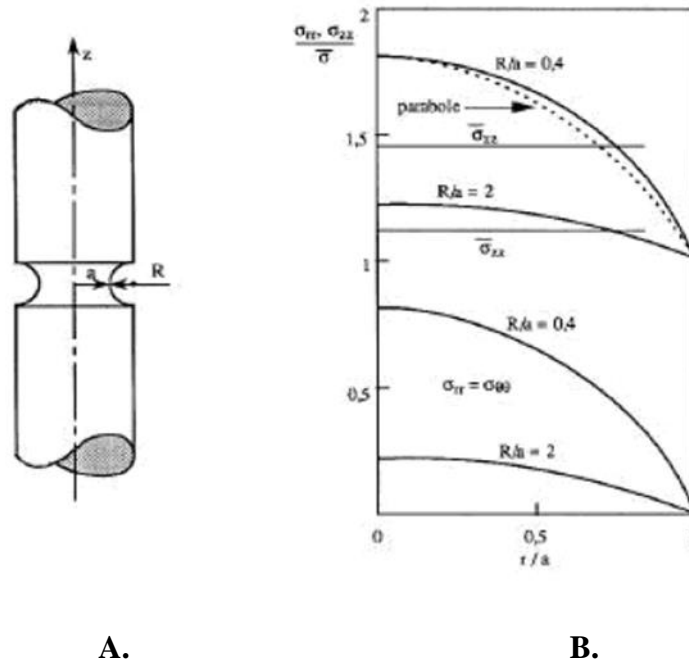
$$\text{d) } \begin{cases} \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{eq} \ln\left(1 + \frac{a^2 - r^2}{2aR}\right) \\ \sigma_{zz} = \sigma_{eq} \left[1 + \ln\left(1 + \frac{a^2 - r^2}{2aR}\right)\right] \end{cases}$$

La contrainte axiale moyenne $\bar{\sigma}_{zz}$ c'est à dire la charge appliquée à l'éprouvette est donnée par l'expression (64) :

$$\text{e) } \bar{\sigma}_{zz} = \sigma_{eq} \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)$$

Le taux de tri-axialité des contraintes est maximale sur l'axe de l'éprouvette tel que :

$$\text{f) } \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)$$



FigIII.2 : le profil de contraintes

- A. Schéma d'une éprouvette axisymétrique entaillée.
- B. Partition des contraintes Axiales, Rad et Tang selon le calcul de Bridgman.

Ainsi comme indiqué sur la Figure 30, le profil de contraintes est une parabole, avec un maximum au centre de l'éprouvette. La contrainte axiale sera d'autant plus élevée que le rayon de courbure R sera faible.

3. Choix des géométries

A partir de ces rappels, on a choisi de travailler avec des éprouvettes axisymétriques entaillées AE à un seul rayon de courbures, pour ne pas étudier l'influence du taux de tri-axialité des contraintes sur le comportement du matériau « l'endommagement ». Le rayon de courbure étudiés est : $R = 10 \text{ mm}$ (AE10). La géométrie de l'éprouvette est telle que la longueur totale est de 66 mm, le diamètre du fût est de 10 mm, le diamètre en fond d'entaille est de 5 mm. **FigIII.3**

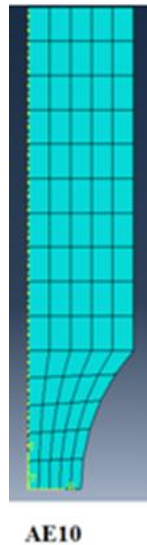
$$\beta = 0.44$$

AE10



FigIII.3 : la Géométrie de l'éprouvette AE

La géométrie entaillée a été étudiée par symétrie (axisymétriques), seul la moitié de l'éprouvette est maillée à l'aide d'éléments axisymétriques quadratiques à intégration réduite (appelé cax4r). Ainsi, grâce à la symétrie, il est possible de ne mailler que la demi-longueur pour représenter la structure entière. Dans la zone entaillée, le maillage est fini, contrairement à la zone lisse où celui-ci est plus grossier. Le nombre total de nœuds est : 1080 nœuds et 345 éléments pour l'AE10. **FigIII.4** indique les maillages utilisés dans la zone de l'entaille et toute la demi-longueur.



FigIII.4 : Maillage de l'éprouvettes AE.

III. Etude expérimentale

1) Conditions de l'étude

Pour avoir les informations sur la matière utilisée, nous avons fait appel à des essais déjà fait avant. [13]

Les essais ont été effectués sur un acier non allié d'usage courant A48-AP dont la composition chimique est donnée par les tableaux ci-dessous, ainsi que la composition chimique du métal d'apport :

Tableau II Composition chimique de l'acier utilisé (A48-AP).

Eléments	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Mo	V
Pourcentage	0.18	0.33	1.17	0.016	0.005	0.004	0.039	0.04	0.06	0.05	0.002	0.01	0.004

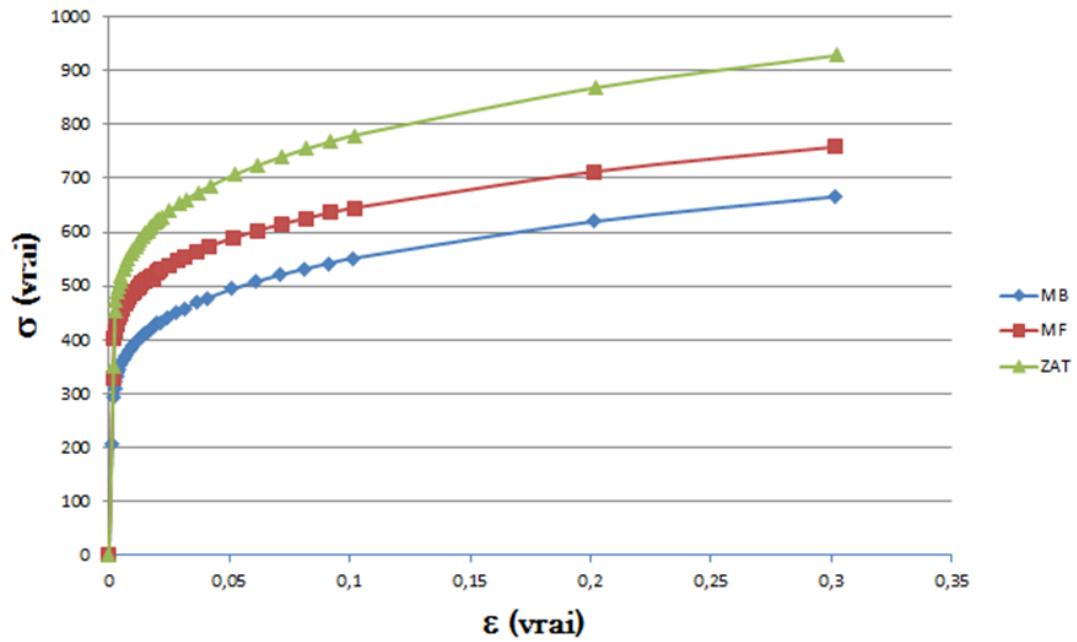
Tableau III Composition chimique du Métal d'apport (ou Métal fondue)

Eléments	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Mo	V
Pourcentage	0.076	0.34	1.33	0.009	0.007	0.009	0.001	0.08	0.04	0.04	0.002	0.01	0.015

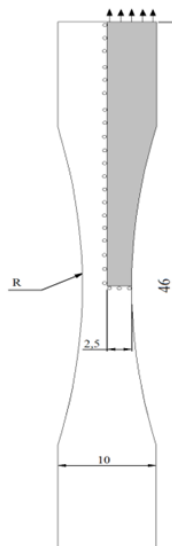
2) Analyse des résultats

a. Essai de traction

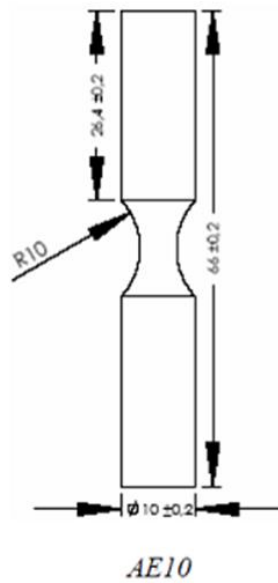
Après des essais de traction, on a fait sortir la courbe des trois zones de soudage : Métal de base, Métal fondu et la zone affecté thermiquement.



FigIII.5 : Courbe pour l'acier A48 (MB, MF et ZAT)



FigIII.6 : Eprouvette entaillé de type sablier avec un rayon de courbure R (mm)



FigIII.7 : Géométrie schématique d'une éprouvette AE.

3) Analyse numérique du comportement mécanique des joints soudés

Pour déterminer la loi de comportement des joints soudés on a fait appel à des essais expérimentaux déjà faites pour les trois zones connues en soudage : métal de base, métal fondu et la zone affectée thermiquement, les variations des propriétés mécaniques des différentes zones pour une vitesse de 0.001 S-1 sont données dans le tableau suivant :

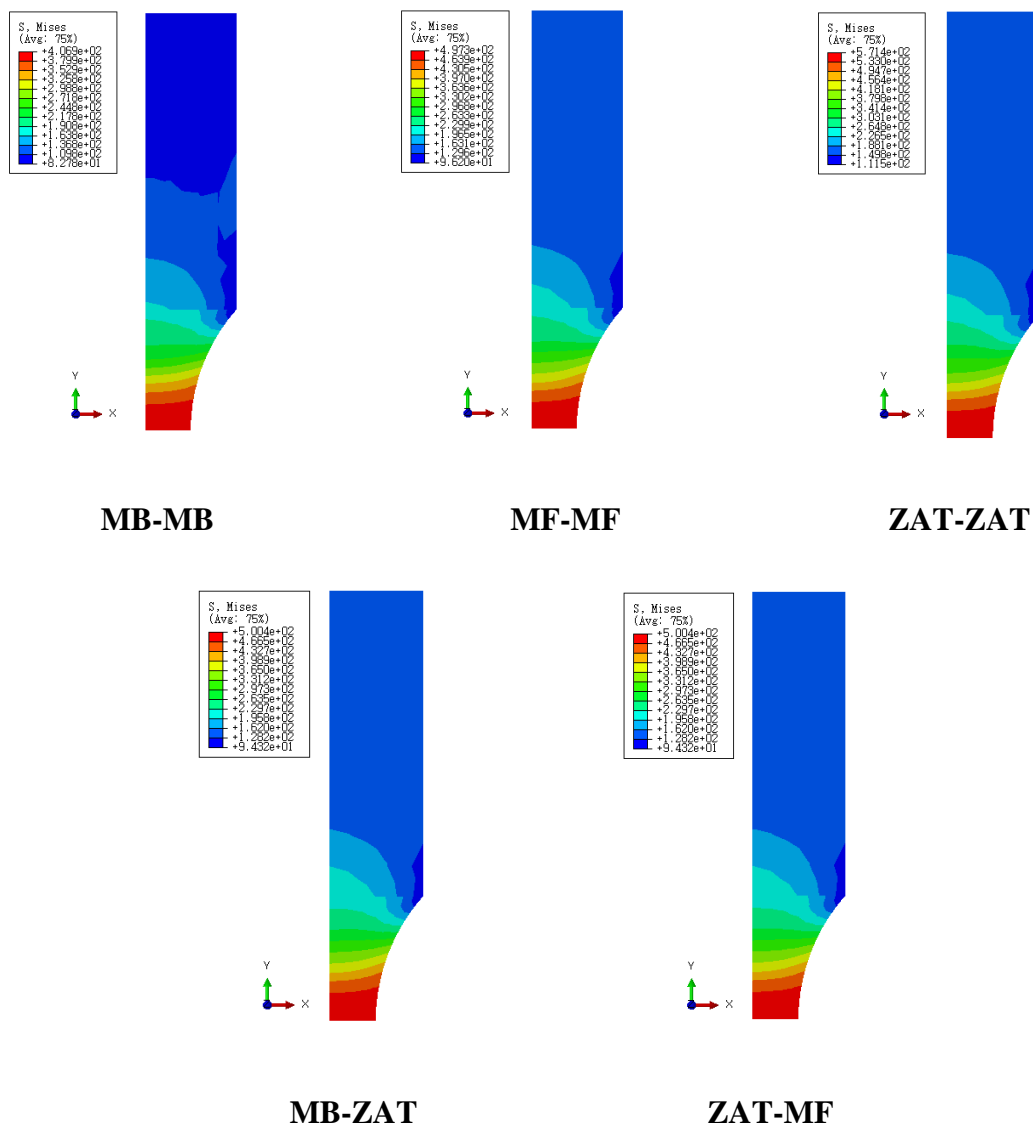
Tableau IV propriétés mécaniques de l'acier A48 (MB, MF et ZAT)

ZONES	Module de Young E (GPa)	Limite élastique σ_y (MPa)	Coeff de poisson ν
<i>MB</i>	<i>183</i>	<i>300</i>	<i>0.3</i>
<i>MF</i>	<i>180</i>	<i>400</i>	<i>0.3</i>
<i>ZAT</i>	<i>200</i>	<i>205</i>	<i>0.3</i>

1.1. Analyse numérique du modèle élasto-plastique

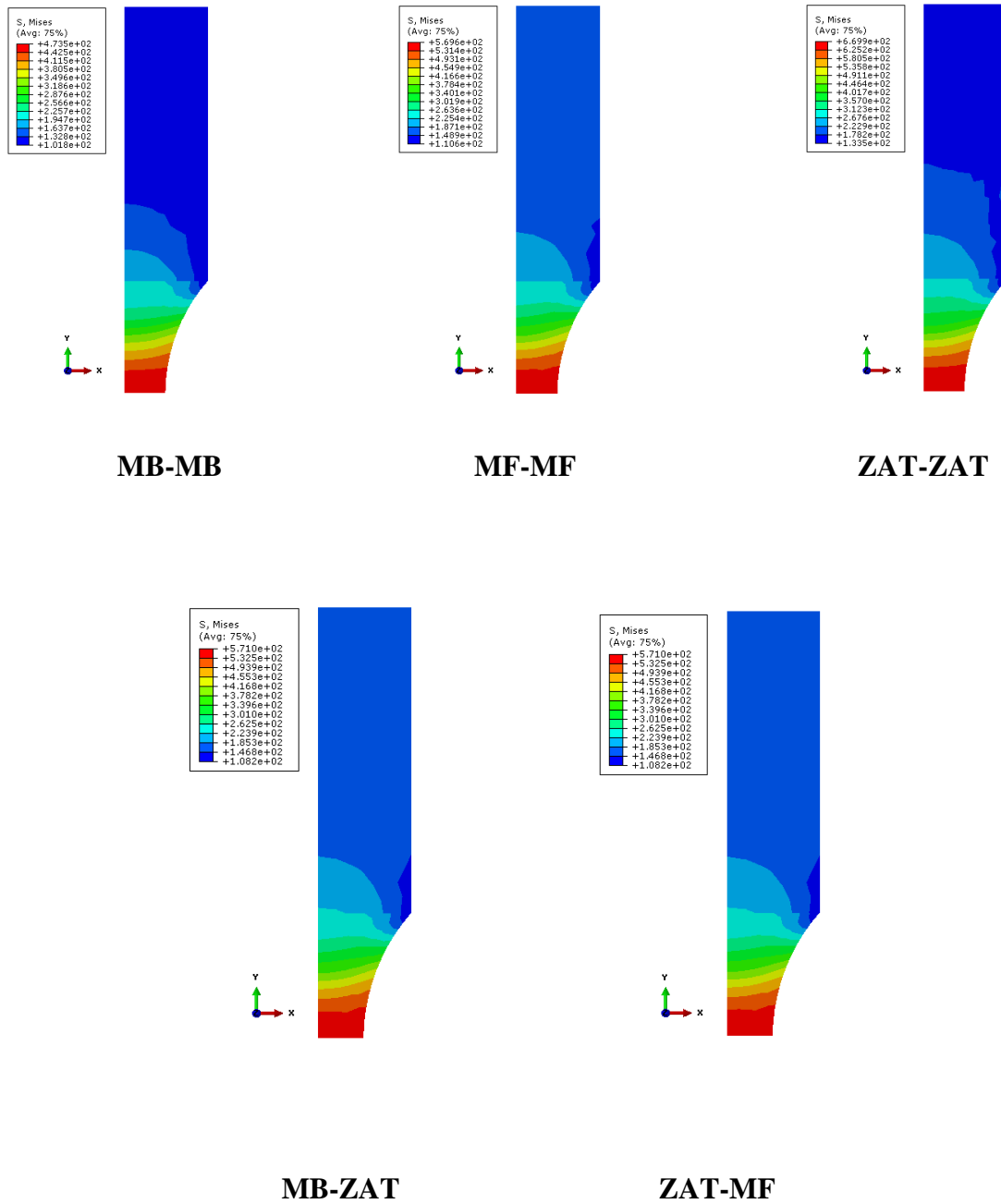
L'analyse numérique nous a permis de déterminer la répartition des champs de déformations au voisinage de l'entaille. les résultats sont obtenus à partir des tests de traction sur cinq éprouvettes de matières différentes MB+MB, MF+MF, ZAT+ZAT, MB+ZAT, ZAT+MF [14].

La figure suivante présente les évolutions et la localisation des déformations longitudinales dans les zones utiles. On remarque d'une part que les déformations sont concentrées en fond d'entaille, cette concentration diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de celui-ci, d'autre part cette concentration est presque de même valeur au début pour les cinq tests.



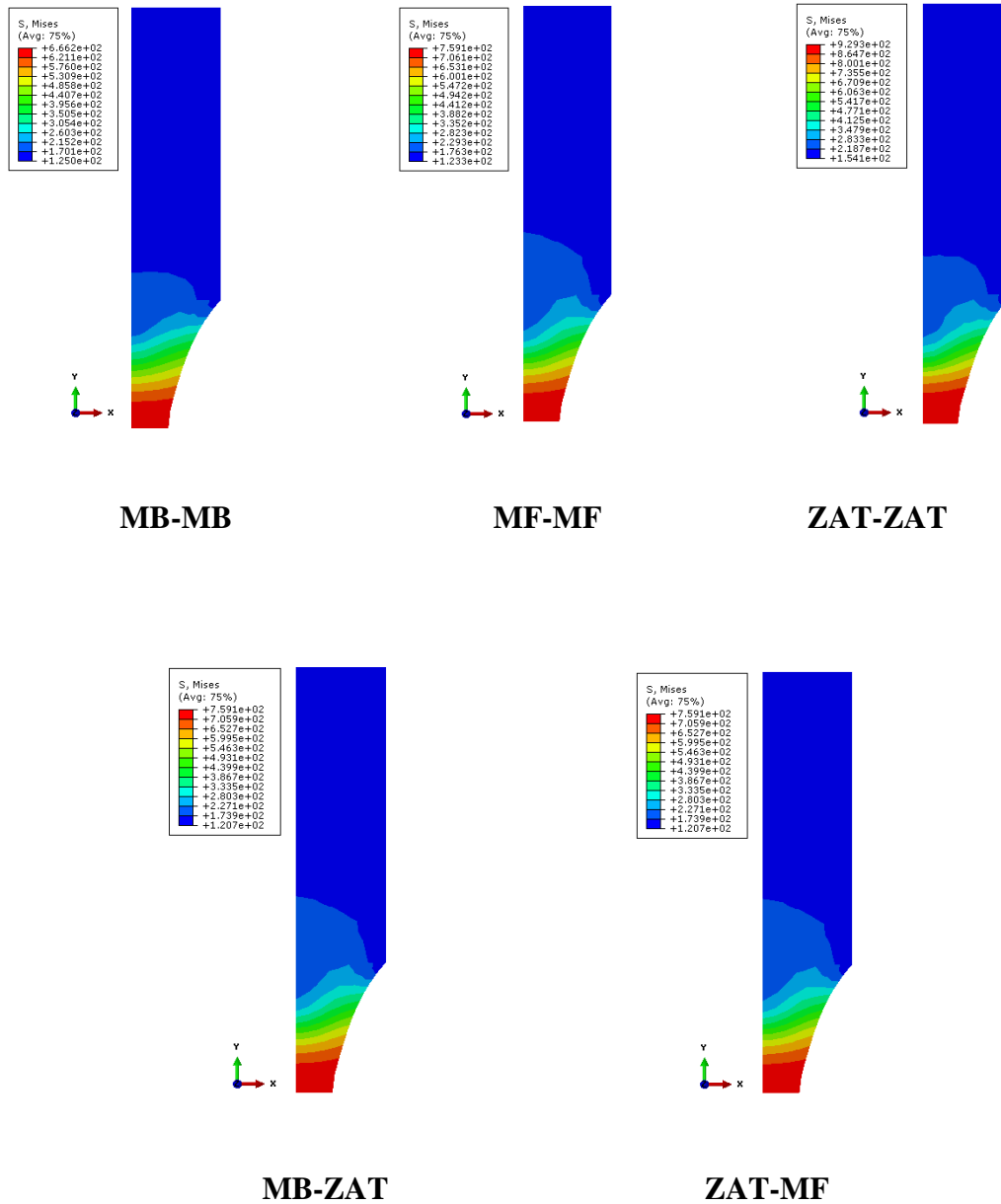
FigIII.8 : Champs des déformations pour les différentes zones

Après le passage de la zone élastique, on remarque une différence de concentration de contrainte, surtout pour les matériaux MB-MB et ZAT-ZAT



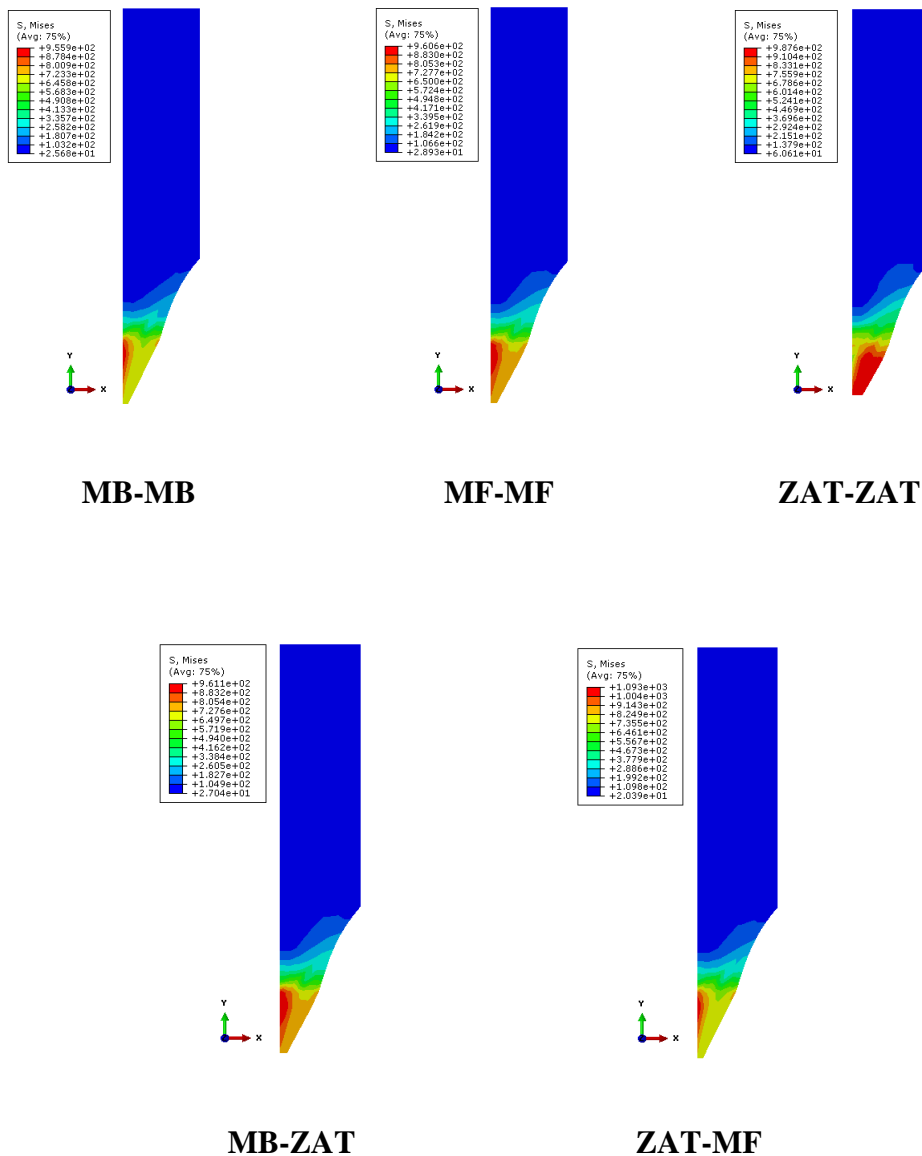
FigIII.9 : Champs des déformations pour les trois zones à l'étape A

Dans le domaine élasto-plastique (étape B) la contrainte en fond d'entaille est presque la même, et une différence de concentration de contrainte est plus visible lorsqu'on s'éloigne du fond d'entaille pour les matériaux MB-MB et ZAT-ZAT, voir la figure suivante :



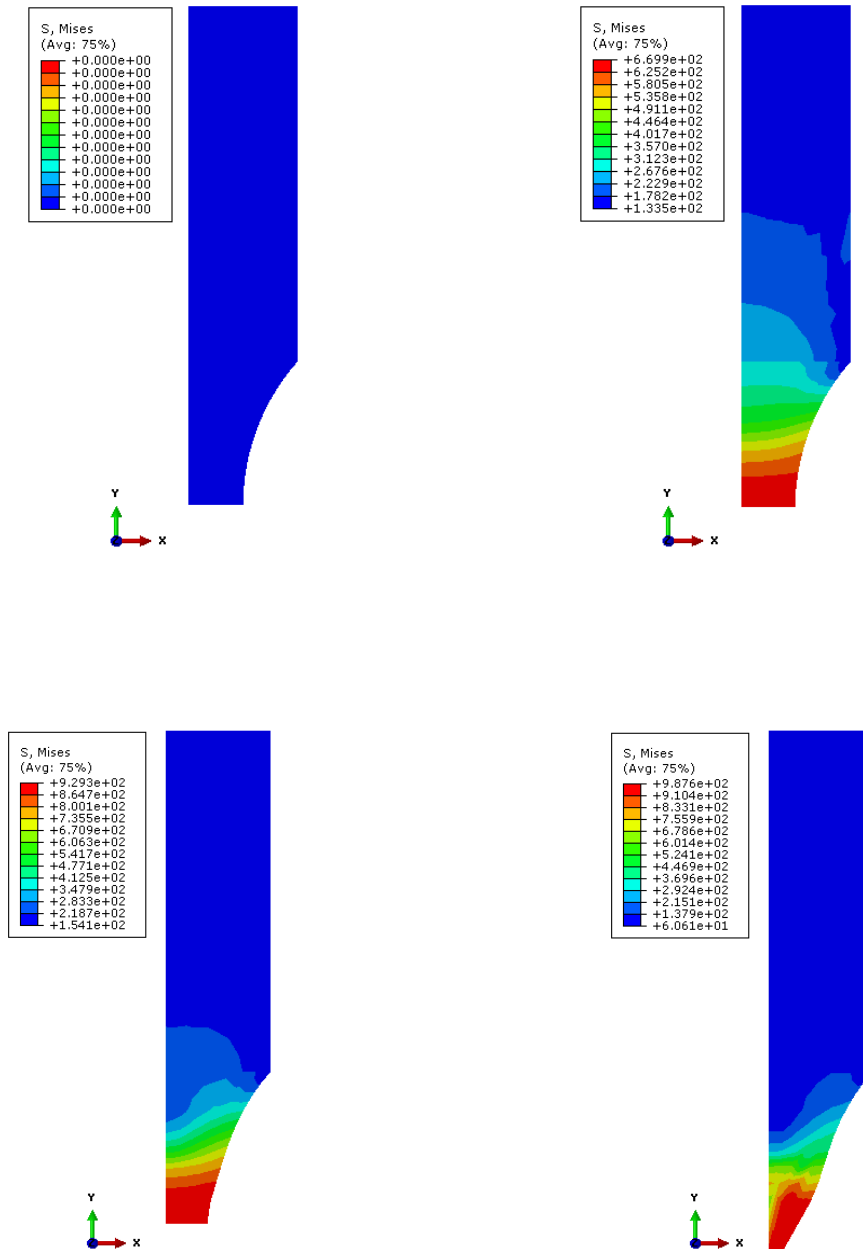
FigIII.10 : Champs des déformations pour les trois zones à l'étape B

En fond d'entaille et dans le domaine plastique (étape C), ou la déformation est plus visible en fond d'entaille, et les concentrations de contrainte qui sont importantes dans les matériaux ZAT-ZAT et MB-ZAT, voir figure suivante :



FigIII.11 : Champs des déformations pour les trois zones a l'étape C

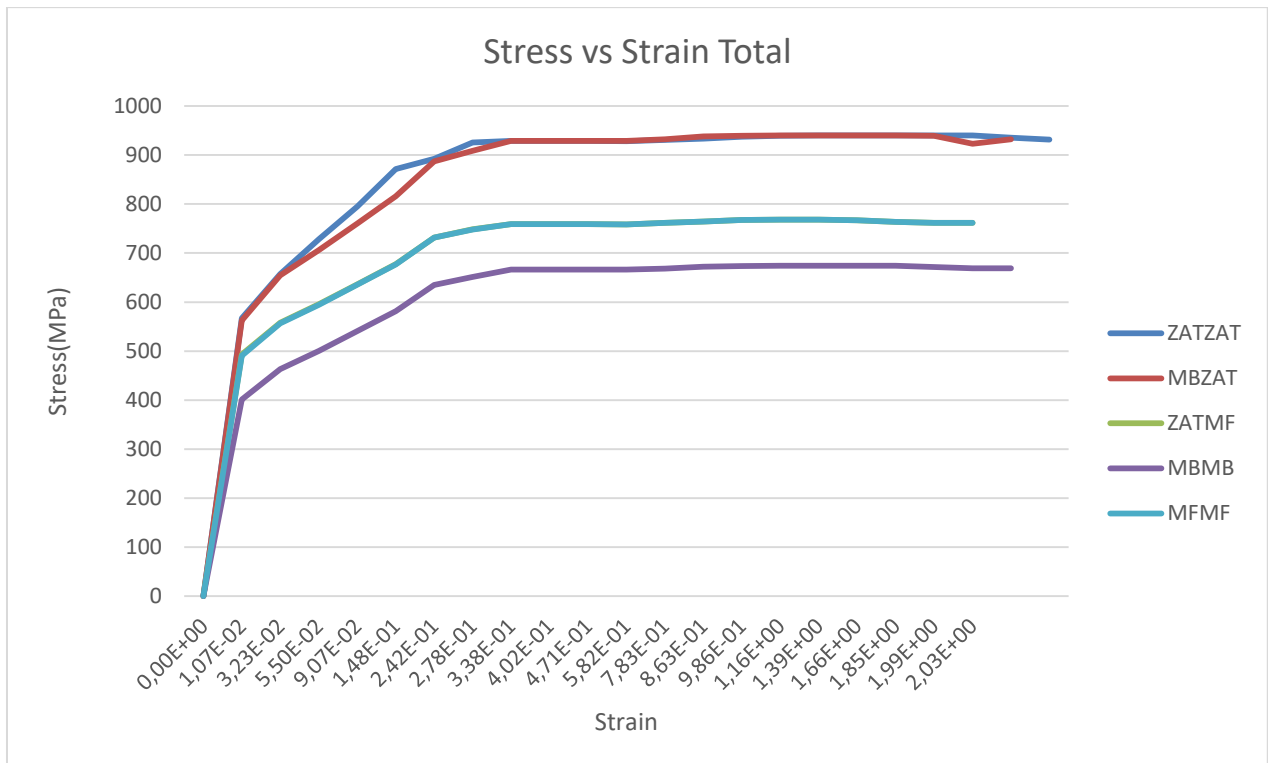
Après avoir fait la comparaison entre les cinq matériaux choisis, la résistance à la traction était plus importante dans le matériau ZAT-ZAT comme le montre la figure **FigIII.12**, une grande concentration de contrainte en fond d'entaille avant rupture.



ZAT-ZAT

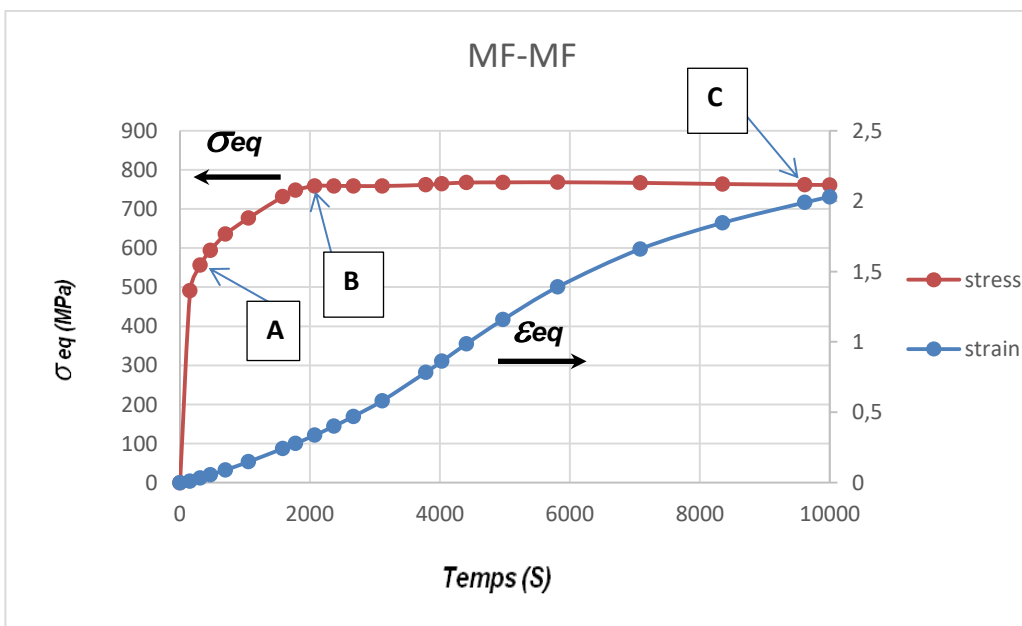
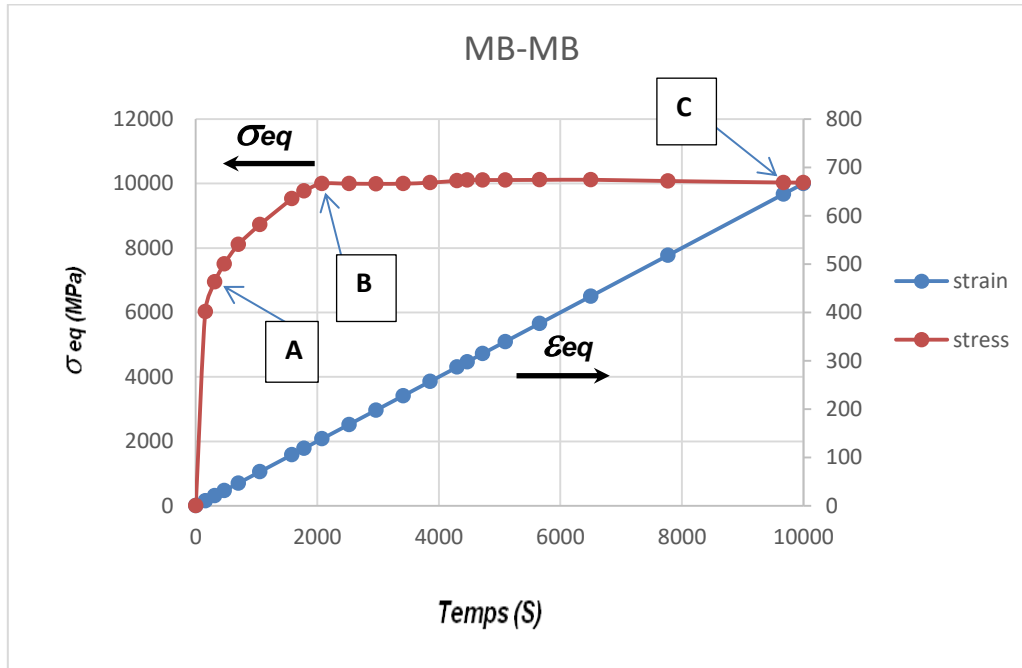
FigIII.12 : Champs des déformations pour différentes étapes de la matière ZAT-ZAT

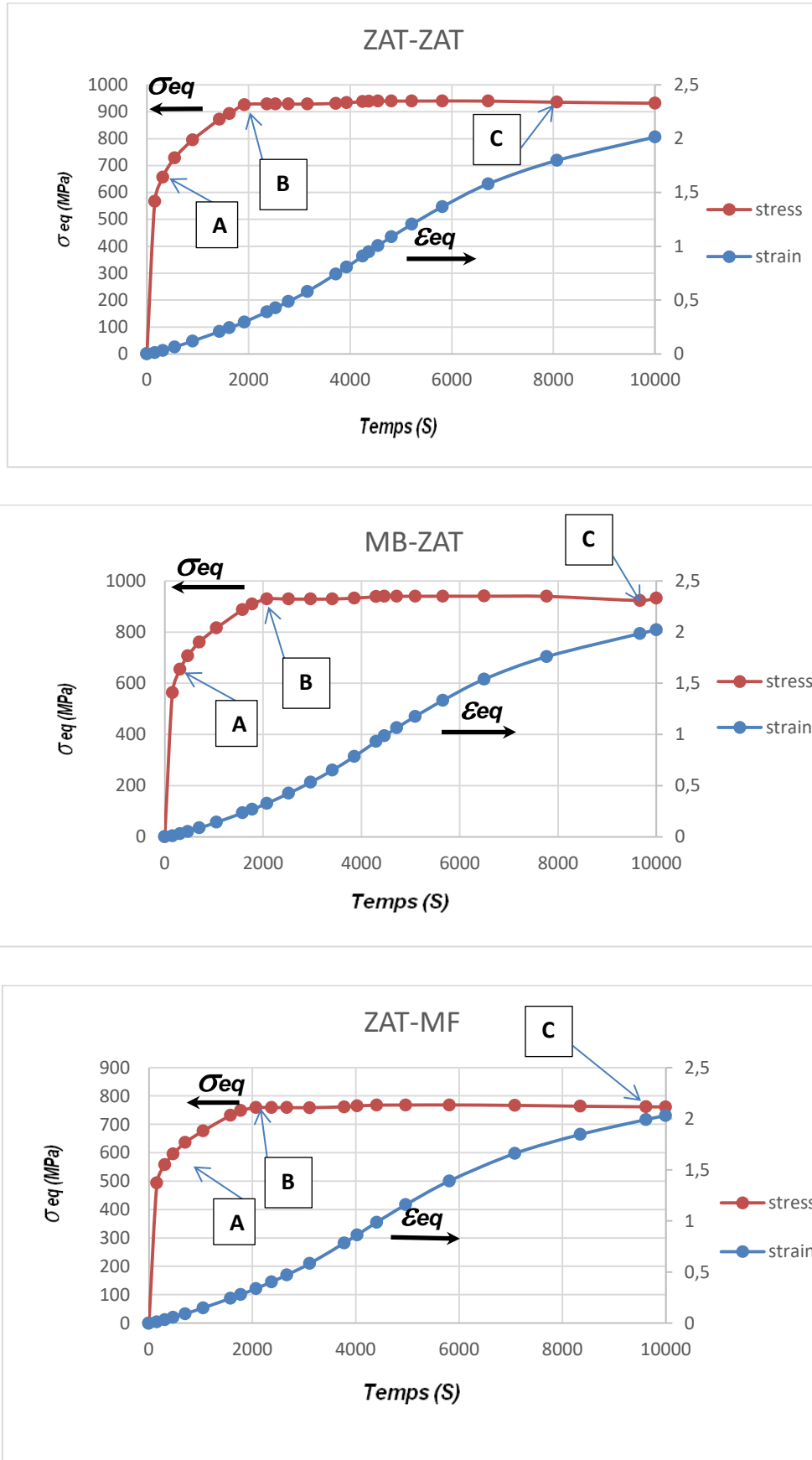
Cette figure montre la variation de la contrainte équivalente de Von-Mises en fonction de la déformation réalisé par éléments finis et prise au centre de l'éprouvette (la partie la plus sollicitée) pour les mêmes tests d'analyse en traction avec les cinq différents Matériaux MB+MB, MF+MF, ZAT+ZAT, MB+ZAT, ZAT+MF. Les résultats obtenus montrent que la contrainte équivalente évolue lorsque la zone affectée thermiquement (ZAT) est présente.



FigIII.13: Evolution de la contrainte équivalente en fonction de la déformation.

Sur les courbes d'évolution des contraintes - déformations en fonction du temps, on remarque que le domaine élastique des matériaux est presque de même valeur, on a noté cette étape comme étape A, ainsi que l'étape B qui représente une valeur du domaine élasto-plastique qui est de même courbure et valeur pour les différents matériaux, mais dans l'étape C, on a remarqué que dans le matériau ZAT-ZAT, cette étape est plus concentré en contrainte que les autres, ce qui provoque la rupture du matériaux avant les autres, voir **FigIII.12**.





FigIII.14: Evolution des contraintes - déformations en fonction du temps

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude nous a permis de mieux comprendre le comportement mécanique d'un joint de soudure; nous avons analysé les mécanismes de propagation des fissures, les facteurs influençant la rupture des soudures, ainsi que le comportement mécanique des différentes zones soudées (métal de base, métal fondu et zone affectée thermiquement).

Elle nous a permis aussi de réaliser une large étude bibliographique concernant différents types de procédé de soudage, les différents défauts des joints de soudures et les différents contrôles destructifs et non destructifs.

L'utilisation du logiciel Abaqus dans la partie expérimentale a permis de simuler de manière précise les contraintes et déformations dans des éprouvettes entaillées, et d'évaluer l'effet de la géométrie des entailles sur la concentration de contraintes. Les résultats obtenus montrent clairement que la zone affectée thermiquement (ZAT) constitue souvent le maillon faible du joint soudé, et que la présence de discontinuités ou de défauts peut accélérer l'initiation et la propagation de fissures, menaçant l'intégrité structurelle de l'assemblage.

En conclusion, ce mémoire contribue à une meilleure compréhension de l'endommagement des joints soudés et souligne la nécessité de maîtriser à la fois la conception, le choix des matériaux et les conditions de soudage. Des études futures pourraient approfondir l'effet des cycles thermiques, du vieillissement en service, ou encore explorer d'autres procédés de soudage et types de chargement pour compléter les résultats obtenus.

Références

- [1] (https://www.simulationmateriaux.com/Fatigue/fatigue_des_structures-propagation_des_fissures_de_fatigue.php).
- [2] <https://corrosia.com/le-soudage/>).
- [3] <https://www.infoindustrielle.fr/actualites/quelles-sont-les-applications-du-soudage-professionnel/>).
- [4] <https://www.promeca.com/contenu/21-procedes-de-soudage>).
- [5] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/brasage-bm7748/#:~:text=Le%20brasage%20est%20un%20proc%C3%A9d%C3%A9,inf%C3%A9rieure%20aux%20mat%C3%A9riaux%20de%20base.>).
- [6] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/brasage-bm7748/#:~:text=Le%20brasage%20est%20un%20proc%C3%A9d%C3%A9,inf%C3%A9rieure%20aux%20mat%C3%A9riaux%20de%20base.>).
- [7] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/quelle-est-la-difference-entre-brasage-et-soudage#:~:text=Le%20brasage%20est%20une%20op%C3%A9ration,celle%20du%20m%C3%A9tal%20de%20base.>).
- [8] Abaqus 6.7-4 Documentation..
- [9] Mohith M. (July 30, 2009). Finite-Element Project ABAQUS Tutorial..
- [10] Hamid R. K. Abdul K. M. (April 2012). Abaqus For Reinforced Concrete Structures. Faculty of Civil Engineering – UTM. <http://www.win2pdf.com>..
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014). Abaqus 6.14 example problems guide volume 1: static and dynamic analyses. Providence, RI, USA..

- [12] Benkaira S. (2017/2018). Calcul du facteur d'intensité de contrainte pour des sections fissurées circulaire et elliptique avec Abaqus. Mémoire de master. Université Saad Dahlab de Blida 1. Faculté de technologie. Département de génie mécanique..
- [13] <https://dspace.univ-sba.dz/bitstreams/d9a5478f-ebe1-4993-ba2b-23044b147168/download>.