

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی و البحث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblage soudée et matériaux.

Par : HENNI Abdesseter.

Sujet

Etude et modélisation du comportement mécanique des joints soudés en présence de fissures type à froid.

Soutenu publiquement, le 26 / 09 /2022, devant le jury composé de :

Mr CHEIKH Abd el madjid
Mr.HADJOUI Abd el hamid
Mr. BENSALD Ismail
Mr. GUEZZEN Samir

Pr
Pr
MCA
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire :2021 /2022.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect à Ma chère mère, et à mon cher père qui m'ont toujours soutenu, aidé et encouragé pendant tout ma vie et tout le long de ce travail.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu et à qui je souhaite encore plus de réussite.

Remerciement

Je tenais tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Au terme de ce travail j'aimerais bien rendre hommage à tous ceux qui de loin ou de près m'ont apporté leurs encouragements.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements envers mon encadreur Mr BENSALD ISMAIL, et mon Co-encadreur GUEZZEN Samir pour leur disponibilité, leur encadrement, leur confiance et les conseils qu'ils m'ont généreusement prodigués tout au long de notre recherche.

Je suis sensible à l'honneur que me fait Mr. CHEIKH Abdelmadjid, de présider le jury de ce travail. Ainsi, que je suis particulièrement heureux que Mr. HADJOUI Abdelhamid me fasse l'honneur de faire partie du jury de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes sentiments les plus distingués.

Résumé

L'assemblage par soudage occupe actuellement une place très importante dans les industries de construction et fabrication mécaniques. La présence des défauts tels que les fissures dans le joint de soudure peut induire inévitablement à des modifications des propriétés microstructurales et mécaniques, et par conséquent une rupture prématurée de la construction soudée.

Le travail présenté dans ce manuscrit est basé sur une simulation numérique en trois dimensions (3D) utilisant le code de calcul par éléments finis ABAQUS pour l'étude de la répartition des contraintes et déformations autour du cordon de soudure pour un acier type DC03 sous forme éprouvette normalisée, et ayant subi des fissures types à froid. Une attention particulière sera donnée à l'étude de la longueur de la fissure dans la zone soudée, son orientation, l'influence de sa position, et les propriétés matérielles du cordon sur l'effet provoqué par l'existence de la fissure.

Mots-clés: défauts de soudure, fissures, simulation, MIG/MAG, MMA, contraintes/déformation .

Abstract

Assembly by welding currently occupies a very important place in the mechanical construction and manufacturing industries. The presence of defects such as cracks in the weld joint can inevitably lead to changes in microstructural and mechanical properties, and consequently premature failure of the welded construction.

The work presented in this manuscript is based on a three-dimensional (3D) numerical simulation using the finite element code ABAQUS for the study of the distribution of stresses and strains around the weld bead for a DC03 type steel in the form standardized specimen, and having undergone typical cold cracks. Particular attention will be given to the study of the length of the crack in the welded zone, its orientation, the influence of its position, and the material properties of the bead on the effect caused by the existence of the crack.

Keywords: weld defects, cracks, simulation, MIG/MAG, MMA, stress/strain.

ملخص

يحتل التجميع باللحام حالياً مكاناً مهماً جداً في البناء الميكانيكي والصناعات التحويلية. يمكن أن يؤدي وجود عيوب مثل التشققات في مفصل اللحام حتماً إلى تغييرات في الخواص الهيكلية الدقيقة والميكانيكية ، وبالتالي فشل سابق لأوانه في البناء الملحوم.

يعتمد العمل المقدم في هذه المخطوطة على محاكاة عددية ثلاثية الأبعاد (3D) باستخدام رمز العنصر المحدود ABAQUS لدراسة توزيع الضغوط والتوترات حول حبة اللحام لفولاذ من النوع DC03 في شكل عينة قياسية ، و بعد أن خضعت لشقوق باردة نموذجية. سيتم إيلاء اهتمام خاص لدراسة طول الشق في المنطقة الملحومة ، واتجاهه ، وتأثير موضعه ، وخصائص المواد للخز على التأثير الناجم عن وجود الكراك.

الكلمات المفتاحية: عيوب اللحام ، التشققات ، المحاكاة ، MIG / MAG ، MMA ، الإجهاد / الانفعال

Liste des figure

Figure I.1 : soudage par point.	4
Figure I.2 : diamètre du point de soudure.	6
Figure I.3 : position de point de soudure.	6
Figure I.4 : soudage par point multiples.....	8
Figure I.5 : cycle de soudage	8
Figure I.6 : cycle de soudage en fonction de l’effort de compression.	8
Figure I.7 : soudage à la molette.	9
Figure I.8 : types de soudure par point.	12
Figure I.9 : soudage aluminothermique.	13
Figure I.10 : Soudage aluminothermique.	13
Figure I.11 : soudage vertical sous laitier.	14
Figure I.12 : soudage à l'arc à l'électrode enrobée.	16
Figure I.13: composition de l'électrode enrobé	17
Figure I.14 : polarité négative	19
Figure I.15 : polarité positive.	19
Figure I.16 : soudage TIG.	22
Figure I.17 : torche refroidie par liquide.	22
Figure I.18 : La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible.....	23
Figure I.19: soudage MAG fil fourré sans gaz.	25
Figure I.20 : longueur de fil libre.	26
Figure II.1 : La fissure longitudinale.	29
Figure II.2 : La fissure transversale.	29
Figure II.3 : Les types de fissure.	30
Figure II.4: Fissure de Gorge (Throat Cracks).	30
Figure II.5 : Fissure de Racine.	31
Figure II.6 : Fissure de Cratère.....	31
Figure II.7 : Fissure au raccordement.....	32
Figure II.8 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).	32
Figure II.9 : Fissure à chaud (ou de solidification).	33
Figure II.10 : Evolution d’un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement. ...	34
Figure II.11 : Fissure à froid (fissure d’hydrogène).	34
Figure II.12 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.	36
Figure II.13 : Apparence de la face de rupture d’un arrachement lamellaire.	36
Figure II.14 : Relation entre STRA et concentration en soufre.	37
Figure II.15 : Configuration du Joint la soudure à deux angles.	38
Figure II.16 : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.	38
Figure II.17 : Configuration du Joint, plus petites soudures d’angle à deux faces.	39
Figure II.18 : Configuration du Joint	39
Figure II.19 : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible	40

Figure II.20 : Beurrage in-situ.	40
Figure II.21 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).	41
Figure II.22 : Soudage en position à plat–haut degré de raffinement de la ZAT.	42
Figure II.23 : Soudage en position verticale ou horizontale.	42
Figure II.24 : Localisations possibles des manques de fusion.	43
Figure II.25 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.	43
Figure II.26 : Manque de fusion entre passes.	44
Figure II.27 : Manque de fusion à la racine de la soudure.	45
Figure II.28 : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure..	46
Figure II.29 : Localisations possibles des manques de pénétration.	46
Figure II.30 : manque de pénétration dans la soudure.	47
Figure II.31 : Apport (chaleur) arc trop faible	48
Figure II.32 : Inclusions de laitier.	48
Figure II.33 : Inclusions de tungstène.	49
Figure II.34 : Inclusions de cuivre.	49
Figure III.1 :Structure d’une analyse sous Abaqus	54
Figure III.2. Organisation d’Abaqus	55
Figure III.3 : Réalisation de la mise en données d’un problème.....	55
Figure III.4. Création de la pièce dans le module Part.	56
Figure III.5 : dessin de la pièce	56
Figure III.6 : Validation du dessin.	57
Figure III.7 : Création des partitions.	57
Figure III.8 : Propreté Matériaux.	58
Figure III.9 : Section du métal de base.	59
Figure III.10 : Section de métal d'apport.	59
Figure III.11 : Instance et assemblage.	60
Figure III.12. Configuration de l’étape Step	60
Figure III.13 : Assign seem	61
Figure III.14 :Création d'une fissure.	61
Figure III.15 : Position de fissures et direction de sa propagation.	62
Figure III.16 : Paramètres de la fissure.	62
Figure III.17 : Application des charges.	63
Figure III.18 : Création de maillage.	63
Figure III.19 : Maillage structuré	64
Figure III.20 : Lancement de calcul.	64
Figure III.21 : Visualisation de la pièce.	65
Figure III.22 : Exemple sur les types éléments dans Abaqus.....	65
Figure III.23 : Contrainte moyenne (Von Mises) d’une pièce non fissurée.	66
Figure III.24 : Contraintes axiales et de cisaillement.	67
Figure III.25 : Déplacement transversale moyen dans l’éprouvette.....	68
Figure III.26 : Distribution des contraintes selon les trois directions.	68
Figure III.27 : Contraintes axiales pour fissure de 2 mm.....	70
Figure III.28 : Contraintes et déplacement, cas fissure de 3 mm.....	72
Figures III.29 : Contraintes et déplacement, cas de fissure 4mm.....	73
Figure III.30 : Contraintes et déplacements, cas fissure orientée de 30°	75
Figure III.31 : Contraintes et déplacements, cas fissure orientée de 45°	77
Figure III.32 : contrainte et déplacement de fissure centré.	79
Figure III.33 : contrainte et déplacement de fissure côté gauche.	80
Figure III.34 : contraintes et déplacement de fissure au joint soudée de 90 MPA.	83
Figure III.35 : contraintes et déplacement de fissure au joint soudée de 120 MPA.	84

Liste des tableaux

Tableau I.1: paramètres de soudage par résistance par point7

Tableau I.2 : paramètre de soudage à la molette.11

Tableau I.3 : intensité moyenne de soudage pour la position à plat.18

Tableau I.4 : intensité moyenne de soudage pour la position à plat18

Tableau I.5 : quelques préparations de joints20

Tableau I.6 : les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc21

Tableau I.7 : gaz de protection pour soudage TIG24

Tableau III.1 : Correspondance des unités.54

Tableau III.2 : Propriétés du matériau utilisé66

Tableau III.3. Facteur d'intensité de contrainte pour les 3 tailles74

Tableau III.4 : Facteurs d'intensités de contrainte pour les trois orientations77

Tableau III.5 : Facteurs d'intensités de contrainte pour les trois positions81

Tableau III.6 : facteur d'intensité pour changement de propreté de matériel.85

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

List des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I les procédés de soudage

I.1.	Introduction	3
I.2.	Problème de soudabilité des aciers:	4
I.3.	Procédés de soudage :.....	4
3.1	Procédé 21 : Soudage par résistance par points :.....	4
3.1.1	Définition du procédé :.....	4
3.1.2	Rappel d'électricité :	5
3.1.3	Installation pour le soudage par points :	5
3.1.4	Les avantages du procédé :.....	5
3.1.5	Paramètres du procédé de soudage par points par résistance :	5
3.1.6	Soudage par points multiples :.....	8
3.1.7	Le cycle de soudage le plus fréquemment utilisé :	8
3.1.8	Le cycle de soudage avec variation de l'effort de compression :	8
3.1.9	Essais pour qualifier le soudage par points :.....	9
3.2	Procédé 22 : Soudage à la molette :.....	9
3.2.1	Définition du procédé :.....	9
3.2.2	Rappel d'électricité :	9
3.2.3	Installation pour le soudage à la molette :	10
3.2.4	Les différents types de transformateurs de soudage :	10
3.2.5	Les différents types de mise en pression des molettes :.....	10
3.2.6	Les avantages du procédé :.....	10
3.2.7	Paramètres du procédé de soudage par résistance à la molette :.....	11
3.2.8	Les différents types de soudures :.....	12
3.3	Procédé 71 : Soudage aluminothermique	12
3.3.1	Définition du procédé :.....	12
3.3.2	Les différents types de moule de coulée :	13
3.3.3	Le mode opératoire de soudage par aluminothermie :	14
3.4	Procédé 72 : Soudage vertical sous laitier :.....	14
3.4.1	Définition du procédé :.....	14
3.4.2	Principe du procédé :	15
3.4.3	Installation pour le soudage vertical sous laitier :.....	15
3.4.4	Avantages du procédé :.....	15
3.4.5	Contraintes du procédé :	15
3.4.6	Domaine d'application du procédé :.....	15
3.4.7	Paramètres de soudage :	15

3.5	Procédé 111 : Arc manuel à l'électrode enrobée :	16
3.5.1	Définition du procédé :	16
3.5.2	Principe du procédé :	16
3.5.3	Définition de l'électrode enrobée :	16
3.5.4	Classification des enrobages des électrodes enrobées :	17
3.5.5	Les électrodes enrobées utilisées sont couramment :	17
3.5.6	Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées :	17
3.5.7	La polarité de l'électrode enrobée :	19
3.5.8	Les différents types de générateurs de soudage :	19
3.5.9	Installation de soudage pour le soudage à l'arc à l'électrode enrobée :	19
3.5.10	Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée :	21
3.6	Procédé 141 : TIG ou GTAW :	21
3.6.1	Définition du procédé :	21
3.6.2	Différents types de buses de torche pour le soudage TIG :	22
3.6.3	Avantages du procédé :	23
3.6.4	Différents types d'électrodes infusibles pour le soudage TIG :	23
3.6.5	L'affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG :	23
3.6.6	Les gaz industriels de soudage en soudage TIG :	24
3.7	Procédé 114 : MAG Fil fourré sans gaz :	25
3.7.1	Définition du procédé :	25
3.7.2	Principe du procédé :	25
3.7.3	Avantages du procédé :	25
3.7.4	Type de dévidage du fil électrode :	26
3.7.5	La partie terminale ou longueur de fil libre (stick-out) :	26
3.8	L'importance de l'angle d'inclinaison de la torche :	26
Chapitre II les défauts de soudage		
1	Introduction :	28
2	Les fissures :	28
2.1	Généralités :	28
2.2	Orientation des fissures :	28
2.3	Les fissures longitudinales :	28
2.4	Les fissures transversales :	29
2.5	Types des fissures :	30
2.5.1	Fissures de Gorge (Throat Cracks):	30
2.5.2	Fissures de Racine :	31
2.5.3	Fissures de Cratère :	31
2.5.4	Fissures au raccordement :	31
2.5.5	Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :	32
2.6	Fissure à chaud (ou de solidification) :	33
2.6.1	Définition :	33
2.6.2	Causes possibles :	33
2.6.3	Méthodes de détection :	34

2.6.4	Méthode de réparation :	34
2.6.5	Mesures préventives :	34
2.7	Fissures à froid (fissures d'hydrogène) :	34
2.7.1	Définition :	34
2.7.2	Causes possibles :	35
2.7.3	Méthodes de détection :	35
2.7.4	Méthode de réparation :	35
2.7.5	Mesures préventives :	35
2.8	Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire) :	35
2.8.1	Introduction :	35
2.8.2	Identification :	36
2.8.3	Les causes :	36
2.8.4	Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement :	37
2.8.5	Détection et réparation :	41
2.9	Fissures de réchauffages (Reheat cracking) :	41
2.9.1	Définition :	41
2.9.2	Causes possibles :	41
2.9.3	Méthodes de réparation :	42
2.9.4	Mesures préventives :	42
3	Manque de fusion :	42
3.1	Localisations possibles des manques de fusion :	42
3.2	Manque de fusion dans le flanc de la soudure :	43
3.2.1	Définition :	43
3.2.2	Causes possibles :	43
3.2.3	Méthodes de détection :	43
3.2.4	Méthodes de réparation :	43
3.2.5	Mesures préventives :	44
3.3	Manque de fusion entre passes :	44
3.3.1	Définition :	44
3.3.2	Causes possibles :	44
3.3.3	Méthodes de détection :	44
3.3.4	Méthodes de réparation :	44
3.3.5	Mesures préventives :	44
3.4	Manque de fusion à la racine de la soudure :	45
3.4.1	Définition :	45
3.4.2	Causes possibles :	45
3.4.3	Méthodes de détection :	45
3.4.4	Méthodes de réparation :	45
3.4.5	Mesures préventives :	45
4	Manque de pénétration :	46
4.1	Localisations possibles des manques de pénétration :	46
4.2	Manque de pénétration à la racine :	46

4.2.1	Définition :	46
4.2.2	Causes possibles :	46
4.2.3	Méthodes de détection :	47
4.2.4	Méthodes de réparation :	47
4.2.5	Mesures préventives :	47
4.3	Manque de pénétration dans la soudure :	47
4.3.1	Causes possibles :	47
4.3.2	Méthodes de détection :	47
4.3.3	Méthodes de réparation :	47
4.3.4	Mesures préventives :	47
5	Inclusion solides :	48
5.1	Différents types d'inclusions solides :	48
5.2	Inclusions de laitier :	48
5.2.1	Définition :	48
5.2.2	Causes possibles :	48
5.2.3	Méthodes de détection :	48
5.2.4	Méthodes de réparation :	48
5.2.5	Mesures préventives :	48
5.3	Inclusions de tungstène :	49
5.3.1	Définition :	49
5.3.2	Causes possibles :	49
5.3.3	Méthodes de détection :	49
5.3.4	Méthodes de réparation :	49
5.3.5	Mesures préventives :	49
5.4	Inclusions de cuivre.....	49
5.4.1	Définition :	49
5.4.2	Causes possibles :	50
5.4.3	Méthodes de détection :	50
5.4.4	Méthodes de réparation :	50
5.4.5	Mesures préventives :	50
6	Conclusion partielle :	50
chapitre III modélisation numérique		
1.	Introduction	52
2.	Conception Assistée par Ordinateur (CAO)	52
3.	Les avantages de la CAO.....	52
4.	Les inconvénients de la CAO	53
5.	Les Outils de CAO	53
6.	Définition du logiciel ABAQUS :	53
7.	Généralité sur le code de calcul ABAQUS	53
8.	Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS	54
9.	Organisation de l'interface Abaqus CAE	55
10.	Les modules :	55

11.	Les éléments dans ABAQUS.....	65
12.	Problématique :.....	66
13.	Modélisation de pièce.....	66
14.	Résultats de Simulation :.....	66
1.	Analyse statique	66
2.	Etude paramétrique	69
1.	Influence de la taille de fissure	69
2.	Influence de l'orientation de fissure :.....	74
3.	Position de fissure :.....	78
4.	Changement de la propriété de matériel :.....	81
15.	Conclusion.....	85

Conclusion générale

Références bibliographique

Introduction générale

Introduction générale

L'assemblage par soudage est l'un des procédés les plus utilisés actuellement dans le monde de l'industrie. Son développement est passé par plusieurs étapes jusqu'aux nouveaux procédés qui sont le MIG, MAG, soudage par faisceau laser...etc.

Les pièces assemblées durant leurs services de travail dans divers milieux industriels sont soumises à des sollicitations tel que la traction, le cisaillement ...etc.

Les caractéristiques mécaniques des structures soudées peuvent subir des changements ou une dégradation dans leurs performances lors de présences des défauts de géométrie ou matérielle.

L'un des défauts les plus répandus et les plus graves dans les assemblages soudés c'est les fissures, qui sont produites lorsque les contraintes internes de soudage dépassent la résistance mécanique du métal d'apport, du métal de base ou bien des deux. L'un des principaux objectifs de toute fabrication soudée est de prévenir l'apparition des défauts de soudure, en particulier les fissures.

Le but de notre travail est une étude sur l'influence de présence des défauts, types fissures dans le cordon de soudure sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées à partir des simulations numériques à l'aide de code de calcul ABAQUS.

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

- Dans premier chapitre, nous allons aborder des généralités sur les procédés de soudages les plus utilisés récemment dans le domaine industriel.
- Le deuxième chapitre, une présentation des différents types de joints de soudure.
- Le troisième chapitre décrit les étapes de la simulation numérique à l'aide du code de calcul ABAQUS en conjonction avec les résultats obtenus de la simulation numérique afin de comprendre globalement la tenue et performance mécanique des assemblages soumis à défauts de types fissures.

Nous avons clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :
Les procédés de soudage

I.1. Introduction

Dans la famille des aciers non alliés et faiblement alliés (teneur de chacun des éléments d'alliage inférieure à 5 %) ne se trouvent que des aciers ferritiques. Ceci signifie une certaine disposition des atomes de fer de la structure cristalline : suivant les sommets et le centre d'un cube (structure cubique centrée).

Les aciers possédant cette structure présentent les caractères généraux suivants :

- Sensibilité à la trempe,
- Susceptibles de fragilité en dessous d'une certaine température,
- Magnétiques.

Dans la famille des aciers fortement alliés (teneur d'au moins un des éléments d'alliage supérieure à 5 %) se trouvent également quelques nuances d'acier de type ferritique ayant les mêmes caractères généraux que les aciers de la première famille à l'exception de l'acier à 17 % de chrome et de certains aciers à 13 % de chrome, et surtout des aciers de type austénitique.

Pour ces derniers, les atomes de la structure sont disposés suivant les sommets et les centres des faces d'un cube (structure cubique à faces centrées).

Cette structure donne aux aciers austénitiques les caractères généraux suivants :

- Aucune sensibilité à la trempe,
- Grande ductilité, pas de fragilité,
- Non magnétiques.

Ces caractères généraux ne sont obtenus que dans le cas de structures saines, purement austénitiques et sont plus ou moins affectés, selon les nuances, par la présence d'un certain pourcentage de ferrite ou d'autres constituants de leur structure susceptibles de se produire par l'application de sollicitations thermiques ou mécaniques en cours de fabrication ou en service.

La division de l'ensemble des aciers en deux familles définies ci-dessus ne correspond donc pas à une séparation en deux groupes ayant chacun leurs problèmes de soudabilité distincts. Les problèmes de trempe sous cordon ou de fragilité des aciers de la première famille peuvent être rencontrés pour certains aciers (ferritiques) de la seconde famille (fortement alliés).

Par contre, les problèmes de soudabilité des aciers austénitiques sont particuliers à certaines nuances de la seconde famille. [1]

I.2. Problème de soudabilité des aciers

« On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement ».

Cette définition établie par l'Institut International de la Soudure (IIS) contient l'énoncé de tous les critères de jugement de l'aptitude d'un matériau à être assemblé par soudage.

Elle rend compte de la complexité de cette propriété qu'est la soudabilité qui est examinée habituellement sous trois aspects différents :

- Soudabilité opératoire,
- Soudabilité locale,
- Soudabilité globale. [1]

I.3. Procédés de soudage

3.1 Procédé 21 : Soudage par résistance par points

3.1.1 Définition du procédé

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes. (figure I.1)

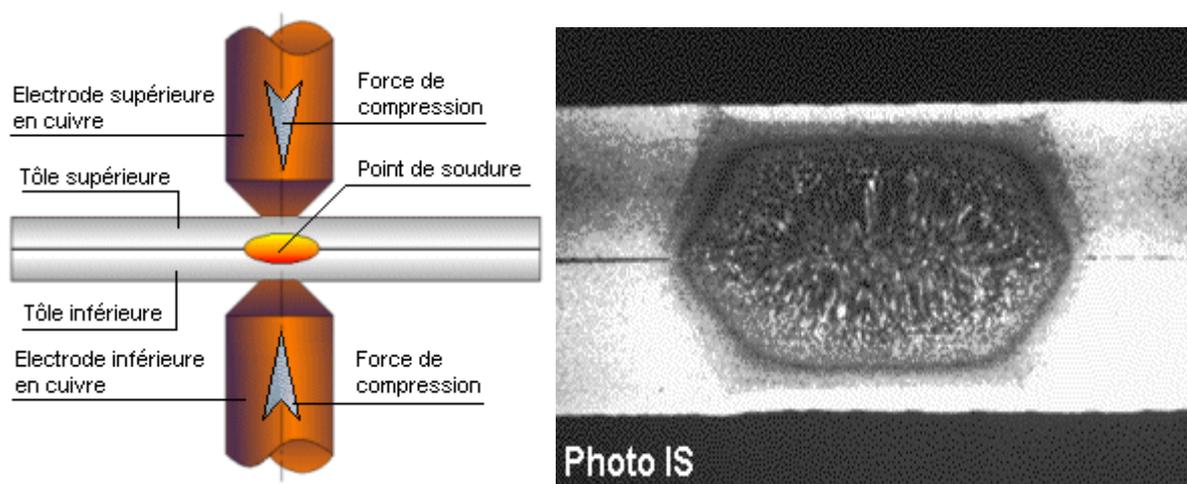


Figure I.1 : soudage par point. [1]

3.1.2 Rappel d'électricité

Loi de Joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps

$$W \text{ (en joules)} = R \text{ (Ohm)} \times I^2 \text{ (Ampères)} \times t \text{ (secondes)}$$

Résistance : La résistance d'un conducteur, à température ambiante, est :

- proportionnelle à sa longueur
- inversement proportionnelle à sa section
- fonction du matériau constitutif de l'âme du conducteur

$$R \text{ (Ohm)} = \rho \text{ (micro-Ohm)} \times (L \text{ (cm)} / S \text{ (cm}^2))$$

3.1.3 Installation pour le soudage par points:

- Un transformateur de courant de soudage
- Un dispositif de mise en pression des électrodes
- Un dispositif de commande du cycle de soudage

a) Les différents types de transformateurs de soudage :

- Les transformateurs monophasés
- Les transformateurs triphasés avec changement de fréquence
- Les transformateurs triphasés avec redresseurs
- Les transformateurs électrostatiques (décharge de condensateurs)

b) Les différents types de mise en pression des électrodes :

- La commande manuelle
- La commande pneumatique
- La commande hydraulique (eau ou huile)
- La commande mécanique

3.1.4 Les avantages du procédé :

- Rapidité d'exécution
- Limitation des déformations
- Absence de préparation des bords à souder
- Possibilité d'automatisation

3.1.5 Paramètres du procédé de soudage par points par résistance

A. Diamètre du point de soudure :

Le diamètre du point de soudure est fonction des paramètres suivants : (figure I.2)

- De l'intensité du courant
- Du temps de passage du courant

- De la section de contact des électrodes
- De l'effort appliqué aux électrodes.

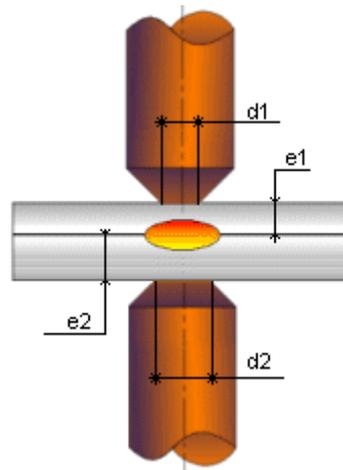


Figure I.2 : diamètre du point de soudure. [1]

B. Diamètre de la pointe de l'électrode en cuivre

Le diamètre de contact de l'électrode doit être d'environ **2 fois l'épaisseur de la pièce à souder + 3 mm**. Lorsque l'assemblage est réalisé sur des pièces d'épaisseurs différentes et de nuance identique, l'électrode la plus petite est placée sur la pièce d'épaisseur la plus mince. Lorsque l'assemblage est réalisé sur des pièces d'épaisseur égale et de nuances différentes, l'électrode la plus petite est placée sur la pièce dont la résistivité est la plus faible.

C. Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce

La distance entre la rive de la pièce et le point de soudure doit être d'environ 2 fois l'épaisseur minimale + 4 mm pour éviter un éclatement du point de soudure sous l'effet de la pression hydrostatique du noyau en fusion. (Figure I.3)

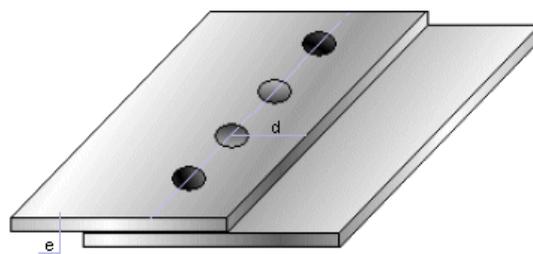


Figure I.3 : position de point de soudure. [1]

D. Distance minimale entre deux points de soudure

La distance entre deux points doit être d'environ 3 fois le diamètre du point de soudure pour éviter un shuntage du courant de soudage. Si la distance entre points est inférieure à $3 \times \varnothing$ du point, il est nécessaire d'augmenter l'intensité pour compenser cet effet de shuntage.

Tableau I : paramètres de soudage par résistance par point

PARAMÈTRES DE SOUDAGE RÉSISTANCE PAR POINTS				
ACIERS NON ALLIÉS (Documentation SCIAKY)				
Epaisseur	Ø pointe	Intensité	Temps	Pression
0,5 mm	4 mm	2 000 A	0,2 s	60 daN
0,5 mm	4 mm	4 000 A	0,04 s	150 daN
1,0 mm	5 mm	3 000 A	0,4 s	100 daN
1,0 mm	5 mm	8 000 A	0,1 s	250 daN
2,0 mm	7 mm	5 000 A	1,0 s	200 daN
2,0 mm	7 mm	14 000 A	0,3 s	500 daN
3,0 mm	9 mm	8 000 A	2,0 s	300 daN
3,0 mm	9 mm	19 000 A	0,6 s	800 daN
4,0 mm	11 mm	10 000 A	3,2 s	380 daN
4,0 mm	11 mm	24 000 A	0,9 s	1 250 daN
5,0 mm	13 mm	12 000 A	4,5 s	450 daN
5,0 mm	13 mm	28 000 A	1,4 s	1 700 daN
PARAMÈTRES DE SOUDAGE RÉSISTANCE PAR POINTS				
ACIERS INOXYDABLES (Documentation SCIAKY)				
Epaisseur	Ø pointe	Intensité	Temps	Pression
0,5 mm	4,0 mm	3 750 A	0,04 s	175 daN
0,8 mm	4,5 mm	6 000 A	0,10 s	300 daN
1,0 mm	5,0 mm	7 600 A	0,14 s	400 daN
1,5 mm	6,0 mm	11 000 A	0,20 s	650 daN
2,0 mm	7,0 mm	14 000 A	0,24 s	900 daN
2,5 mm	7,5 mm	16 000 A	0,28 s	1 200 daN
3,0 mm	8,5 mm	18 000 A	0,32 s	1 500 daN

3.1.6 Soudage par points multiples

L'exécution simultanée de plusieurs points sans déplacement des pièces permet d'améliorer la productivité surtout lorsque le nombre de points à réaliser est important. Le courant parcourt successivement chaque couple d'électrodes. (Figure I.4)

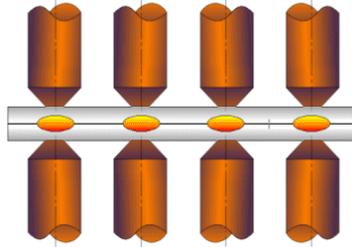


Figure I.4 : soudage par point multiples. [1]

3.1.7 Le cycle de soudage le plus fréquemment utilisé

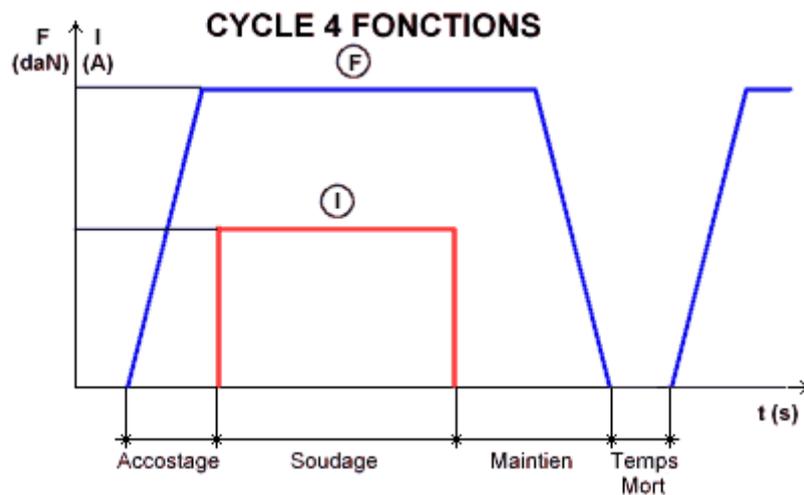


Figure I.5 : cycle de soudage [1]

3.1.8 Le cycle de soudage avec variation de l'effort de compression

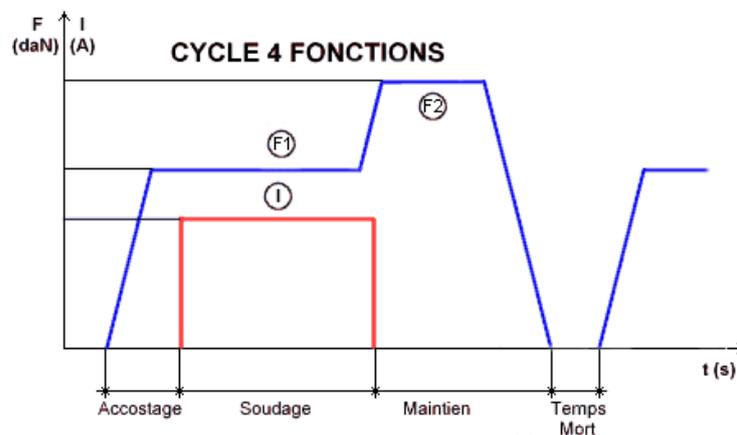


Figure I.6 : cycle de soudage en fonction de l'effort de compression. [1]

3.1.9 Essais pour qualifier le soudage par points

Pour vérifier la qualité du soudage d'un point de soudure par résistance, plusieurs essais sont réalisés

- L'essai de cisaillement
- L'essai d'arrachement ou de déboutonnage
- L'essai d'endurance ou de fatigue. [2]

3.2 Procédé 22 : Soudage à la molette

3.2.1 Définition du procédé

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux molettes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / molettes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux molettes. Le soudage à la molette permet d'obtenir une soudure continue et étanche lorsque le passage de courant est continu. (Figure I.7)

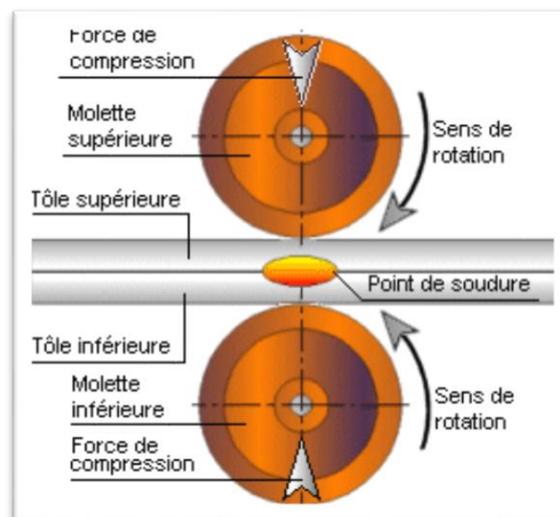


Figure I.7 : soudage à la molette. [2]

3.2.2 Rappel d'électricité

Loi de Joule: Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W \text{ (en joules)} = R \text{ (Ohm)} \times I^2 \text{ (Ampères)} \times t \text{ (secondes)}$$

Résistance : La résistance d'un conducteur, à température ambiante, est :

- proportionnelle à sa longueur
- inversement proportionnelle à sa section
- fonction du matériau constitutif de l'âme du conducteur

$$R \text{ (Ohm)} = p \text{ (micro-Ohm)} \times (L \text{ (cm)} / S \text{ (cm}^2))$$

3.2.3 Installation pour le soudage à la molette :

Les installations de soudage à la molette sont constituées :

- ❖ Soit par des machines statiques à molettes longitudinales ou transversales
- ❖ Soit par des machines portatives
 - Un transformateur de courant de soudage
 - Un dispositif de mise en pression des molettes
 - Un dispositif de commande du cycle de soudage.

3.2.4 Les différents types de transformateurs de soudage :

- Les transformateurs monophasés
- Les transformateurs triphasés avec changement de fréquence
- Les transformateurs triphasés avec redresseurs
- Les transformateurs électrostatiques (décharge de condensateurs)

3.2.5 Les différents types de mise en pression des molettes :

- La commande pneumatique
- La commande hydraulique (eau ou huile)
- La commande mécanique

3.2.6 Les avantages du procédé :

- Rapidité d'exécution
- Limitation des déformations
- Absence de préparation des bords à souder
- Possibilité de réaliser des soudures continues et étanches
- Possibilité d'automatisation. [3]

3.2.7 Paramètres du procédé de soudage par résistance à la molette

Tableau I.2 : paramètre de soudage à la molette.

PARAMÈTRES DE SOUDAGE A LA MOLETTE				
ACIERS NON ALLIES (Documentation SCI AKY)				
Epaisseur	Vitesse	Intensité	Temps Travail / Repos	Pression
0,5 mm	2,3 m/min	10 600 A	0,04 s / 0,04 s	250 daN
0,8 mm	2,1 m/min	13 000 A	0,04 s / 0,04 s	350 daN
1,0 mm	1,9 m/min	15 000 A	0,04 s / 0,04 s	400 daN
1,5 mm	1,9 m/min	17 500 A	0,06 s / 0,06 s	525 daN
2,0 mm	1,5 m/min	21 000 A	0,08 s / 0,08 s	675 daN
2,5 mm	1,3 m/min	26 000 A	0,10 s / 0,10 s	800 daN
3,0 mm	1,1 m/min	30 000 A	0,15 s / 0,15 s	950 daN
PARAMÈTRES DE SOUDAGE A LA MOLETTE				
ACIERS INOXYDABLES (Documentation SCI AKY)				
Epaisseur	Vitesse	Intensité	Temps Travail / Repos	Pression
0,5 mm	1,4 m/min	8 250 A	0,02 s / 0,04 s	330 daN
0,8 mm	1,3 m/min	12 000 A	0,04 s / 0,06 s	400 daN
1,0 mm	1,3 m/min	12 800 A	0,06 s / 0,08 s	580 daN
1,5 mm	1,1 m/min	15 100 A	0,06 s / 0,08 s	810 daN
2,0 mm	1,0 m/min	16 500 A	0,08 s / 0,10 s	1 000 daN
PARAMÈTRES DE SOUDAGE A LA MOLETTE				
ALLIAGES D'ALUMINIUM (Documentation SCI AKY)				
Epaisseur	Vitesse	Intensité	Temps Travail / Repos	Pression
0,5 mm	1,25 m/min	23 600 A	0,02 s / 0,02 s	260 daN
0,8 mm	1,00 m/min	28 600 A	0,02 s / 0,06 s	330 daN
1,0 mm	0,90 m/min	32 000 A	0,04 s / 0,06 s	380 daN
1,5 mm	0,75 m/min	36 000 A	0,04 s / 0,08 s	430 daN
2,0 mm	0,60 m/min	42 000 A	0,06 s / 0,10 s	480 daN

3.2.8 Les différents types de soudures

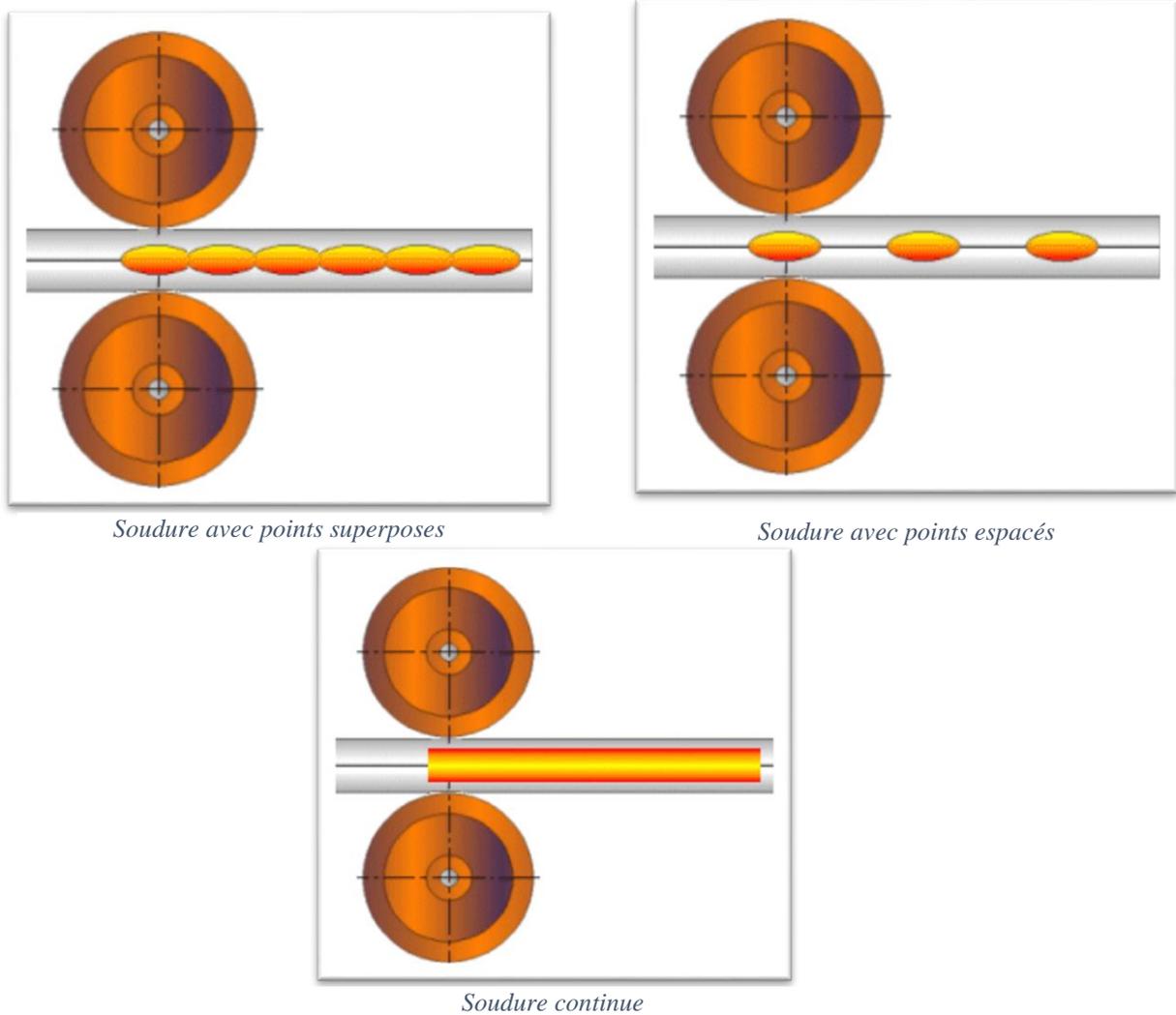


Figure I.8 : types de soudure par point. [3]

3.3 Procédé 71 : Soudage aluminothermique

3.3.1 Définition du procédé

Le soudage aluminothermique est un procédé de soudage par coulée de métal en fusion (Figure I.9). La chaleur nécessaire à la fusion est obtenue par la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium suivant la réaction chimique suivante :



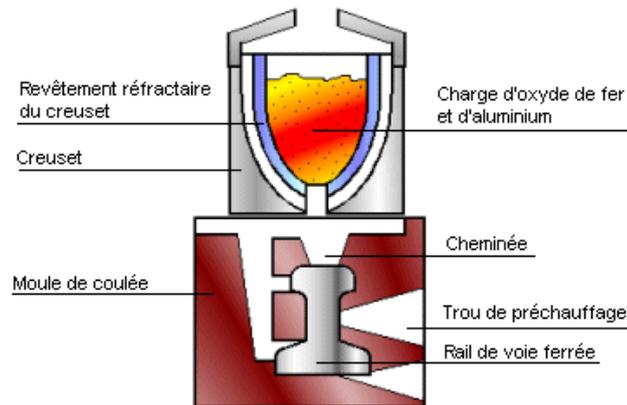


Figure I.9 : soudage aluminothermique. [3]

La réaction chimique se produit lorsque le mélange est porté à une température de 1300° Celsius. La durée de la réaction dure entre 30 et 90 secondes (figure I.10). La fusion est réalisée dans un creuset à partir d'une charge d'oxyde ferrique et d'une fine poudre d'aluminium. Des éléments d'addition peuvent être incorporer à la charge pour améliorer la qualité métallurgique du joint soudé. Le métal en fusion est déversé dans un moule de coulée. L'acier liquide fait fondre les bouts de rail et après refroidissement forme une soudure homogène.

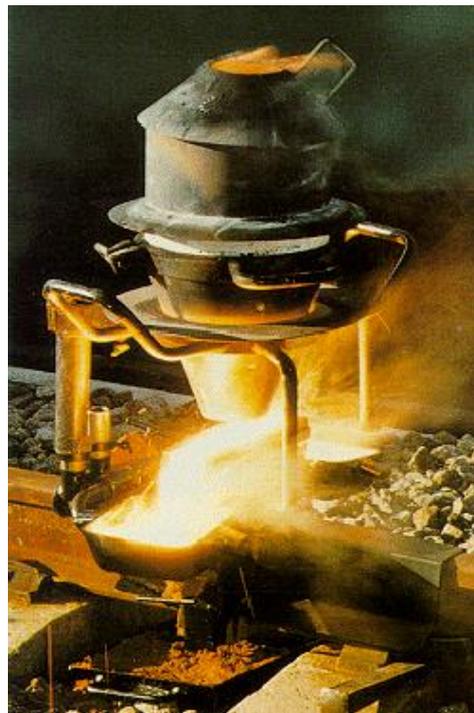


Figure I.10 : Soudage aluminothermique. [3]

3.3.2 Les différents types de moule de coulée :

- Les moules en sable (Silice + argile)
- Les moules préfabriqués (Oxyde de fer + sable + silicate)

3.3.3 Le mode opératoire de soudage par aluminothermie :

- 1) Alignement des abouts de rails
- 2) Préchauffage des rails avec une flamme oxy-propane
- 3) Mise en place des moules de coulée
- 4) Mise en place de la pâte de scellement des moules
- 5) Mise en place du creuset avec la charge
- 6) Allumage de la réaction
- 7) Coulée du métal en fusion dans les moules
- 8) Extraction des moules
- 9) Meulage de la soudure
- 10) Profilage du rail.

3.4 Procédé 72 : Soudage vertical sous laitier

3.4.1 Définition du procédé

Le soudage vertical sous laitier (Electroslag Welding - ESW) est comparable au soudage automatique sous flux solide. Un arc électrique est créé entre le fil électrode et la pièce pour démarrer la fusion. Un dépôt continu de flux électro conducteur recouvre le bain de fusion ainsi formé. Ensuite la fusion est entretenue par effet joule, constitué par la très haute résistance électrique du laitier et de la forte intensité appliquée. Le bain de fusion est soutenu et moulé par des flasques latéraux en cuivre placés de part et d'autre du joint soudé et refroidis par une circulation de réfrigérant. (Figure I.11)

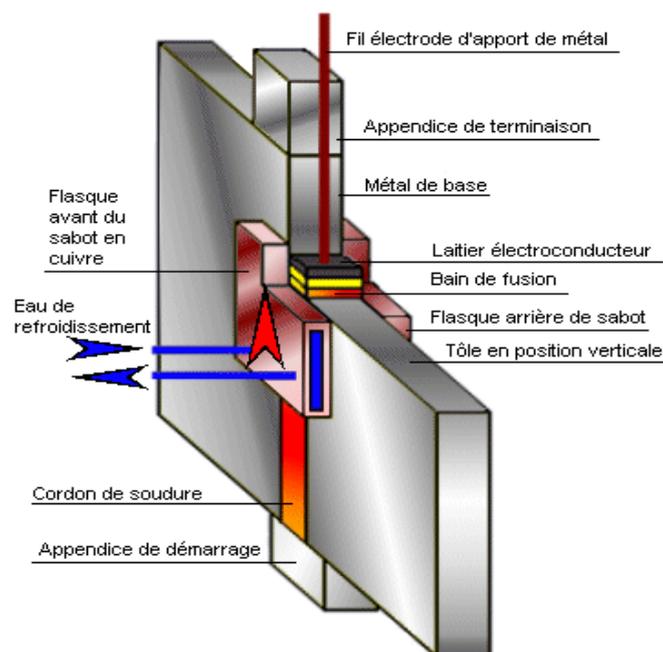


Figure I.11 : soudage vertical sous laitier. [4]

3.4.2 Principe du procédé

La soudure est réalisée en une seule passe sur des joints à bords droits de 50 à 600 mm d'épaisseur dans une position verticale montante. Le nombre de fil électrode peut être égal à 3. Un balancement des fils électrodes est réalisé pour augmenter la largeur soudée dans les joints de fortes épaisseurs. Le taux de dilution est élevé (de l'ordre de 50%). Le maintien à haute température et le cycle thermique relativement long donnent une structure cristalline grossière et des propriétés de résiliences faibles. Des traitements thermiques de normalisation sont nécessaires pour affiner la structure métallurgique grossière du joint soudé et améliorer les caractéristiques mécaniques.

3.4.3 Installation pour le soudage vertical sous laitier :

- 1) Un générateur de courant continu ou alternatif à caractéristique horizontale.
- 2) Un dispositif de déplacement des flasques du moule et du fil
- 3) Une trémie d'alimentation en flux électro conducteur
- 4) Un dispositif d'alimentation et d'oscillation du ou des fils électrodes.
- 5) Un sabot mobile en cuivre avec système réfrigérant.

3.4.4 Avantages du procédé :

- Procédé de soudage entièrement automatique
- Soudage de pièces très épaisses (jusqu'à 600 mm)
- Pas de préparation de joint
- Peu de déformation angulaire

3.4.5 Contraintes du procédé :

- Caractéristiques mécaniques moyennes
- Soudage en position verticale

3.4.6 Domaine d'application du procédé :

- Soudage des aciers non alliés et faiblement alliés (aucun risque de trempe)

3.4.7 Paramètres de soudage

3.4.7.1 Intensité du courant

L'intensité du courant est comprise entre 400 A et 800 A pour un fil électrode de Ø 3,2 mm.

3.4.7.2 Tension du courant

La tension est comprise entre 25 et 50 Volts. [4]

3.5 Procédé 111 : Arc manuel à l'électrode enrobée

3.5.1 Définition du procédé

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder (figure I.12). L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur.

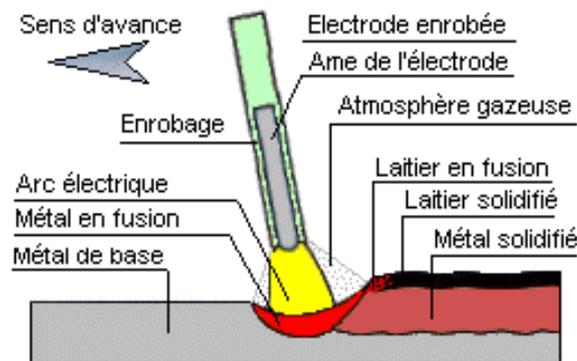


Figure I.12 : soudage à l'arc à l'électrode enrobée. [5]

Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur (U_0) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts.

3.5.2 Principe du procédé

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisée en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.

3.5.3 Définition de l'électrode enrobée

L'électrode est constituée de deux parties distinctes (Figure I.13) :

L'âme : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.

L'enrobage : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.



Figure I.13: composition de l'électrode enrobée [5]

L'enrobage a un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe.

Le diamètre de l'électrode enrobée varie de $\varnothing 1,6$ à $\varnothing 8$ mm. La longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm. Certaines électrodes peuvent atteindre 1 mètre pour des applications spécifiques (soudage automatique). [5]

3.5.4 Classification des enrobages des électrodes enrobées :

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

3.5.5 Les électrodes enrobées utilisées sont couramment :

- ❖ Rutiles pour les travaux courants.
- ❖ Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression)
- ❖ Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position descendante

3.5.6 Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées :

- ❖ Lorsque l'intensité est trop faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder, la fusion est molle et la pénétration est faible, l'amorçage est difficile, une instabilité de l'arc et une mauvaise compacité du métal déposé (présence de défaut type soufflure et inclusion de laitier)
- ❖ Lorsque l'intensité est trop forte, vous constatez des projections importantes au bord du joint, des écoulements de métal lors du soudage en position.

Tableau I.3 : intensité moyenne de soudage pour la position à plat.

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat				
Ø électrode	Enrobage mince	Enrobage semi-épais	Enrobage épais	Enrobage R% 110 / 130
Ø 1,6 mm	25 A	30 A	35 A	
Ø 2,0 mm	40 A	50 A	55 A	
Ø 2,5 mm	60 A	70 A	75 A	80 A
Ø 3,2 mm	90 A	100 A	110 A	115 A
Ø 4,0 mm	130 A	150 A	160 A	170 A
Ø 5,0 mm	170 A	190 A	200 A	220 A

Le réglage de l'intensité appliquée à l'électrode dépend :

- ❖ Du diamètre de l'électrode (voir tableau ci-dessus)
- ❖ De la nature de l'âme de l'électrode
- ❖ De la nuance des pièces à assembler
- ❖ De la position de soudage
- ❖ Du type d'assemblage rencontré
- ❖ De l'épaisseur des pièces à souder. [6]

Tableau I.4 : intensité moyenne de soudage pour la position à plat

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat						
Epaisseur	Ø 1,6 mm	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
3 mm		60 A	70 A	90 A		
4 mm			80 A	100 A	120 A	
5 mm			90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm			90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm			90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm				130 A	160 A	190 A
12 mm				130 A	170 A	190 A
15 mm				130 A	170 A	200 A
20 mm					190 A	220 A

3.5.7 La polarité de l'électrode enrobée

Les passes de pénétration (non reprises à l'envers) réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité négative à l'électrode. (Figure I.14 ; I.15)

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (-)
- La fiche du câble de la pince de masse est raccordée à la borne (+)

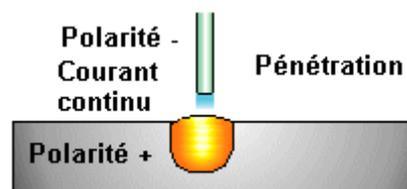


Figure I.14 : polarité négative [5]

Les passes de remplissage et de finition réalisées à l'électrode enrobée avec un générateur à courant continu sont généralement effectuées avec la polarité positive à l'électrode.

- La fiche du câble de la pince porte-électrode est raccordée à la borne (+)
- La fiche du câble de la pince de masse est raccordée à la borne (-)

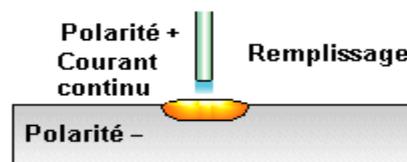


Figure I.15 : polarité positive. [5]

3.5.8 Les différents types de générateurs de soudage

Les différents types de postes de soudage ou générateurs sont :

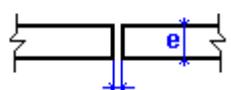
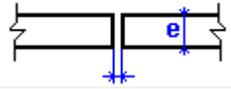
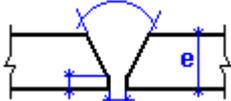
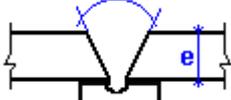
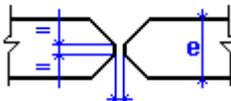
- ❖ Les transformateurs statiques monophasés qui fournissent du courant alternatif à 50 hertz. Ces postes sont les plus économiques du marché et les plus simples.
- ❖ Les transformateurs statiques monophasés ou triphasés à redresseur (pont de diodes, thyristors ou transistors) qui fournissent du courant continu. Les bornes électriques de sortie sont repérées par les signes conventionnels (+) et (-).
- ❖ Les groupes rotatifs à changeur de fréquence. Ils se composent d'un moteur entraînant une génératrice à courant alternatif de 150 à 450 Hertz.
- ❖ Les transformateurs rotatifs à redresseur qui fournissent un courant continu redressé.

3.5.9 Installation de soudage pour le soudage à l'arc à l'électrode enrobée :

- 1) Un générateur de courant (poste de soudage)
- 2) Une pince porte-électrode avec câble conducteur
- 3) Une pince de masse avec câble conducteur

- 4) Une étuve portative pour les électrodes basiques
- 5) Un masque avec verres teintés spéciaux
- 6) Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple
- 7) Un marteau à piquer et une brosse métallique
- 8) Une meuleuse d'angle électrique
- 9) Des écrans ou rideaux de protection
- 10) Une ventilation dans les endroits confinés.

Tableau I.5 : quelques préparations de joints

Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø électrode	Préparation
De 1,0 à 2,5 mm	30 à 60 ampères	Ø 1,6 mm	
De 2,0 à 4,0 mm	50 à 90 ampères	Ø 2,0 à 3,2 mm	
De 4,0 à 20 mm	60 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 4,0 à 20 mm	70 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 8,0 à 30 mm	80 à 200 ampères	Ø 3,2 à 5,0 mm	

3.5.10 Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée

Tableau I.6 : les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc

DÉFAUTS RENCONTRES	ORIGINES PROBABLES	SOLUTION A ADOPTER
Morsures et caniveaux le long du cordon de soudure	Mauvais balancement de l'électrode Intensité de soudage trop élevée Vitesse de soudage trop rapide Tôles insuffisamment blanchies	Insister sur les bords du chanfrein lors du soudage. Vérifier les paramètres de soudage. Nettoyer correctement les rives.
Cordon trop bombé ou cordon trop creux	Vitesse de soudage inadaptée et intensité mal réglée.	Vérifier vos valeurs de soudage et faites varier les deux paramètres lors du soudage.
Manque de pénétration	Diamètre de l'électrode trop grosse en première passe. Préparation des chanfreins inadaptée. Jeu d'écartement entre les deux pièces trop faible ou non constant. Entraînement du soudeur insuffisant.	
Soufflures dans la soudure	Causes multiples : Pièces humides ou sales. Électrodes non étuvées donc humides. Arc trop long lors du soudage. Intensité trop faible.	Sécher et dégraisser les pièces à assembler. Étuver les électrodes basiques dans un four à 300° C pendant au moins 1 heure. Étuver les électrodes rutiles dans un four à 100° C pendant au moins 1 heure. Réduire la distance électrode/pièce lors du soudage.
Projections sur les bords des pièces	Intensité trop forte. Mauvais raccordement de la masse. Électrodes non étuvées	Adapter l'intensité du courant au diamètre de l'électrode. Étuver les électrodes basiques dans un four à 300° C pendant au moins 1 heure. Étuver les électrodes rutiles dans un four à 100° C pendant au moins 1 heure.
Rougisement important de l'électrode	Intensité trop élevée. Arc trop long lors du soudage.	Adapter l'intensité du courant au diamètre de l'électrode. Réduire la distance électrode/pièce lors du soudage.

3.6 Procédé 141 : TIG ou GTAW

3.6.1 Définition du procédé

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) est un procédé à l'arc sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène)(figure I.16). Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène (de Ø 1,0 mm à Ø 8,0 mm) et la pièce à souder. [7]

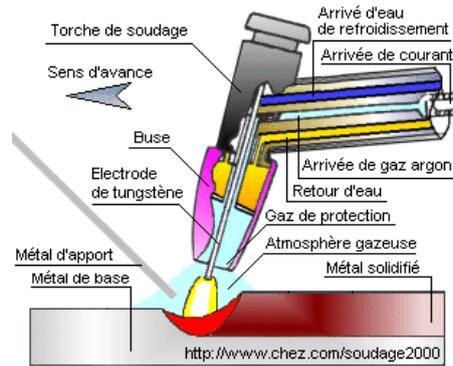


Figure I.16 : soudage TIG. [7]

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de $\varnothing 0,8$ mm à $\varnothing 4,0$ mm) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de $\varnothing 0,8$ mm à $\varnothing 2,0$ mm) dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertage de gaz (de 5 à 25 litres/minute) de protection (Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H₂ pour les procédés automatiques). Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 5 à 300 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La polarité de l'électrode est toujours négative en courant continu (polarité directe).[7]

3.6.2 Différents types de buses de torche pour le soudage TIG :

- Céramique (couleur rose foncé et brun clair)
- Alumine (couleur rose)
- Corindon (couleur blanche).

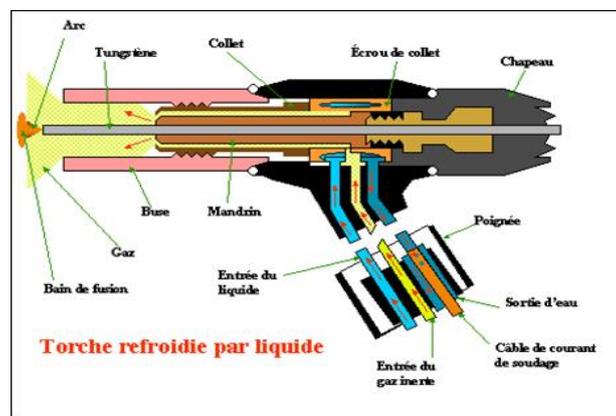


Figure I.17 : torche refroidie par liquide. [7]

3.6.3 Avantages du procédé :

- Simple d'emploi
- Travail fin et précis
- Large gamme d'épaisseur
- Très bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- Soudage dans toutes les positions
- Aspect de cordon très correct
- Procédé automatisable

3.6.4 Différents types d'électrodes infusibles pour le soudage TIG :

- Tungstène pur.
- Tungstène thorié
- Tungstène cérié
- Tungstène zirconié

Lors du soudage, l'électrode de tungstène doit continuellement être protégée par un courant d'argon jusqu'à son refroidissement complet afin d'éviter sa détérioration. [8]

3.6.5 L'affûtage de l'électrode infusible pour le soudage TIG

La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible est une variable importante. L'affûtage est exécuté à l'aide d'une meuleuse à grain fin avec récupération des poussières. L'affûtage de l'électrode est réalisé par un cône avec un angle compris entre 30 et 60 degrés. Les stries d'usinage ou de meulage doivent être dans le sens longitudinal de l'électrode. La pointe d'extrémité du cône doit être adoucie pour supporter les densités de courant (figure I.18).

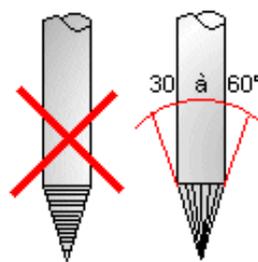
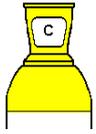


Figure I.18 : La préparation géométrique de la pointe de l'électrode infusible [8]

3.6.6 Les gaz industriels de soudage en soudage TIG

Tableau I.7 : gaz de protection pour soudage TIG

GAZ DE PROTECTION ENDROIT POUR LE SOUDAGE TIG			
Composition	Ancienne couleur d'ogive	Nouvelle couleur d'ogive	Description
GAZ PUR			
<u>ARGON</u>			Utilisable dans la grande majorité des applications de soudage TIG.
MÉLANGES BINAIRES			
<u>ARGON + 20 % HELIUM</u>			Élévation de la température de l'arc. Vitesse de soudage plus importante. Polyvalence / Performance. Coût important
<u>ARGON + 1 à 3 % AZOTE</u>			Utilisable sur les aciers duplex (austéno-ferritique).
<u>ARGON + 2 à 5% HYDROGÈNE</u>			Utilisable en TIG automatique avec les inox austénitiques - Bain de fusion plus chaud - Meilleur mouillage - Vitesse d'avance plus élevée - Pénétration améliorée. A interdire sur les aciers inoxydables martensitiques et les matériaux sensibles à l'oxydation à chaud (titane, zirconium, tantale).

Note important

L'utilisation d'un gaz de protection inerte à l'envers du bain de fusion est obligatoire et techniquement impérative sur les matériaux comme les aciers inoxydables, les bases nickel, le titane, le zirconium. (Rochage sur les inoxydables et pollution par les gaz H, O et N pour les matériaux très réactifs à l'air) . Les gaz utilisés en soudage ne sont pas toxiques. Toutefois à concentration élevée, ils n'entretiennent pas la vie. Ne travaillez jamais dans un local fermé ou une enceinte confinée non ventilée. [8].

3.7 Procédé 114 : MAG Fil fourré sans gaz

3.7.1 Définition du procédé

Le soudage à l'arc avec fil électrode fusible sans protection de gaz (appelé aussi **Innershield**) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil fourré d'apport (de \varnothing 1,0 mm à \varnothing 3,2 mm) à dévidage continu et à vitesse constante (de 1 à 15 mètres/minutes environ) et la pièce à souder.

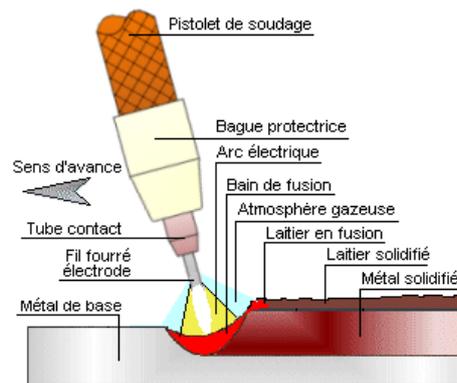


Figure I.19: soudage MAG fil fourré sans gaz. [8]

La vitesse de dévidage du fil détermine l'intensité de soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil fourré pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure avec un laitier protecteur, peu abondant en surface (suivant le type de fil fourré utilisé). Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. Une protection gazeuse se forme par la fusion des flux et métaux en poudre constitutifs du fourrage (figure I.19). Un générateur électrique fournit le courant exclusivement continu avec une intensité variant de 40 à 700 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil électrode, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La polarité à l'électrode est fonction du type de fourrage du fil fourré utilisé. [9]

3.7.2 Principe du procédé

La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la torche, dans la gaine guide-fil de la torche de soudage jusqu'au tube contact. La torche de soudage est reliée sur une des bornes électriques de sortie du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder.

3.7.3 Avantages du procédé :

- ❖ Travaux effectués en extérieur (courant d'air et vent)

- ❖ Forte productivité par rapport à l'ARC E.E. et le TIG
- ❖ Grande vitesse de soudage
- ❖ Taux de dépôt de métal élevé
- ❖ Limitation des déformations
- ❖ Nombre de reprises de soudure limité
- ❖ Large gamme d'épaisseur
- ❖ Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- ❖ Soudage dans toutes les positions.

3.7.4 Type de dévidage du fil électrode :

Il existe quatre types d'entraînement du fil d'apport entre le dévidoir motorisé et la torche :

- ❖ Fil poussé (le plus utilisé à ce jour)
- ❖ Fil tiré
- ❖ Fil poussé et tiré
- ❖ Fil poussé, tiré et poussé.

3.7.5 La partie terminale ou longueur de fil libre (stick-out) :

La partie terminale ou stick-out est la distance déterminée entre l'extrémité de l'arc et le tube contact. La longueur de fil libre doit être suffisante pour éviter un échauffement excessif du tube contact (figure I.20). Le fil libre ne doit pas être trop long afin d'éviter l'échauffement du fil par effet joule. Lorsque la partie terminale augmente, le taux de dépôt s'accroît. [9]

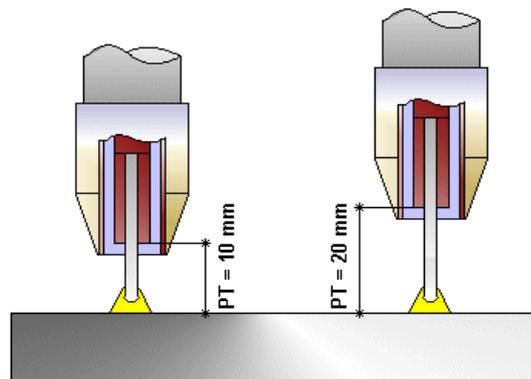


Figure I.20 : longueur de fil libre. [10]

3.8 L'importance de l'angle d'inclinaison de la torche :

Le fil est incliné dans la direction de déplacement du pistolet de soudage comme vous le feriez avec une électrode enrobée. L'inclinaison est d'environ 10 à 20°. Lorsque l'angle d'inclinaison est trop important, vous risquez d'avoir un arc erratique, un soufflage magnétique et l'apparition de soufflures. [10]

Chapitre II : les défauts de soudage

1 Introduction

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Commençons d'abord par les fissurations.

2 Les fissures

2.1 Généralités

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

2.2 Orientation des fissures

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur. [11]

2.3 Les fissures longitudinales

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure. [11]

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous.

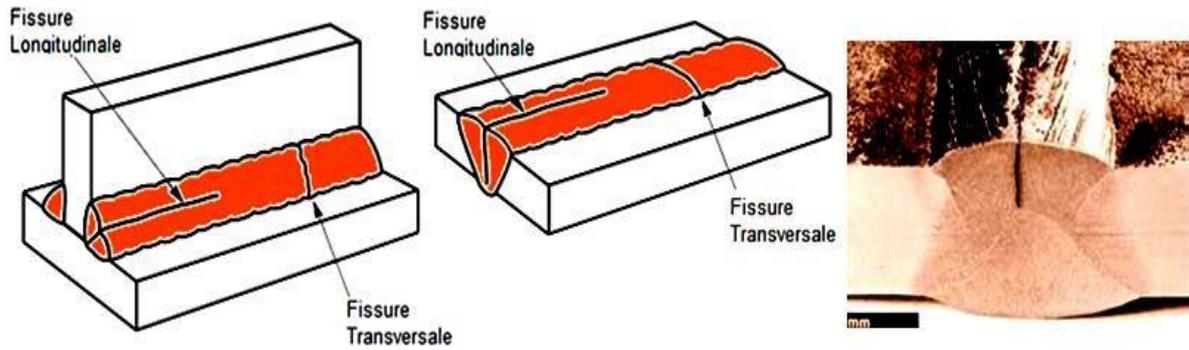


Figure II.1 : La fissure longitudinale. [11]

2.4 Les fissures transversales

Les fissures transversales sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (figure II.2).



Figure II.2 : La fissure transversale. [11]

2.5 Types des fissures

Figure II.3 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

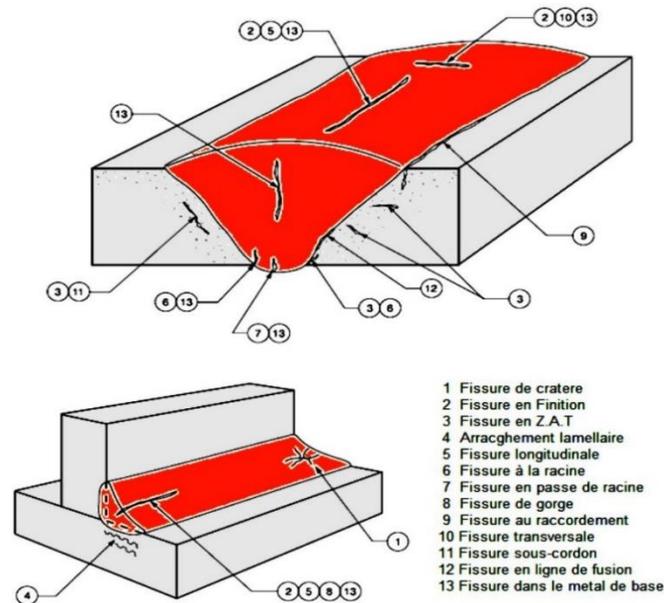


Figure II.3 : Les types de fissure. [11]

2.5.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks):

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Figure II.4). Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud. [11]

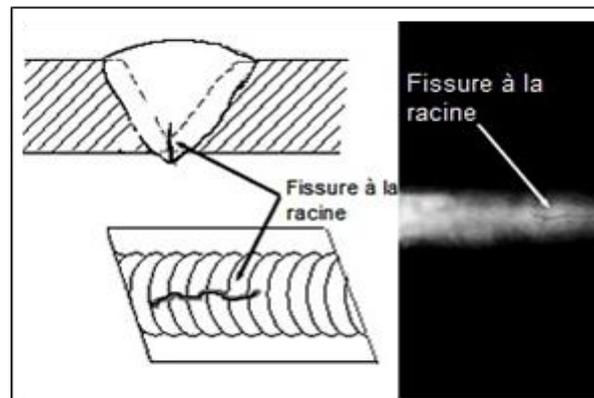


Figure II.4: Fissure de Gorge (Throat Cracks). [11]

2.5.2 Fissures de Racine

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Figure II.5). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

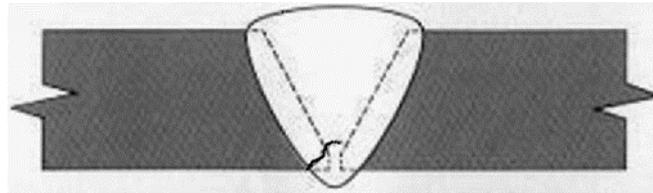


Figure II.5 : Fissure de Racine. [11]

2.5.3 Fissures de Cratère

Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Figure II.6.). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère. [11]



Figure II.6 : Fissure de Cratère. [11]

2.5.4 Fissures au raccordement

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Figure II.7.). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage. [11]

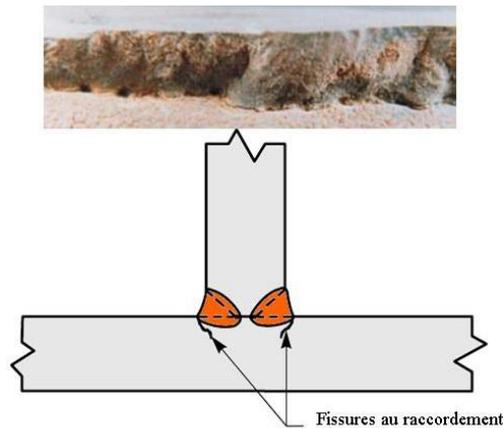


Figure II.7 : Fissure au raccordement. [11]

2.5.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément :

- Hydrogène.
- Une microstructure de ductilité relativement faible.
- De fortes contraintes résiduelles. [12]

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Figure II.8.).

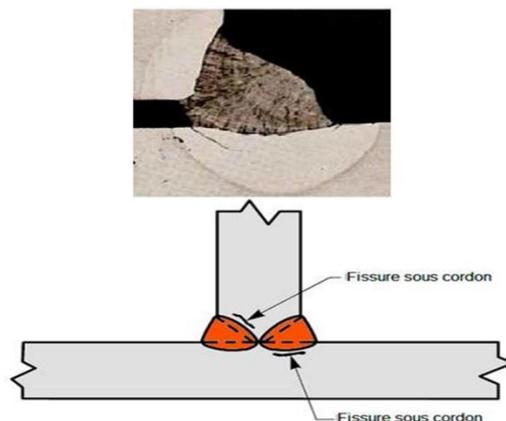


Figure II.8 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement). [11]

2.6 Fissure à chaud (ou de solidification)

2.6.1 Définition

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Figure II.9.).

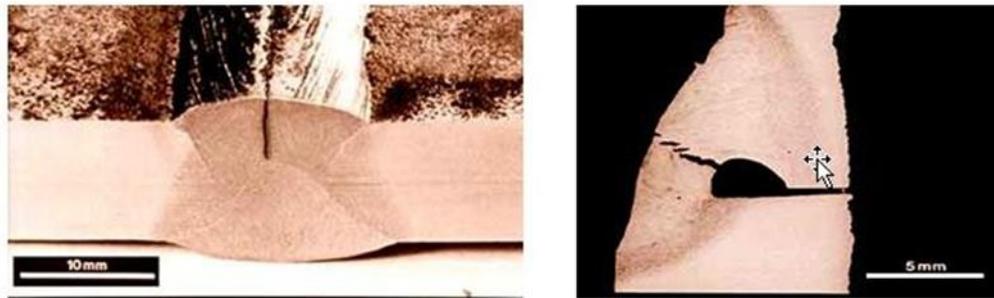


Figure II.9 : Fissure à chaud (ou de solidification). [12]

2.6.2 Causes possibles :

- Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/ largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).
- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure II.10.). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

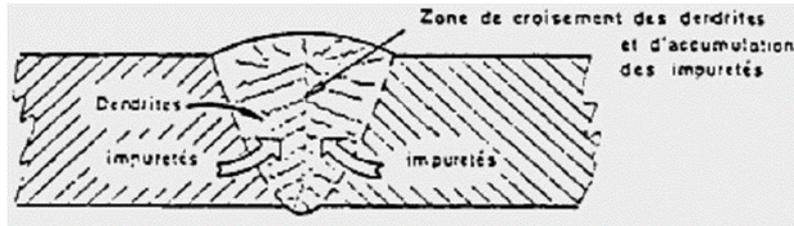


Figure II.10 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

[12]

2.6.3 Méthodes de détection :

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes: examen par ultrasons ou radiographie.

2.6.4 Méthode de réparation :

Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

2.6.5 Mesures préventives :

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.

2.7 Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

2.7.1 Définition

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage (Figure II.11.) [12]

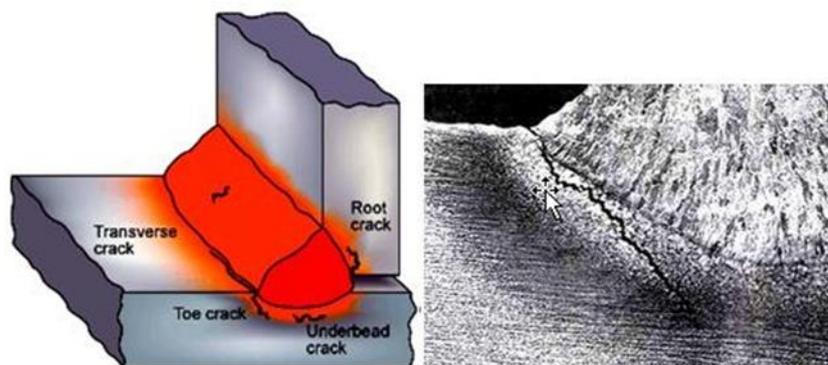


Figure II.11 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène). [12]

2.7.2 Causes possibles

La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.

De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

2.7.3 Méthodes de détection :

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

2.7.4 Méthode de réparation :

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.

2.7.5 Mesures préventives :

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.

2.8 Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire)

2.8.1 Introduction

L'arrachement lamellaire (ou fissure lamellaire) peut se produire sous la soudure spécialement dans les tôles laminées à faible ductilité dans le sens de l'épaisseur.

Nous décrirons ici, les traits caractéristiques, les principales causes, ainsi que les bonnes pratiques pour minimiser le risque d'arrachement lamellaire. [11]

2.8.2 Identification :

Aspect Visuel :

Le principal trait caractéristique de l'arrachement lamellaire est qu'il se produit dans les soudures en T et en angle et qu'il se situe dans le métal de base parallèlement à la ligne de fusion de la soudure et de la surface de la tôle (Figure II.12.). Les fissures peuvent apparaître au bord de la pénétration de la soudure mais sont toujours associées avec des points de grande concentration de contraintes.

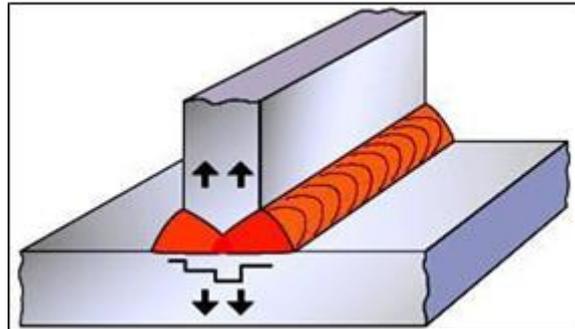


Figure II.12 : Arrachement lamellaire dans un joint en T. [11]

La surface de la rupture est fibreuse avec un aspect de « bois » et de longues sections parallèles qui indiquent une faible ductilité du métal dans le sens de l'épaisseur (Figure II.13.)

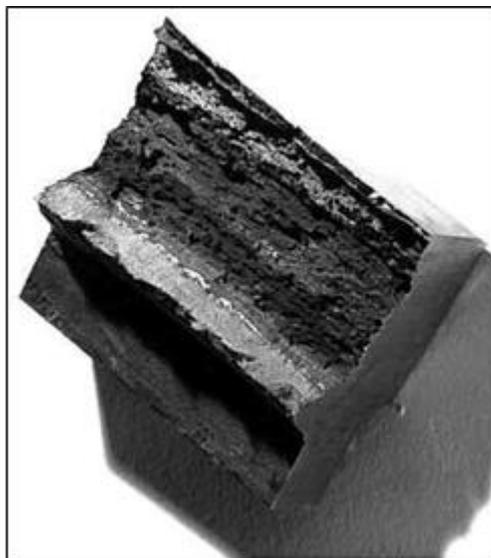


Figure II.13 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire. [11]

2.8.3 Les causes

Il est généralement reconnu qu'il y a trois conditions qui doivent être présentes pour que l'arrachement lamellaire se produise :

- Tension dans le sens de l'épaisseur : les tensions de soudage doivent agir dans la direction la plus courte de la tôle (il à travers l'épaisseur de la tôle)
- Orientation de la soudure : la zone de fusion sera parallèle au plan des inclusions

- Susceptibilité du matériau : la tôle doit avoir une faible ductilité dans le sens de l'épaisseur. Donc, le risque d'arrachement lamellaire sera plus grand si les tensions générées par soudage agissent dans le sens de l'épaisseur. Le risque augmentera aussi avec l'augmentation du niveau d'hydrogène du métal déposé.

2.8.4 Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement

Le choix du matériau, de la configuration du joint, du procédé de soudage, des consommables, ainsi que le préchauffage, et le beurrage peuvent aider à réduire le risque d'arrachement. [11]

➤ Matériau:

L'arrachement n'est rencontré que dans les tôles laminées en acier et pas dans les produits moulés ou forgés. Il n'y a pas de nuance d'acier qui est plus encline à l'arrachement lamellaire, mais les aciers avec une faible ductilité en épaisseur (STRA–Short Transverse Réduction in Area) seront susceptibles. En règle générale, les aciers avec STRA supérieur à 20 % sont essentiellement résistants à l'arrachement, alors que les aciers de 10 à 15 % de STRA devraient être utilisés uniquement dans les joints légèrement soumis à contraintes (Figure II.14.).

Les aciers de haute résistance présentent un grand risque spécialement lors que l'épaisseur est supérieure à 25mm.

Les aciers traités à l'aluminium avec un faible taux de soufre (<0,005%) présentent un faible risque.

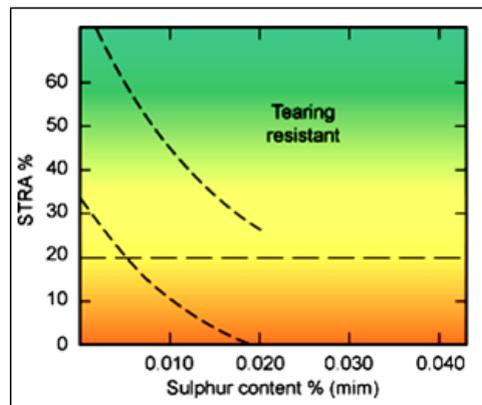


Figure II.14 : Relation entre STRA et concentration en soufre pour tôle de 12.5 à 50 mm d'épaisseur. [11]

Les fournisseurs d'acier peuvent fournir des tôles qui ont été testées dans le sens de l'épaisseur avec valeur garantie de STRA supérieure à 20%.

➤ Configuration du Joint

L'arrachement lamellaire se manifeste dans les joints qui produisent de grandes tensions à travers l'épaisseur, (Ex joints en T ou en coin). Dans les joints en T ou cruciformes, les soudures à pleine pénétration seront particulièrement susceptibles. [12]

Les structures cruciformes dans lesquelles la tôle susceptible ne peut se déformer durant le soudage augmenteront aussi grandement le risque d'arrachement.

Dans les joints bout-à-bout, comme les contraintes de soudage n'agissent pas à travers l'épaisseur de la tôle, il y a peu de risque d'arrachement.

Comme la déformation angulaire peut augmenter la tension dans la racine de soudure et/ou les extrémités de celle-ci, l'arrachement peut se produire dans les joints de sections épaisses où les tensions de pliage sont élevées.

Plusieurs exemples de bonnes pratiques dans la conception de joints soudés sont illustrés en (Figure II.15.)

Comme l'arrachement a plus de chance de se produire dans le soudures bout à bout en T de pleine pénétration, utiliser, dans la mesure du possible, deux soudures d'angle.

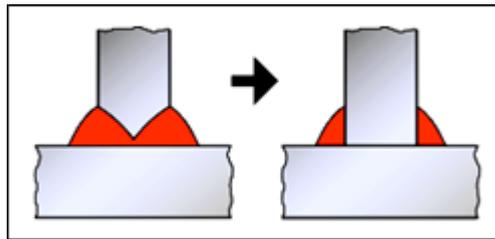


Figure II.15 : Configuration du Joint la soudure à deux angles. [12]

(Figure II.16.) - Les soudures à deux faces sont moins susceptibles que les grandes soudures à une seule face et le soudage alterné pour réduire le stress, diminuera encore le risque d'arrachement spécialement dans la pénétration.

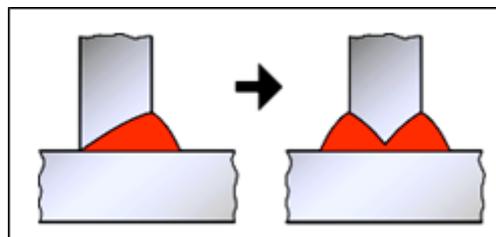


Figure II.16 : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.

(Figure II.17.) Les soudures d'angle épaisses à une seule face devraient être remplacées par De plus petites soudures d'angle à deux faces.

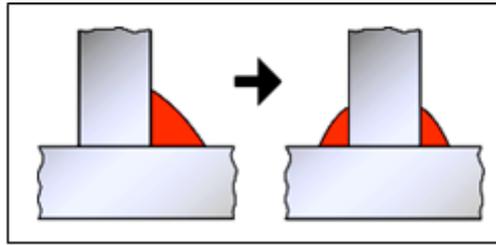


Figure II.17 : Configuration du Joint, plus petites soudures d'angle à deux faces. [12]

(Figure II.18.) Revoir la configuration du joint, de manière à ce que la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible, sera particulièrement efficace dans la réduction du risque d'arrachement.

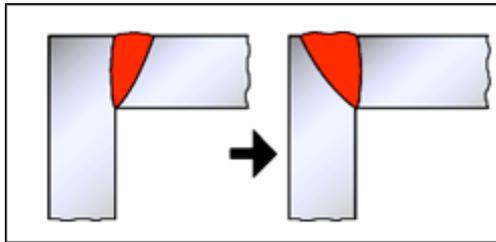


Figure II.18 : Configuration du Joint, la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible. [12]

➤ **Dimensions de la soudure**

L'arrachement lamellaire a plus de chance de se produire dans les soudures épaisses quand le coté d'une soudure d'angle ou en T est supérieur à 20mm. Comme la contrainte contribue au problème, une tôle de section plus mince qui est moins susceptible à l'arrachement peut être quand même à risque dans les situations de contraintes élevées.

➤ **Procédé de soudage**

Comme le matériau et la configuration du joint sont les causes premières d'arrachement, le choix du procédé de soudage a une influence relativement faible sur le risque. Toute fois, les procédés à grand apport de chaleur, qui génèrent de faibles tensions à travers une plus large ZAT et une pénétration plus profonde, peuvent être bénéfiques.

Etant donné que l'hydrogène du métal déposé augmentera le risque d'arrachement, un procédé à bas hydrogène devrait être utilisé lors du soudage des aciers susceptibles.

➤ **Consommable**

Lors que possible, le choix d'un consommable de faible résistance peut réduire le risque par diminution de la tension dans le métal de soudure. Un plus petit diamètre de l'électrode qui peut être utilisé pour produire un plus petit flanc, sera utilisé pour prévenir la fissuration. Un consommable à faible hydrogène réduira le risque par diminution du niveau d'hydrogène

diffusé par le métal de soudure. Les consommables doivent être échés selon les recommandations du fabricant.

➤ **Préchauffage**

Le préchauffage aura un effet bénéfique en réduisant le niveau d'hydrogène diffusé dans le métal de soudure. Cependant, il doit être noté que dans un joint retenu, un préchauffage excessif peut avoir un effet nocif en augmentant le niveau de contrainte produit par la contraction à travers la soudure durant le refroidissement.

Le préchauffage devrait, alors, être utilisé pour réduire le niveau d'hydrogène mais il devrait être appliqué de manière à ne pas augmenter la quantité de contraction à travers la soudure.

➤ **Beurrage**

Beurrer la surface de la tôle susceptible avec un métal de soudure de faible résistance a été largement utilisé. Comme indiqué, par exemple, dans les (Figure II.19.20.) ci-dessous pour une soudure en T avec pleine pénétration, la surface de la tôle peut être chanfreinée de façon à ce que la couche de beurrage s'étende 15 à 25mm au-delà de chaque extrémité de la soudure et avoir une épaisseur de 5 à 10mm.

Le beurrage in-situ (a&b.), lorsque le métal de soudure de faible résistance est déposé en premier sur la tôle susceptible avant de remplir le joint, a aussi été utilisé avec réussite. Cependant, avant d'adopter cette technique, les calculs de conception doivent être réalisés avec soin pour s'assurer que la résistance globale du joint sera acceptable.

- a. Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible

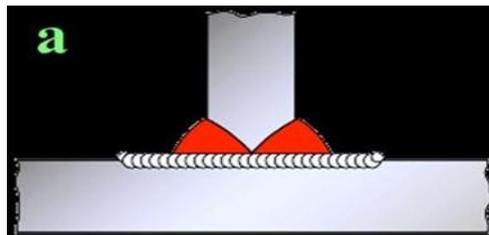


Figure II.19 : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible. [12]

- b. Beurrage in situ :

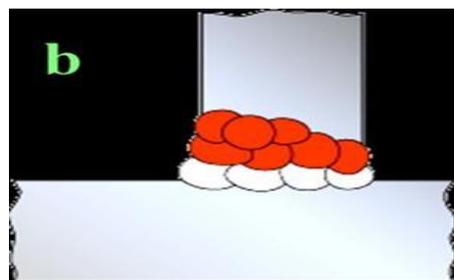


Figure II.20 : Beurrage in-situ. [12]

➤ Normes d'Acceptation

Comme les arrachements lamellaires sont des imperfections linéaires, qui ont des bords très abrupts, ils ne sont pas permis pour les soudures de qualité par la majorité des codes et normes de construction.

2.8.5 Détection et réparation

S'ils sont débouchant en surface, les arrachements lamellaires peuvent être facilement détectés par examen visuel, par ressuage, ou par magnétoscopie.

Les fissures internes nécessitent les techniques d'examen par ultrasons mais ils peuvent ya voir un problème de distinction entre les arrachements lamellaires et les bandes d'inclusions.

L'orientation des arrachements les rend, pour la plupart du temps, impossibles à déceler par radiographie.

2.9 Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

2.9.1 Définition

Forme de fissure qui apparaît dans des aciers au Va ou Mo qui, dans le cas d'une teneur suffisamment élevée, provoquent une trempe importante dans la zone affectée thermiquement et par la suite une ductilité au fluage basée aux joints des grains dans cette zone affectée thermiquement, d'où apparition de fissures lors du fonctionnement à température élevée (Figure II.21.).

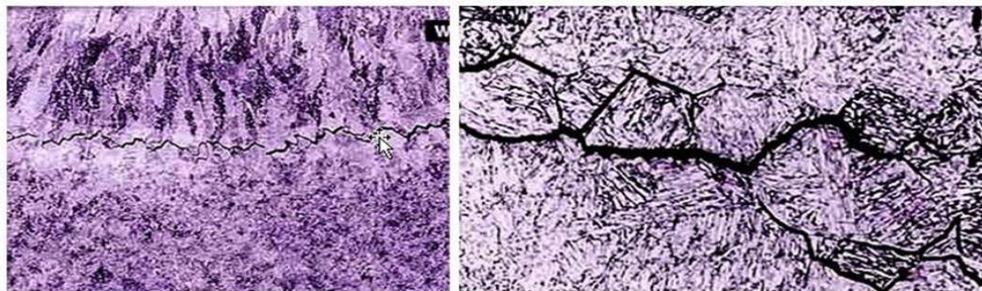


Figure II.21 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking). [12]

2.9.2 Causes possibles

Des facteurs contribuant sont :

- Impuretés dans l'acier (As, Sn, ...).
- Effets d'entaille.
- Manque de pénétration.
- Manque de fusion à la racine de la soudure Méthodes de détection.
- À la surface : examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- À l'intérieur : examen par ultrasons.

2.9.3 Méthodes de réparation

Traitement thermique de la zone de soudage afin de restaurer la ductilité de la zone influencée thermiquement, suivi par l'élimination du défaut jusqu'à 5mm au-delà de l'extrémité de la fissure. Préchauffage suffisant avant la réparation ; elle-même étant suivie par un nouveau traitement thermique (Figure II.22 et 23.).

2.9.4 Mesures préventives :

- Elimination de toute entaille avant traitement thermique.
- Traitement de détente entre les différentes passes.
- Choix du matériau-Procédure et technique de soudage.

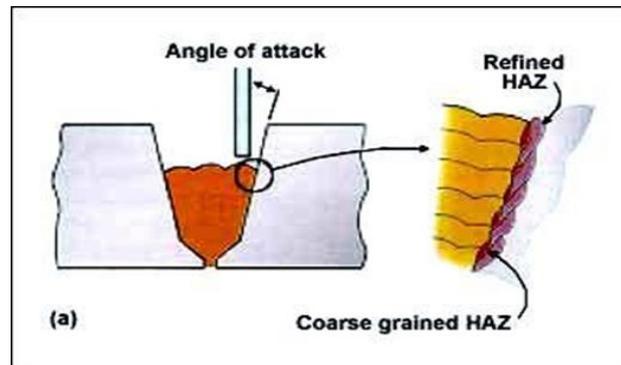


Figure II.22 : Soudage en position à plat – haut degré de raffinement de la ZAT. [12]

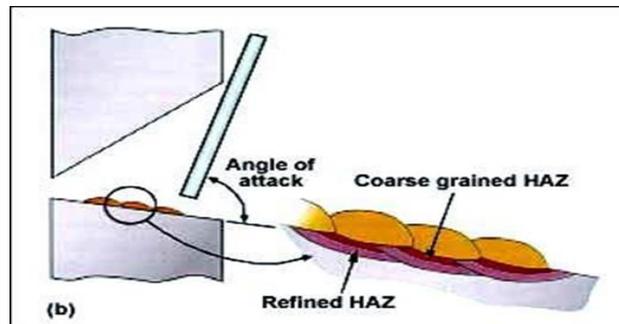


Figure II.23 : Soudage en position verticale ou horizontale – faible degré de raffinement de la ZAT. [12]

3 Manque de fusion

3.1 Localisations possibles des manques de fusion

Des manques de fusion peuvent apparaître (Figure II.24.) :

- Soit dans le flanc de la soudure entre métal de base et métal déposé.
- Soit entre passes de soudage.
- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé

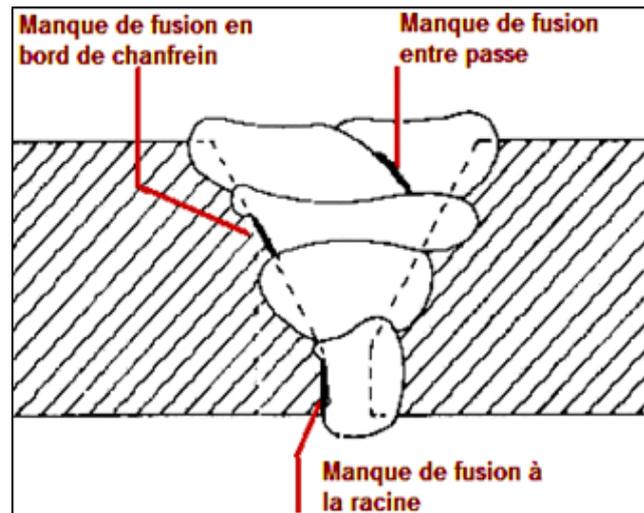


Figure II.24 : Localisations possibles des manques de fusion. [12]

3.2 Manque de fusion dans le flanc de la soudure

3.2.1 Définition

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (Figure II.25.).

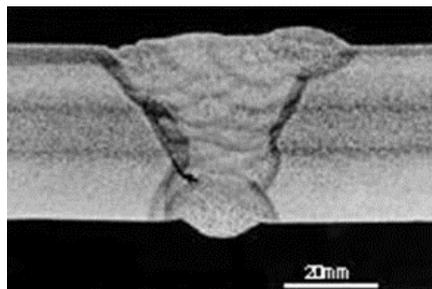


Figure II.25 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.2.2 Causes possibles :

- Energie de l'arc trop faible.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvais angle de l'électrode.
- Métal d'apport qui coule devant l'arc à la suite de la position de soudage.
- Inductance trop importante en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.

3.2.3 Méthodes de détection :

- Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie).

3.2.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer la partie défectueuse et ressouder.

3.2.5 Mesures préventives :

- Qualification de la procédure pour vérifier la fusion
- Eventuellement modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage
- Nettoyer suffisamment les bords à souder
- Diminuer une inductance trop élevée dans le soudage MAG, même si les projections sur le métal de base deviennent plus nombreuses.

3.3 Manque de fusion entre passes

3.3.1 Définition

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure II.26.).

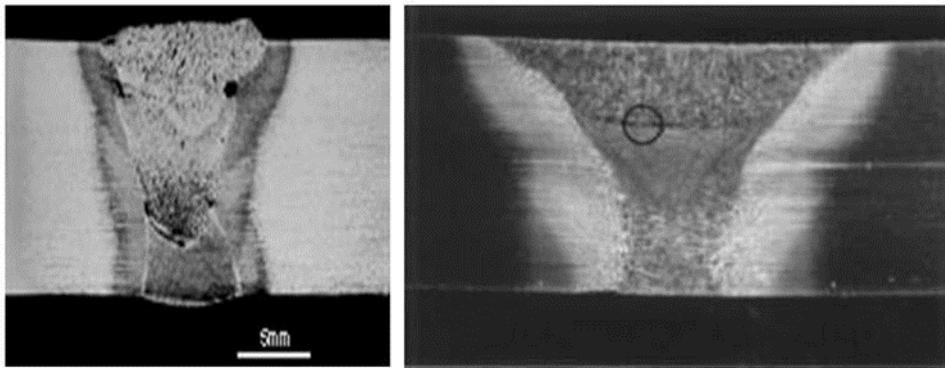


Figure II.26 : Manque de fusion entre passes.

3.3.2 Causes possibles :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.3.3 Méthodes de détection :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.3.4 Méthodes de réparation :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.3.5 Mesures préventives :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.4 Manque de fusion à la racine de la soudure

3.4.1 Définition

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration comme il est montré dans (Figure II.27).

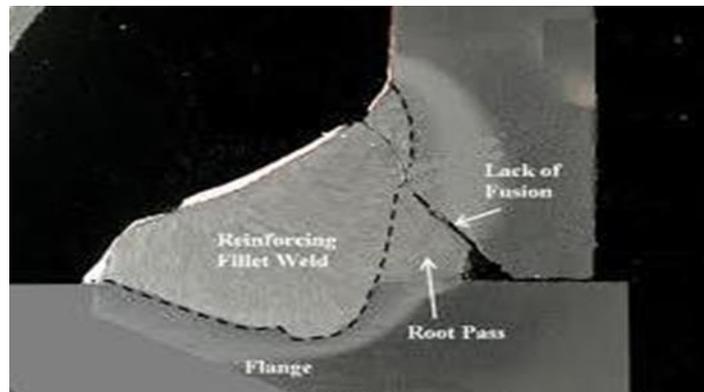


Figure II.27 : Manque de fusion à la racine de la soudure.

3.4.2 Causes possibles :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure Autres causes spécifiques :
- Ecartement trop faible.
- Méplat trop important lors de la préparation.
- Diamètre de l'électrode trop important dans le soudage à l'arc électrique.

3.4.3 Méthodes de détection :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure Si la soudure peut être contrôlée à revers : examen visuel, magnétique ou par ressuage.

3.4.4 Méthodes de réparation :

- Si la reprise à revers est possible : éliminer le défaut par meulage et reprendre à revers
- Si la reprise à revers est impossible : éliminer toute la soudure et ressouder.

3.4.5 Mesures préventives :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure et surtout spécialement soigner préparation (écartement, méplat...).

4 Manque de pénétration

4.1 Localisations possibles des manques de pénétration

Le manque de pénétration peut être localisé (Figure II.28 et 29.) :

1. A la racine de la soudure (soudure en « V ») :

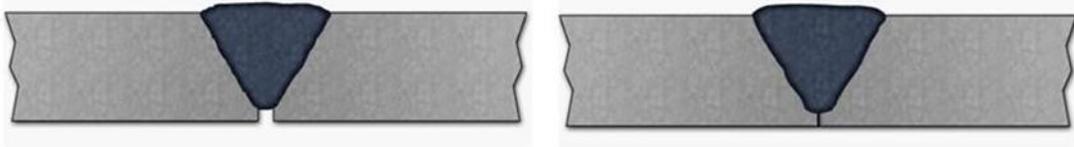


Figure II.28 : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.

2. A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X ») (Fig.29.) :

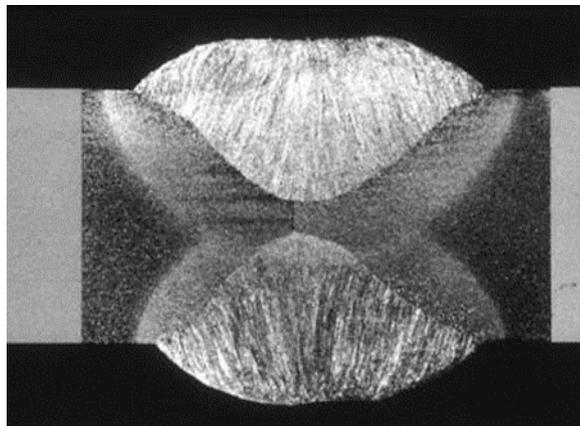


Figure II.29 : Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure.

4.2 Manque de pénétration à la racine

4.2.1 Définition

Le métal d'apport n'atteint pas la racine du chanfrein.

4.2.2 Causes possibles :

- Ecartement trop faible.
- Méplat trop grand.
- Soudage vertical descendant tandis que vertical montant spécifié pour obtenir une pénétration complète.
- Apport calorifique trop faible.
- Vitesse de soudage trop grand.
- Diamètre d'électrode fautif dans le soudage électrique manuel.
- Inductance trop importante dans le soudage MAG.
- Laitier qui coule devant le bain de soudage.

4.2.3 Méthodes de détection :

- Défaut débouchant en surface ; examen visuel, magnétique ou ressuage.
- Défaut interne : examen par ultrasons ou radiographie.

4.2.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage.

4.2.5 Mesures préventives :

- Adapter la préparation de soudage (écartement, méplat...).
- Adapter les paramètres de soudage (vitesse de soudage, régime thermique).
- Diminuer la fluidité du laitier.
- Diminuer l'inductance pour le soudage MAG.

4.3 Manque de pénétration dans la soudure :

- Le métal d'apport n'atteint pas le milieu du chanfrein en X (Figure II.30 a b c et d)

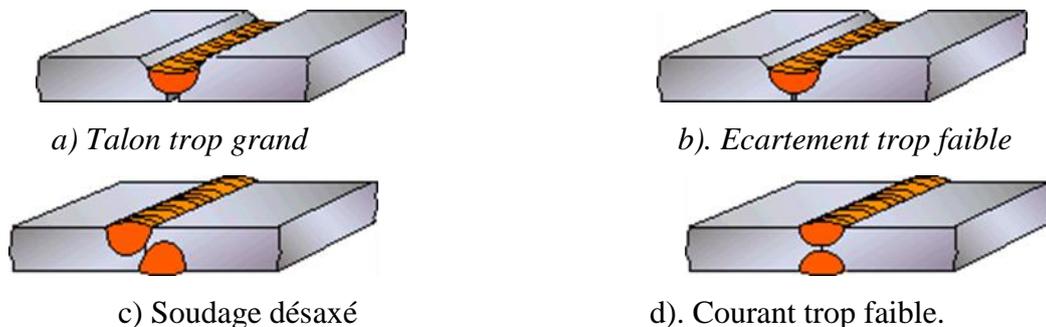


Figure II.30 : manque de pénétration dans la soudure.

4.3.1 Causes possibles :

- Idem Manque de pénétration à la racine.

4.3.2 Méthodes de détection :

- Examen par ultrasons ou radiographie.

4.3.3 Méthodes de réparation :

- Eliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage.

4.3.4 Mesures préventives :

- Idem Manque de pénétration à la racine.
- Une mesure spécifique est de faire un examen magnétique ou un ressuage après gougeage afin de contrôler la qualité du gougeage .

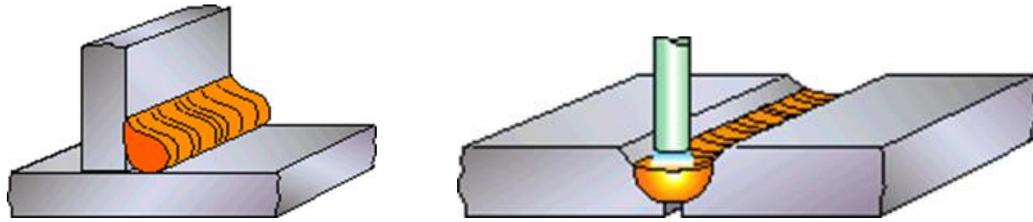


Figure II.31 : Apport (chaleur) arc trop faible.

B) Diamètre électrode trop grand.

5 Inclusion solides

5.1 Différents types d'inclusions solides

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents

- Laitier.
- Tungstène.
- Cuivre.

5.2 Inclusions de laitier

5.2.1 Définition

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure (Figure II.32.). Ces inclusions peuvent avoir deux aspects :

- Un aspect linéaire : les inclusions sont alors groupées en parallèle à l'axe du cordon.
- Un aspect quelconque : elles sont alors isolées.

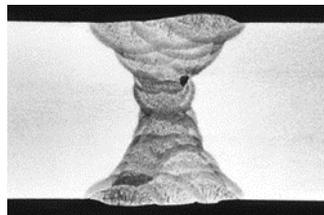


Figure II.32: Inclusions de laitier.

5.2.2 Causes possibles :

- Manque de contrôle sur le laitier (par ex. le laitier qui coule devant le bain de fusion à cause de la position de soudage).
- Manque d'élimination du laitier entre passes d'une soudure multi-passes.

5.2.3 Méthodes de détection :

- Ultrasons et radiographie.

5.2.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer la zone défectueuse par meulage et réparer.

5.2.5 Mesures préventives :

- Eventuellement adapter la position de soudage pour mieux contrôler le bain de fusion.

- Eliminer suffisamment le laitier entre passes.

5.3 Inclusions de tungstène

5.3.1 Définition

Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US=GTAW) (Figure II.33.).

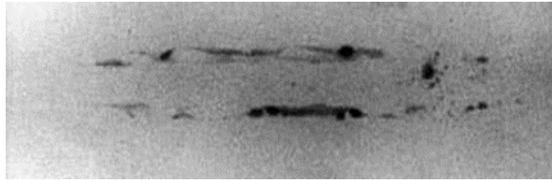


Figure II.33 : Inclusions de tungstène.

5.3.2 Causes possibles :

- Electrode trop pointue.
- Intensité de courant trop élevée.
- Débit de gaz de protection trop faible.
- Coupure trop rapide du gaz de protection à la fin du soudage.

5.3.3 Méthodes de détection :

- Surtout radiographie où les inclusions de tungstène forment des taches très blanches sur le film (le tungstène absorbe très fort les rayonnements)

5.3.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer le défaut par meulage et ressouder.

5.3.5 Mesures préventives :

- Ne pas utiliser des électrodes trop pointues.
- Limiter l'intensité du courant.
- Augmenter le débit du gaz de protection.
- Ne pas couper trop vite l'alimentation en gaz de protection.

5.4 Inclusions de cuivre

5.4.1 Définition

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage (Figure II.34.).



Figure II.34 : Inclusions de cuivre.

5.4.2 Causes possibles :

- Fusion de points de contact lors du soudage MIG à la suite d'un arc instable.
- Perte de refroidissement à l'eau provoquant la fusion de certaines parties de la torche.

5.4.3 Méthodes de détection :

- Contamination : Non décelable par des moyens CND.
- Inclusion importante : Radiographie.
- Dans le cas où ces inclusions provoqueraient des fissures se référer au chapitre fissures.

5.4.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer la zone complète par meulage et même un peu au-delà, car l'étendue de la contamination est très difficile à évaluer.

5.4.5 Mesures préventives :

- Stabiliser l'arc lors du soudage MIG.
- Minimiser les pertes de refroidissement de la torche.
- Eliminer toute source de contamination possible.

6 Conclusion partielle

La fissuration résulte généralement de tensions internes trop importantes dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée durant le soudage (ZTA). Les fissures peuvent apparaître très tôt (fissuration à chaud) ou des heures, voire des jours après le soudage (fissuration à froid). Les causes les plus fréquentes de fissuration sont un refroidissement trop rapide, un métal d'apport incompatible avec le métal de base ou une mauvaise préparation des joints.

En plus des fissures, il existe plusieurs types de défauts de soudure : les défauts dimensionnels (mauvaise dimension du cordon sur la largeur ou sur l'épaisseur), les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion.

Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

Chapitre III :
Modélisation numérique

1. Introduction

Aujourd'hui, l'industrie doit répondre de plus en plus rapidement aux besoins des consommateurs. La concurrence avec d'avantage de nouveaux produits est très rapide et leur cycle de vie est de plus en plus court. Par conséquent, il est nécessaire de réduire le temps de conception des produits. Depuis l'introduction de l'informatique pour la conception, la CAO et la FAO, il a été possible de concevoir et de simuler de nouveaux produits avec une vitesse et une précision plus élevée. Ces dernières années, il y a eu de plus en plus de discussions sur la réduction du nombre de prototypes utilisés dans le cycle de conception. Ces prototypes sont utilisés pour vérifier les choix de conception où sont utilisés pour vérifier la validité des simulations ou des calculs de résistance.[15].

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique du comportement mécanique des joints soudés par procédé de soudage à l'arc enrobée sous chargement de compression uniaxial. La première section est consacrée à la présentation du logiciel utilisé, puis la construction du modèle de calcul sous le logiciel de simulation par éléments finis ABAQUS. Ensuite une dernière section qui traite les résultats de simulation obtenus et leurs discussions.

2. Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Nous pouvons définir la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) par l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'assister les concepteurs dans la conception et la mise au point d'un produit. Un logiciel de CAO se compose généralement de quatre parties majeures qui peuvent être organisées comme suit :

- Le traceur géométrique.
- L'outil de visualisation.
- Un certain nombre d'applications.

3. Les avantages de la CAO

Grâce aux solutions de CAO, nous pouvons transformer rapidement nos idées innovantes en produits d'exception. Son interface intuitive et ses puissantes fonctionnalités de conception favorisent un développement rapide et efficace des produits, ce qui renforce la réussite des entreprises. Des outils conviviaux tout en étant puissants, une diffusion claire des informations de conception, un prototypage virtuel et une génération rapide des données et des mises en plan prêtes à être fabriquées. Tous ces atouts donnent un avantage très net sur un marché concurrentiel.

4. Les inconvénients de la CAO

- Gain économique reste à prouver
- Il n'y a pas un environnement réel
- Considérer les dimensions aux chiffres arrondis
- La surface est considérée parfaite
- Le matériau est considéré comme étant un milieu continu.

5. Les Outils de CAO

Parmi les outils de la CAO, nous citons :

- a. SolidWorks
- b. Abaqus
- c. Solid edge
- d. Catia

6. Définition du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impact ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. [16]

7. Généralité sur le code de calcul ABAQUS

ABAQUS compose de trois versions : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE,

ABAQUS/Standard : ABAQUS Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite. [17]

- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.
- Problèmes linéaires et non linéaires, Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

ABAQUS/Explicit : ABAQUS/ Explicite est un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires :

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle).
- Problème transitoire et dynamique des structures.
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.

ABAQUS/CAE 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 optionnels, spécifiques à certaines applications.

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

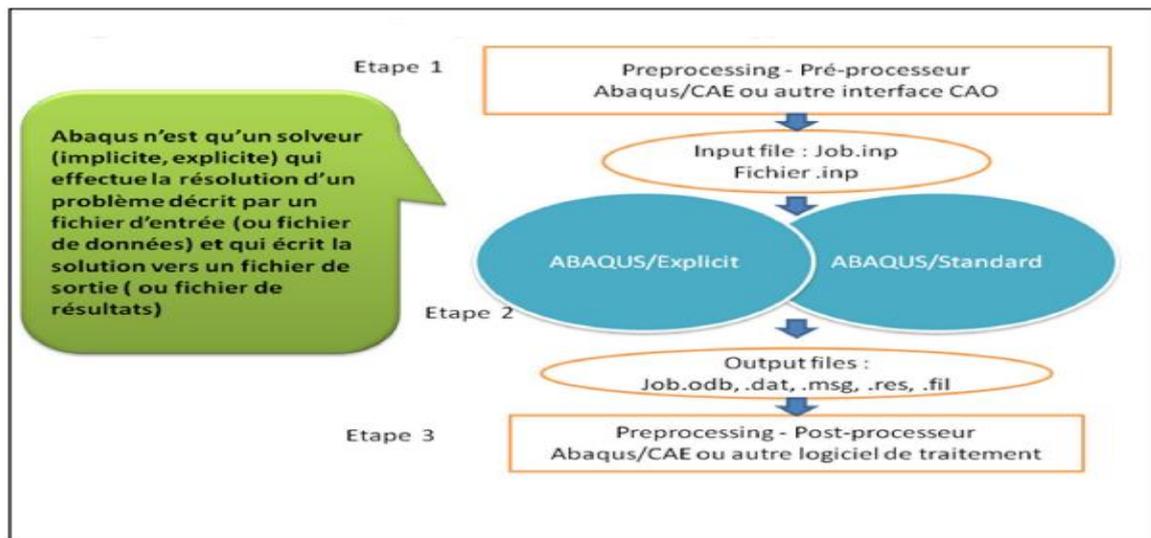


Figure III.1 : Structure d'une analyse sous Abaqus.[17]

8. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS

Avant de commencer à définir un modèle, nous devons choisir le système d'unités que nous utiliserons. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm). [18]

Le tableau III.1 ci-dessous représente la correspondance des unités sous Abaqus :

Tableau III.1 : Correspondance des unités.

Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Energie
M	L	T	M.L.T-2	M.L-1.T-2	M.L2.T-2
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	Méga Pascal	Milli Joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	Méga Pascal	Milli Joule

9. Organisation de l'interface Abaqus CAE

Il est important de savoir que le module CAE (Complète Abaqus Environnement) (figure III.2) qu'on va l'utiliser pour créer le jeu des données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données des problèmes relativement classiques.

Donc pas toutes les commandes utilisables dans Abaqus sont faites souvent le choix des paramètres par défaut.

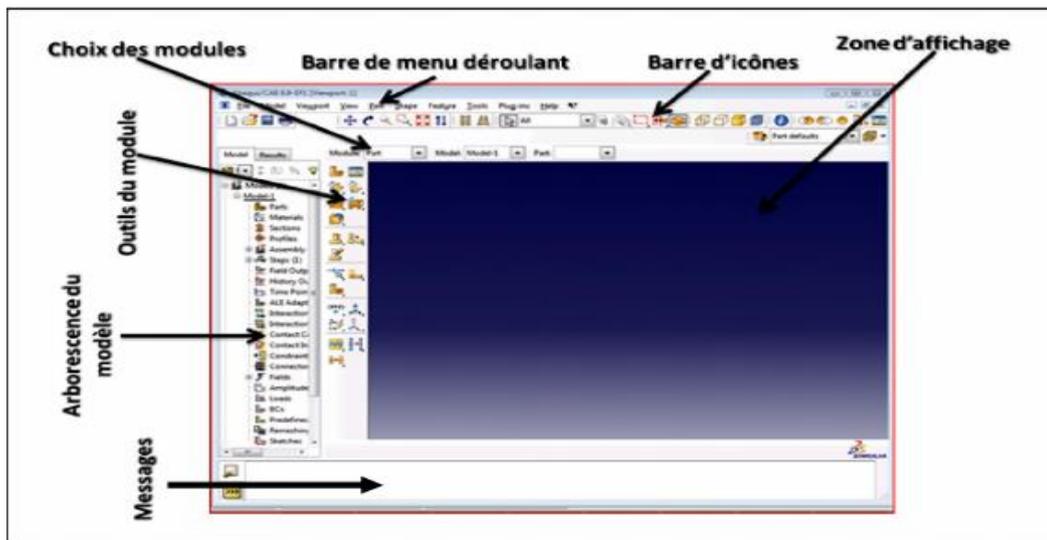


Figure III.2. Organisation d'Abaqus.[19]

10. Les modules

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules, figure III.3

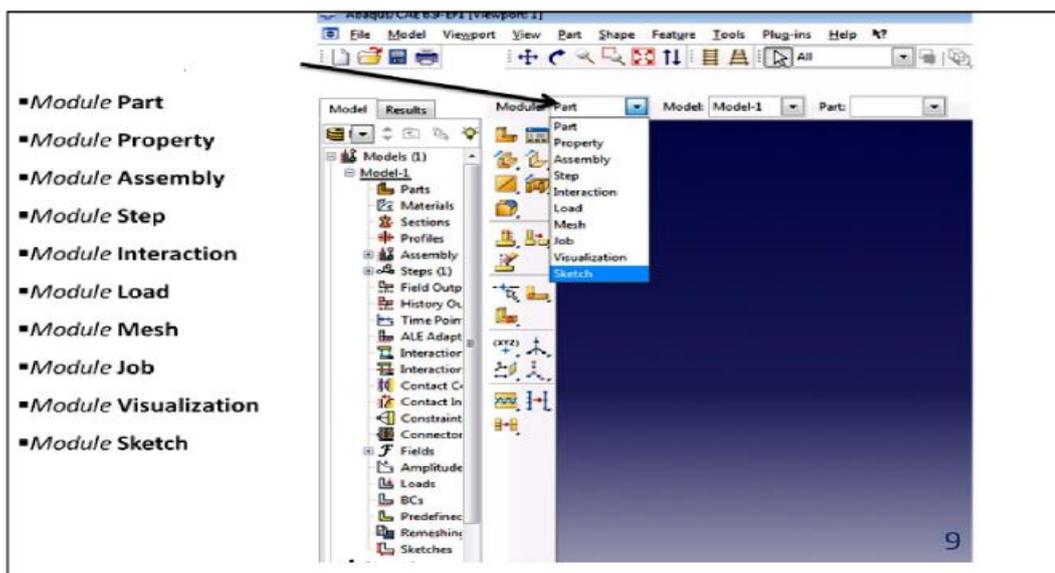


Figure III.3 : Réalisation de la mise en données d'un problème.[20]

Module Part : Ce module définit la géométrie des entités du modèle, Figure III.4. Elle comprend les parties déformables et les parties rigides. Pour les créer, il faut utiliser l'icône de création en haut à gauche, et puis sélectionner convenablement :

- L'espace de modélisation : 3D par exemple.
- Le type d'entité à générer : déformable.
- La forme de l'entité.

Ce module nous permet dessiner notre pièce suivant les étapes sous-indiqués

1^{er} étape : création d'une partie

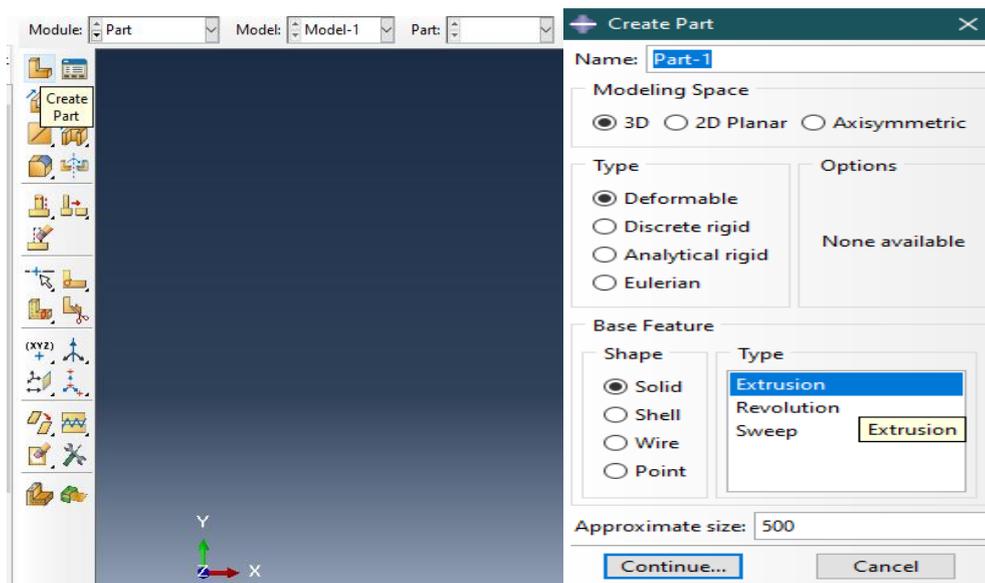


Figure III.4. Création de la pièce dans le module Part.

2^{em} étape : dessiner la pièce :

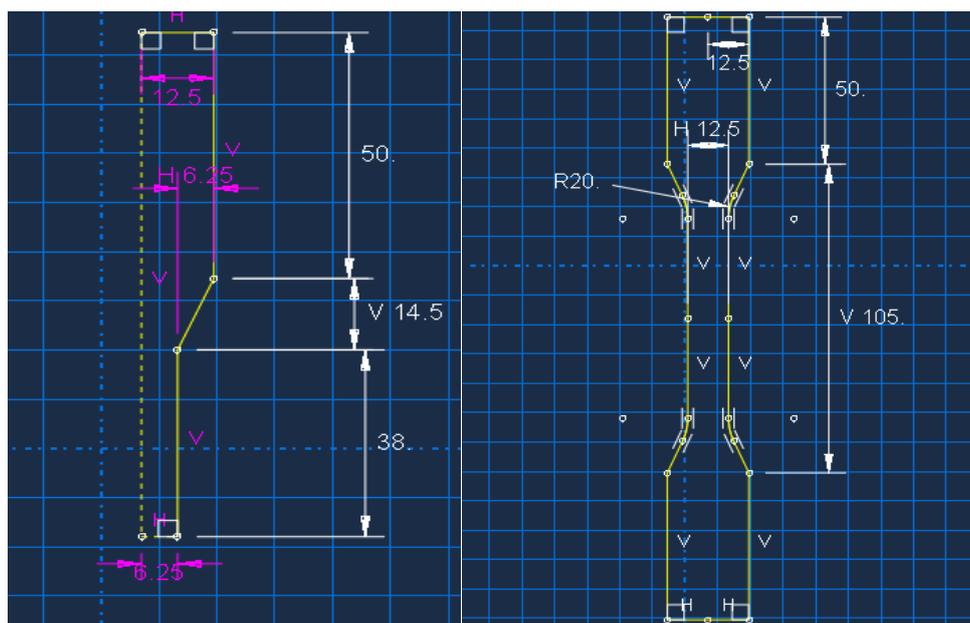


Figure III.5 : dessin de la pièce

3^{em} étape : validation du dessin

Afin de terminer ce dessin, il est nécessaire de valider le pour choisir la valeur de leur épaisseur comme le montre la figure III.6

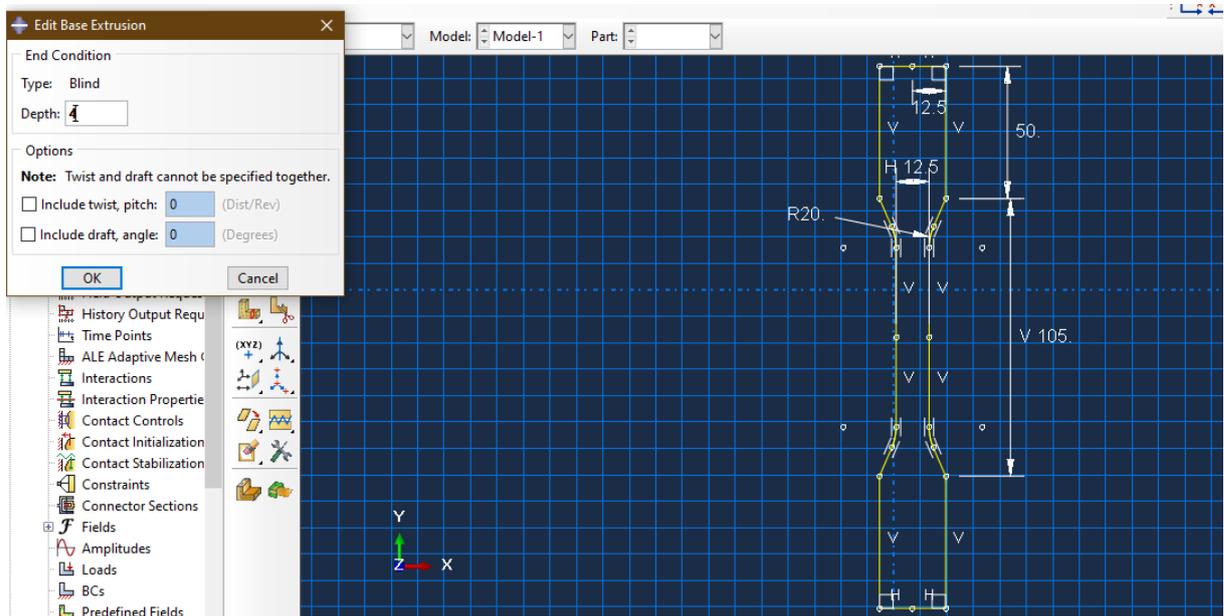


Figure III.6 : Validation du dessin.

4^{em} étape : création des partitions

Pour obtenir la forme finale de la pièce il faut faire des parts en cette pièce (figure III.7).

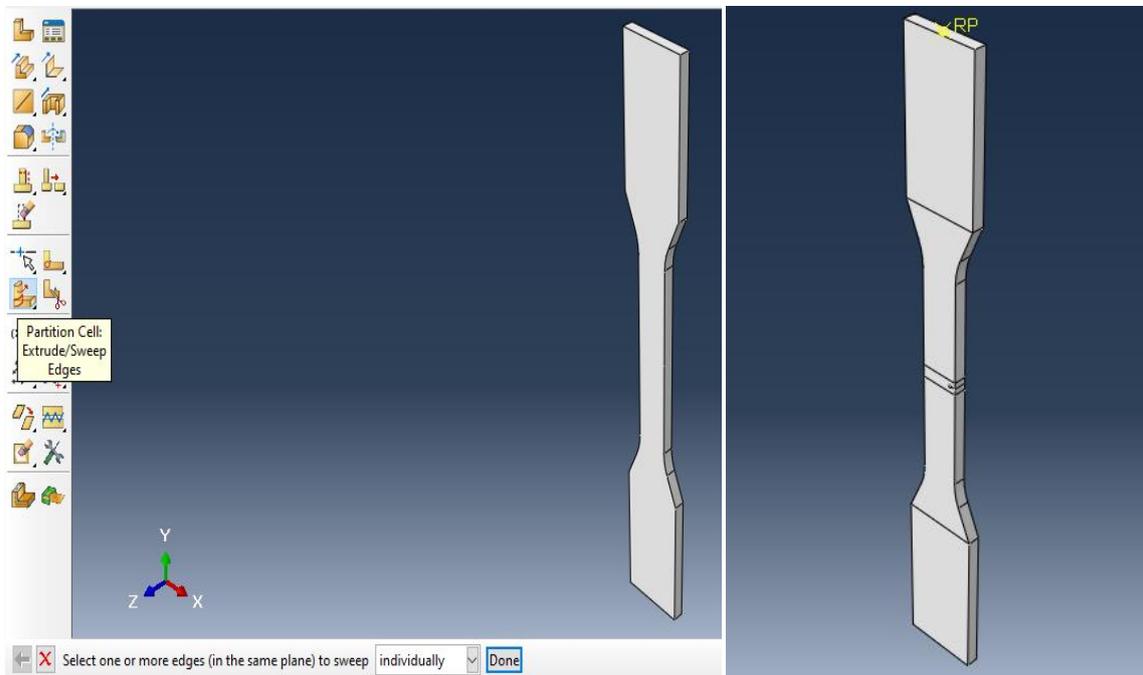


Figure III.7 : Création des partitions.

Module propriété du matériau : On y définit les propriétés du ou des matériaux figure III.8 (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans le cas présent, nous avons à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques. Pour créer un matériau, il suffit de cliquer sur l'icône en haut à gauche.

Il vaut mieux ensuite donner un nom spécifique à chacun de matériaux, ce qui fait la création d'une base de données pour le matériaux étudié, il nous reste à définir :

- Les propriétés élastiques par Mechanical, Elasticity, Elastic (module de Young et le coefficient de Poisson pour un matériau isotrope).
- Les propriétés plastiques via Mechanical, Plasticity, Plastic. (Sous l'hypothèse d'un écrouissage isotrope, la courbe d'écrouissage est entrée sous la forme : limite d'élasticité/déformation plastique. Dans cette courbe, la contrainte est de type Cauchy (F divisée par la surface actuelle) et la déformation est logarithmique ($\ln(L/L_0)$).

Dans la partie **Comportement du matériau**, nous avons la possibilité de rentrer différentes valeurs numériques ou lois physiques. Le logiciel Abaqus travaille sans unités, il est donc préférable de les définir avant et de s'en tenir tout au long du calcul.

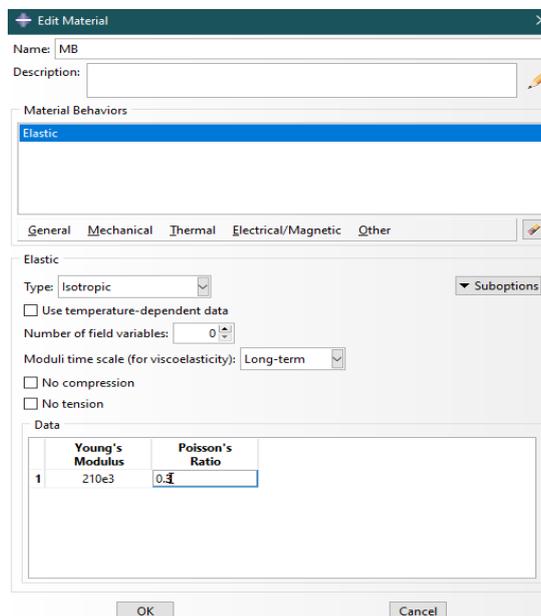


Figure III.8 : Propriété Matériaux.

Après le choix de propreté du matériel il est nécessaire de choisir la section de matériel dans la pièce. (Figure III.9, 10)

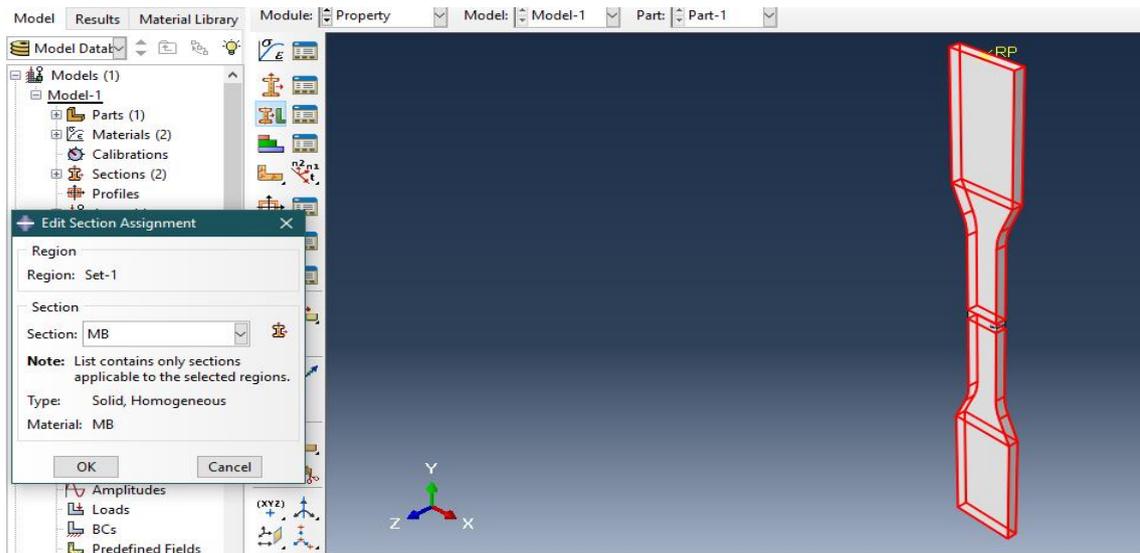


Figure III.9 : Section du métal de base.

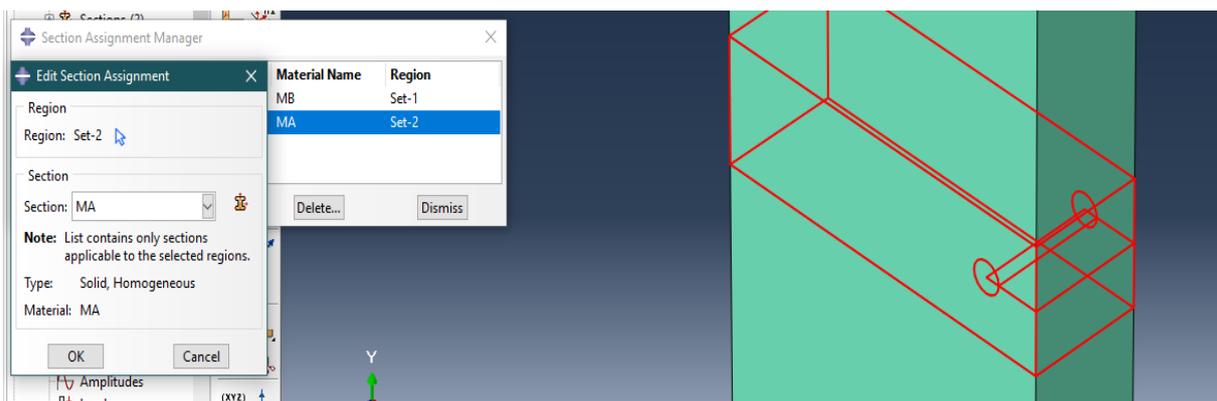


Figure III.10 : Section de métal d'apport.

Module Assemblage : Ce module, il s'agit de créer une instance (figure III.11) à partir des entités que nous avons définies dans le module Part. Ces instances seront celles que nous allons manipuler par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, pour créer une instance il faut sélectionner tous les éléments créés dans Part.

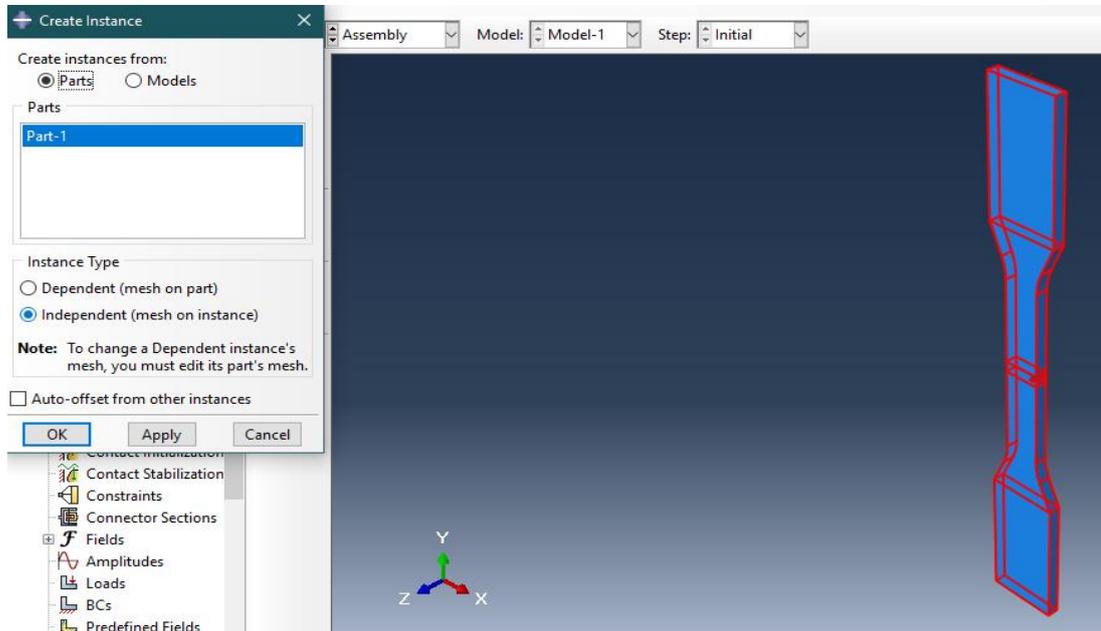


Figure III.11 : Instance et assemblage.

Module type d'analyse : C'est ici (figure III.12) que nous choisirons le type d'analyse à exécuter qui est dans ce cas **statique générale**.

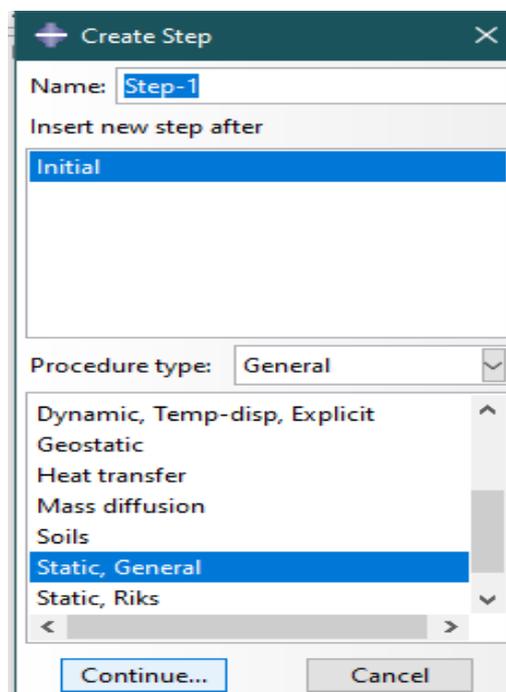


Figure III.12. Configuration de l'étape type analyse.

Module Interaction : Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante. Ce module aussi intègre la particularité d'intégrer la fissure dans le système à modéliser. Pour la création de la fissure : dans la barre de menu, on sélectionne la ligne de la fissure (figure III.13) après sa on sélectionne création fissure spéciale, dans la nouvelle fenêtre, on nomme notre fissure « Crack-1 », puis on choisit dans type contour intégral et continue. Ensuite, on entre la position de la fissure, on clique sur le centre du Cercle puis sur valider. Finalement, on va choisir la direction de propagation de la fissure, on clique sur q-vecteur, on sélectionne la pointe de fissure comme origine du vecteur-direction et un point sur l'axe horizontal à droite comme son extrémité.

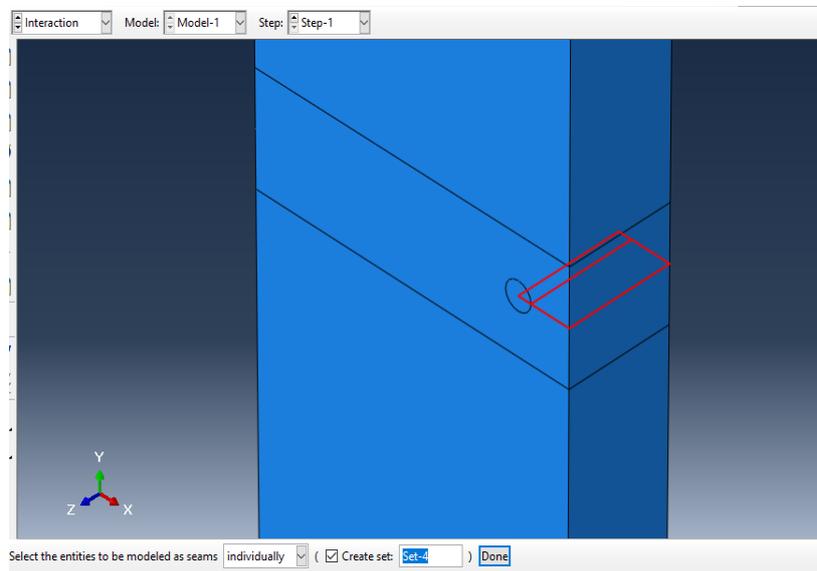


Figure III.13 : Assign seem

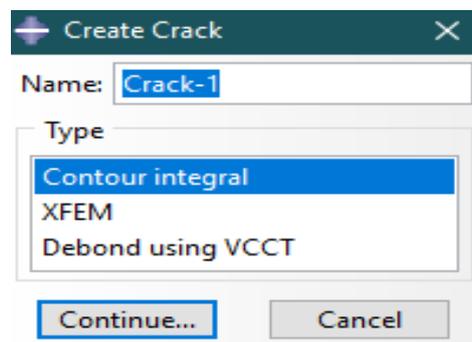


Figure III.14 : Création d'une fissure.

Après la création de la fissure on entre la direction de sa propagation

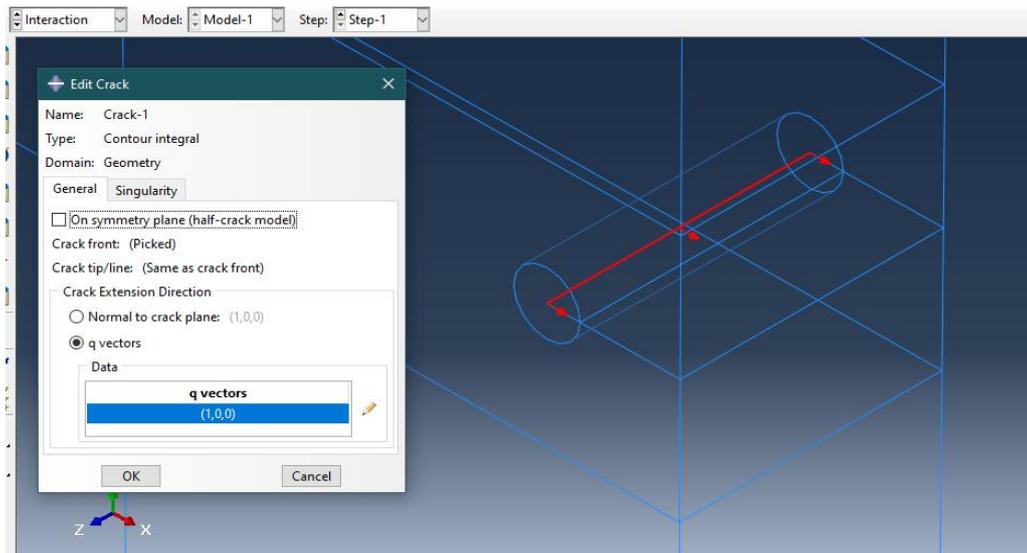


Figure III.15 : Position de fissures et direction de sa propagation.

Après la création de la fissure il est nécessaire d'activer là on le module step comme le montre la figure III.16 :

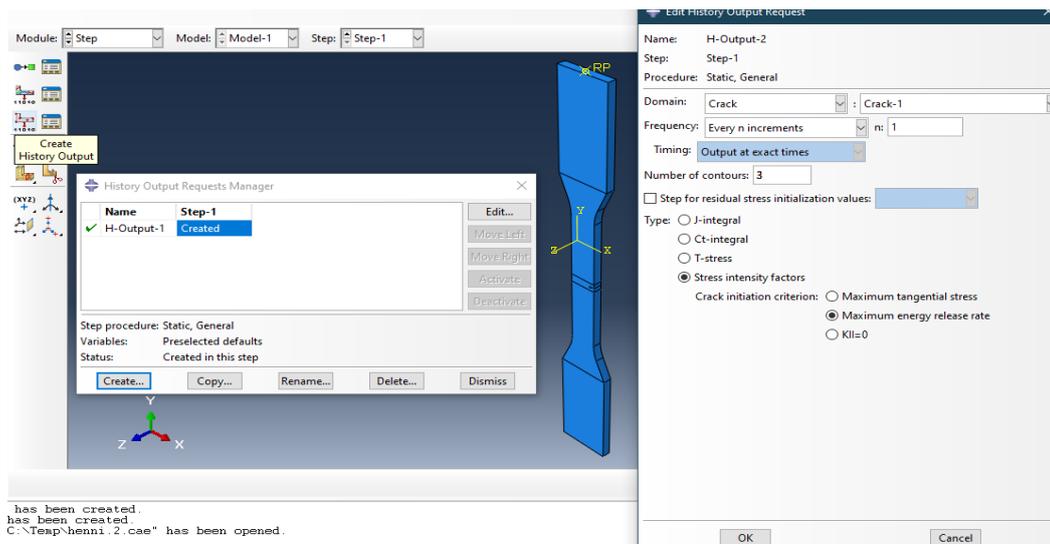


Figure III.16 : Paramètres de la fissure.

Module charge appliqué : Le module charge permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs (Figure III.17). Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des type d'analyse.

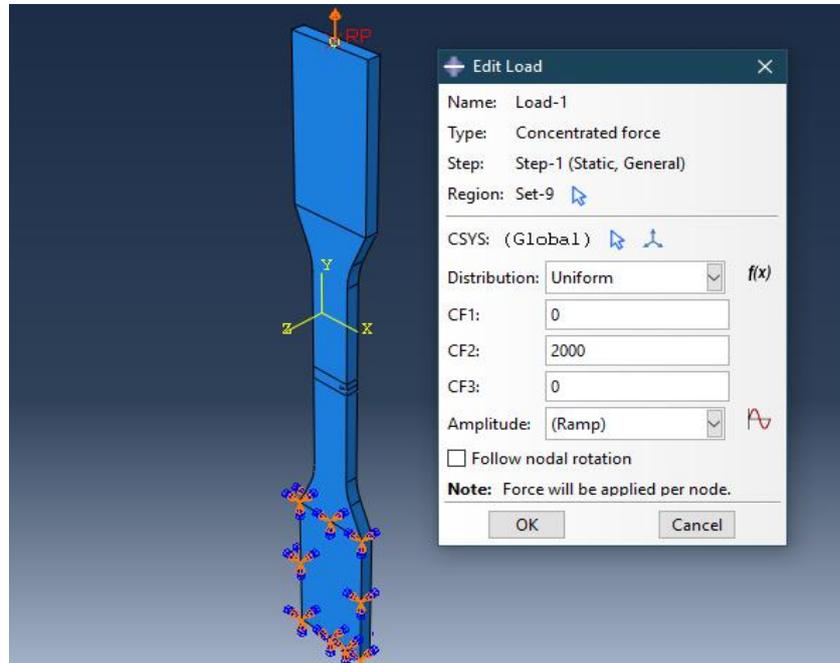


Figure III.17 : Application des charges.

Module Maillage : Le module maillage contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. (Figure III.18)

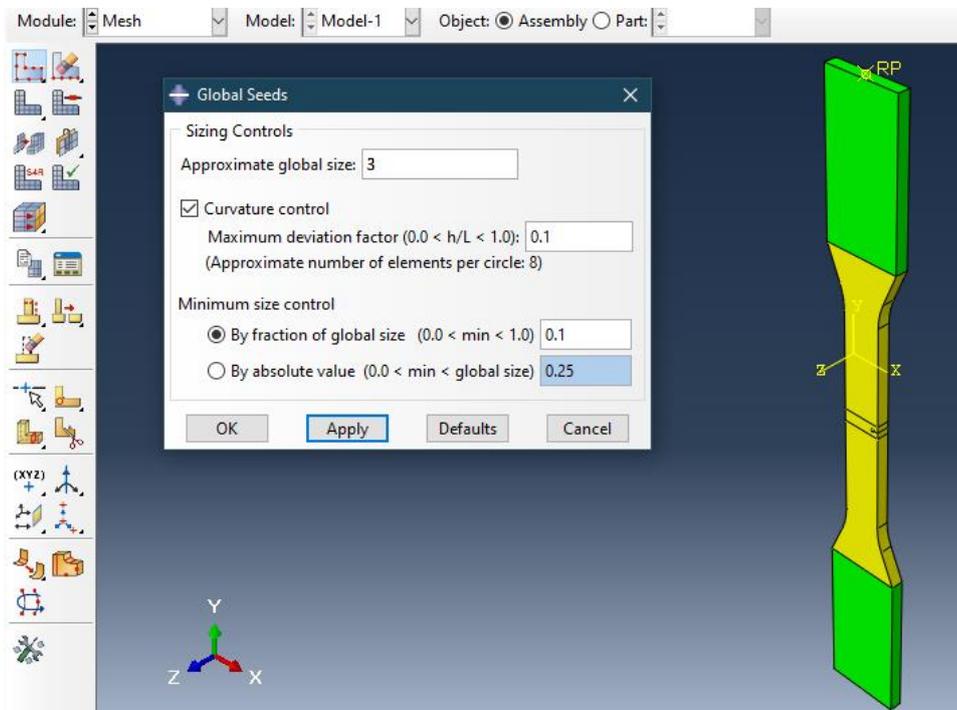


Figure III.18 : Création de maillage.

La figure III.19 représente un maillage structuré pour notre pièce.

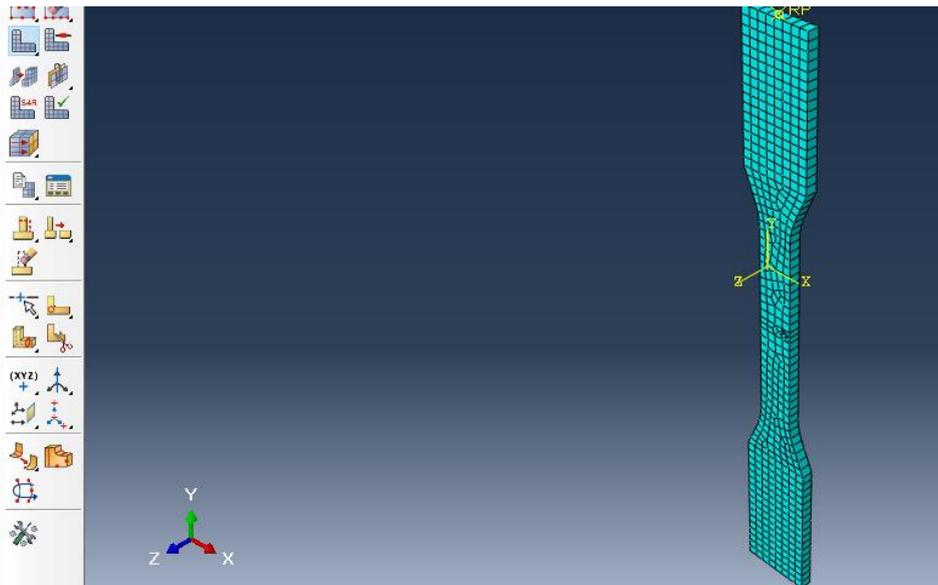


Figure III.19 : Maillage structuré.

Module Travail (Calcul) : Le « lancement » du calcul est classique (Figure III.20), Après avoir lancé le calcul, nous pouvons suivre l'évolution du procès en cliquant sur Monitor : nous pouvons ainsi avoir en temps réel l'évolution des incréments de chargement et apprécier la convergence des calculs.

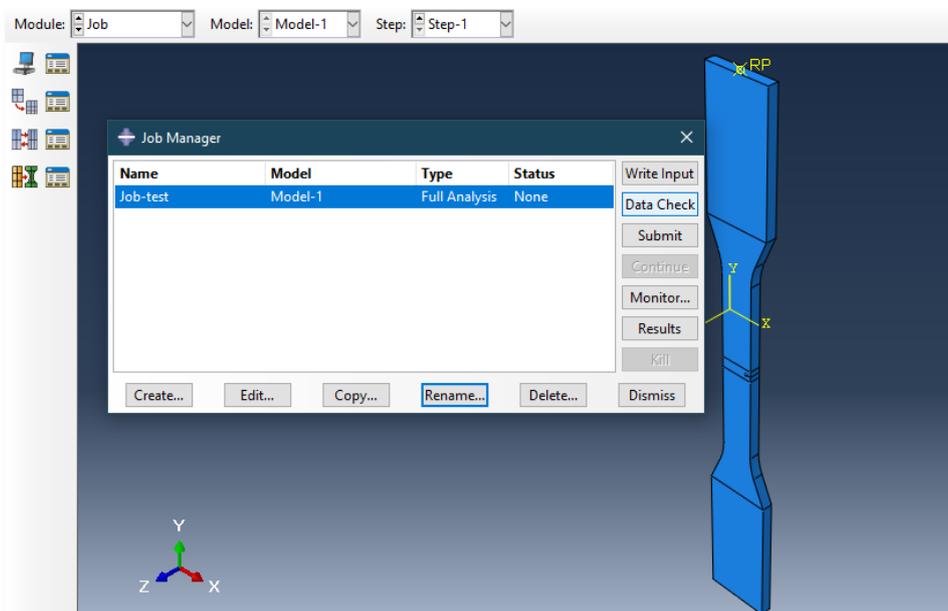


Figure III.20 : Lancement de calcul.

Module Visualisation : Ce module permet de visualiser les résultats de modèle obtenu, les courbes de charges, les déplacements, contraintes et les déformations, comme illustré sur la figure III.21.

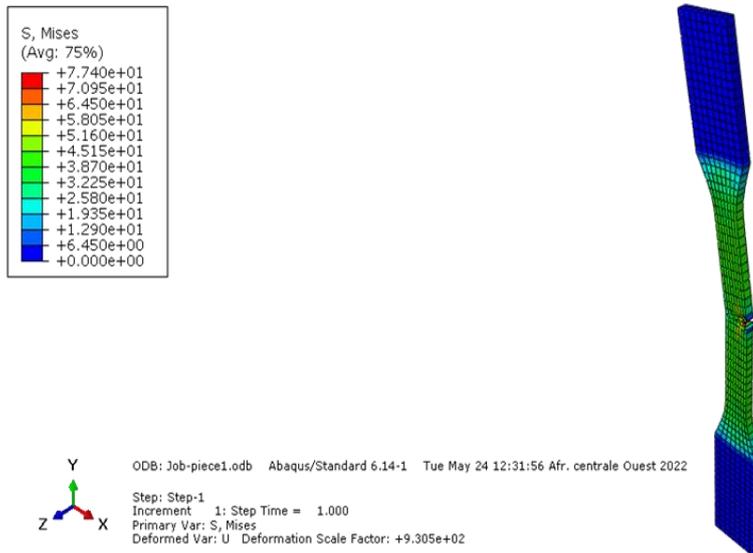


Figure III.21 : Visualisation de la pièce.

11. Les éléments dans ABAQUS

Un très large choix d’éléments (plus de 100) comme indiquer dans la Figure III.22, chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre des nœuds, intégration ; Possibilités aussi de programmer de nouveaux éléments (en Python, FORTRAN, sur ABAQUS/Standard). [21]

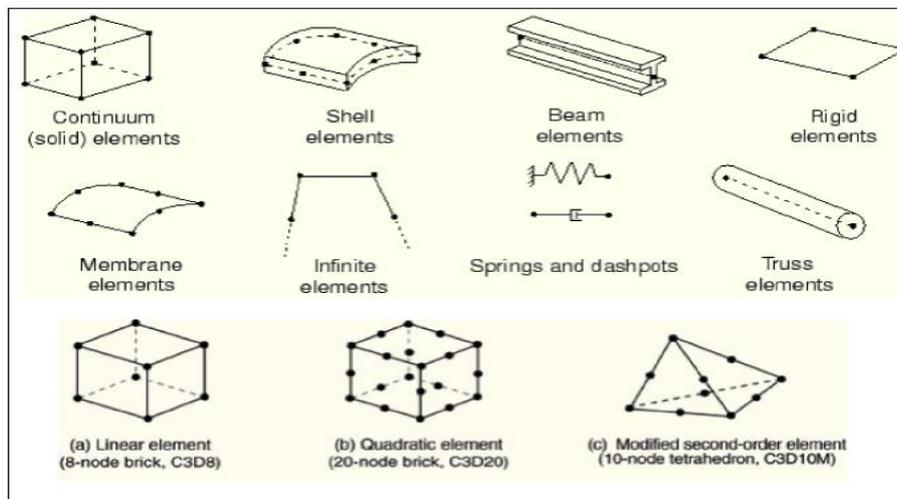


Figure III.22 : Exemple sur les types éléments dans Abaqus[20]

12. Problématique

L'un des principaux objectifs de toute fabrication de soudure est d'éviter les défauts de soudure, en particulier les fissures. Les fissures sont les plus dangereux de tous les défauts de soudure et sont inacceptables dans la plupart des cas, et pour connaître les effets des fissures sur les joints soudés nous présentons une analyse statique sur une éprouvette de soudage normalisé soumise à un chargement mécanique axiale, en faisant varier les différents paramètres afin de montrer l'influence de ces derniers sur le comportement de l'éprouvette et la jonction soudées.

13. Modélisation de la pièce

Nous avons dessiné et modélisés notre éprouvette par logiciel ABAQUS comme il a été montré dans les étapes précédentes, ses propriétés sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Propriétés du matériau utilisé

Matériau	Module de Young	Coefficient de poisson
Acier	210000 N.mm ²	0.3
Joint soudé	100000 N.mm ²	0.3

14. Résultats de Simulation :

1. Analyse statique

A partir de l'analyse statique (éprouvette soumise à un chargement mécanique axiale), on peut déterminer les déplacements, contraintes, déformations et les facteurs d'intensité de contrainte de l'éprouvette simulée.

- Contraintes moyennes (Equivalente)

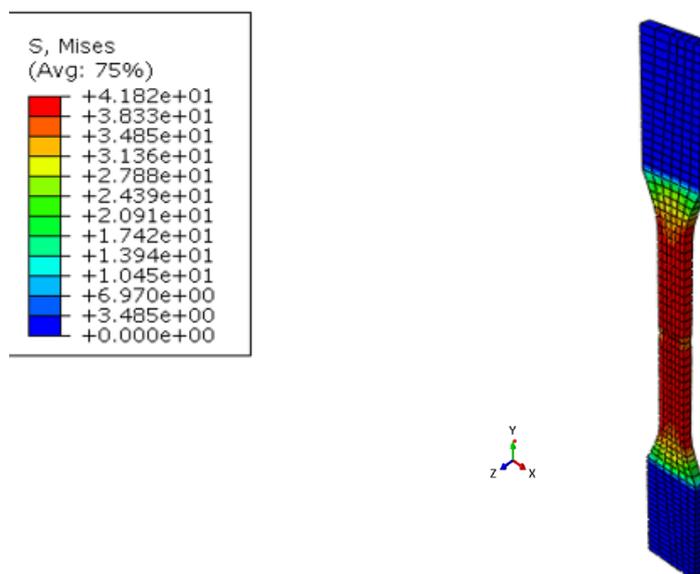


Figure III.23 : Contraintes équivalentes (Von Mises) d'une pièce non fissurée.

La figure III.23 montre le résultat de la distribution de contraintes équivalente de Von Mises dans l'éprouvette normalisé et soudée sans prise en considération la présence de la fissure, et soumise à une force de traction $F=100$ KN. En outre, la jonction soudée est située en centre du spécimen avec les caractéristiques mécaniques indiqués précédemment. On remarque d'après la visualisation de résultats que la concentration de contraintes moyenne présentent dans le centre de l'éprouvette et se focalise au niveau du joint d'assemblage et elle prend une valeur maximale égale à 41.82 MPa.

- Selon les directions (contraintes) axiales/planes :

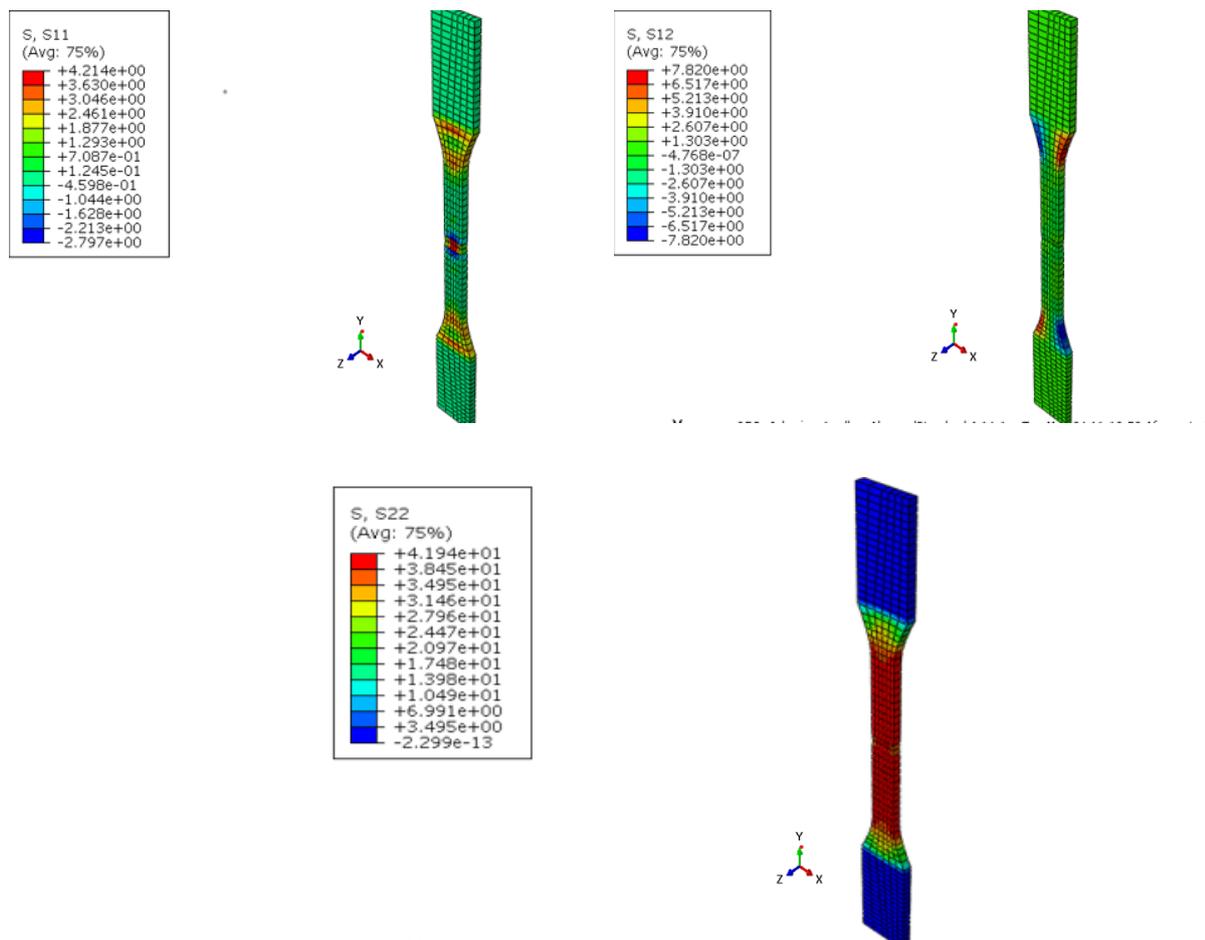


Figure III.24 : Contraintes axiales et de cisaillement.

La variation des contraintes axiales (S_{11} et S_{22}) et de cisaillement (S_{12}) dans l'éprouvette soudé, et soumise à un chargement de traction uni-axiales sont représentés dans la Figure III.24. Les résultats de la simulation montrent que les sollicitations se focalisent autour du joint soudé qui se situe au centre pour les deux contraintes axiales (S_{22}) et (S_{11}) et prennent une valeur de 41.94 MPa, 4.21 MPa respectivement. Et une valeur ultime pour la contrainte de cisaillement (S_{12}), qui s'apparaisse dans les deux bords libres d'arrondis supérieur droit et inférieur gauche de l'éprouvette avec une valeur maximale égale à 7.82 MPa.

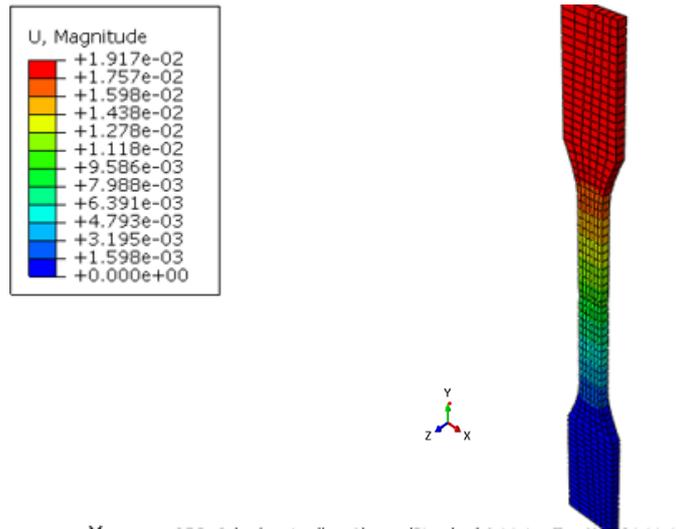


Figure III.25 : Déplacement transversale moyen dans l'éprouvette

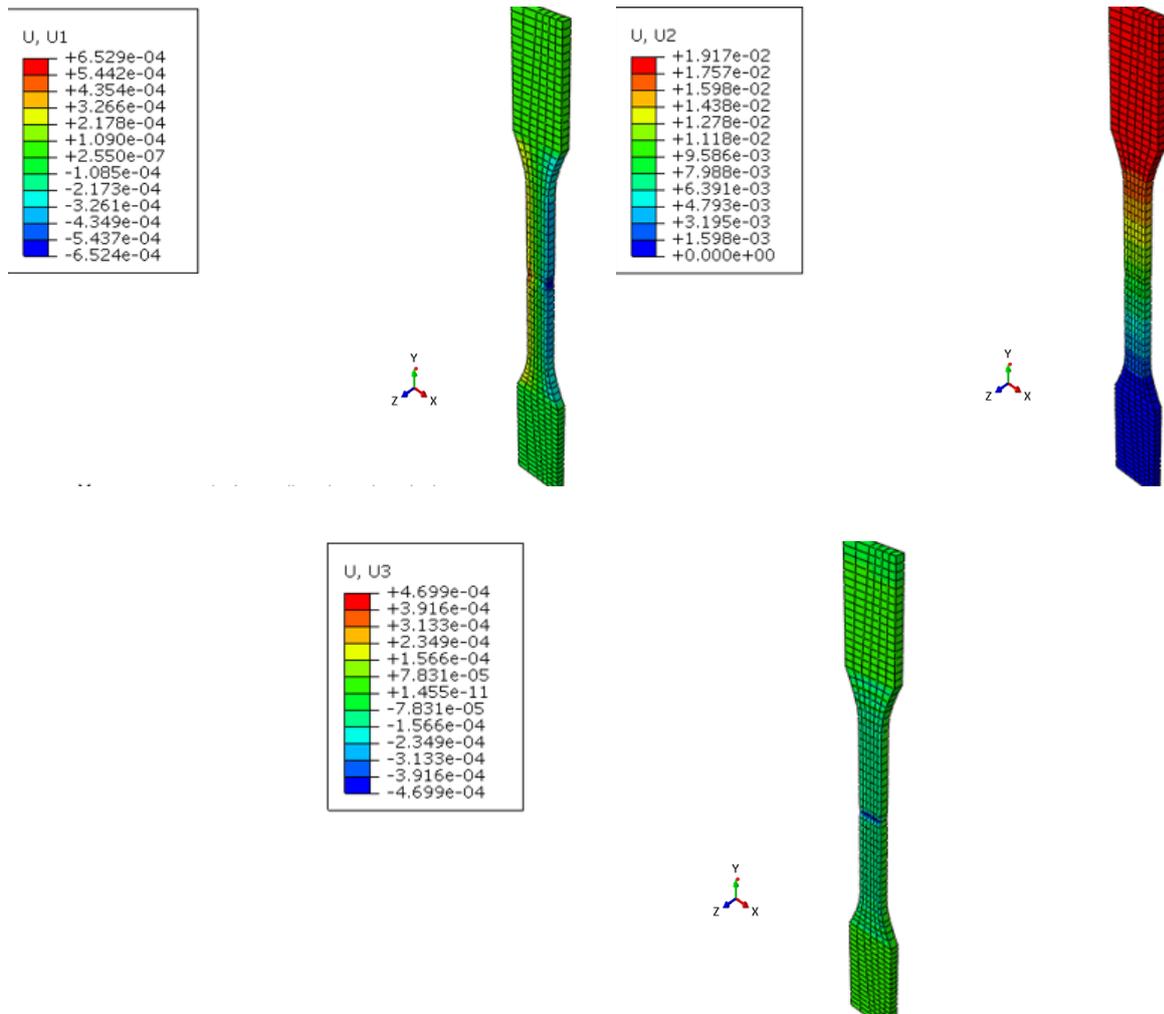


Figure III.26 : Distribution des contraintes selon les trois directions.

Les résultats de simulation concernant le déplacement moyen U ainsi que les déplacements axiaux suivant les directions du repère tris dimensionnelle $U1$ (suivant x), $U2$ (suivant y), et $U3$ (suivant z), liés à l'éprouvette étudié sont représentés dans les figures III.25 et III.26. On voit que le déplacement atteint sa valeur maximale dans la partie supérieure de l'éprouvette ou la charge est appliqué, et cela pour les différents types de déplacements (U , $U1$, $U2$ et $U3$). Par ailleurs, on observe aucune déformation au niveau du cordon de soudure, ce qui montre l'efficacité de remplir ses fonctions ainsi la bonne modélisation et la simulation du modèle étudié.

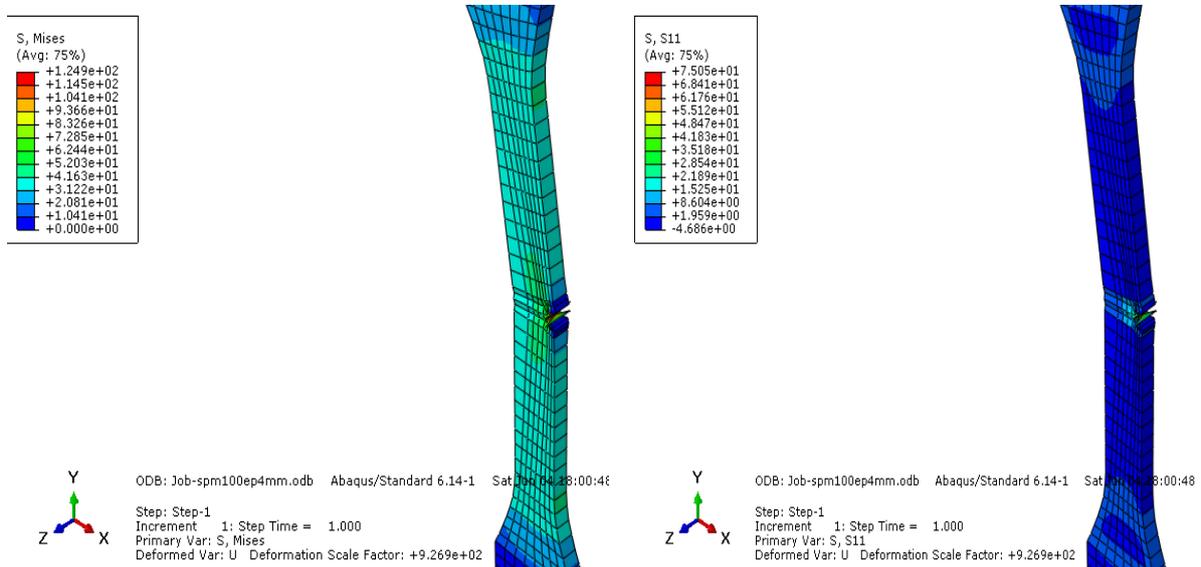
2. Etude paramétrique

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de quelques paramètres, tels que (la taille, l'orientation et la position de fissure), et les paramètres de la pièce (propriété du matériel, diamètre de cordon de soudure et l'épaisseur de la pièce), qui ont un effet significatif sur la performance des assemblages soudés.

1. Influence de la taille de fissure

Pour les tailles de fissures on a pris trois valeurs (2,3, et 4 mm), afin d'étudier leurs influences sur le comportement mécanique de ces joints soudés.

- Fissure de 2 mm :



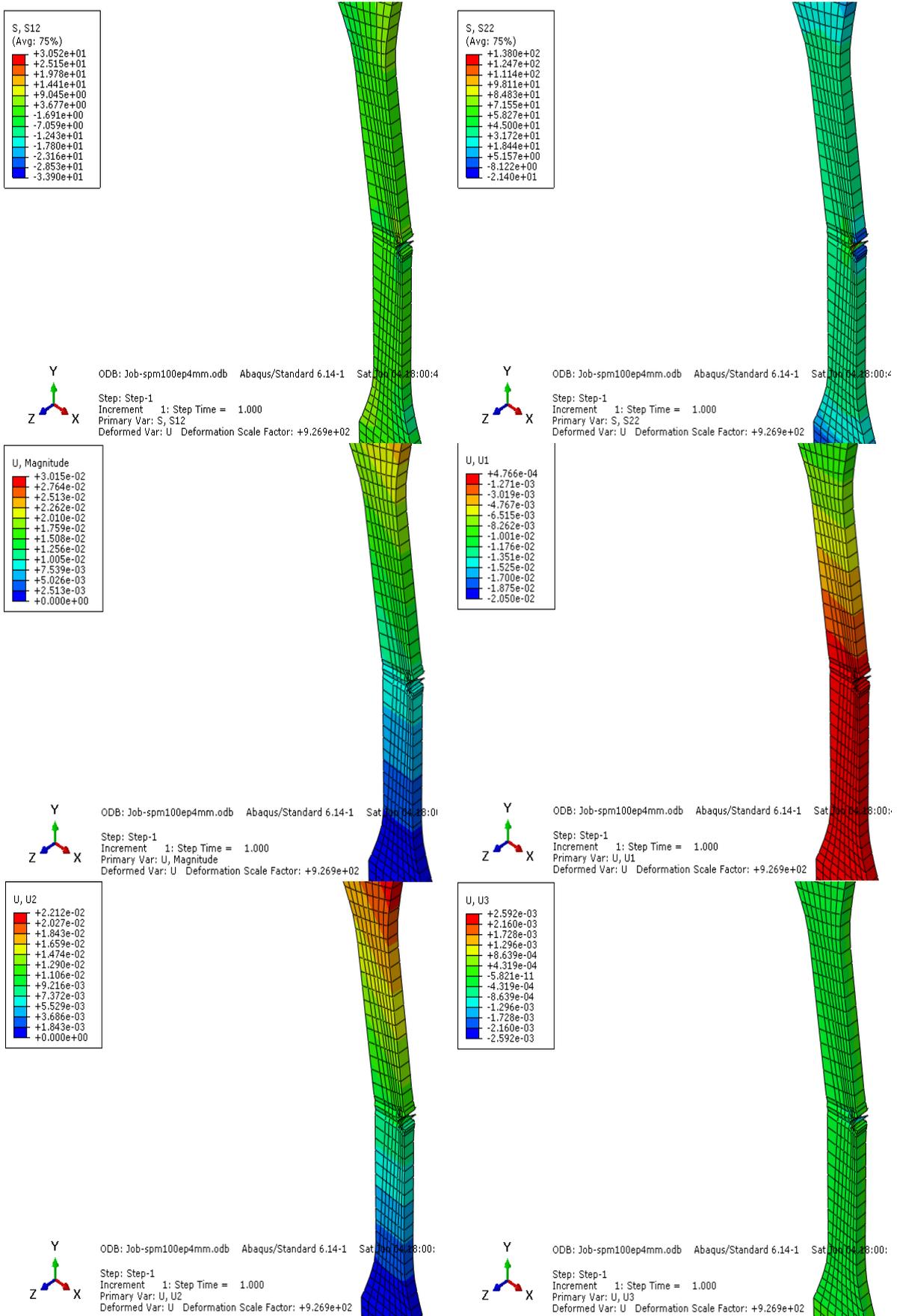
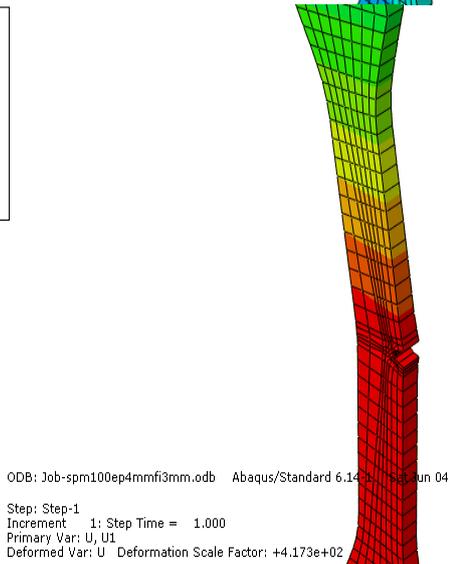
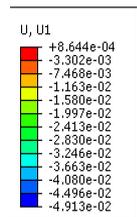
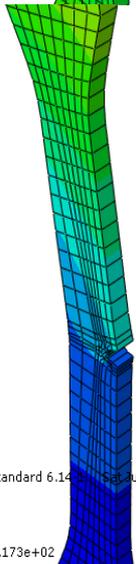
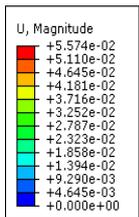
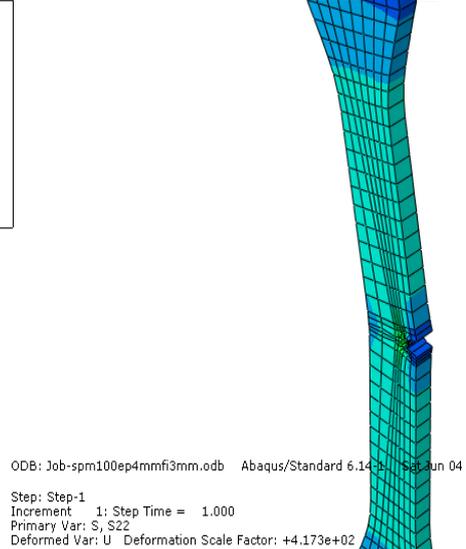
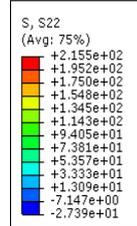
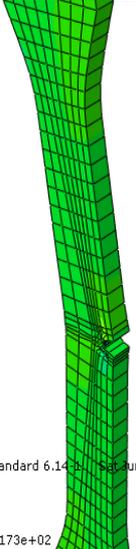
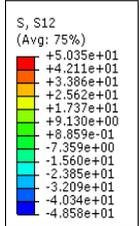
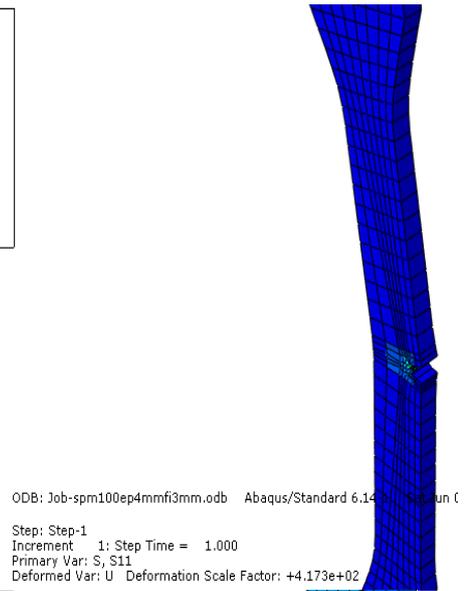
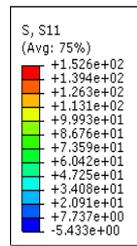
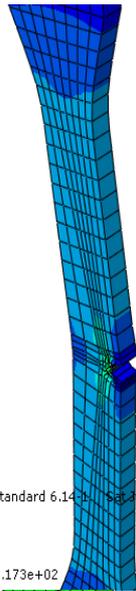
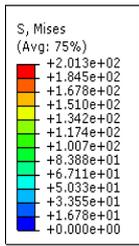


Figure III.27 : Contraintes axiales pour fissure de 2 mm

▪ Fissure de 3 mm :



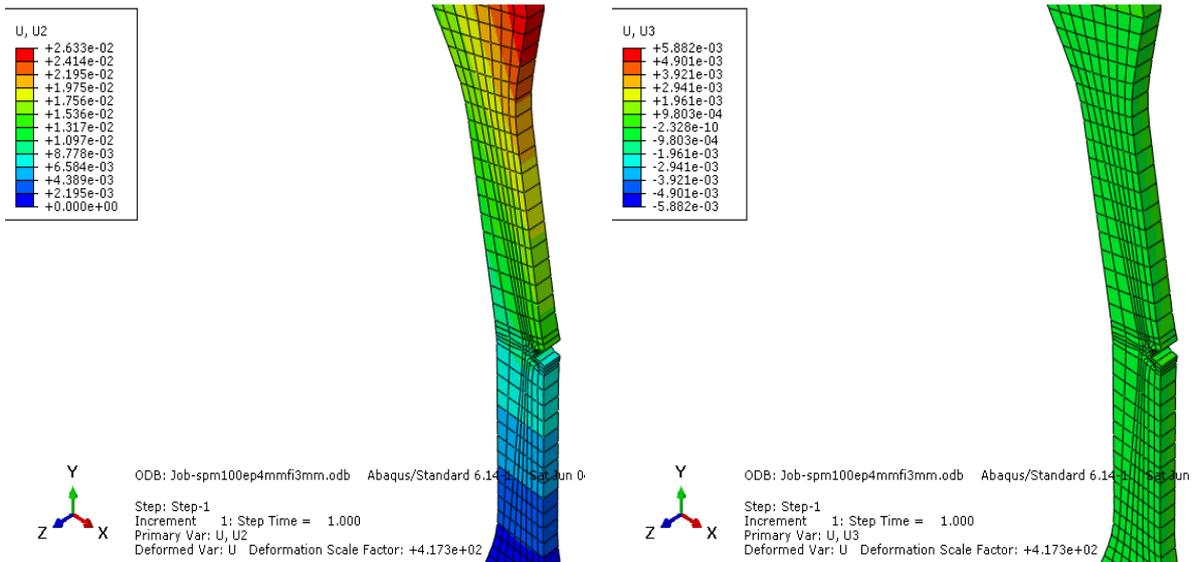
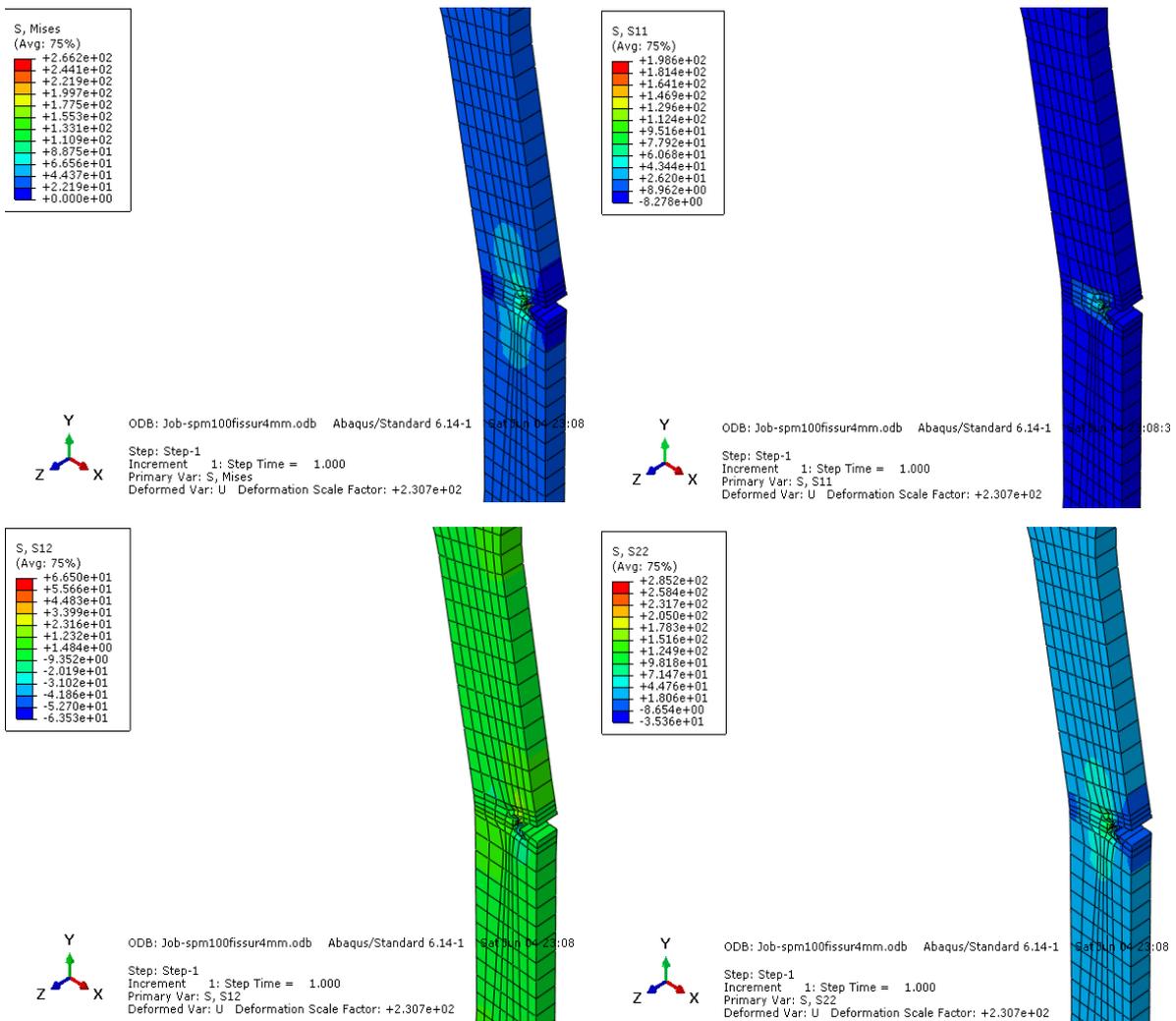
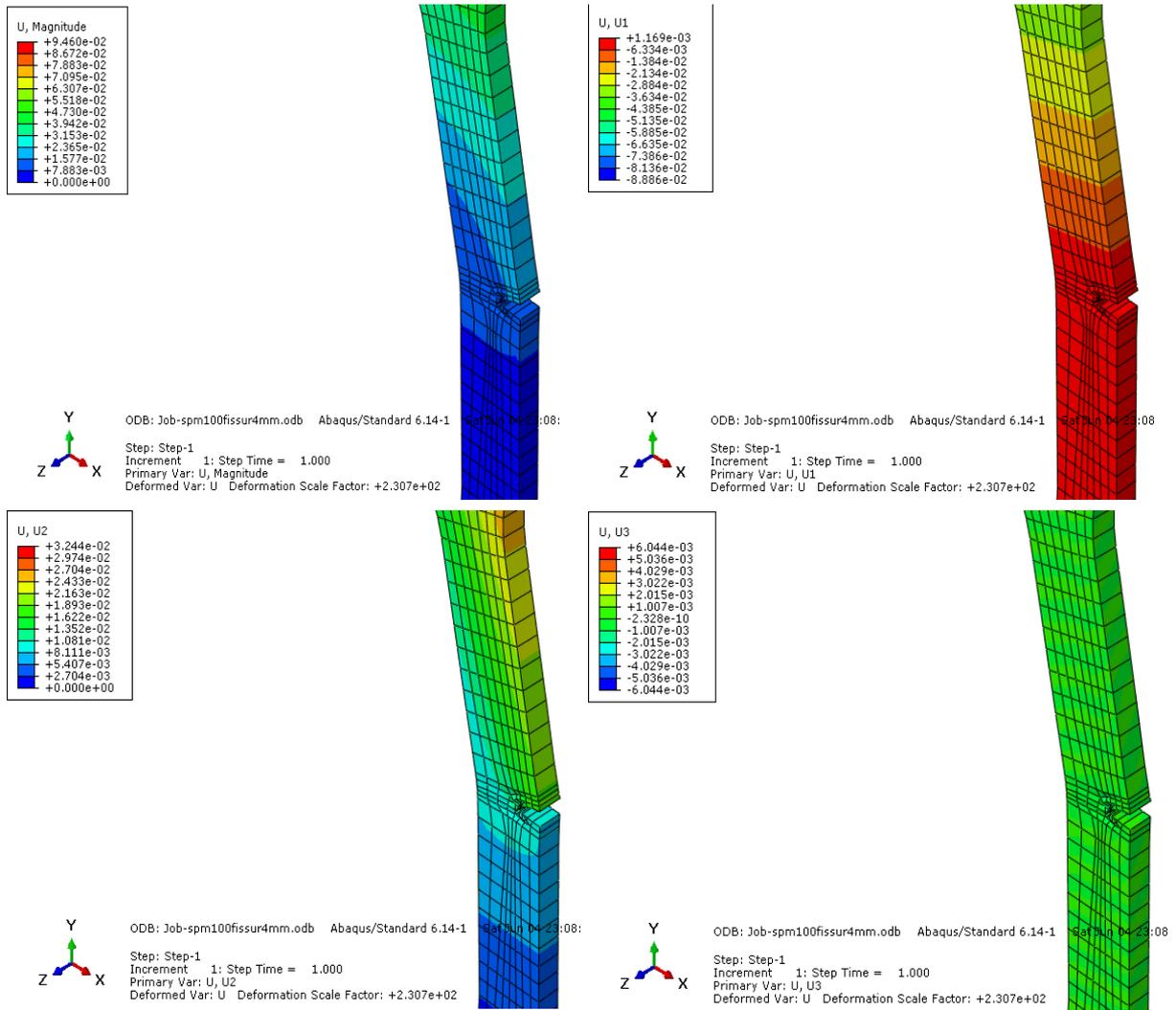


Figure III.28 : Contraintes et déplacement, cas fissure de 3 mm

■ Fissure de 4 mm :





Figures III.29 : Contraintes et déplacement, cas de fissure 4mm

L'influence de la présence d'une fissure dans le cordon de soudure ainsi que sa taille donnée par ($a = 2, 3$ et 4 mm) sur les valeurs maximales de S Mises, S_{11} , S_{22} et S_{12} , ainsi pour les déformations U_{moy} , U_1 , U_2 , U_3 est présenté dans les Figures III.27, III.28, III.29 respectivement. En premier lieu, nous constatons que la présence de la fissure affect considérablement le comportement mécanique de l'éprouvette soudée, ainsi sa présence provoque une incrémentation significative dans les valeurs de contraintes et déformation par rapport a une éprouvette qui n'a pas subi des défauts de fissures. En plus, l'augmentation de la taille de la fissure induit une augmentation dans les valeurs de contraintes résiduelles et déformations dans tous les types d'éprouvettes illustrés en haut.

- Le facteur d'intensité de contrainte K_I

Dans le tableau suivant, nous présentons la valeur d'intensité de contrainte K_I lié aux différentes tailles de fissures prises en considération dans cette étude :

Tableau III.3. Facteur d'intensité de contrainte pour les 3 tailles

Contours	1	2	3
K_I fissure de 2 mm	-20.87	-26.29	-18.39
K_I fissure de 3 mm	-11.35	-19.67	-16.96
K_I fissure de 4 mm	-12.58	-21.26	-14.86

Le Tableau III.3 présente les différentes valeurs du facteur d'intensité de contrainte du mode I pour les trois valeurs liées à la taille de la fissure en prenant en considération trois contours d'intégrations. Nous remarquons qu'il y a un changement de la valeur d'intensité de contrainte K_I dans les trois cas de taille de fissure, donc il y a une influence de taille de fissure sur la valeur d'intensité et sa valeur est proportionnelle avec l'augmentation de la longueur de la fissure a .

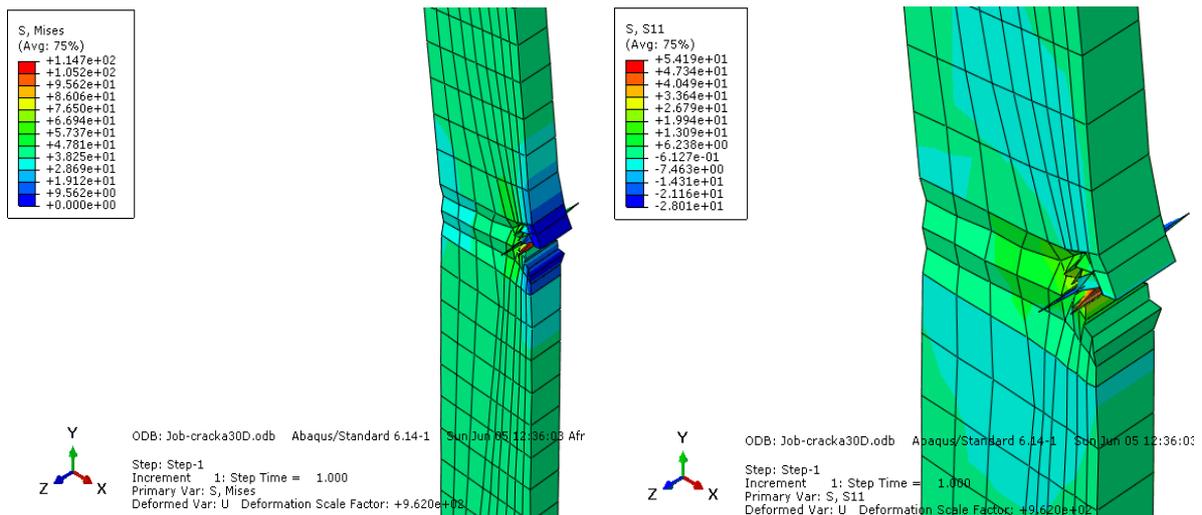
2. Influence de l'orientation de fissure

Pour ce cas on a pris 3 angles (0° , 30° et 45°)

- Fissure horizontale 0° :

Dans ce cas on a déjà fait la simulation comme il est montré dans la section précédente, figure III. 27 (même résultat).

- Fissure orientée de 30° :



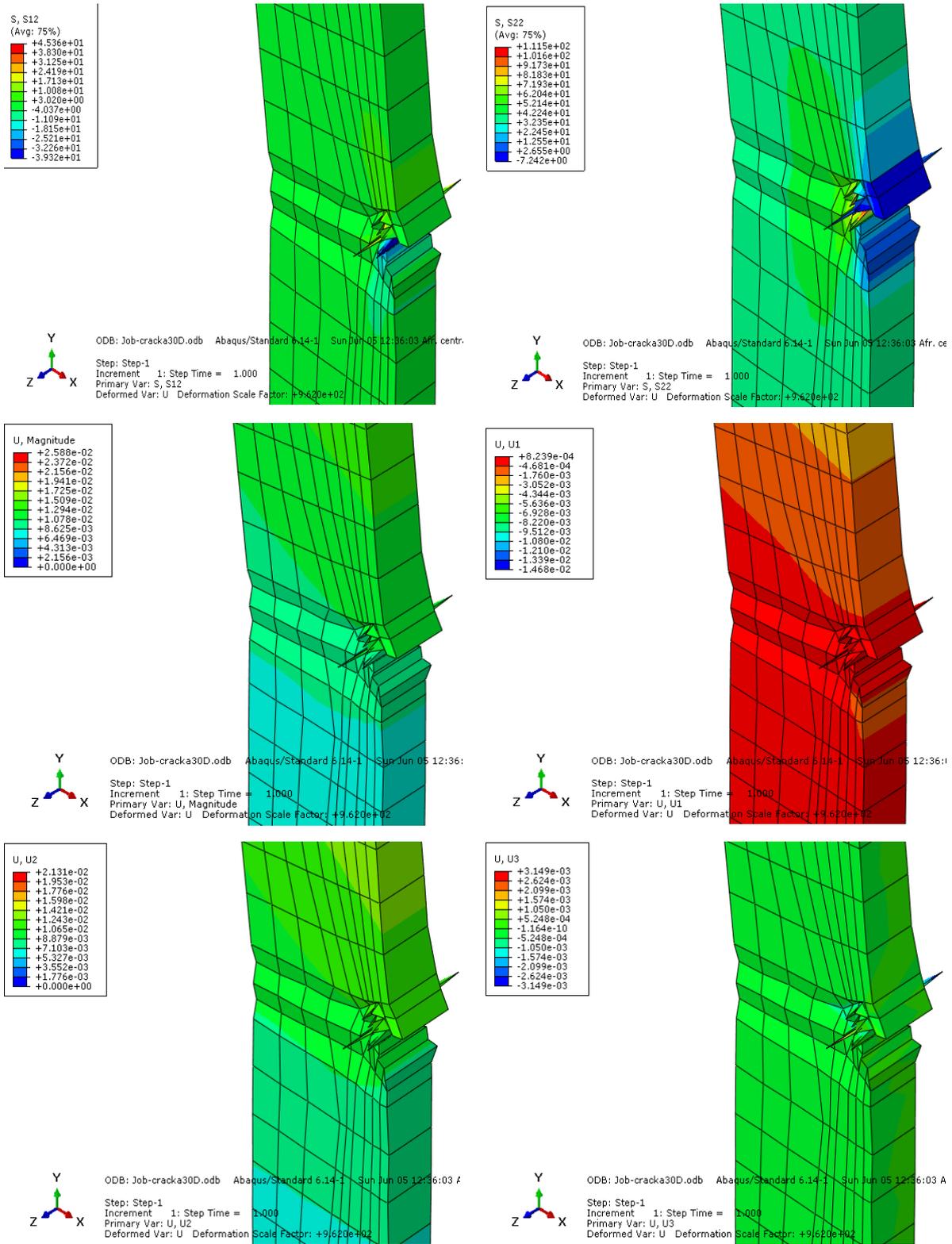
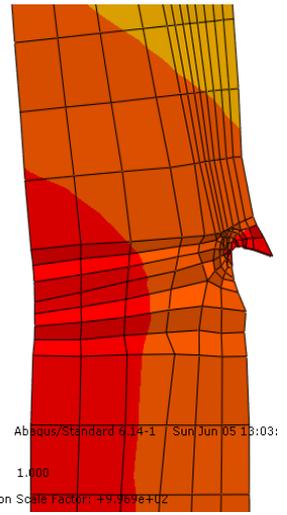
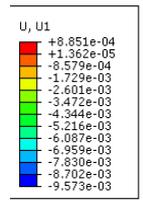
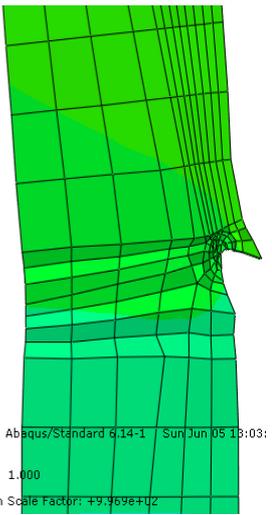
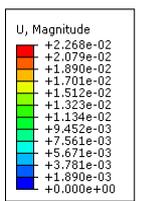
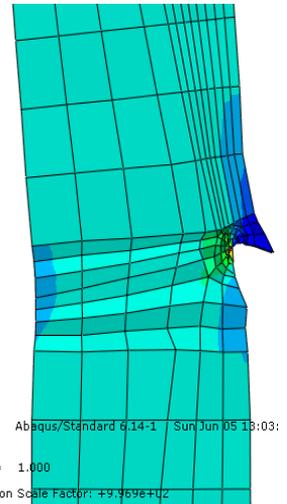
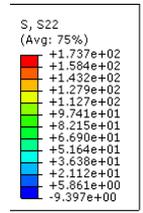
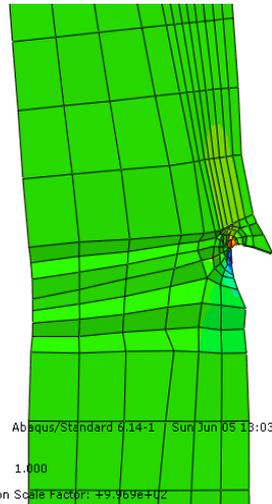
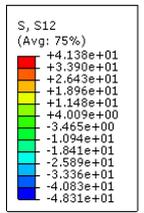
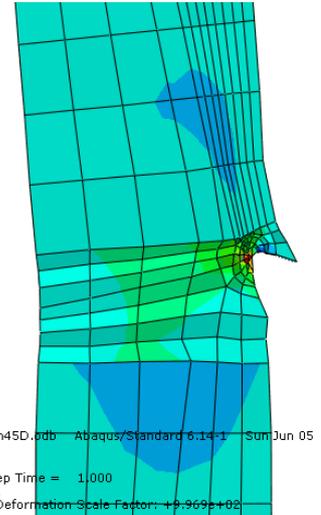
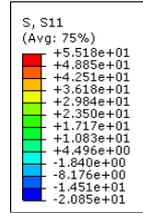
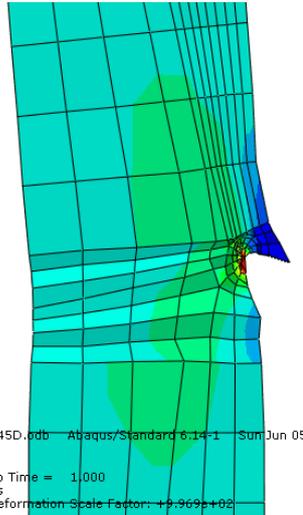
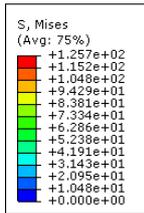


Figure III.30 : Contraintes et déplacements, cas fissure orientée de 30°

■ Fissure orientée de 45° :



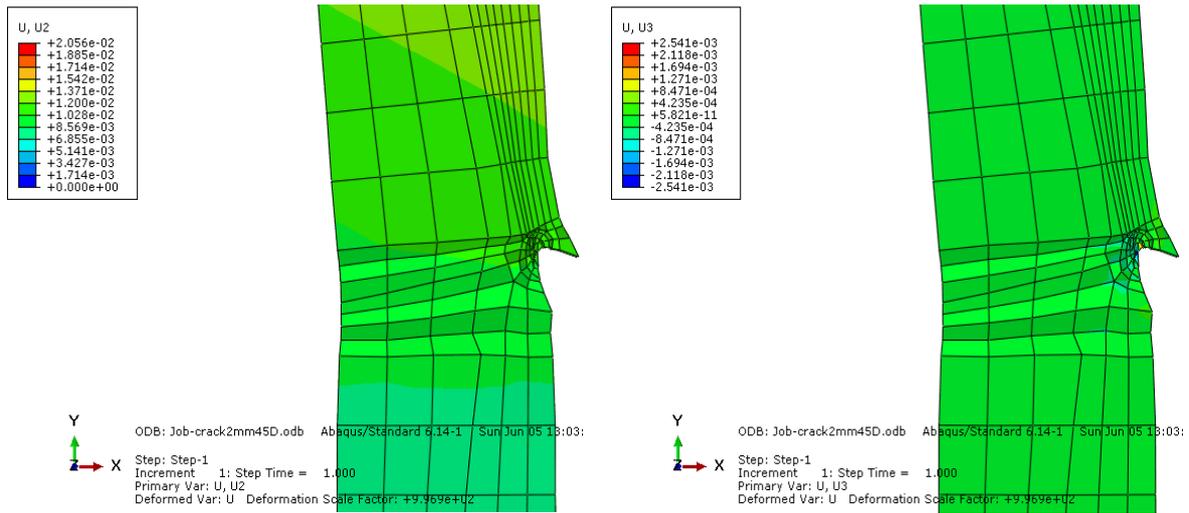


Figure III.31 : Contraintes et déplacements, cas fissure orientée de 45°.

L’une des particularités importantes des fissures, c’est qu’elles peuvent s’orienter facilement lors de leurs propagations. Les Figures III.30 et III.31 présentent cet effet très critique dans les jonctions soudées. On constate d’après ces figures que la variation de l’angle caractérisant l’orientation de la fissure a un impact significatif sur les valeurs maximales des déformations et contraintes dans l’éprouvette en investigation, ce qui montre leurs effets et devrait être pris en considération lors de la phase de conception.

- Le facteur d’intensité de contrainte K_I

Les facteurs d’intensité de contrainte K_I pour les trois cas de l’orientation de la fissure sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4: Facteurs d’intensités de contrainte pour les trois orientations

Contour	1	2	3
K_I de fissure horizontal	-20.87	-26.29	-18.39
K_I de fissure orienté 30°	-1.660	-6.856	-2.127
K_I de fissure orienté 45°	-5.652	-12.51	-15.91

La variation des facteurs d’intensités de contrainte K_I en fonction du changement de l’orientation de la fissure par différents angles sont exhibés dans le Tableau III.4 pour trois contours d’intégrations. On remarque l’augmentation importante dans les valeurs maximales du K_I avec le changement de l’angle de la fissure en parallèle avec l’augmentation du nombre de contour.

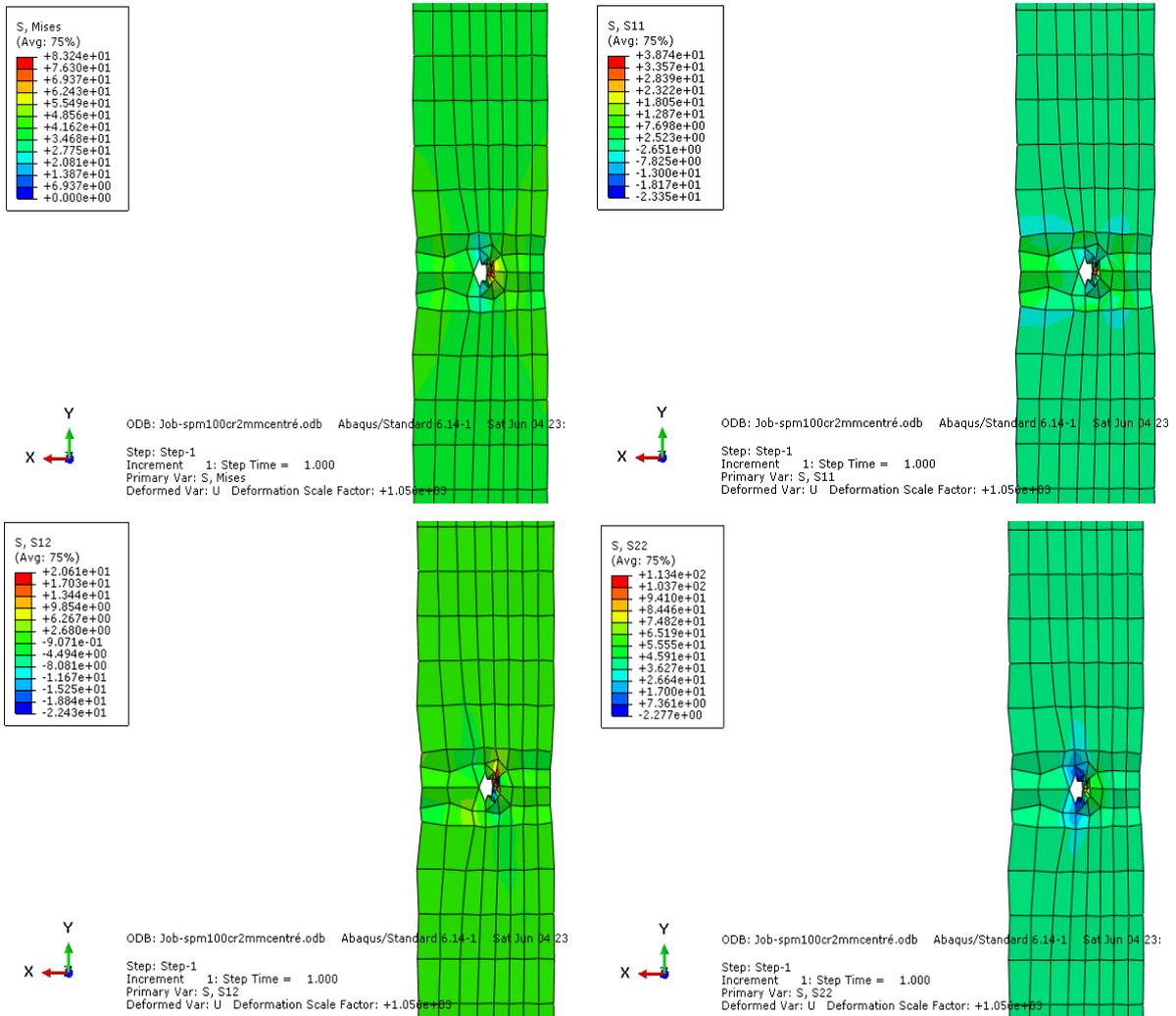
3. Position de fissure

Pour ces cas on a pris trois positions, le premier cas on a préparé la fissure dans le côté droit, et pour le deuxième cas la fissure est en centre de joint soudée, et dans le dernier cas la fissure est à 8.5mm vers la gauche.

- Fissure dans le côté droit :

Dans ce cas on a déjà fait la simulation comme il est montré dans la section précédente, figure III. 27 (même résultat).

- Fissure centré :



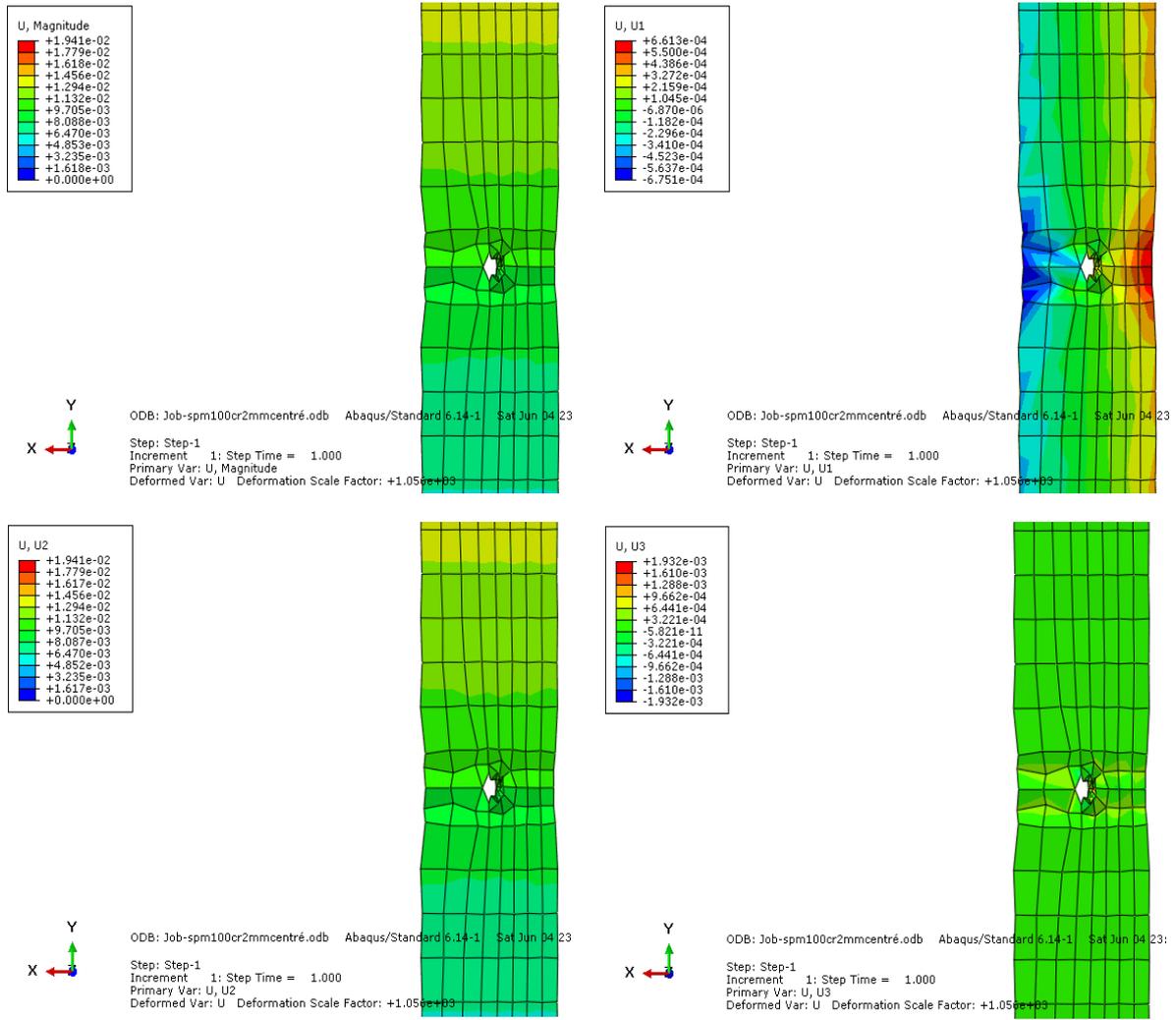
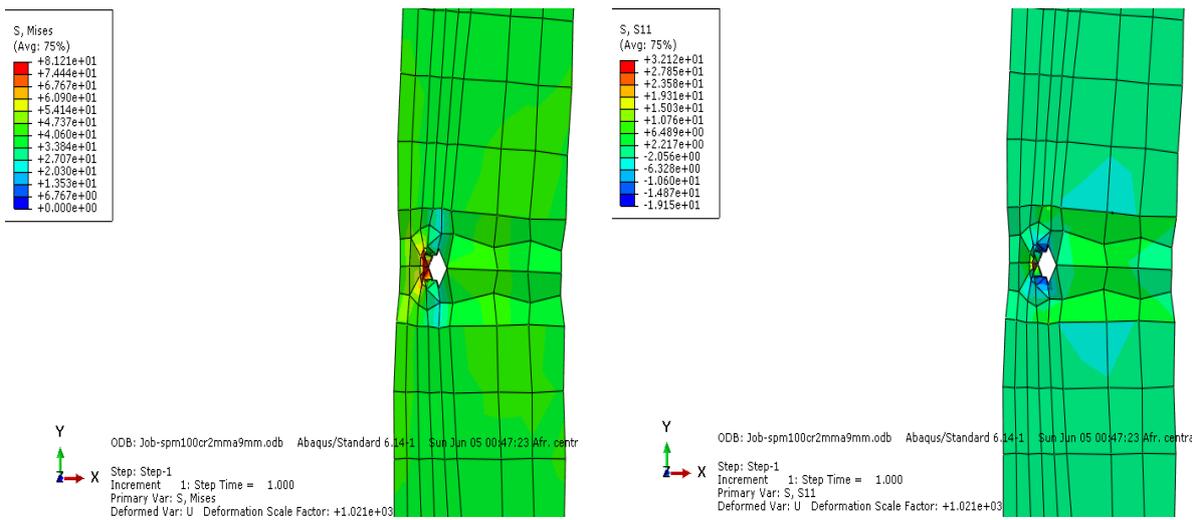


Figure III.32 : contrainte et déplacement de fissure centré.

Fissure à 8.5 mm vers la gauche :



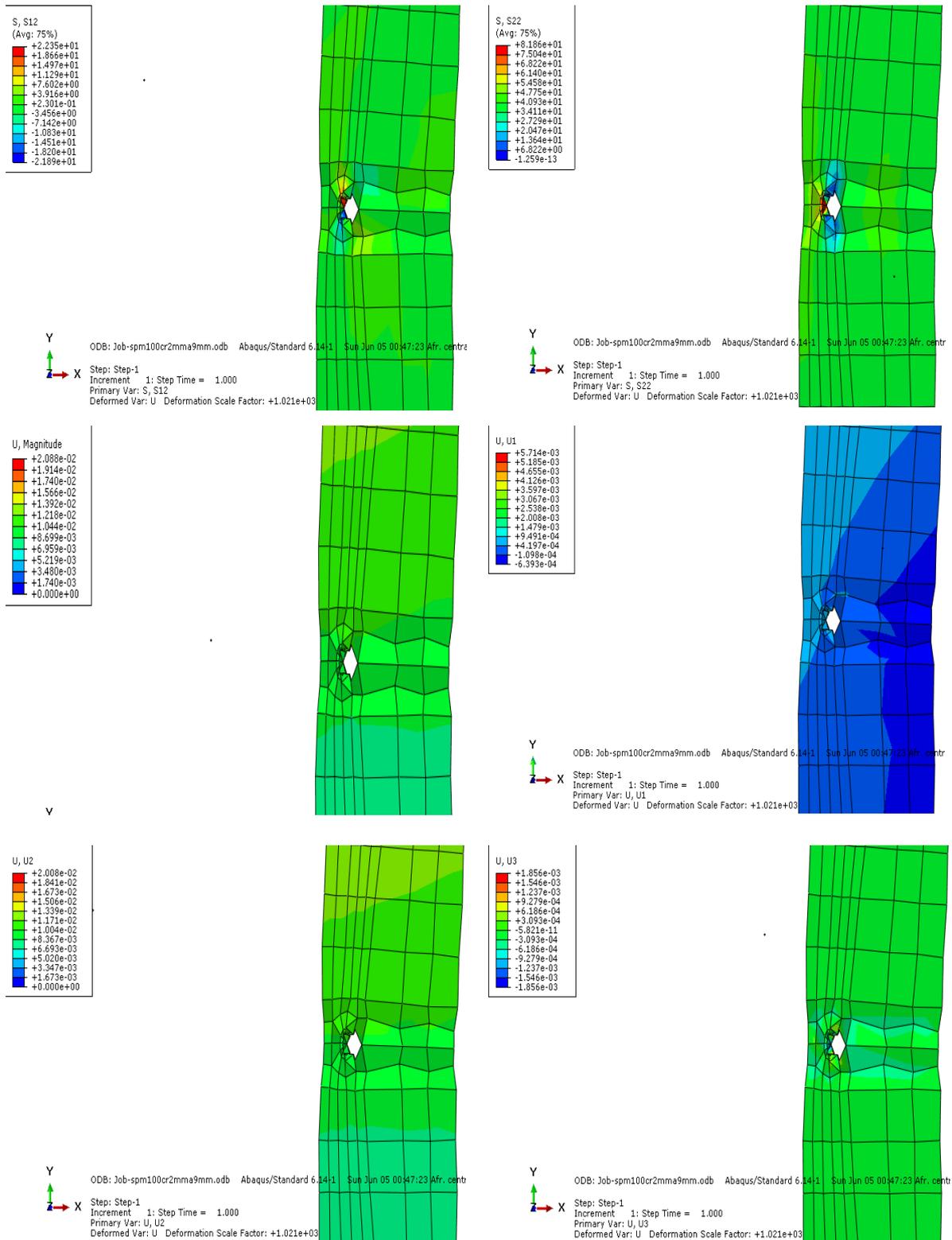


Figure III.33 : contrainte et déplacement de fissure côté gauche.

L'influence de la présence d'une fissure dans le cordon de soudure ainsi que sa position donnée par (fissure à droit, centre, et à 8.5mm vers la gauche) sur les valeurs maximales de S Mises, S11, S22 et S12, ainsi pour les déformations Umoy, U1, U2, U3 est présenté dans les Figures III.27, III.32, III.33 respectivement. En premier lieu, nous constatons que la présence

de la fissure affect considérablement le comportement mécanique de l'éprouvette soudé, ainsi sa présence provoque une incrémentation significative dans les valeurs de contraintes et déformation par rapport a une éprouvette qui n'a pas subi des défauts de fissures. En plus, le changement de position de la fissure induit une augmentation dans les valeurs de contraintes résiduelles et déformations dans tous les types d'éprouvettes illustrés en haut.

- Le facteur d'intensité de contrainte K_I :

Les facteurs d'intensité de contrainte K_I pour les trois cas de changement de position de la fissure sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5: Facteurs d'intensités de contrainte pour les trois positions

Contours	1	2	3
K_I de fissure initial	-20.87	-26.29	-18.39
K_I de fissure centré	-8.238	1.946	24.37
K_I de fissure à 8.5 mm	-6.419	0.7194	23.89

La variation des facteurs d'intensités de contrainte K_I en fonction du changement de l'orientation de la fissure par différents angles sont montrés dans le Tableau III.6 pour trois contours d'intégrations. On remarque l'augmentation importante dans les valeurs maximale du K_I avec le changement de position de la fissure en parallèle avec l'augmentation du nombre de contour.

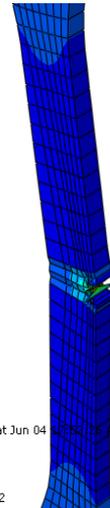
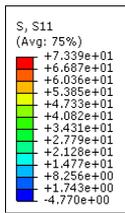
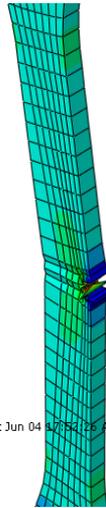
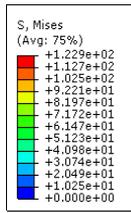
4. Changement de la propreté de matériel

Dans cette étude on va changer le module de Young de joint soudé.

- 1^{er} cas : module de Young est 100 Mpa

Dans ce cas on a déjà fait la simulation comme il est montré dans la section précédente, figure III. 27 (même résultat).

- 2^{em} cas : module de Young est 90 Mpa :



Y
Z X

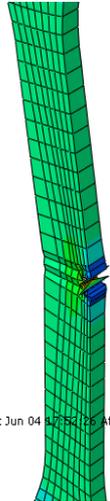
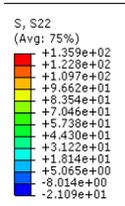
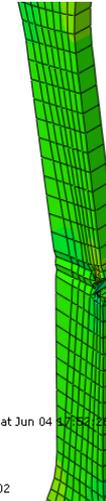
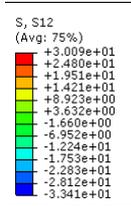
ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02

Y
Z X

ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02



Y
Z X

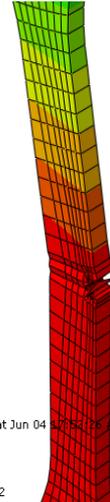
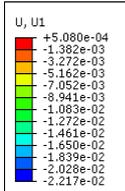
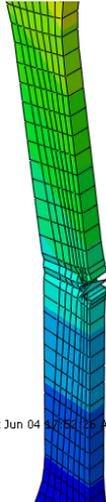
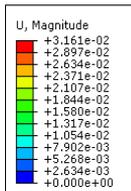
ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S12
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02

Y
Z X

ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02



Y
Z X

ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02

Y
Z X

ODB: Job-spm90Mpa.odb Abaqus/Standard 6.14-1 Sat Jun 04 17:55:26 Afr.

Step: Step-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: U, U1
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +9.100e+02

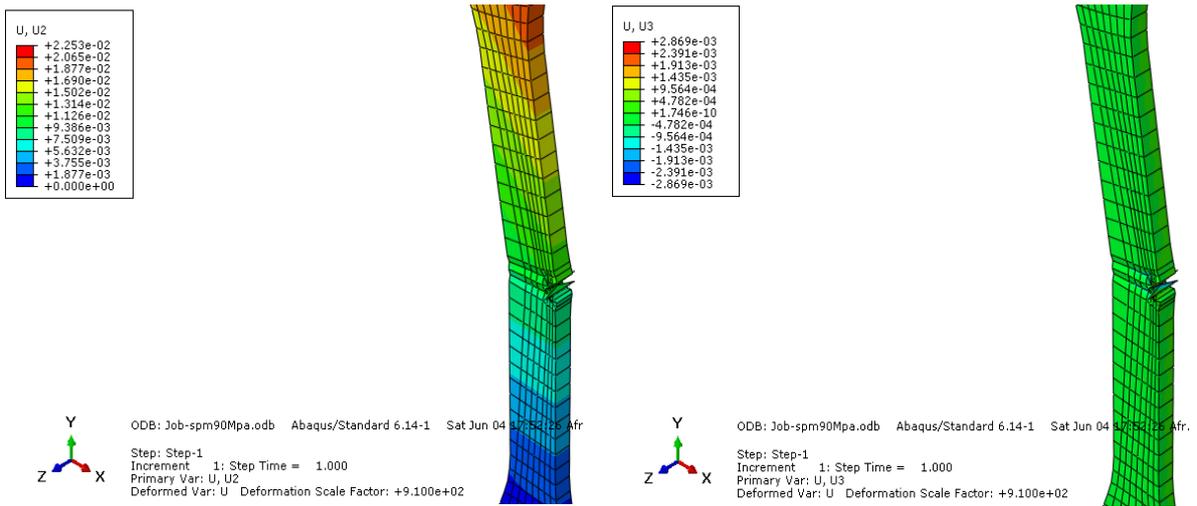
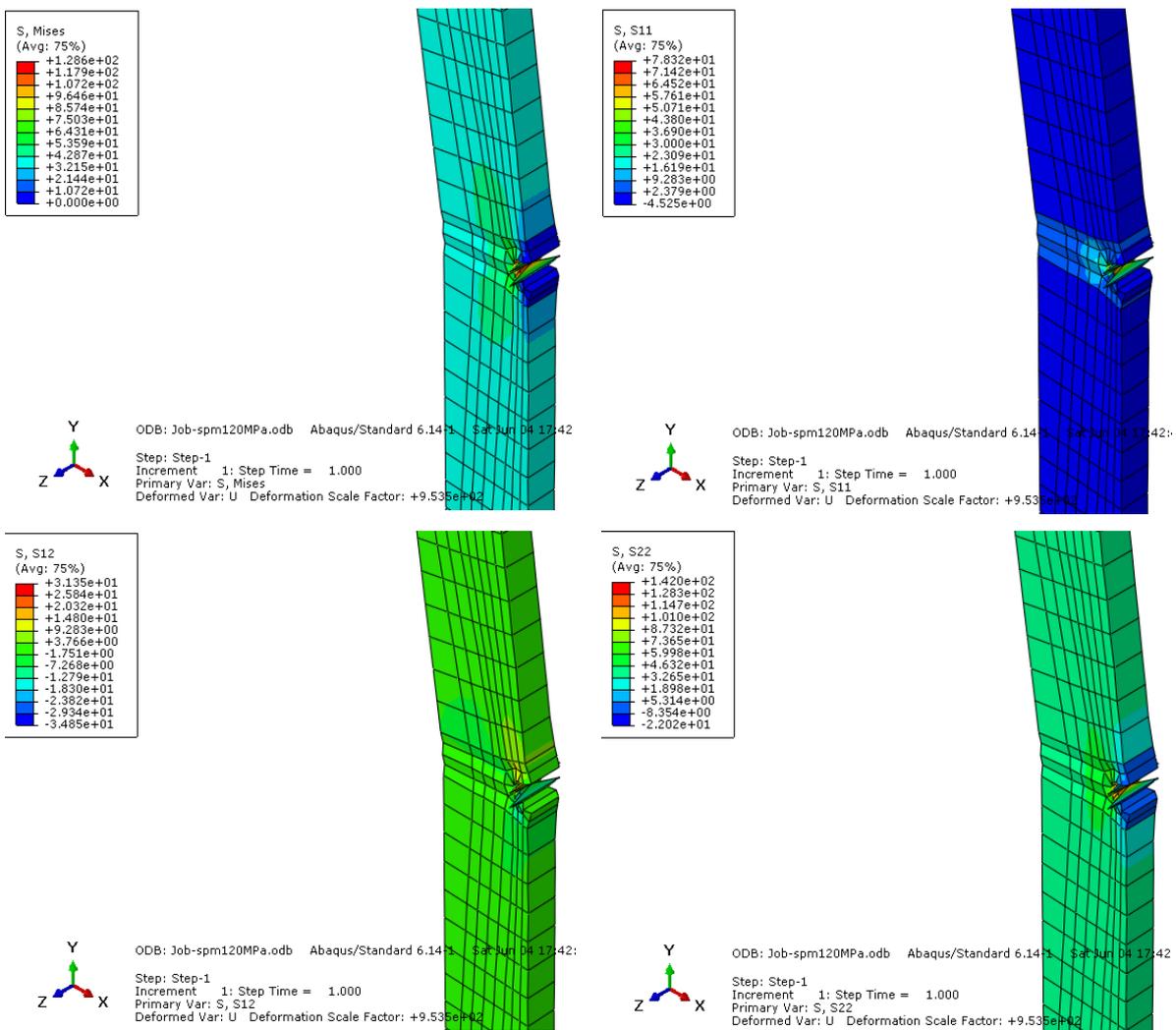


Figure III.34 : contraintes et déplacement de fissure au joint soudée de 90 MPa.

- 3^{em} cas : module de Young est 120 Mpa :



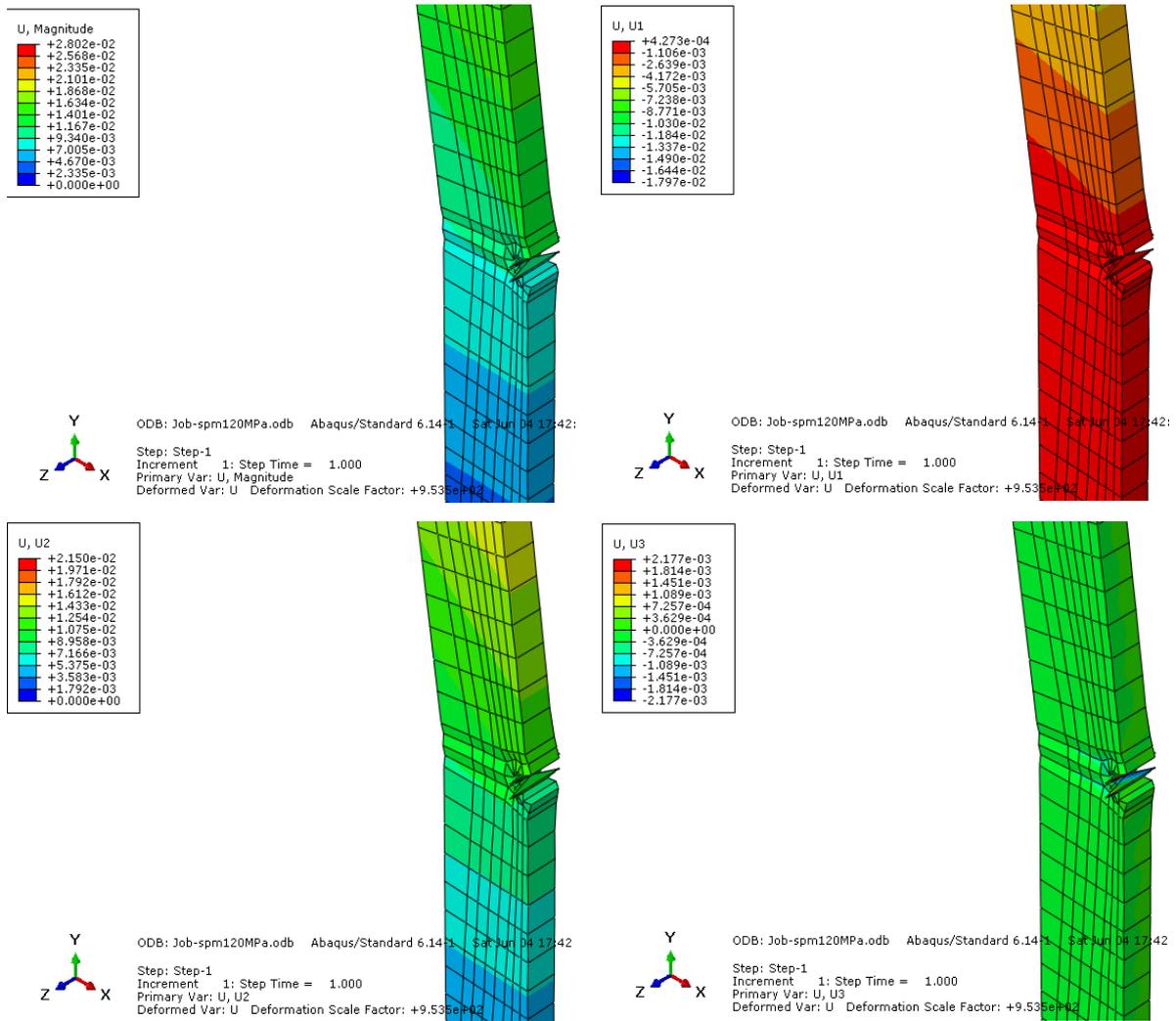


Figure III.35 : contraintes et déplacement de fissure au joint soudée de 120 MPA.

L'influence de la présence d'une fissure dans le cordon de soudure ainsi que ces propriétés matériaux donnée par 90,100, et 120 MPA sur les valeurs maximales de S Mises, S11, S22 et S12, ainsi pour les déformations U_{moy} , U1, U2, U3 est présenté dans les Figures III.27, III.34, III.35 respectivement. En premier lieu, nous constatons que la présence de la fissure affect considérablement le comportement mécanique de l'éprouvette soudée, ainsi sa présence provoque une incrémentation significative dans les valeurs de contraintes et déformation par rapport a une éprouvette qui n'a pas subi des défauts de fissures. En plus, le changement de propriété de matériel (joint soudé) induit une augmentation dans les valeurs de contraintes résiduelles et déformations dans tous les types d'éprouvettes illustrés en haut.

- Variation du facteur d'intensité de contrainte K_I

Tableau III.6: facteur d'intensité pour changement de propriété de matériel.

Contours	1	2	3
K_I de PM 90 Mpa	-20.36	-25.53	-16.90
K_I de PM 100 Mpa	-20.87	-26.29	-18.39
K_I de PM 120 Mpa	-21.84	-27.79	-21.32

La variation des facteurs d'intensités de contrainte K_I en fonction du changement de l'orientation de la fissure par différents angles sont exhibâtes dans le Tableau III.5 pour trois contours d'intégrations. On remarque l'augmentation importante dans les valeurs maximales du K_I avec le changement de propriété de matériaux et la présence de la fissure d'en parallèle avec l'augmentation du nombre de contour.

15. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions générales sur le code de calcul ABAQUS, faire la simulation et l'introduction du system de cordon de soudure de deux parties d'une éprouvette normalisée de soudage par procédé classique, et connaitre comment intégrer dans le code la nuance du matériau utilisé, et ses principales propriétés mécaniques, puis les résultats de la simulation ainsi que la discussion ont été présentés. Enfin une étude paramétrique qui montre l'influences de quelques paramètres physique et géométrique est aussi été fournis.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait comme objectif d'analyser le comportement mécanique des jonctions soudées ayant subi des défauts type fissures à froid. En général, pour ce type de structure à géométries composées, les modèles de calcul sont principalement basés sur la méthode des éléments finis pour une bonne approximation de résultats en comparaison avec les modèles expérimentaux. Tout d'abord, nous avons modélisé notre éprouvette soudée en deux dimensions par le module sketch, et puis nous l'avons transformé en pièce en trois dimensions par l'option extrusion sur le logiciel ABAQUS pour la simulation et la réalisation des calculs des résultats.

L'application de l'analyse statique sur l'éprouvette normalisée soudée étudiée dans ce mémoire est soumise à un chargement mécanique axiale est nécessaire pour déterminer les allongements, la répartition des contraintes ainsi que l'effet de la présence des fissures et donc les caractéristiques physiques du cas étudié.

Le facteur d'intensité de contrainte (K_I) permet de décrire l'état des contraintes à l'extrémité de la fissure afin de fournir les critères de rupture.

Plusieurs paramètres influent sur le comportement du cordon de soudure tels que, la présence de la fissure, son orientation, le type de matériau, l'intensité de chargement mécanique, la taille et la propagation de la fissure, afin de montrer ces influences, on a fait une analyse sur des éprouvettes de soudage normalisées ayant subi des endommagements par fissure.

On constate un changement important dans les valeurs des déformations, contraintes ainsi que dans le facteur d'intensité de contrainte, et cela avec la présence d'une fissure, changement de taille, angle, position de fissure et le type du matériau.

Enfin, à partir des résultats qu'on a obtenus dans cette étude on peut conclure qu'il est nécessaire de bien choisir les caractéristiques géométriques et physiques des composants ou structures à soudées pour éviter les divers défauts.

A la fin, ce travail m'a permis d'enrichir mes connaissances dans l'étude des assemblages soudés et en particulier leurs comportements mécaniques vis-à-vis des différentes charges et défauts, et de me familiariser avec le logiciel ABAQUS.

En perspective, nous espérons que ce travail sera comme une source d'inspiration aux futures promotions, et qu'il va les aider à mieux comprendre comment faire une analyse par modélisation des éprouvettes et composants soudés, et nous envisagerons d'utiliser la méthode des éléments finis étendus (XFEM) pour étudier de tel cas identique.

Références

Bibliographique

- [1] : document de formation de l'entreprise GTP, PRG – 9 – 0001, date 14/01/06.
- [2] : document de procédés de soudage, (MOUICI Derradji)ALFAPIPE / TUBERIE DE GHARDAIA.
- [3] : procédés de soudages, procédé 22 PDF, MOUICI Derradji/ ALFAPIPE / TUBERIE DE GHARDAIA.
- [4] : cours de formation de l'entreprise GTP /Procédé 72 PDF.
- [5] : document de formation de l'entreprise GTP, soudage 111 PDF page 05, date 14/01/06.
- [6] : Simulation numérique du soudage à l'électrode enrobé page 15, date 18/06/2000.
- [7] : document de formation de l'entreprise GTP, page 15 date 14/01/06.
- [8] : document de formation de l'entreprise GTP, page 18
- [9] : cours de formation de l'entreprise GTP /PDF
- [10] : Documents Technique GTP/procédure de soudage
- [11] : Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [12] : Documents Yamani Institute of Technology.
- [13] : Site Internet : <http://www.yamani-institute.com/>
- [14] : Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [15] : Maurizio Targhetta-Fotolia.com-Nouvelle présentation 2013 © Dunod, Paris, 2003, 2008 ISBN 978-2-10-059861-8-Usinage de la photo de couverture.
- [16] : PATRICKH ROZICHI. Formation ABAQUS ; Université de Nantes. France 2007. Mémoire finale Mr. Bouleftour Abderrahmane.
- [17] : MEFTEH KAMEL. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.
- [18] : Abaqus 6.12 Abaqus/CAE User's Manuel [7] AIT TALEB Aissa. Modélisation du comportement de structures tubulaires traitées et non traitées. Mémoire de fin d'études.
- [19] : MEFTEH KAMEL. Présentation Abaqus. Formation des masters ; université de Biskra.
- [20] : ABAQUS. Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit, élève ingénieur ; Université de Nantes. 2007.
- [21] : MICKAEL ABBAS. Principe et fonctionnement ABAQUS. Université de technologie de Compiègne.