

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université Oran 2 Mohamed ben Ahmed
Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
معهد الصيانة والأمن الصناعي

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Spécialité : Electromécanique industrielle

Thème :

***Qualification Des Procédures De Soudage
Des Pipelines***

Présenté par :

Brinkane Othmane

Encadré par :

Dr. Djilali CHAREF

Devant le jury :

| | | | |
|-------------------------|-----|-------------------|-----------|
| Dr. AOUIMER Yamina | MCA | Université Oran 2 | Président |
| Dr. BOUIADJRA Bachir | MAA | Université Oran 2 | Examineur |
| Dr. TITAH Mawloud | MAA | Université Oran 2 | Examineur |
| Dr. Djilali CHAREF | MAA | Université Oran 2 | Encadrant |

Année universitaire : 2022 – 2023

Remerciements :

Nous tenons à remercier le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a offert pour aboutir à la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères et profonds remerciements toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de la rédaction de ce mémoire. Tout d'abord, je remercie mon encadreur monsieur **Djillali CHAREF** pour ses conseils, son soutien et son expertise qui m'ont permis de mener à bien ce projet de recherche.

Je remercie également mes enseignants pour leurs enseignements et leurs encouragements tout au long de ma formation universitaire.

Je n'oublie pas mes proches, ma famille et mes amis, pour leur soutien moral et leur présence tout au long de mes études. Merci également à tous les participants de mon étude, qui ont accepté de partager leur expérience et leur expertise pour enrichir ce travail.

Je remercie la direction de SARPI (Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels) pour leur accueil et confiance qu'ils m'ont accordés en particulier le directeur de projet monsieur **BERREGHIOUA IMADEDDINE**.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à tous les Ingénieurs et les cadres techniques du service contrôle de qualité et au le manager du service monsieur **YOUB ABDELHAK** qui m'a aidé et guidé tout long de ce travail.

Enfin, nos respectueuses salutations et remerciements aux membres du jury qui auront l'honneur d'apprécier et de juger ce travail.

Merci à tous.

BRINKANE OTHMANE

Résumé :

L'assemblage des pipelines par soudure occupe une place très importante dans l'industrie, Pour assurer la distribution du gaz entre les lieux d'extraction et les consommateurs.

le soudage d'un pipeline est effectué selon une procédure approuvée, l'approbation de cette procédure passe par plusieurs étapes de la préparation du PWPS au soudé un joint selon cette PWPS et envoie-le au laboratoire pour des tests destructifs et non destructifs , La PQR est le document officiel qui récapitule toutes les variables de qualification d'un essai de soudage et les résultats des essais mécaniques , les résultats de ces test nous donnent une WPS approuvée , le WPS est un document qui sert de guide pour la création efficace d'une soudure qui respecte toutes les exigences du code et les normes de production applicables , la production au site est soumise à des contrôles non destructifs pour s'assurer la respecte du procédure.

Mots clé : soudage, pwps, pqr, wps, cnd.

SOMMAIRE :

| | |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale : | 1 |
| Chapitre I : Présentation du site et de la société | |
| I.1 Présentation de la société : | 2 |
| I.1.1 Historique | 2 |
| I.1.2 Présentation : | 2 |
| I.2 Présentation du site : | 2 |
| I.2.1 Situation Géographique : | 2 |
| I.2.2 Présentation : | 3 |
| Organigramme de l'entreprise : | 4 |
| Chapitre II : Généralité sur le soudage | |
| II.1 Introduction : | 5 |
| II.2 Définition : | 5 |
| II.3 Historique : | 5 |
| II.4 Procédés de soudage : | 6 |
| II.4.1 Soudage par fusion : | 6 |
| II.4.2 Soudage par résistance : | 7 |
| II.4.3 Soudage Oxyacéthylnique : | 8 |
| II.4.4 Soudage à l'état solide : | 9 |
| II.5. Types d'assemblage par soudage : | 10 |
| II.5.1 Assemblage bout à bout : | 10 |
| II.5.2 Assemblage en angle : | 10 |
| II.5.3 Assemblage par recouvrement : | 10 |
| II.6. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) : | 11 |
| II.6.1 Norme et standard : | 11 |
| II.6.2 Soudage d'un joint au techniques de soudage SMAW | 12 |
| II.6.2 .1 Préparation d'un joint : | 12 |
| II.6.2.2 Application du soudage : | 13 |
| II.6.3.3 métal d'apport : | 14 |
| II.6.3.4 Métal de base : | 15 |
| II.6.3.5 Caractéristiques de la soudure : | 15 |
| II.6.3.6 Règles de soudage : | 16 |
| II.6.3.6.1 Longueur de l'arc : | 16 |
| II.6.3.6. 2 Angle de soudage : | 17 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| II.6.3.6.3 Vitesse de progression : | 17 |
| II.6.3.6 .4 Ampérage : | 18 |
| II. 7 Contrôle et défaut de soudage : | 18 |
| II. 7.1 contrôle non destructif : | 18 |
| II. 7.1.1 le control visuel : | 19 |
| II. 7.1.2 le ressuage : | 21 |
| II. 7.1.3 La magnétoscopie : | 22 |
| II. 7.1.4 la radiographie : | 22 |
| II. 7.1.5 l'ultrason : | 23 |
| II. 7.2 défaut de soudage : | 24 |
| II.8 Conclusion : | 29 |

Chapitre III : Qualification de la procédure de soudage

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction : | 30 |
| III .2 Préparation d'une Spécification préliminaire du mode opératoire de soudage: | 30 |
| III .2.1 Conception de joints : | 31 |
| III .2.2 Métal de base : | 31 |
| III .2.3 Métaux d'apport : | 32 |
| III .2.4 Position de soudage : | 33 |
| III .2.5 Température de préchauffage et de interpasse : | 34 |
| III .2.6 Traitement thermique : | 34 |
| III .2.7 Variables de soudage : | 34 |
| III .3 Le rapport de qualification d'un mode opératoire de soudage : | 35 |
| III .3 .1 Les tests non destructifs : | 36 |
| III .3 .1.1 le contrôle visuel : | 36 |
| III .3 .1.2 magnétoscopie : | 37 |
| III .3 .1.3 radiographie : | 37 |
| III .3 .2 Les tests destructifs : | 37 |
| III .3 .2.1 Essai de traction : | 38 |
| III .3 .2.2 Test de pliage : | 41 |
| III .3 .2.3Essai de résilience : | 42 |
| III .3 .2.4 Essai de dureté : | 43 |
| III .3 .2.5 Examens Macrographiques : | 46 |
| III .4 -Conclusion : | 47 |

Chapitre IV : Etude numérique

| | |
|------------------------------------------------|----|
| IV .1 Introduction : | 48 |
| IV .2 Généralité sur le code de calcul ABAQUS: | 48 |
| IV .2 .1 Organisation de l'interface Abaqus : | 49 |
| IV .2 .2 Les modules : | 49 |
| IV .3 Les étapes de simulation : | 51 |
| IV .4 -Conclusion : | 56 |

Chapitre V : Résultat et discussion

| | |
|---------------------------------|----|
| V .1 Introduction : | 57 |
| V .2 Graphe et interprétation : | 57 |
| V .3 Conclusion : | 81 |
| Références bibliographiques : | 82 |

Liste des Figures :

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 .1 Situation Géographique de AIN TSILA..... | 2 |
| Figure 2 .1 Préparation des bords en assemblage bout-à-bout | 10 |
| Figure 2 .2 Types d'assemblage par soudage..... | 11 |
| Figure 2 .3 Chenfreinage d'un joint..... | 12 |
| Figure 2 .4 Clampsage (Alignement) | 13 |
| Figure 2 .5 Préchauffage avant le soudage | 13 |
| Figure 2 .6 Application du soudage SWAM..... | 14 |
| Figure 2 .7 L'électrode enrobé | 14 |
| Figure 2 .8 Les différent zone d'un joint soudé..... | 16 |
| Figure 2 .9 Longueur de l'arc..... | 16 |
| Figure 2 .11 Effet de la vitesse de soudage..... | 18 |
| Figure 2 .12 Les étapes de contrôle par ressuage..... | 21 |
| Figure 2 .13 Le ressuage coloré | 21 |
| Figure 2 .14 Le ressuage fluorescent..... | 22 |
| Figure 2 .15 Contrôle par magnétoscopie..... | 22 |
| Figure 2 .16 Contrôle par radiographie | 23 |
| Figure 2 .17 Image radiographique fissure transversale..... | 23 |
| Figure 2 .18 Image radiographique nid de porosité ou soufflure | 23 |
| Figure 2 .19 Contrôle par l'ultrason | 24 |
| Figure 3 .1 Conception de joints | 31 |
| Figure 3 .2 Métal de base | 32 |
| Figure 3 .3 Métaux d'apport..... | 33 |
| Figure 3 .4 Position de soudage | 33 |
| Figure 3 .5 Traitement thermique..... | 34 |
| Figure 3 .6 Variables de soudage | 35 |
| Figure 3 .7 Soudage d'un joint de test | 35 |
| Figure 3 .8 Les tests non destructifs sur joint de test | 36 |
| Figure 3 .9 Eprouvait de test | 38 |
| Figure 3 .10 Machine d'essai de traction | 39 |
| Figure 3 .11 courbe de traction relativisée | 39 |
| Figure 3 .12 La courbe de traction relativisée..... | 40 |
| Figure 3 .13 Eprouvait d'essai de traction..... | 40 |
| Figure 3 .14 Les résultats de l'essai..... | 40 |
| Figure 3 .15 D'essai de de pliage..... | 41 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3 .16 Eprouvait D'essai de de pliage | 41 |
| Figure 3 .17 Les résultats de l'essai | 42 |
| Figure 3 .18 Essai de résilience..... | 43 |
| Figure 3 .20 Essai de dureté Brinell | 44 |
| Figure 3 .21 Essai de dureté Vickers..... | 45 |
| Figure 3 .22 Essai de dureté Rockwell | 45 |
| Figure 3 .23 Les résultats de l'essai | 46 |
| Figure 3 .24 Examens Macrographiques | 46 |
| Figure 4 .1 L'interface Abaqus..... | 49 |
| Figure 4 .2 Les modules d'abaques | 50 |
| Figure 4 .3 Le model géométrique | 51 |
| Figure 4 .4 Le model en 3D..... | 52 |
| Figure 4 .5 La courbe contrainte déformation de l'acier api 5LX65..... | 52 |
| Figure 4 .6 Le module « Assembly »..... | 53 |
| Figure 4 .7 Le Module « Step »..... | 53 |
| Figure 4 .8 Le module « l'interaction »..... | 54 |
| Figure 4 .9 Le module « Load» | 54 |
| Figure 4 .10 Le maillage du model | 55 |
| Figure 5 .1 Le résultat du module « job » | 57 |
| Figure 5.2 Chemin N1 | 58 |
| Figure 5.3 Graphe du Chemin N1 | 58 |
| Figure 5. 4 Chemin N2 | 59 |
| Figure 5.5 Graphe du Chemin N2 | 59 |
| Figure 5.6 Comparaison des deux graphe 1 et 2..... | 60 |
| Figure 5. 7 Chemin N3 | 60 |
| Figure 5. 8 Graphe du Chemin N3 | 61 |
| Figure 5. 9 Chemin N4 | 61 |
| Figure 5. 10 Graphe du Chemin N4..... | 62 |
| Figure 5. 11 Comparaison des deux graphe 3 et 4..... | 62 |
| Figure 5. 12 Chemin N5 | 63 |
| Figure 5.13 Graphe du Chemin N5 | 63 |
| Figure 5. 14 Chemin N6..... | 64 |
| Figure 5.15 Graphe du Chemin N6..... | 64 |
| Figure 5. 16 Comparaison des deux graphe 5 et 6..... | 64 |
| Figure 5. 17 Chemin N7 Figure 5. 18 Chemin N8..... | 65 |

| | |
|--------------------------------------------------------|----|
| Figure 5. 19 Graphe du Chemin N7 | 65 |
| Figure 5. 20 Graphe du Chemin N8..... | 66 |
| Figure 5. 21 Comparaison des deux graphe 7 et 8..... | 66 |
| Figure 5. 22 Chemin N9 | 67 |
| Figure 5.23 Graphe du Chemin N9..... | 67 |
| Figure 5. 24 Chemin N10..... | 67 |
| Figure 5.25 Graphe du Chemin N10..... | 68 |
| Figure 5.26 Comparaison des deux graphe 9 et 10..... | 68 |
| Figure 5. 27 Chemin N11..... | 69 |
| Figure 5. 28 Graphe du Chemin N11..... | 69 |
| Figure 5. 29 Chemin N12 | 70 |
| Figure 5. 30 Graphe du Chemin N12 | 70 |
| Figure 5. 31 Comparaison des deux graphe 11 et 12..... | 70 |
| Figure 5. 32 Chemin N13 | 71 |
| Figure 5. 33 Graphe du Chemin N13 | 71 |
| Figure 5. 34 Chemin N14..... | 72 |
| Figure 5. 27 Graphe du Chemin N14..... | 72 |
| Figure 5. 35 Comparaison des deux graphe 13 et 14..... | 73 |
| Figure 5. 36 Chemin N15 | 73 |
| Figure 5. 37 Graphe du Chemin N15..... | 74 |
| Figure 5. 38 Chemin N16..... | 74 |
| Figure 5. 39 Graphe du Chemin N16..... | 75 |
| Figure 5.40 Comparaison des deux graphe 15 et 16..... | 75 |
| Figure 5. 41 Chemin N17..... | 76 |
| Figure 5. 42 Graphe du Chemin N17..... | 76 |
| Figure 5. 43 Chemin N18..... | 77 |
| Figure 5. 44 Graphe du Chemin N18..... | 77 |
| Figure 5.45 Comparaison des deux graphe 17 et 18..... | 78 |
| Figure 5. 46 Graphe du Chemin N19..... | 78 |
| Figure 5. 47 Graphe du Chemin N19..... | 79 |
| Figure 5. 38 Chemin N20..... | 79 |
| Figure 5. 49 Graphe du Chemin N20..... | 80 |
| Figure 5. 50 Comparaison des deux graphe 19 et 20..... | 80 |

Liste des abréviations :

WPS: Welding Procedure Specification

PWPS: Preliminary Welding Procedure Specification

SARPI: société algérienne de réalisation de projets industriels

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

EPC: Engineering, Procurement and Construction

CPF: central processing facility

GMAW: Gas metal arc welding

SAW: Submerged Arc Welding

EGW: Electro gas arc **welding**

PAW: Plasma arc **welding**

CAW: Carbon arc **welding**

SW: Stud arc welding

AHW: Atomic hydrogen arc welding

FCAW: **Flux cored arc welding**

RSW: Resistance Spot **Welding**

RSEW: Resistance seam welding

FW: Flash welding

HFW: **High frequency welding**

PEW: Percussion **welding**

UW: Upset welding

RPW: Resistance projection welding

OAW: Oxy acetylene welding

OHW: Oxy hydrogen welding

PGW: Pressure gas welding

FRW: Friction welding

ROW: Roll welding

USW: Ultrasonic welding

EXW: Explosive welding

DFW: Diffusion welding

CW: Cold welding

FOW: Forge welding

EPI : Élément de protection individuelle

API: l'American Petroleum Institute

Psi: pound per square inch

ZF: zone fondue

ZAT: zone affectée thermiquement

ZL: zone de liaison

CND: contrôle non destructif

Introduction générale :

Le transport de pétrole et du gaz par des pipelines, une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides d'un endroit à un autre, la transportation du gaz naturelle et pétrole brut de la longue distance devenir plus fort plus résistant plus grand et épais parce que c'est fait à haute pression.

La présence de soudures dans les matériaux provoque certaines défaillances structurelles qui peuvent altérer les propriétés mécaniques et métallurgique nuire à l'assemblage soudé.

La WPS indique tous les paramètres nécessaires du soudage basé sur des tests destructifs et non destructif menées précédemment pour éviter tout nuire au joint soudé.

Le but de cette mémoire est d'étudier la qualification d'une spécification du mode opératoire de soudage primaire, Grâce à cette procédure nous assurons que le soudage est conforme aux normes.

Dans le premier chapitre je vais vous présenter la Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels et Le projet de développement du champ gazier d'Ain Tsila

Ensuite je vous donnerai une généralité sur le soudage, une présentation du méthode SMAW, une idée générale sur les méthodes de contrôle non destructif, en fin les défauts de soudage dans un deuxième chapitre.

Dans un troisième chapitre en va voire la préparation d'une spécification du mode opératoire de soudage primaire et les test destructif et non destructif pour le qualifier.

Le quatrième chapitre est une étude numérique d'un test destructif sur un spécimen, une simulation avec logiciel ABAQUS d'un essai de traction.

Le dernier chapitre est une discussion des résultats.

Chapitre I : Présentation du site et de la société

I.1 Présentation de la société : [1]

I.1.1 Historique

Née d'une joint-venture entre Sonatrach et ABB en 1992 pour la réalisation des grands projets industriels dans le secteur de l'énergie, la Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels (SARPI spa) est devenue en 2018 une filiale 100% Sonatrach.

I.1.2 Présentation :

La dynamique entreprise SARPI Spa est reconnue pour la réalisation de projets industriels. Elle a réalisé une centaine de projets pour Sonatrach et les plus grandes entreprises étrangères présentes en Algérie, notamment ceux de construction d'infrastructures pour les besoins de production, de transport et de stockage des industries du pétrole, du gaz et de l'énergie.

Elle dispose d'implantations aux implantations des grands hubs d'hydrocarbures et d'une ressource humaine de premier plan qui a développé un certain niveau d'expertise au fil de ses années d'exploitation au contact des grandes entreprises du secteur.

Actuellement, des travaux d'ingénierie et des études spécifiques sont développés, des études spécifiques sont menées, et des projets en EPC (Ingénierie, Achats et Construction) sont ainsi gérés grâce à l'expertise et aux moyens humains et logistiques disponibles.

I.2 Présentation du site :

I.2.1 Situation Géographique :

Ain Tsila est un champ de condensat de gaz situé dans le bassin d'Illizi, en Algérie, situé dans le périmètre d'Isarène à 160 km au nord-ouest de la wilaya d'Illizi et 500 Km au sud-est de Hassi- Messaoud, le champ gazier d'Ain Tsila a été découvert dans le périmètre Isarène en 2009.



Figure 1 .1 Situation Géographique de AIN TSILA

I.2.2 Présentation : [2]

Le groupement Sonatrach, développe des installations de production composées des équipements de surface, un centre de traitement de gaz (CPF) et d'un pipeline d'exportation de 100 km pour le raccordement au réseau de transport de gaz en Algérie.

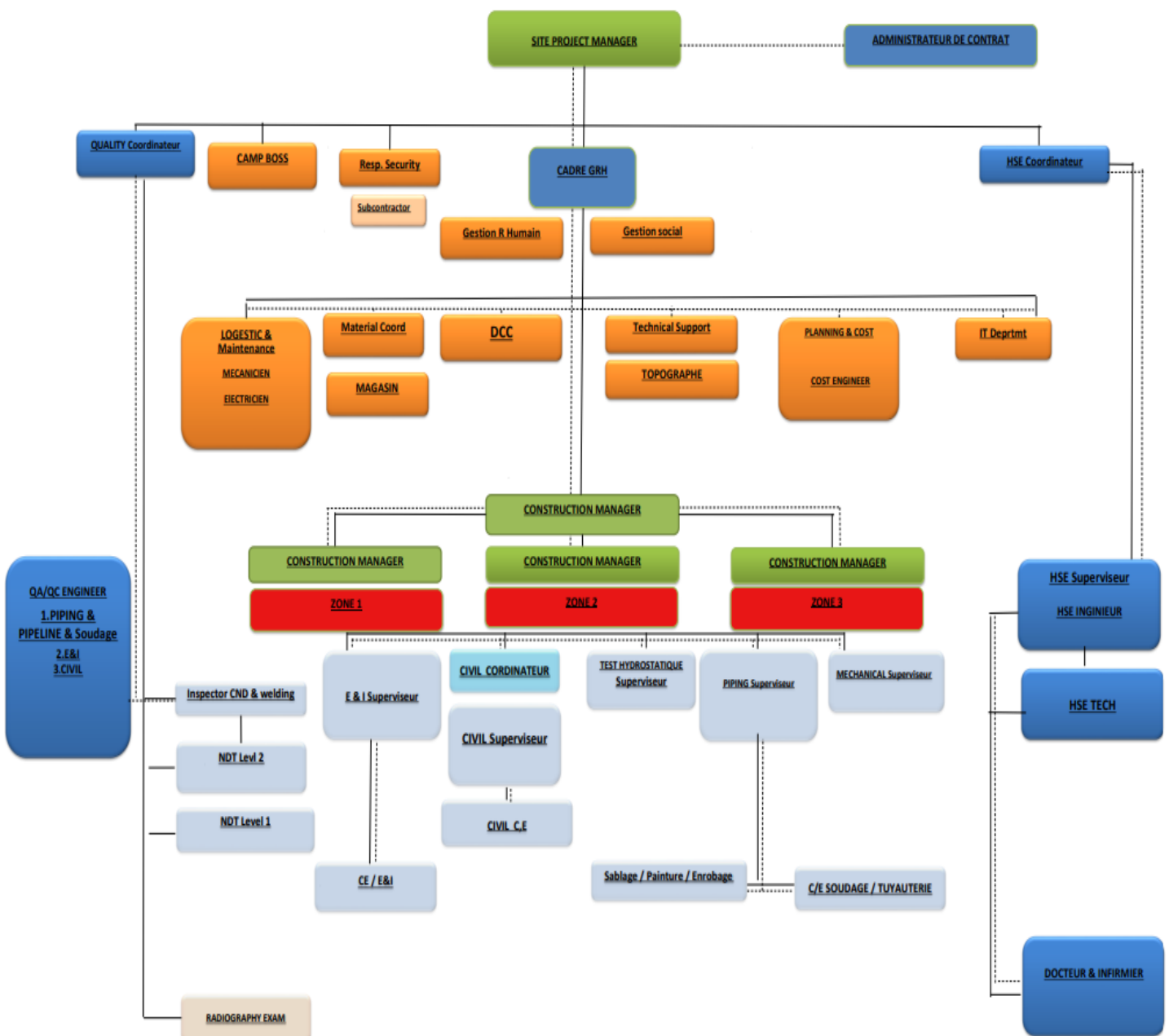
Le champ d'Ain Tsila sera développé sur une période de 30 ans, au cours de laquelle 124 puits devraient être forés. Au total, 24 puits seront forés avant le début de la production de gaz.

Le projet de développement du champ gazier d'Ain Tsila permettra la récupération de 64 milliards de mètres cubes (m³) de gaz avec une production journalière de 10,3 millions m³ de gaz de vente.

D'un montant des milliards de dinars, le contrat en EPC consiste à réaliser des installations de traitement de gaz humide qui reçoivent le gaz brut des puits à travers un réseau de conduites, Ces installations séparent, traitent, conditionnement et mesurent fiscalement les fluides afin de produire trois flux d'exportation conformes aux spécifications de Sonatrach à savoir le gaz de vente, le condensat et le GPL de vente.

Organigramme de l'entreprise :

L'organigramme d'une entreprise est un outil visuel essentiel pour comprendre la structure et le fonctionnement de celle-ci. Il permet de visualiser les différentes unités organisationnelles, les liens hiérarchiques et fonctionnels, ainsi que les rôles et responsabilités de chaque membre de l'équipe. Dans ce contexte, je vais présenter l'organigramme de la Société Algérienne de Réalisation des Projets Industriels (SARPI) afin de mieux comprendre comment les différentes fonctions et services sont répartis et comment ils contribuent à la réalisation de ses objectifs.



Chapitre II : Généralité sur le soudage

II.1 Introduction : [3]

le terme anglo-saxon *pipeline* — également prononcé à la française — s'applique spécifiquement aux systèmes de canalisations à haute pression, utilisés pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux.

Le soudage est le processus d'assemblage de deux pièces de métal, en les rapprochant et en chauffant le point de contact jusqu'au point de fusion. Ce processus se caractérise par trois aspects. Thermique, chimique, thermomécanique.

Ce chapitre présente une généralité sur le soudage et les différents types d'assemblages et procédés, notamment les procédés de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW), Cela vous donnera une idée des zones critiques du joint de soudure.

II.2 Définition :

Le soudage est le processus d'assemblage de morceaux de métal ou de pièces métalliques en les rapprochant intimement et en chauffant le lieu du contenu jusqu'à un état de fusion ou de plasticité.

Le soudage est le processus d'obtention d'une liaison indestructible entre deux pièces métalliques en utilisant la chaleur ou la pression ou ensemble, avec ou sans matériau d'apport.

Le but de l'assemblage des métaux est d'atteindre des structures grandes ou complexes en connectant des pièces simples ou petites.

II.3 Historique : [4]

Les premiers exemples remontent à l'âge du bronze, lorsque deux surfaces superposées étaient chauffées et martelées dans de petits cercueils ronds en or. Nous supposons que c'est là que ces boîtes ont été produites. L'arbre a plus de deux mille ans. Les Égyptiens de l'âge du bronze et les peuples de l'Orient et de la Méditerranée ont appris à souder des composants en fer. trouvé plusieurs outils qui datent de 3 000 ans.

Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, la procédure de soudage était en grande partie inchangée. Pour chauffer les métaux qu'ils soudaient, les gens ont commencé à utiliser le gaz vers 1850.

Le soudage par résistance, le soudage oxyacétylénique, le soudage aluminothermique et le soudage à l'arc électrique étaient toutes de nouvelles techniques de soudage utilisées dans l'industrie vers 1920.

Les années 1930 ont vu une augmentation du nombre d'industries utilisant le soudage, notamment la construction navale, les transports et l'aviation.

Au fil de nombreuses années, la technologie de soudage s'est développée, notamment le soudage par explosion, le soudage par faisceau d'électrons, le soudage au laser et par ultrasons et la croissance de la robotisation, qui ont tous augmenté la qualité et la productivité.

II.4 Procédés de soudage :

La continuité métallique, En majorité cas, il est obtenu par fusion locale. Il peut également être obtenu par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés selon :

- Energie utilisée : mécanique, chimique, électrique, électromécanique
- Système d'opération : manuel, semi-automatique, automatique
- Métal d'apport : avec ou sans métal d'apport
- Type de protection : avec ou sans métal d'apport gaz de protection.
- Type de métal.
- L'état du métal dans la zone de soudage : soudage par fusion ou pression.

II.4.1 Soudage par fusion : [5]

Il s'agit d'un processus utilisé pour assembler des métaux en utilisant de l'électricité et en la convertissant en énergie thermique pour créer suffisamment de chaleur pour faire fondre les bords du métal à souder, Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique La chaleur est générée par la collision d'ions et d'électrons.

Il existe de nombreuses techniques utilisées dans le soudage à l'arc électrique :

- Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) : En créant et entretenant un arc électrique entre l'âme métallique de l'électrode et le composant à souder, on réalise un soudage à l'arc à électrode enrobée. Le bain de fusion est créé lorsque le composant à assembler, l'âme métallique de l'électrode et le revêtement sont fondus simultanément et très localement par l'énergie thermique de l'arc.
- Soudage à l'arc sous gaz (GMAW) : Le soudage sous arc électrique utilise un arc électrique pour faire fondre les métaux à souder. De plus, cette technique utilise un gaz inerte ou actif pour protéger le bain de fusion des contaminants de l'atmosphère. Le gaz de protection peut être l'argon, l'hélium ou un mélange de ces deux types de gaz. Il peut également inclure des gaz actifs comme le dioxyde de carbone (CO₂) ou l'oxygène (O₂) pour améliorer la pénétration de la soudure et stabiliser l'arc électrique.
- Soudage à l'arc submergé (SAW) : Le soudage à l'arc submergé est une technique de soudage par fusion qui utilise un arc électrique pour faire fondre le métal de base et un fil de soudage continu. Le soudage SAW utilise un arc électrique continu entre un fil de soudage et la pièce à souder. Le fil de soudage est alimenté automatiquement à travers une buse de contact et la zone de soudage est recouverte par un flux granulaire. L'arc électrique chauffe le flux granulaire, créant un bain de fusion qui fusionne le fil de soudage et le métal de base.
- Soudage électrogaz (EGW) : Le processus de soudage EGW utilise un équipement de soudage spécialisé qui utilise un fil de soudage continu, un guide de fil et un dispositif

de préchauffage pour la pièce à souder. Une soudure est produite lorsqu'un arc électrique est créé entre le fil de soudage et la pièce à souder. Cela fait fondre le fil de soudage et le métal de base, ce qui entraîne la formation d'une soudure. Le gaz inerte protège la soudure des contaminants de l'atmosphère. Un tube de gaz introduit le gaz dans la zone de soudure, créant une atmosphère de protection autour de la soudure.

- Soudage arc plasma (PAW) : L'industrie aéronautique, la fabrication de turbines et la production de pièces de haute qualité utilisent fréquemment cette méthode de soudage. Le processus de soudage PAW utilise un équipement de soudage spécialisé qui produit un arc électrique très concentré. Le gaz plasma est produit en ionisant un gaz de protection inerte comme l'argon ou l'hélium à travers une buse de plasma. Pour former une soudure, le fil de soudage est alimenté à travers la buse de plasma et fondu par l'arc électrique.
- Soudage à l'arc au carbone (CAW) : Le soudage CAW utilise une électrode de carbone qui est maintenue à une distance constante de la pièce à souder. Une soudure est produite lorsque l'arc électrique est créé entre l'électrode de carbone et la pièce à souder, ce qui fait fondre le métal de base. Les pièces de grande taille ou qui ne peuvent pas être déplacées sont souvent soudées à l'aide de la technique de soudage CAW.
- Soudage de goujons à l'arc (SW) : Le processus de soudage de goujons à l'arc implique l'utilisation d'un équipement de soudage spécialisé qui utilise un arc électrique pour faire fondre le goujon et le fixer à la pièce métallique. Le goujon est placé dans un support de goujon et maintenu en place contre la pièce métallique. L'équipement de soudage crée un arc électrique entre le goujon et la pièce métallique, ce qui fait fondre la partie supérieure du goujon et le fixe à la pièce métallique.
- Soudage à l'hydrogène atomique (AHW) : Le processus utilise un arc électrique pour fondre les métaux à souder, et un flux d'hydrogène atomique est utilisé pour protéger le bain de fusion de l'oxydation. L'hydrogène atomique est produit en ionisant de l'hydrogène gazeux dans un plasma électrique, créant ainsi des atomes d'hydrogène hautement réactifs.
- Soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW) : Le soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW) est un procédé de soudage à l'arc qui utilise un fil fourré comme électrode. Le fil fourré est un fil métallique creux rempli de flux qui fond lorsqu'il est exposé à la chaleur de l'arc électrique. Le flux fondu crée une atmosphère protectrice autour de la zone de soudure, empêchant l'oxydation et la contamination de la zone de soudure.
- Le FCAW est souvent utilisé pour le soudage de l'acier et d'autres métaux ferreux, ainsi que pour le soudage de l'aluminium. Il est également couramment utilisé dans l'industrie de la construction pour le soudage de structures en acier, de ponts et de bâtiments.

II.4.2 Soudage par résistance :

C'est l'une des méthodes de soudage dans laquelle la chaleur et la pression sont utilisées, la chaleur est générée à la suite du passage d'un courant électrique de haute intensité et de basse tension pendant une courte période de temps spécifiée à l'endroit à souder.

Les deux pièces à souder sont placées entre deux électrodes opposées, et l'une des électrodes se déplace vers l'autre pour qu'une certaine pression soit appliquée sur les deux pièces à souder.

Un courant électrique traverse cette pièce, ce qui provoque une forte élévation de la zone de contact des deux pièces, ce qui entraîne sa fusion partielle.

Techniques utilisées dans le soudage par résistance :

- Soudage par points (RSW) : Ce procédé de soudage par résistance par points utilise la combinaison d'une pression localisée pour mettre les pièces en contact par recouvrement et de l'effet joule d'une forte intensité électrique. Ce procédé de soudage ne nécessite pas de métal.
- Soudage à la molette par résistance (RSEW) : Ce procédé de soudage par résistance à la molette utilise la combinaison d'une pression localisée pour mettre les pièces en contact par recouvrement et de l'effet joule d'une forte intensité électrique
- Soudage par étincelage (FW) : Le procédé de soudage en bout par étincelage permet de souder bout à bout des barres ou des profilés de même section droite. Les pièces sont placées dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage.
- Soudage par résistance à haute fréquence (HFW) : Le soudage en bout par étincelage est une méthode utilisée pour souder bout à bout des barres ou des profilés ayant la même section droite. Les pièces à souder sont maintenues dans des mâchoires en cuivre, l'une d'entre elles étant fixée sur un chariot mobile qui se déplace parallèlement à l'axe de soudage.
- Soudage par percussion (PEW) : Le soudage par percussion (PEW) est un procédé de soudage par résistance qui utilise une électrode en forme de pointe pour appliquer une force et une décharge électrique rapide sur les surfaces de soudure. Cette décharge électrique génère une forte chaleur qui fait fondre les surfaces de soudure, créant ainsi une liaison solide entre les deux pièces.
- Soudage en bout par résistance (UW) : Le soudage en bout (UW) est une méthode de soudage qui crée une fusion entre deux pièces métalliques sur toute la zone de contact en utilisant la chaleur générée par la résistance électrique
- Soudage par projection par résistance (RPW) : Le soudage par projection par résistance (RPW) est une méthode de soudage dans laquelle des points d'ancrage sont formés sur la surface des pièces à souder. Ces points d'ancrage sont ensuite fusionnés ensemble pour créer une soudure solide et durable.

II.4.3 Soudage Oxyacétylénique : [6]

C'est un type de soudage dans lequel l'oxygène est utilisé avec un autre gaz pour générer suffisamment de chaleur pour faire fondre les bords du métal, et il est divisé en deux types, avec ou sans ajout de métal.

Il est possible d'ajouter du gaz acétylène, du gaz hydrogène, du gaz propane ou du gaz propylène, Nous choisissons le gaz en fonction de la température résultante et en tenant compte du prix.

Techniques utilisées dans le soudage Oxyacétylénique :

- Soudage oxyacétylénique (OAW) : est un procédé de soudage à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née du mélange et de la combustion d'un gaz combustible d'acétylène C_2H_2 avec un gaz comburant d'oxygène.
- Soudage oxyhydrogène (OHW) : est une méthode de soudage par fusion qui utilise une flamme oxyhydrogène pour chauffer les pièces à souder et les faire fondre. Cette méthode est principalement utilisée pour souder des métaux légers tels que l'aluminium et le cuivre, ainsi que pour souder des métaux fins.
- Soudage aux gaz par pression (PGW) : Le processus de PGW implique l'utilisation d'un chalumeau à gaz, qui produit une flamme à haute température en brûlant du gaz combustible tel que l'acétylène ou le propane. La flamme est dirigée sur les pièces à souder, ce qui les fait fondre et les fusionne ensemble. Pendant le soudage, une pression est exercée sur les pièces pour les maintenir ensemble et assurer une soudure de qualité

II.4.4 Soudage à l'état solide :

Pour le soudage en phase solide, deux surfaces métalliques solides et propres sont mises en contact suffisamment étroit pour qu'une liaison métallique se forme. Le soudage en phase solide peut être réalisé à des températures aussi basses que la température ambiante. Le processus de liaison est basé soit sur la déformation, soit sur la diffusion et la déformation limitée, de sorte que le mouvement atomique (diffusion) crée de nouvelles liaisons entre les atomes de deux surfaces

On peut citer les techniques :

- Soudage par friction (FRW) : Le soudage par friction est une méthode de soudage à l'état solide qui est réalisée à partir du mouvement de frottement mécanique entre les pièces à souder.
- Soudage au rouleau (ROW) : est une technique de soudage par friction qui utilise la rotation des pièces à souder pour générer de la chaleur et créer une liaison solide.
- Soudage par ultrasons (USW) : est une méthode de soudage sans fusion qui utilise des vibrations ultrasoniques pour créer une liaison solide entre deux pièces.
- Soudage explosif (EXW) : la liaison entre les deux pièces est obtenue par la projection d'une pièce sur l'autre par pression et vitesse élevées. L'onde de choc de l'explosion par détonation contrôlée est utilisée pour assembler les matériaux avec une vitesse de déformation très élevée,
- Soudage par diffusion (DFW) : Le processus de soudage par diffusion commence par l'assemblage des pièces à souder. Les pièces sont ensuite placées sous une pression élevée et chauffées à une température contrôlée. La chaleur et la pression provoquent la diffusion des atomes entre les surfaces de contact, créant ainsi une liaison solide.
- Soudage à froid (CW) : également connu sous le nom de soudage par pression à froid, est une méthode de soudage qui utilise la pression pour créer une liaison entre deux

pièces métalliques sans l'utilisation de chaleur. Cette technique est souvent utilisée pour assembler des pièces en feuilles minces, telles que des tôles, des fils et des feuilles métalliques.

- Soudage par forgeage (FOW): est une technique de soudage par friction qui utilise la chaleur et la pression pour créer une liaison solide entre les pièces à souder. Cette méthode est souvent utilisée pour souder des pièces métalliques de grande taille ou de forme complexe, telles que des arbres, des roues dentées ou des pièces d'avion.

On peut citer d'autres types :

- Soudage par faisceau d'électrons
- Soudage laser
- Soudage par induction
- Soudage aluminothermique

II.5. Types d'assemblage par soudage :

Les joints soudés sont souvent classés en fonction de la disposition des pièces assemblées.

II.5.1 Assemblage bout à bout :

La soudure bout-à-bout est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égale à 5 mm.

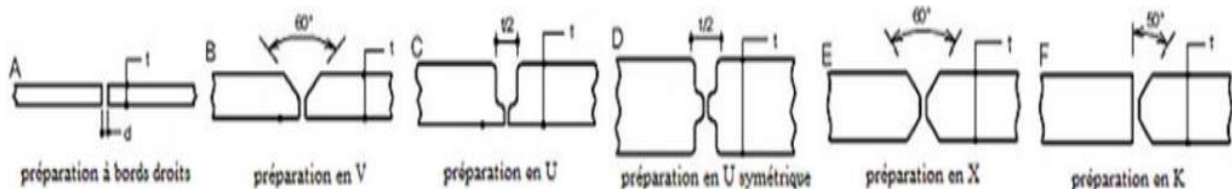


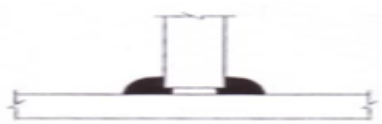
Figure 2 .1 Préparation des bords en assemblage bout-à-bout

II.5.2 Assemblage en angle :

Est utilisé pour créer un angle entre deux pièces soudées.

II.5.3 Assemblage par recouvrement :

Lorsque deux pièces sont empilées l'une sur l'autre, la technique la plus populaire pour assembler des pièces de différentes épaisseurs.



Assemblage en T



Assemblage et par recouvrement



Assemblage en angle

Figure 2 .2 Types d'assemblage par soudage

II.6. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

La procédure de soudage à l'arc à électrode enrobée (SMAW) est toujours cruciale choisi parce qu'il offre une grande flexibilité d'exécution, une grande autonomie selon la méthode employée. Les dépôts formés par l'utilisation de cette technique ont des caractéristiques importantes car ils sont souvent plus purs que le métal de base et ont de meilleures propriétés mécaniques. Le procédé de soudage SMAW consiste à créer la fusion des métaux par la chaleur qui s'est formé entre une électrode métallique revêtue et le métal de base afin de fusionner les métaux ensemble.

L'objectif du processus de soudage SMAW est de faire fondre les métaux en chauffant à un arc créé électriquement entre une électrode métallique et le métal de base, L'électrode fournit le métal qui est ajouté.

Un fort courant électrique se déplace de l'extrémité de l'électrode au métal de base à souder. La chaleur de l'arc du courant électrique provoque la fusion de la surface du métal de base et de l'extrémité de la tige de métal d'apport, Le métal d'apport fondu est guidé dans le bain de soudure par la puissance de l'arc, créant le cordon de soudure. La source de chaleur (énergie électrique) et le métal d'apport (électrode) sont inséparables pendant la procédure de soudage SMAW.

II.6.1 Norme et standard : [7]

L'API 1104 a été développée par l'American Petroleum Institute en tant que norme industrielle pour les applications de soudage. Cette norme fournit des méthodes pour produire des soudures de haute qualité dans un nouveau format compréhensible à l'aide de soudeurs qualifiés, en utilisant des procédures de soudage, des matériaux et des équipements approuvés. Le nom complet de la norme est : API 1104 Source des pipelines et des installations connexes.

La norme intègre une connaissance détaillée de l'industrie et des années d'expérience, et fournit aux organisations autorisées une méthodologie d'audit pour garantir que la qualité des actifs est analysée avec précision à l'aide de techniciens qualifiés et de méthodes et d'équipements approuvés.

L'API 1104 couvre le soudage au gaz et à l'arc des soudures de fond de tuyaux en acier faiblement allié, des soudures de remplissage et des soudures à emboîtement. Ces pipelines sont utilisés pour la compression, le pompage et le transport de produits tels que le pétrole brut, les produits pétroliers, le gaz, le dioxyde de carbone et l'azote. C'est utilisé. Cette norme s'applique au procédé de soudage des canalisations neuves ou en service. Le procédé de soudage peut être

le soudage sous protection métallique, le soudage à l'arc submergé, le soudage à l'arc sous gaz tungstène, le soudage sous protection gazeuse, le soudage à l'arc, le soudage à l'arc plasma, le soudage oxyacétylénique ou le soudage bout à bout par étincelage. Alternativement, des techniques de soudage manuelles, semi-automatiques, mécanisées ou automatiques ou une combinaison de ces techniques peuvent être appliquées.

La norme fournit également des méthodes d'inspection pour s'assurer que la qualité des ressources est analysée avec précision à l'aide de techniciens qualifiés et de méthodes et d'équipements approuvés. Il couvre les procédures de radiographie, de magnétoscopie, de ressuage et d'ultrasons. En bref, l'API 1104 est une norme qui fournit des méthodes pour produire des soudures de haute qualité en utilisant des soudeurs certifiés utilisant des procédures, des matériaux et des équipements de soudage approuvés. Parmi les services fournis par notre organisation dans le cadre des services d'essais de métaux, il y a également les tests de la norme API 1104.

II.6.2 Soudage d'un joint au techniques de soudage SMAW [8]

Après avoir fourni un poste à souder, un clamp extérieur, side boom, torch et bouteille de gaz, une meule, des électrode enrobée (E6010, E8010), des EPI. Afin d'éviter toute impureté pouvant affecter le soudage, les tubes seront soudés dans des conditions climatiques appropriées. Les opérations de soudage seront stoppées et arrêtées lorsque les circonstances métrologiques peuvent avoir un impact sur la qualité du soudage, (chutes de pluies, taux humidité élève, vent de sable).

II.6.2 .1 Préparation d'un joint :

- **chenfreinage :** Les caractéristiques dimensionnelles spécifiées de la procédure de soudage qualifiée seront suivies lors la chenfreinage du joint de soudure sur site , il est chanfreinés sous un angle avec une meule .

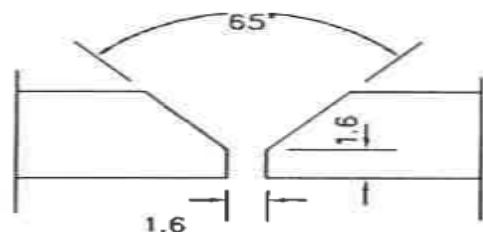


Figure 2 .3 Chenfreinage d'un joint

- **Clampsage (Alignement) :** pour assurer un meilleur alignement pour un soudage de joint de pipeline en utilise un clampse extérieur, il sera enlevé après en soudée 50 pourcent de la première passe.



Figure 2 .4 Clampsage (Alignement)

- **Préchauffage :** En soudage, la température de préchauffage est utilisée pour chauffer le métal de base qui entoure le joint de soudure à une température minimale prédéterminée. Si le préchauffage n'est pas effectué, une différence de température significative pourrait exister entre la zone de soudure et le matériau de base. Cela peut entraîner un refroidissement rapide, ce qui peut entraîner une fissuration.



Figure 2 .5 Préchauffage avant le soudage

II.6.2.2 Application du soudage :

L'appareil doit inclure une source de courant continu ou alternatif, un porte-électrode, un câble de connexion et un câble de masse. L'électrode enrobée est placée sur la pince porteuse d'électrode et connectée au poste de soudage. Le contact électrode-pièce amorce l'arc électrique et la fusion de l'électrode forme le cordon.

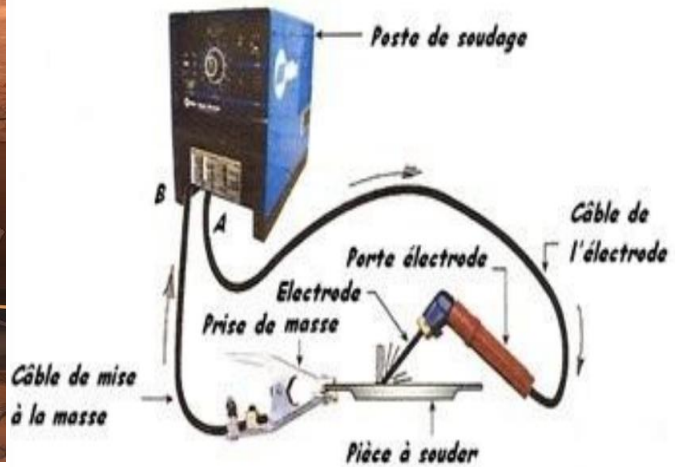


Figure 2 .6 Application du soudage SWAM

La première passe s'effectue avec l'électrode E6010, Les électrodes E6010 sont caractérisées par un arc de pulvérisation de force élevée et profondément pénétrant et des scories friables facilement amovibles, très minces à négligeables. Le laitier semble ne pas recouvrir complètement le cordon de soudure d'un point de vue visuel.

Pour la passe de remplissage et la finition on utilise l'électrode E8010, c'est une électrode à haute teneur en cellulose et en sodium utilisée pour le soudage pour les applications de pipelines ayant une résistance élevée.

II.6.3.3 métal d'apport :

Un revêtement chimiquement diversifié recouvrant une âme métallique de forme cylindrique
Types d'électrode :

- Type A (Acide à base d'oxyde de fer)
- Type B (Basique à base de carbonate)
- Type C (Cellulosique à base de cellulose)
- Type O (Oxydant à base d'oxyde de fer)
- Type R (Rutile à base d'oxyde de titane)



Figure 2 .7 L'électrode enrobé

L'enrobage d'électrode :

L'enrobage à plusieurs rôles métallurgique, électrique, physique :

- Former un laitier protecteur qui assure la protection contre l'oxygène de l'air ambiant durant le refroidissement du bain de fusion.
- Favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc électrique
- Contribue l'orientation de l'arc

Signification de nom d'électrode :

Nous prenons par exemple l'électrode E6010 :

E : signifie électrode

60 : la résistance à la traction du dépôt de soudure est de 60 KSI ou 60 000 psi

1 : indique qu'il s'agit de toutes les positions d'électrode

0 : indique qu'il s'agit d'un sodium à haute teneur en cellulose

II.6.3.4 Métal de base : [9]

Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines : Le transport à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures nécessite l'emploi des tubes de grande résistance capables de résister à des pressions très élevées. On a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les nuances X60, X65, X70, X80 et même X100.

Les types d'aciers utilisés pour les tubes peuvent être divisés en deux groupes :

- aciers au carbone faiblement alliés.
- aciers à faible teneur en carbone.

Dans le premier groupe, on trouve les aciers dits ferrito-perlitique tels que le X42 jusqu'au X52 selon les normes API, renfermant jusqu'à 0,3 %C, 1,6 %Mn, 0,7 %Si, Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement microalliés à plus basse teneur en carbone tels que le : X56, X50, X65, X70 et X80 renfermant 0,12 %C, 0,45 %Si, 0,25 %S, 1,9 %Mn, 0,1%V, 0,1 %Nb, 0,015 %Al.

Le matériau utilisé est un acier au carbone utilisé pour transport des hydrocarbures de nomination API 5L X65, il est désigné par sa limite élastique 65000 psi.

II.6.3.5 Caractéristiques de la soudure :

Zone fondue :

Z.F : la zone qui est à l'état liquide durant l'opération de soudage

Zone affectée thermiquement :

ZAT : C'est le métal de base non fondu qui a subi des modifications structurales (taille des particules) ou des modifications physico-chimiques (propriété et proportions des constituants).

Zone liaison :

ZL : la frontière entre le métal fondu et le métal de base

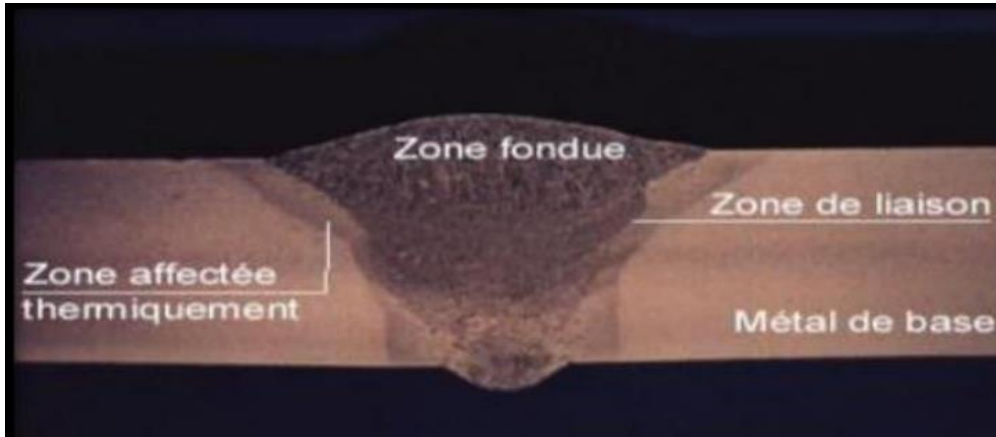


Figure 2 .8 Les différent zone d'un joint soudé

II.6.3.6 Règles de soudage :

Ce sont les règles de base du processus de soudage de soudage qui aident à effectuer le soudage de manière professionnelle.

II.6.3.6.1 Longueur de l'arc :

La longueur de l'arc est la distance entre la partie de l'électrode est le bain de fusion, la longueur normale de l'arc est entre 1\16 INCH (1,58) millimètre et 1\8 INCH (3,17) millimètre

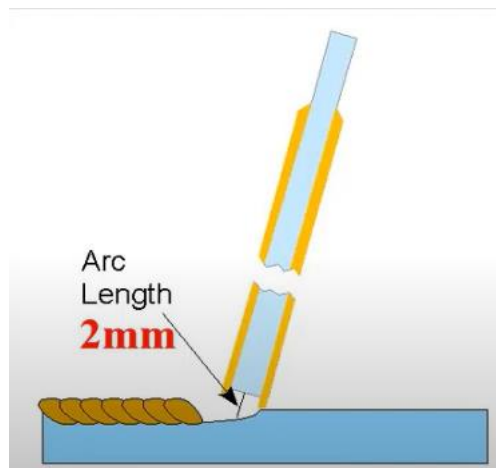


Figure 2 .9 Longueur de l'arc

Effets du long arc :

- Bourdonnement
- Une mauvaises fusion et pénétration
- Mauvais contrôle du métal en fusion
- Beaucoup d'étincelles
- Déséquilibre du cordon de soudure

- « undercut »

Effets d'arc court :

- Bruit sec
- Fusion et pénétration insuffisante
- « Porosité »
- Mauvaise vue du joint de soudure

II.6.3.6. 2 Angle de soudage :

C'est le degré d'inclinaison du fil à souder dans le sens de la ligne de soudure et la position du fil à souder par rapport aux deux pièces à souder.

Ils sont de deux type :

Angle de travail : c'est l'angle entre l'électrode et les deux pièces à souder, L'angle de travail varie selon le type de joint soudé et la position de la soudure (soudage bout à bout : 90 degré, soudage en Tee et en recouvrement a 45 degré) si l'angle de soudage ne respecte pas le cordant de soudure sera déformé.

L'angle d'avance : L'angle d'avance est l'angle entre l'électrode de soudure et le métal dans la direction de la ligne de soudure ou de l'axe vertical, L'angle d'avance est de 70 à 80 à partir de la surface de la pièce dans le sens de la marche, et il varie selon la position de soudage et le type de joint. Soudage en Tee et en recouvrement sont de 45 degrés.

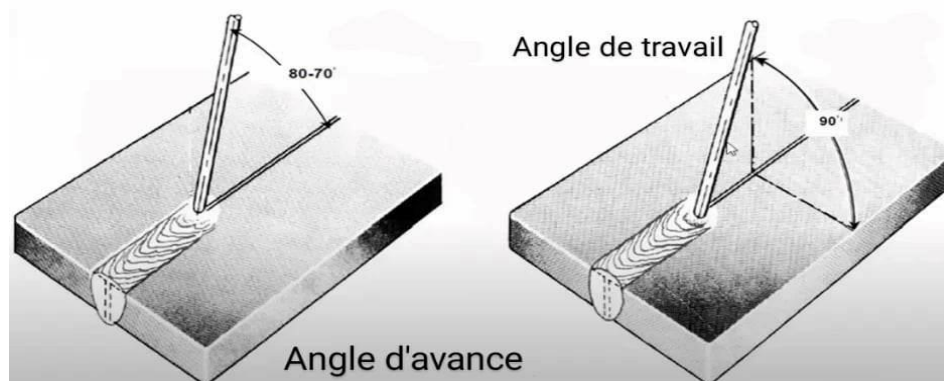


Figure 2 .10 Angle de soudage

Un angle de soudage incorrect affecte la taille et la forme des cordons de soudure et le dépôt de métal au bon endroit.

II.6.3.6.3 Vitesse de progression :

La vitesse d'avance est la longueur de la soudure divisée par le temps de soudure et est mesurée en pouces par minute, l'effet d'une vitesse de progression anormale :

Grand vitesse de soudage :

- Ligne de soudage intermittente et fine
- Fusion insuffisante et mauvaise soudure

Vitesse de soudage lente :

- Une large ligne de soudure sous forme un bloc empilé
- Faire fondre et percer le métal s il est léger

Nous déterminons la vitesse de soudage idéale en fonction de plusieurs facteurs :

- Epaisseur de matériau
- Ampérage
- Type d'électrode
- Type de joint et la position de soudage
- Taille de soudage requise



Figure 2 .11 Effet de la vitesse de soudage

II.6.3.6 .4 Ampérage :

Pour ajuster l'ampérage approprié pour le processus de soudage, les éléments suivants doivent être pris en compte :

- Type de procédé de soudage
- Type et l'épaisseur du métal utilisé de métal utilisé
- Type de mode de soudage
- Type d'électrode utilisé (25 à 35 A pour chaque 1 mm de diamètre d'électrode)

II. 7 Contrôle et défaut de soudage :

II. 7.1 contrôle non destructif : [10]

Le contrôle non destructif est une technique d'inspection qui permet de détecter et de mesurer les défauts et les anomalies dans les matériaux, les pièces ou les structures sans altérer leur intégrité ou leur fonctionnalité.

Le but du Contrôle Non Destructif est de préserver l'intégrité des structures, matériaux, pièces et assemblages en identifiant les défauts internes. Cette méthode se concentre exclusivement

sur la santé de la matière. Les techniques CND garantissent la qualité de production et assurent la tenue en service des pièces et des ensembles fabriqués.

Les méthodes de CND comprennent des techniques telles que la radiographie, l'ultrason, le control visuel, t la magnétoscopie, le ressuage, etc.

II. 7.1.1 le control visuel :

La méthode visuelle consiste à illuminer l'échantillon d'essai avec des rayons lumineux, généralement dans le domaine visible, puis à l'observer à l'œil nu ou à l'aide d'un instrument optique.

Les instruments utilisés :

-Instruments de contrôle visuel :

Lampe stylo : une lampe stylo est un outil pratique pour les qui travaillent dans des environnements sombres ou mal éclairés. Elle est conçue pour fournir une source de lumière portable et facile à utiliser pour l'inspection et l'examen de petites zones difficiles d'accès.



Lampe stylo

Le miroir d'inspection : L'outil essentiel pour les contrôleurs et les soudeurs de tuyauterie est le miroir d'inspection, qui permet une vérification visuelle des intérieurs de tubes.



Le miroir d'inspection

La loupe : Avec la loupe éclairante, il est possible d'agrandir les détails et de détecter facilement des défauts de surface minuscules tels que des piqûres ou des fissures sur les cordons de soudure.



Loupe éclairante

Multimètre pince ampérométrique : Il permet de contrôler l'intensité de soudage et la tension de soudage



Pince ampérométrique

Le thermomètre : est utilisé pour mesurer diverses températures telles que la température ambiante, la température d'étuvage, la température de préchauffage avant soudage, la température entre les passes et la température de post-chauffage.



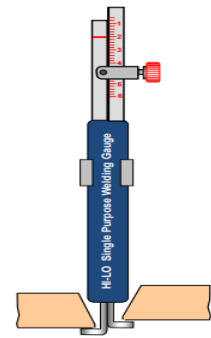
Le thermomètre

La jauge d'écartement : permet de vérifier le jeu entre les pièces à souder avant et après pointage. Cette jauge peut être remplacée par le jeu de cales d'épaisseur.



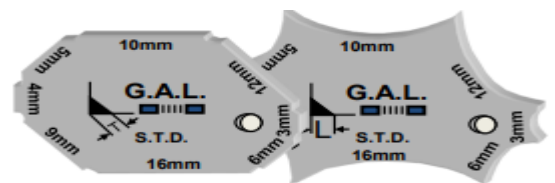
La jauge d'écartement

Le Hi-Lo Gauge est un outil utilisé pour mesurer l'écart un joint de soudure. Il aide à s'assurer que le joint de soudure est préparé conformément aux spécifications requises.



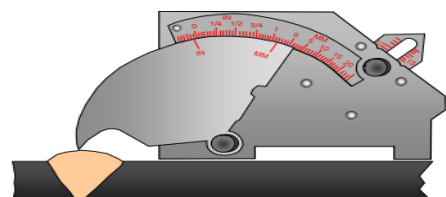
Le Hi-Lo Gauge

Jauges de soudure d'angle : Elles sont utiles pour s'assurer que l'angle de soudure est conforme aux spécifications requises et pour garantir la qualité de la soudure.



Jauges de soudure d'angle

Jauges de soudage polyvalentes : Les jauges de soudage polyvalentes sont des outils de mesure utilisés pour contrôler la qualité des soudures. Elles sont conçues pour mesurer la hauteur, la largeur, l'angle et la profondeur des soudures.



Jauges de soudage polyvalentes

II. 7.1.2 le ressuage : [11]

Le contrôle non destructif par ressuage est une technique couramment utilisée pour détecter les défauts de surface dans les matériaux métalliques. Cette méthode implique l'application d'un liquide pénétrant sur la surface d'une pièce à tester. Le liquide pénètre dans les fissures et les défauts de surface, puis un révélateur est appliqué pour faire ressortir les imperfections. Cette technique est très efficace pour détecter les défauts de surface tels que les fissures, les porosités et les inclusions.

Méthode éprouvée depuis longtemps. Sa mise au point en tant que procédé de contrôle a commencé dès les années 1930.

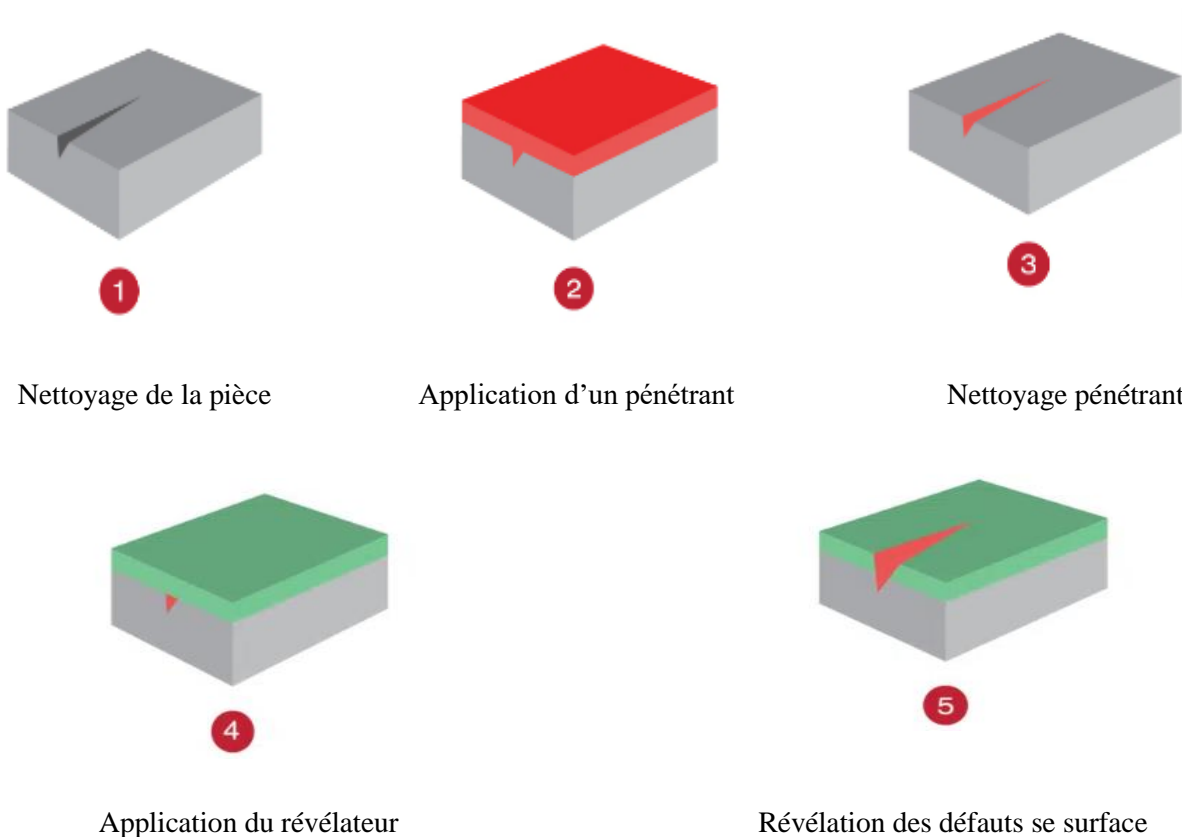


Figure 2 .12 Les étapes de contrôle par ressuage

Le contrôle est toujours réalisé par un inspecteur dans des conditions d'observation appropriées. Il y a deux méthodes distinctes pour le ressuage :

Le ressuage coloré : qui utilise une lumière blanche artificielle ou naturelle.



Figure 2 .13 Le ressuage coloré

Le ressuage fluorescent : qui utilise un rayonnement ultraviolet (UV-A) ou, dans certains cas, une lumière bleue actinique pour les contrôles intermédiaires.

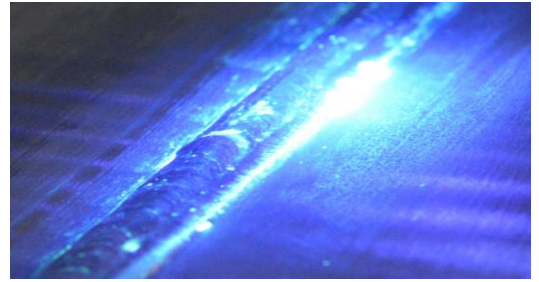


Figure 2 .14 Le ressuage fluorescent

II. 7.1.3 La magnétoscopie :

Les défauts de surface dans les matériaux ferromagnétiques tels que le fer, l'acier et le nickel peuvent être détectés à l'aide d'une méthode de contrôle non destructif appelée magnétoscopie. Dans cette méthode, un champ magnétique est utilisé pour identifier les variations de flux magnétiques provoquées par des discontinuités dans le matériau.

Le processus consiste à appliquer un champ magnétique sur la pièce à tester, puis à appliquer une fine couche de poudre magnétique sur la surface. Le champ magnétique attire la poudre magnétique et la concentre au-dessus d'une discontinuité.

Les défauts de soudure tels que les fissures, les inclusions, les porosités, les manques de fusion et les déformations peuvent être détectés à l'aide de la magnétoscopie.

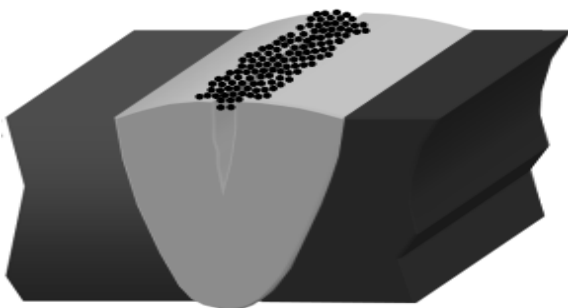


Figure 2 .15 Contrôle par magnétoscopie

II. 7.1.4 la radiographie :

La radiographie industrielle, qui utilise les rayonnements γ et X, est une technique de contrôle non destructif (CND) largement employée dans l'industrie. Elle est particulièrement utile pour le contrôle des soudures, la détection des défauts des matériaux et l'évaluation de la corrosion.

La radiographie est une méthode courante de contrôle non destructif qui utilise des rayons pour détecter les défauts internes dans les matériaux. Cette méthode est utilisée pour détecter les fissures, les porosités, les inclusions, les manques de fusion et les déformations dans les soudures et d'autres pièces en métal. Le processus de radiographie consiste à exposer la pièce à

tester à des rayons à haute énergie, puis à capturer l'image de la pièce sur un film radiographique ou un détecteur numérique. Les zones denses de la pièce, telles que les fissures, les inclusions et les porosités, apparaissent plus claires sur l'image radiographique, tandis que les zones moins denses, telles que les manques de fusion, apparaissent plus sombres.

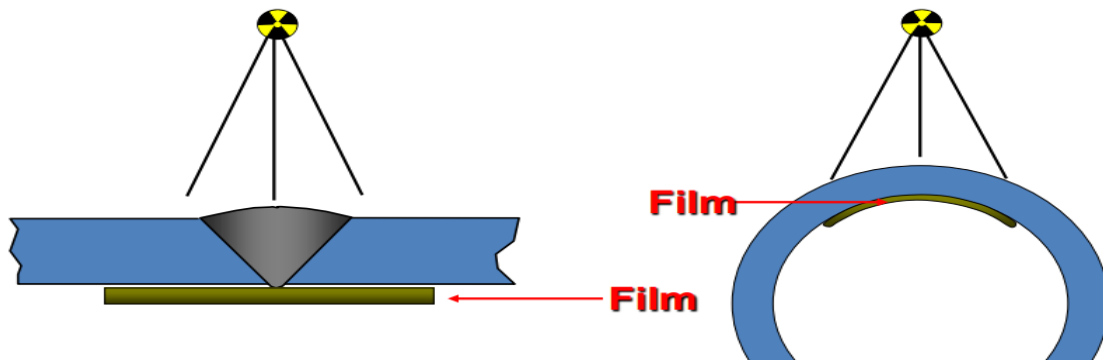


Figure 2 .16 Contrôle par radiographie

Exemple du contrôle par radiographie :

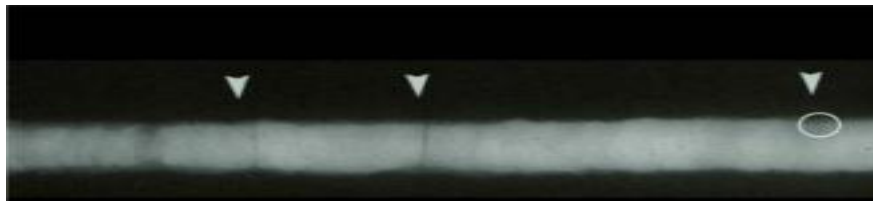


Figure 2 .17 Image radiographique fissure transversale



Figure 2 .18 Image radiographique nid de porosité ou soufflure

II. 7.1.5 l'ultrason : [12]

Le Contrôle par Ultrasons utilise des ondes sonores à haute fréquence (typiquement dans la plage entre 0,5 et 15 MHz) pour effectuer des examens et des mesures. Outre son utilisation courante dans les applications d'ingénierie (telles que la détection/évaluation des défauts, les mesures dimensionnelles, la caractérisation des matériaux, etc.), les ultrasons sont également utilisés dans le domaine médical (comme la sono graphie, l'échographie thérapeutique, etc.).

En général, le contrôle par ultrasons est basé sur la capture et la quantification des ondes réfléchies (impulsion-écho) ou des ondes transmises (transmission). Chacun des deux types est utilisé dans certaines applications, mais en général, les systèmes d'impulsion-écho sont plus utiles car ils nécessitent un accès à une seule face de l'objet inspecté.

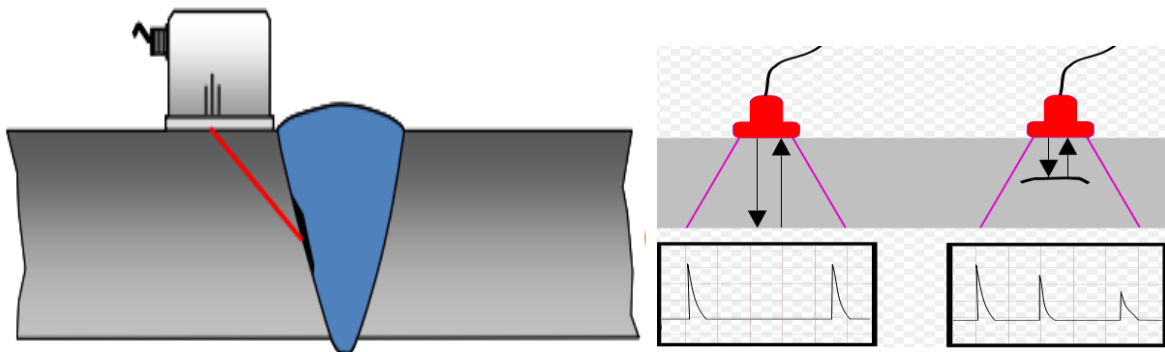


Figure 2.19 Contrôle par l'ultrason

II. 7.2 défaut de soudage : [13]

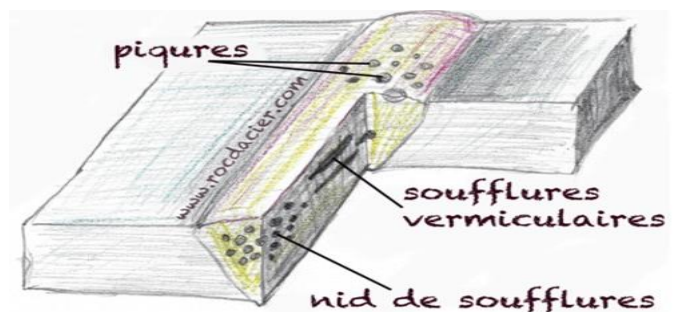
- Défauts de soufflures ou cavités : Les cavités, communément appelées soufflures, sont des défauts courants dans le soudage. Elles se présentent généralement sous forme de bulles de gaz piégées dans le cordon de soudure. Les soufflures débouchant sont également appelées piqures, car elles sont visibles à la surface.

Types de soufflures fréquentes :

- Nid de soufflures
- Soufflures vermiculaires
- Piqures

Causes :

- Une mauvaise préparation de la zone de soudure.
- Une contamination de la surface de la pièce à souder.
- Une mauvaise manipulation de l'arc de soudage.
- Une vitesse de soudage trop élevée.
- Une humidité excessive dans l'environnement de soudage.
- des courants d'air.



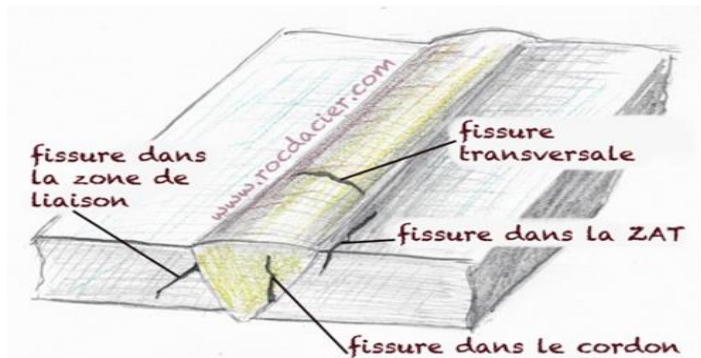
- Défauts de fissures : Les fissures correspondent à des brisures du matériau et leur orientation dépend du type de défaut. Elles peuvent être présentes dans le métal de base le cordon de soudure, la zone affectée thermiquement ou encore la zone de liaison.

Types de fissures :

- Fissure longitudinale
- Fissure transversale
- Fissure de cratère
- Fissure sous cordon débouchant.
- Fissure sous cordon non débouchant

Causes :

- Une mauvaise préparation de la surface à souder peut conduire à des contaminations qui fragilisent le joint et favorisent l'apparition de fissures.
- Des variations de température importantes pendant le soudage peuvent créer des fressures.
- des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...)
- L'utilisation d'un métal d'apport inadapté ou des paramètres de soudage mal réglés peuvent également causer des fissures dans le joint.
- arrêt prématuré de la protection gazeuse.



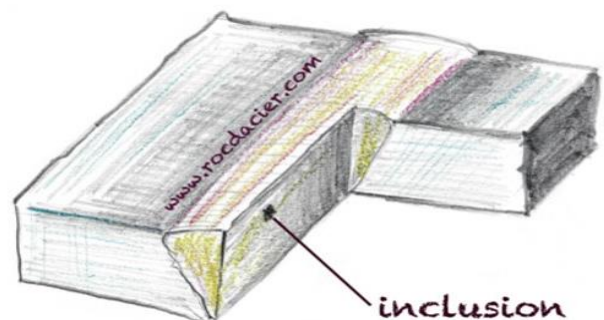
- Défaut d'inclusions : Les inclusions sont des particules étrangères qui se trouvent dans le matériau de base ou le métal d'apport utilisé pendant le soudage. Un défaut d'inclusion se produit lorsque ces particules ne sont pas complètement fondues et fusionnées avec le reste du matériau lors du soudage, créant ainsi des vides ou des poches dans le joint de soudure.

Types d'Inclusion :

- Inclusion solide.
- Inclusion de laitier.
- Inclusion de flux.
- Inclusion d'oxyde.
- Inclusion métallique.

Causes :

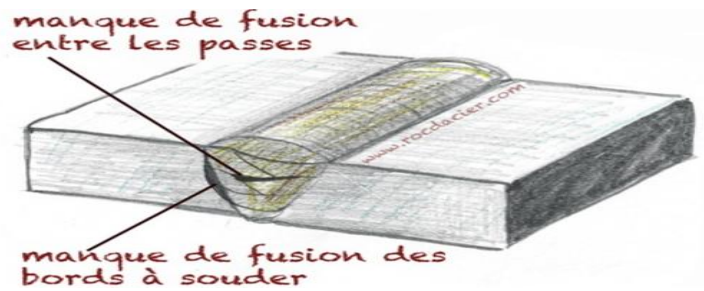
- corps étranger inclus dans le cordon de soudure.



- Défaut de manque de fusion : Le manque de fusion, également appelé défaut de collage, est un défaut courant dans les joints de soudure. Il se produit lorsque les bords des pièces à souder ne sont pas suffisamment fondus et mélangés pendant le soudage, ce qui entraîne une liaison insuffisante entre les pièces.

Types de manque de fusion :

- Manque de fusion des bords à souder
- Manque de fusion entre les passes.

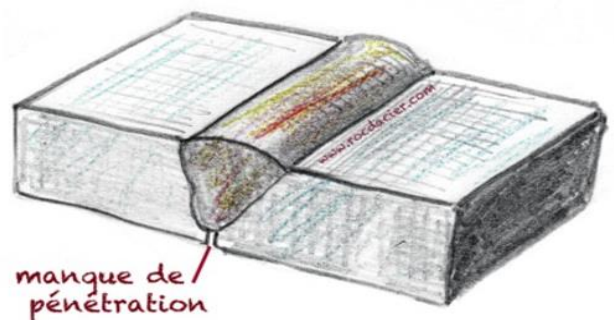
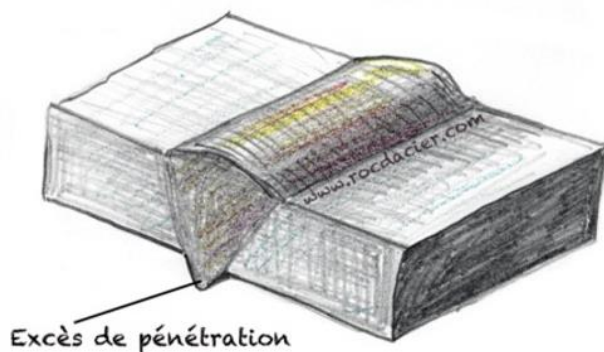


Causes :

- une puissance de soudage insuffisante.
- une vitesse de soudage trop rapide.
- un mauvais angle de soudage
- un métal d'apport inapproprié
 - Défaut de pénétration : Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration. L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente.

Types de défaut de pénétration :

- excès de pénétration.
- manques de pénétration.



Causes des défauts d'excès de pénétration :

- Jeu de soudage trop grand.
- Vitesse d'avance trop lente.
- Intensité trop élevée.
- Distance électrode/pièce trop courte.

Causes des défauts de manque de pénétration :

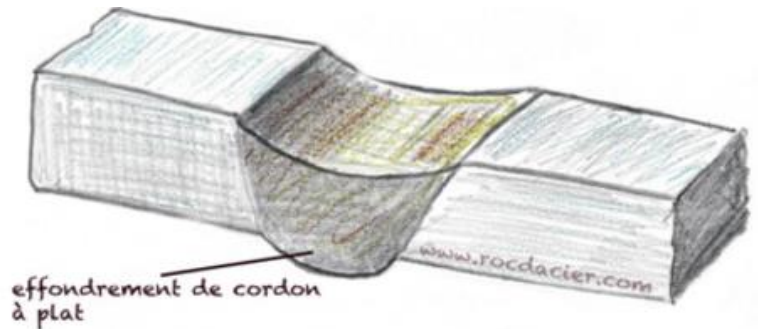
- Jeu de soudage trop petite (pièces trop rapprochées).
- Vitesse d'avance trop élevée.
- Intensité trop faible.
- Métal de base trop froid.

- Défaut d'effondrement : le défaut d'effondrement d'un joint de soudure se produit lorsque le matériau de soudure ne remplit pas complètement l'espace entre les deux pièces à souder.

Défaut d'effondrement

Types d'effondrements :

- Effondrement à plat
- Effondrement en angle
- Effondrement en corniche



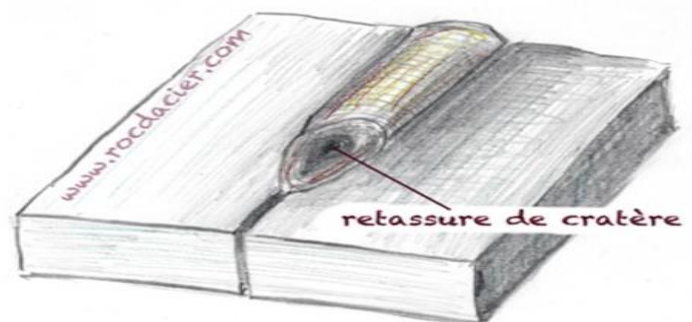
Causes d'effondrements :

- une mauvaise préparation de la surface de soudure.
- une mauvaise technique de soudage.
- une utilisation inappropriée de la source de chaleur.

- Défauts retassures et criques : La retassure est un défaut de soudure qui se produit lorsque le métal de soudure se refroidit et se contracte de manière inégale, créant un creux ou un espace entre les bords de la soudure.

Cause de retassures et criques :

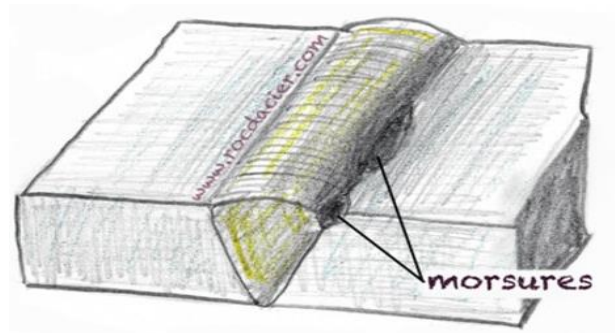
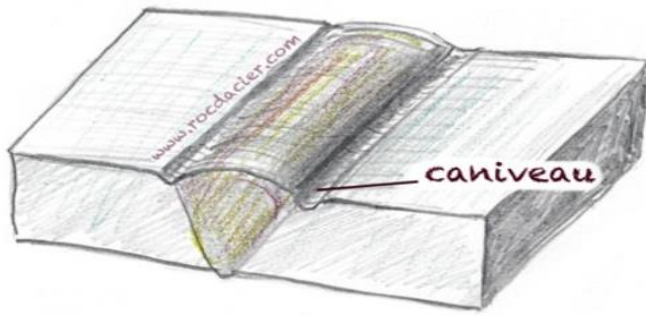
- Mauvaise technique de soudage.
- Une source de chaleur inappropriée.
- Préparation inadéquate de la surface de soudure.



- Morsures et caniveaux : Les morsures et les caniveaux sont des défauts de soudure qui se produisent lorsqu'une partie du matériau de soudure est retirée de la zone de soudure pendant le processus de soudage.

Types de Morsures et caniveaux :

Les caniveaux peuvent être en surface, entre le cordon et le métal de base (y compris entre les passes, si plusieurs passes). Ils peuvent aussi être à la racine, Les morsures sont des défauts locaux (ponctuels)



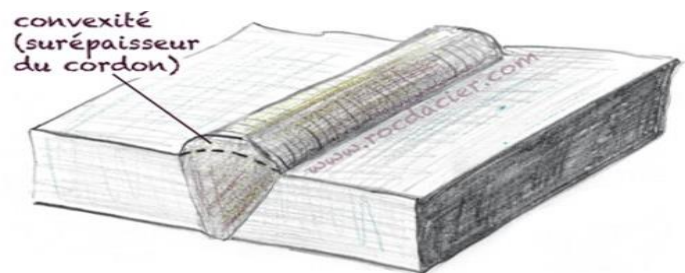
Cause de Morsures et caniveaux :

- Ces défauts peuvent être causés par une mauvaise technique de soudage.
- Une surchauffe de la zone de soudure.
- Une utilisation inappropriée de la source de chaleur.
- Une préparation inadéquate de la surface de soudure.

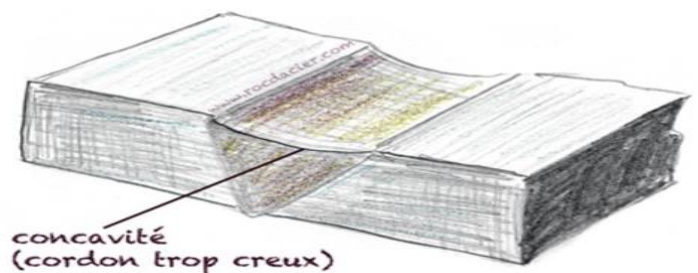
- Défauts géométriques des cordons : Les défauts géométriques des cordons de soudure sont des défauts qui affectent la forme et la taille du cordon de soudure.

Types de Défauts géométriques des cordons :

- Défaut de convexité : Il s'agit d'un excès de matière sur la longueur de la soudure.

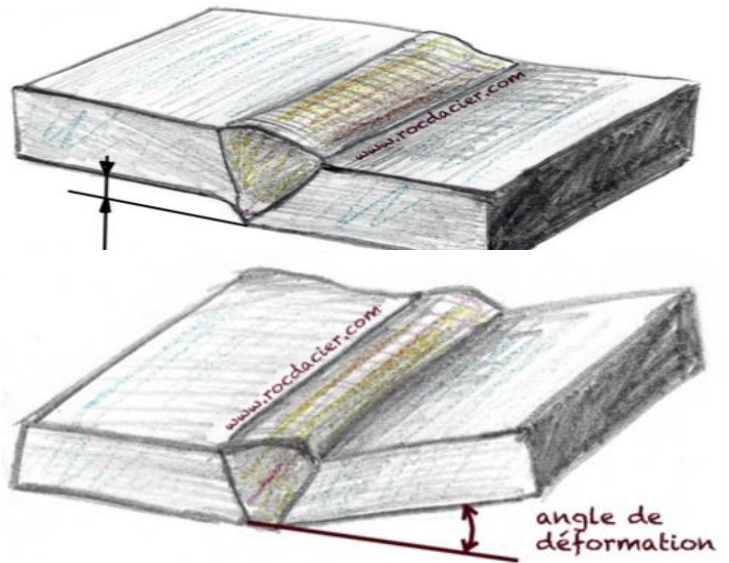


-Défaut de concavité : Il s'agit d'un manque de matière sur la longueur de la soudure.



-Défaut d'alignement : Lorsque les pièces sont mal bridées ou le pointage insuffisant.

Déformations angulaires : Un défaut angulaire peut survenir lorsqu'il y a des déformations importantes pendant l'opération de soudage, ce qui peut entraîner un écart par rapport à la forme souhaitée des pièces assemblées.



- Une préparation inadéquate des surfaces de soudure.

- Des problèmes de positionnement des pièces à souder.

- Des problèmes de manipulation ou de déformation des pièces pendant ou après le soudage.

-Il est important de prendre en compte ces facteurs pour éviter les défauts géométriques des cordons de soudure et garantir la qualité et la durabilité de la soudure.

II.8 Conclusion :

Ce chapitre a décrit le procédé de soudage SMAW, Nous avons également discuté de divers autres procédés de soudage. Comme nous l'avons vu, le soudage est un procédé caractérisé par des phénomènes physico-chimiques et des paramètres qui rentre en jeu, le soudage est effectué selon des règles précises selon des normes internationales qui garantissent la qualité du soudage.

Les paramètres de soudage incorrects, tels que la vitesse de soudage, la température, le type d'électrode utilisé, peuvent affecter la qualité de la soudure est créée des défauts, les défauts peuvent affecter la résistance et la durabilité de la soudure, ainsi que son apparence esthétique.

Pour éviter tout type de défaut en suivre la procédure qualifiée et utilise les méthodes des control non destructif durant est après soudage.

Chapitre III : Qualification de la procédure de soudage

III.1 Introduction :

Le soudage est une technique de collage des métaux largement utilisée dans l'industrie pour créer des joints solides et durables entre deux pièces métalliques. Pour garantir la qualité et la fiabilité des joints de soudage, il est important de mettre en place des procédures de soudage bien définies et qualifiées. La qualification des procédures de soudage consiste à tester et à évaluer les performances de ces procédures dans des conditions rigoureuses, afin d'assurer la conformité aux normes et aux spécifications de qualité exigées par le client. La qualification des procédures de soudage est donc essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité des soudures et pour répondre aux exigences des fabricants et des clients. La qualification d'une procédure dépend sur les test destructif et non destructif sur un spécimen soudé selon cette procédure.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons explorer les différentes étapes impliquées dans la qualification des procédures de soudage et de la préparation des documents de soudage préliminaire au paramètre de soudage, et les test requis pour qualifier cette procédure.

III .2 Préparation d'une Spécification préliminaire du mode opératoire de soudage:

La préparation d'une spécification préliminaire du mode opératoire de soudage est une étape cruciale pour garantir la qualité des soudures produites. Cette spécification doit être établie avant le début du processus de soudage, afin de définir les paramètres de soudage appropriés pour les matériaux et les conditions de soudage spécifiques.

La spécification préliminaire du mode opératoire de soudage doit inclure des informations détaillées sur les matériaux à souder, les équipements utilisés, les procédures de soudage et les résultats de tests préliminaires. La spécification doit également inclure des critères de qualité pour évaluer les résultats de la soudure.

Les matériaux à souder doivent être décrits en détail, y compris leur type, leur composition et leur épaisseur. Les équipements utilisés, tels que les machines de soudage et les outils, doivent également être spécifiés, avec des informations sur leur marque et leur modèle, ainsi que sur leur capacité et leur réglage.

Les procédures de soudage doivent être clairement décrites, y compris les paramètres de soudage tels que la tension, le courant, la vitesse de soudage et la technique de soudage utilisée. Ces paramètres doivent être compatibles avec les caractéristiques des matériaux à souder afin de garantir une fusion de qualité.

Des tests préliminaires doivent être effectués pour évaluer les propriétés mécaniques et les caractéristiques de soudage du matériau avant le soudage de la pièce complète. Ces tests

peuvent inclure des essais de traction, des essais de dureté et des examens non destructifs tels que les ultrasons et les radiographies.

Une fois la spécification préliminaire du mode opératoire de soudage établie, elle doit être approuvée par des professionnels qualifiés, tels que des ingénieurs de soudage ou des inspecteurs de soudage. Cette approbation garantit que la spécification est conforme aux normes de qualité et aux exigences du projet.

La préparation d'une spécification préliminaire du mode opératoire de soudage est une étape essentielle pour garantir la qualité des soudures produites. Elle requiert une connaissance approfondie des propriétés des matériaux à souder et des procédures de soudage appropriées pour assurer une fusion réussie et de qualité satisfaisante.

III .2.1 Conception de joints :

Cela est laissé à l'ingénieur en soudage. La sélection d'une conception et de dimensions de joint a un effet significatif sur la qualité, la productivité et le coût.

Premièrement il faut déterminer la méthode de soudure et la spécification sur lesquels nous travaillons.

Pour la conception de joint Cela est laissé à l'ingénieur de soudage. La sélection d'une conception et de dimensions de joint a un effet significatif sur la qualité, la productivité et le coût.

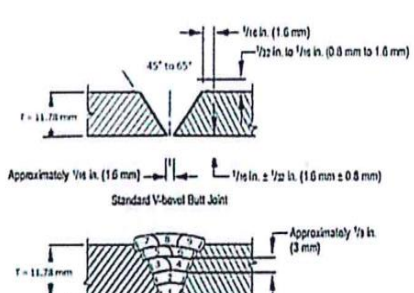
| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WELDING PROCESS: SMAW <i>Procédé(s) de soudage</i> APPLICABLE CODE: API 1104 21st Edition <i>Code applicable</i> Addendum 2 - 2016 | Welding System/ Machine detail TYPE(S): <input checked="" type="checkbox"/> Manual <input type="checkbox"/> Semi-Auto <input type="checkbox"/> Automatic <i>Type(s)</i> Manuel Semi-automatique Automatique CONSTRUCTION CODE: ASME B31.8 <i>Code de construction</i> |
| JOINTS (5.3.2.4) JOINTS (5.3.2.4) Joint No.: _____ Joint N° _____ Backing: <input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <i>Protection de fond</i> Oui Non Backing Material: NA <i>Matériau de protection</i> Method of Adjustment: External clamps <i>Method d'ajustement</i> Edge Preparation: _____ <i>Préparation des bords</i> Other: _____ <i>Autre</i> | Joint Preparation Details: <i>Détail de la préparation conjoints</i>  Root mis-alignment = ± 3mm Backing: No |

Figure 3 .1 Conception de joints

III .2.2 Métal de base :

Lors du choix nous tenon compte de :

- Le type de soudure à réaliser : chaque type de soudure fonctionne mieux avec certaines combinaisons de métaux de base et de matériaux d'apport.

-Les propriétés mécaniques requises : la résistance à la traction, la flexibilité, la résistance à la corrosion, la conductivité thermique et électrique sont des propriétés importantes qui peuvent influencer le choix du métal de base.

-L'application finale : il est important de déterminer l'environnement dans lequel la soudure sera utilisée (température, pression, etc.) afin de choisir un métal de base qui sera compatible et résistant aux contraintes environnementales.

La disponibilité du métal : le coût et la disponibilité du métal peuvent également être des facteurs déterminants dans le choix du métal de base.

Le choix du métal de base avant de souder dépendra de l'application, les exigences de cillent, du type de soudure, des propriétés mécaniques requises ainsi que de la disponibilité et du coût du métal.

| BASE METALS (5.4.2.2 / 6.2.2.e) | | NA | | | | | |
|------------------------------------------|---------|----------------------|-------|-----------------|-------|---------------------|-------|
| <i>METAL DE BASE (5,4,2,2/6,2,2,e)</i> | | Group No. | Gr. C | to | P-No: | Group No. | Gr. C |
| P-No: | / | Group No. | Gr. C | to | P-No: | Group No. | Gr. C |
| P-N° | / | Groupe N° | | avec | P-N° | Groupe N° | |
| Specification type and Grade: | | Pipe API 5L X65 HFW | | to | | Pipe API 5L X65 HFW | |
| Type et classe de spécification | | | | avec | | | |
| Mech'l Prop | | SMYS= 448 Mpa | | to | | SMYS= 448 Mpa | |
| caractéristiques mécaniques | | | | avec | | | |
| Thickness range: | Groove | 5.89 ≤ Th ≤ 15.59 mm | | Fillet | | All / Toutes | |
| Gamme d'épaisseur | Rainure | | | Soudure d'angle | | | |
| Pipe Dia. Range: | Groove | 2.375" ≤ Ø ≤ 24 | | Fillet | | All / Toutes | |
| Gamme dia. de tube | Rainure | | | Soudure d'angle | | | |
| Other: | | | | | | | |
| Autre | | | | | | | |

Figure 3 .2 Métal de base

III .2.3 Métaux d'apport :

-Le matériau de base : le premier critère à considérer est le matériau de base que vous allez souder. Le métal d'apport doit être compatible avec le matériau de base afin d'assurer une solidité de la liaison.

-La méthode de soudure : il existe différentes méthodes de soudure chacune de ces méthodes nécessite un type de métal d'apport spécifique.

-L'application de la pièce soudée : l'application de la pièce soudée est également un facteur important à considérer. Si la pièce est destinée à être utilisée dans des conditions difficiles telles que des températures élevées, une haute humidité ou des environnements corrosifs, le choix du métal d'apport sera également influencé.

-Les propriétés requises de la soudure : les propriétés telles que la résistance à la traction, la résistance à la corrosion, la ductilité, la tolérance aux fissures, entre autres, doivent également être considérées dans le choix du métal.

| FILLER METALS (5.4.2.6) METAL D'APPORT (5.4.2.6) | <u>SMAW</u> | / | <u>SMAW</u> |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Groupe | 3 | / | 3 |
| F-N° | | / | |
| A-No. | - | / | - |
| A-N° | | / | |
| Spec. No. (SFA) | A 5.1 | / | A 5.5 |
| Spec. No. (SFA) | | / | |
| AWS No. (Class) | E 6010 | / | E 8010-P1 |
| AWS No. (Class) | | / | |
| Size of Filler Metal | 2.5 / 3.2 mm | / | 3.2 / 4.0 mm |
| Diamètre du produit d'apport | | / | |
| Mark at Electrode or Filler Metal | Hobart/Eurotrod/ELGA /GEKA | / | Hobart/Eurotrod/ELGA /GEKA |
| Marque d'électrode ou métal d'apport | Celectarc/Cobaco/Esab/Bohler/Lincoln | / | Celectarc/Cobaco/Esab/Bohler/Lincoln |
| Electrode - Flux (Class) | NA | Consumable Insert | NA |
| Electrode - Flux (Classe) | | insertion matériau consuma. | |
| Flux Trade Name | NA | | |
| Marque de Flux | | | |
| Redrying Temperature | NA °C | Holding Time | NA Hours |
| Température de séchage | | Durée de maintien | Heures |
| Other | | | |
| Autre | | | |

Figure 3 .3 Métaux d'apport

III .2.4 Position de soudage :

La position de soudage doit être choisie en fonction de la nature de la pièce à souder. La position de soudage devrait également tenir compte de la facilité d'accès à la zone de soudage. Par exemple, si la zone de soudage est difficile à atteindre, une position de soudage verticale ou surmontée peut être plus appropriée qu'une position à plat.

La position de soudage doit également tenir compte des propriétés du matériau de base et de l'épaisseur de la pièce. Certaines positions de soudage permettent une répartition plus uniforme de la chaleur dans la pièce, ce qui peut être important pour éviter les déformations ou les dommages au matériau.

| POSITIONS (5.4.2.4) POSITION (5,4,2,4) | | | POST HEAT: POST CHAUFFAGE | | |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|
| Position of Groove | | 5G- fixed | Post Heat: | <input type="checkbox"/> Yes | <input checked="" type="checkbox"/> No |
| Position of Groove | | | Post chauffage | Oui | Non |
| Position de rainure | | | Post Heat Temp: | | NA |
| Welding Progression | <input checked="" type="checkbox"/> Up | <input checked="" type="checkbox"/> Down | Température post chauffage | | NA |
| Avancement de soudage | | | Duration: | | NA |
| Position of Fillet | | 5G- fixed | Durée de maintien | | NA |
| Position de soudure d'angle | | | Method: | | NA |
| Other | | | Méthode | | |

Figure 3 .4 Position de soudage

Les positions de soudage :

- 1G – (position de soudage à plat)
- 2G – (position de soudage horizontale)
- 3G – (position de soudage vertical)

-4G – (position de soudage au-dessus ou au-dessus de la tête)

-5G – (position de soudage vertical en montée/descente)

-6G– (position de soudage vertical aérien)

III .2.5 Température de préchauffage et de interpasse :

Ces températures sont déterminées afin d'atteindre la vitesse de refroidissement souhaitée. Il est essentiel de spécifier les bonnes températures car cela empêchera la fissuration des matériaux sensibles.

III .2.6 Traitement thermique :

Cela peut être nécessaire pour retrouver la tolérance dimensionnelle, pour éviter la fissuration, pour réduire la contrainte résiduelle ou pour retrouver certaines propriétés mécaniques.

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>PREHEAT (5.4.2.13) : PRECHAUFFAGE (5.4.2.13) <input checked="" type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No Preheat: Time between start of preheating and commencing welding is 13 minutes Préchauffage: _____ Preheat Temperature: Min 120 °C / 75 mm each side of bevel edge Température de préchauffage: _____ Interpass Temperature: 250°C* Max Température de passe intermédiaire: _____ Inspection: Tempilstik or calibrated thermometer contrôle: Crayon termochrome ou thermomètre étaloné Method: Propane Torche Méthode: Torche Propane <small>*Interpass temperature is measured on the previous deposited pass, if inter pass temperature drops below the minimum preheat temperature, preheat shall be applied to resume welding</small></p> | <p>TECHNIQUE (5.4.2.9) TECHNIQUE (5.4.2.9) Max beads width 03 times electrode diameter Weld Bead: <input checked="" type="checkbox"/> String <input checked="" type="checkbox"/> Weave: 3 times of electrode Cordon soudage: Root & hot Pass Fill & cap pas diameter Orifice or Gas Cup Size: _____ mm Dimensions d'orifice ou de coiffe au gaz de protection Initial & Interpass Cleaning: <input checked="" type="checkbox"/> Brushing <input checked="" type="checkbox"/> Grinding Nettoyage des passes initiale et intermédiaire: Brosage Meulage <input type="checkbox"/> Other _____ Pass (per side): <input checked="" type="checkbox"/> Multiple <input type="checkbox"/> Single Pass (par un coté): Multiple Simple Electrode: <input type="checkbox"/> Multiple <input checked="" type="checkbox"/> Single Electrode: Mittele Simale</p> |
| <p>POST WELD HEAT TREATMENT (5.4.2.14) Post Weld Heat Treatment: <input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No Traitement thermique après soudage: Oui Non Temperature Range: NA Gamme de température: _____ Duration: NA Durée de maintien: _____ Heating Rate, Cooling Rate: NA Taux d'augmentation ou de diminution: _____ Post weld cooling: Cover with insulation Blanket immediately after Welding</p> | <p>Clamp Removal: After 50 to 75% root pass Retrait de la pince: _____ Method of Back Gouging: NA Méthode de gougeage à l'envers: _____ Peening: NA Grenailage: _____ Other: / Autre: _____</p> |

Figure 3 .5 Traitement thermique

III .2.7 Variables de soudage :

Il est essentiel de choisir le bon ampérage, la bonne tension et la bonne vitesse de déplacement. Ces variables ont un impact significatif sur la qualité et la productivité. Il est important de comprendre qu'une procédure de soudage peut atteindre la qualité souhaitée, mais avoir une très faible productivité. Ce n'est pas parce que vous répondez aux critères d'acceptation que vous disposez d'une procédure de soudage optimale. La pénétration n'est pas la seule chose à considérer, mais c'est certainement l'une des plus importantes.

WELDING PARAMETER TABLE

| No. | Pass No | Process & Polarity | Consumables | | Amps Range(A) | Volt Range (V) | Arc Time (Sec) | Weld Length (mm) | Preheat Temp(C°) | Heat Input (kJ/mms) | Inter Pass Temp.(C°) | | | |
|------------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------|------|-----|
| | | | Size | Type | | | | | | | | | | |
| 1 | Root Left | Up Hill DC (-) | 3.2 | E6010 | 63 | 75 | 22 | 33 | 683 | 609 | 120 | 1.85 | 2.33 | / |
| | Root Right | Up Hill DC (-) | 3.2 | E6010 | 64 | 90 | 22 | 34 | 596 | 609 | 120 | 1.94 | 2.13 | / |
| 2 | Hot Left | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 73 | 90 | 24 | 32 | 309 | 619 | 120 | 1.08 | 1.17 | 250 |
| | Hot Right | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 72 | 90 | 22 | 32 | 275 | 619 | 120 | 0.88 | 1.02 | 250 |
| 3 | Fill Left 1 | Down hill DC (+) | 4.0 | E8010-P1 | 102 | 126 | 24 | 29 | 398 | 627 | 120 | 1.88 | 1.92 | 250 |
| | Fill Right 1 | Down hill DC (+) | 4.0 | E8010-P1 | 102 | 129 | 23 | 27 | 350 | 627 | 120 | 1.54 | 1.66 | 250 |
| 4 | Fill Left 2 | Down hill DC (+) | 4.0 | E8010-P1 | 95 | 133 | 24 | 27 | 549 | 634 | 120 | 2.22 | 2.76 | 250 |
| | Fill Right 2 | Down hill DC (+) | 4.0 | E8010-P1 | 89 | 133 | 21 | 27 | 528 | 638 | 120 | 1.99 | 2.31 | 250 |
| 5 | Cap Left 1 | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 69 | 96 | 22 | 27 | 417 | 638 | 120 | 1.22 | 1.38 | 250 |
| | Cap Right 1 | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 59 | 90 | 22 | 29 | 473 | 638 | 120 | 1.27 | 1.47 | 250 |
| 6 | Cap Left 2 | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 69 | 86 | 22 | 28 | 280 | 638 | 120 | 0.83 | 0.85 | 250 |
| | Cap Right 2 | Down hill DC (+) | 3.2 | E8010-P1 | 61 | 90 | 22 | 28 | 365 | 638 | 120 | 0.98 | 1.13 | 250 |
| Shielding Gas: | | N/A | Time lapse between Root pase and 2nd | | 10 Minute Max | | | | Time lapse between 2nd pass (hot pass) to fill 1 pass | | | 15 Minute Max | | |
| | | | | | | | | | Time lapse between one fill 1 pass to fill 2 pass | | | 13 Minute Max | | |
| | | | | | | | | | Time lapse between fill 2 pass to cap 1 pass | | | 240 Minute Max | | |
| Number of Passes befor interruption of welding | | | | | 4Nos (Root, Hot,Fill1, Fill2 pass:A | | | | Time lapse between cap 1 pass to cap 2 pass | | | 04 Minute Max | | |

Figure 3.6 Variables de soudage

III .3 Le rapport de qualification d'un mode opératoire de soudage :

Le rapport de qualification d'un mode opératoire de soudage est un document technique qui décrit les paramètres de soudage utilisés pour souder un matériau spécifique dans des conditions spécifiques, établi par un ingénieur en soudage et doit être approuvé par un organisme de certification. Le rapport de qualification comprend des informations sur les matériaux de base, les électrodes de soudage, les paramètres de soudage tels que la tension, l'intensité et la vitesse d'avance, ainsi que les résultats des tests de qualification tels que les tests de traction, de flexion et de dureté. Le rapport de qualification est utilisé pour garantir que le soudage est effectué conformément aux normes de qualité et de sécurité requises.

Un coupant soudée selon cette procédure préliminaire, la pièce est envoyée au laboratoire pour des essai destructif et non destructif le résultat de ces tests qualifiez nous la procédure et permettez-nous de l'utiliser dans la production.



Figure 3.7 Soudage d'un joint de test

III .3 .1 Les tests non destructifs :

Le contrôle non destructif est une méthode d'inspection qui permet de vérifier l'intégrité et la qualité des matériaux et des structures sans les endommager. Cette technique est utilisée dans la fabrication de pipelines. Le CND comprend plusieurs méthodes telles que le test visuel, la radiographie, la magnétoscopie, le ressuage, et l'ultrason. Chacune de ces méthodes utilise des principes physiques différents pour détecter les défauts, tels que les fissures, les porosités, les inclusions, les déformations et les discontinuités. Le CND est essentiel pour garantir la sécurité et la fiabilité des produits et des structures, Avant de procéder aux tests mécaniques sur les joints de soudure, il est courant d'utiliser des tests non destructifs pour s'assurer qu'ils ne présentent aucun défaut qui pourrait altérer les résultats des tests mécaniques à venir.

Dans cette qualification on a utilisé les méthodes de contrôle non destructif suivante : le contrôle visuel, la radiographie, la magnétoscopie.

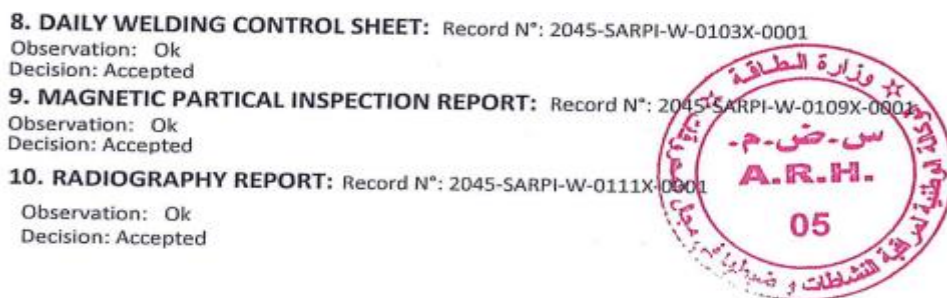


Figure 3 .8 Les tests non destructifs sur joint de test

III .3 .1.1 le contrôle visuel :

Lorsqu'il s'agit de contrôle non destructif, le contrôle visuel est une technique clé. Pour assurer un examen visuel précis, il est important d'avoir des conditions adéquates, notamment un éclairage suffisant et une accessibilité à la partie à examiner permettant d'approcher l'œil à au moins 60 cm sous une incidence de 30 degrés. Bien que le contrôle visuel soit le premier contrôle direct des produits et qu'il ne nécessite pas d'outillages spécifiques, il est souvent utilisé en combinaison avec d'autres techniques de contrôle pour une évaluation plus complète de la qualité des matériaux ou des structures. L'inspection visuelle directe est particulièrement utile pour détecter les défauts qui débouchent en surface.

La qualification d'une procédure dépend au résultat des tests destructifs, ces tests effectués sur un joint soudé selon cette procédure, durant le soudage de ce joint le contrôle visuel est très important pour assurer que le soudage est fait selon la pwps (Conception de joints, Métal de

base, Métaux d'apport, Position de soudage, Température de préchauffage, Variables de soudage)

III .3 .1.2 magnétoscopie :

La magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif largement utilisée pour détecter les défauts de surface dans les matériaux ferromagnétiques tels que le fer, l'acier et le nickel. Cette méthode utilise un champ magnétique pour détecter les variations de flux magnétique causées par des discontinuités dans le matériau.

Avant le test destructif le joint soudé passe par un test magnétoscopie pour assurer qu'il est exempt de défaut débouchant comme les piqures, les fissures, les morsures et caniveaux.

III .3 .1.3 radiographie :

La radiographie X-ray est une méthode courante de contrôle non destructif qui utilise des rayons X pour détecter les défauts internes dans les matériaux. Cette méthode est utilisée pour détecter les fissures, les porosités, les inclusions, les manques de fusion et les déformations dans la soudure.

Avant le test destructif le joint soudé passe par un test radiographie pour détecter tous les défauts internes et assure que les résultats des tests non affectés par les défauts de soudage.

III .3 .2 Les tests destructifs :

Le contrôle destructif d'un joint de soudure est une méthode de test qui implique la destruction partielle ou totale de la pièce soudée pour évaluer la qualité de la soudure. Cette méthode est souvent utilisée pour des soudures critiques où la qualité et la résistance de la soudure sont primordiales.

Les méthodes de contrôle destructif comprennent la découpe, l'écrasement, la flexion, la traction et la torsion. Chacune de ces méthodes implique l'application d'une force à la pièce soudée pour évaluer la résistance de la soudure.

Après le soudage un coupon d'essais est envoyé au laboratoire, il est divisé en plusieurs spécimens pour être soumis à des essais mécaniques.

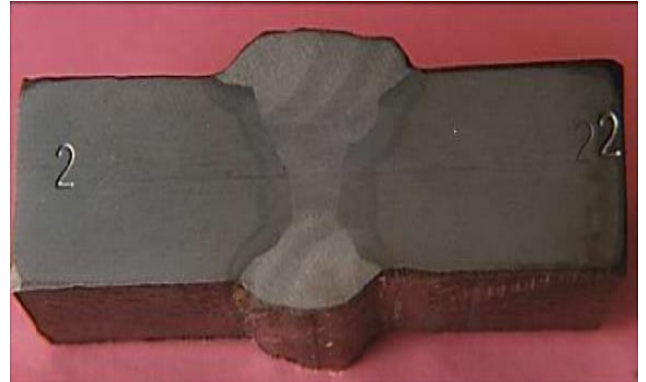
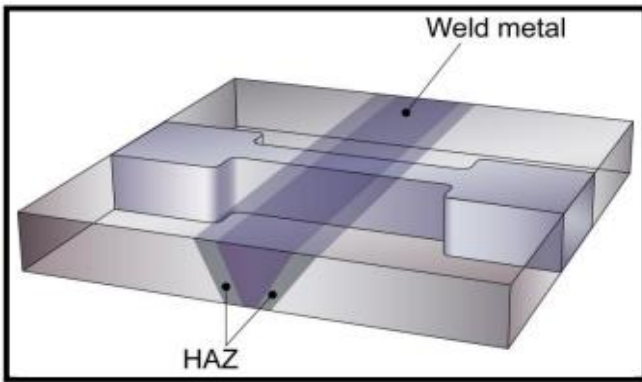


Figure 3.9 Eprouvait de test

III .3 .2.1 Essai de traction :

L'essai de traction est une méthode couramment utilisée pour qualifier les procédures de fabrication. L'objectif de cet essai est de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un matériau ou en appliquant une force de traction.

Pour réaliser l'essai de traction, une machine de traction est utilisée pour appliquer une force de traction à un échantillon de matériau. L'échantillon est fixé à la machine de traction à ses extrémités et la force est appliquée de manière progressive jusqu'à ce que l'échantillon se rompe. Les données recueillies lors de l'essai de traction comprennent la charge maximale supportée par l'échantillon, la déformation maximale subie par l'échantillon et le module d'élasticité du matériau. Ces données permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau, telles que sa résistance à la traction, sa résistance à la rupture.

L'essai de traction est particulièrement utile pour qualifier les procédures de fabrication car il permet de vérifier que les matériaux utilisés dans le processus de fabrication répondent aux spécifications requises. Il peut également être utilisé pour évaluer les performances des produits finis et pour s'assurer qu'ils sont conformes aux normes de qualité et de sécurité.

Le chargement s'accompagne par une mesure en continu :

-l'allongement de l'éprouvette $\Delta L=L-L_0$

-Du chargement appliqué (**F**)

La constitution de la machine :

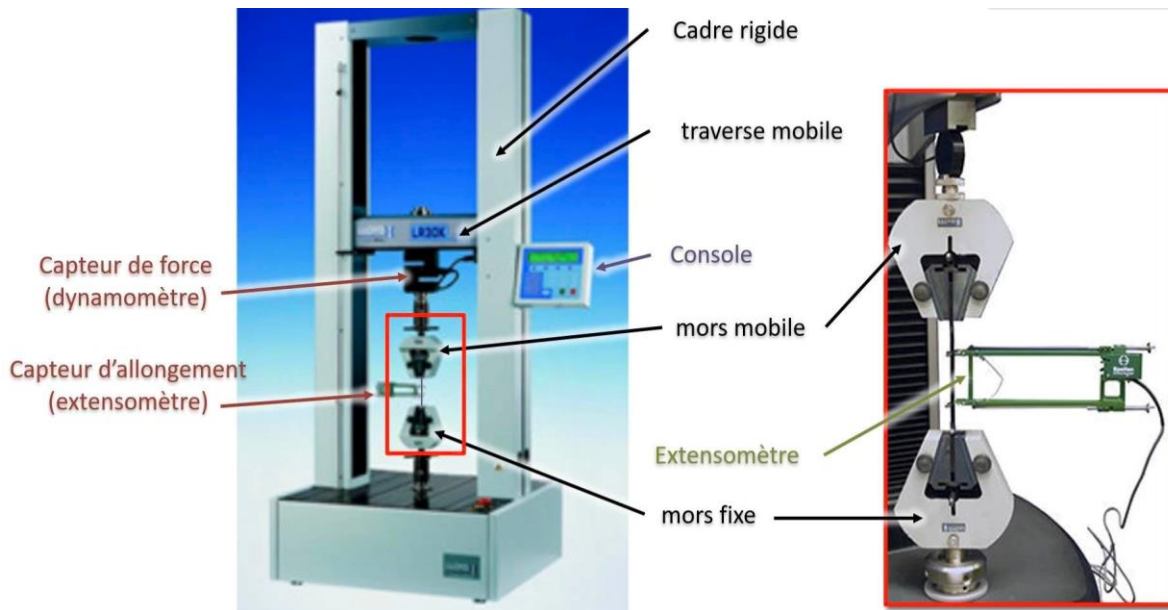


Figure 3 .10 Machine d'essai de traction

En applique une charge croissent en nuton est en va capter et tracé la courbe $f(N)$ en fonction de ΔL , la force augment jusqu'à quille tombe à la rupture.

La contrainte $\sigma = F / S_0$ et la déformation $\epsilon = 100 * \Delta L / L_0$, en peux tracer la courbe de

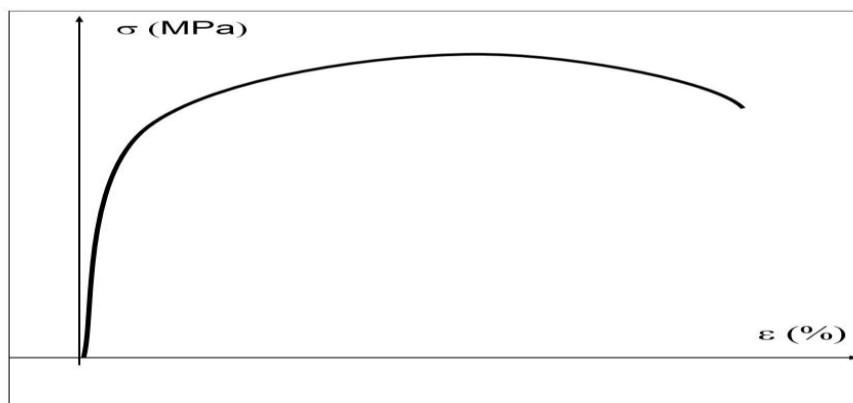


Figure 3 .11 courbe de traction relativisée

La traction relativisée :

- R (résistance à la rupture) : ordonné du sommet de la courbe
- E (Module de Young) : pente de la droite élastique $\Delta \sigma / \Delta \epsilon$
- Re (Limite élastique) : ordonnée du point intersection de la courbe et le droit élastique passant par
- $\epsilon = 0.2\%$

- A% (allongement a la rupture) : projection (parallèlement à la droite élastique) du point ultime de la courbe, avec examen de l'éprouvette après rupture en peut déterminer allongement a la rupture par $A\% = 100 * (L - L_0) / L_0$.
- Z% (coefficient de striction) : $Z\% = 100 * (S_0 - S) / S_0$.

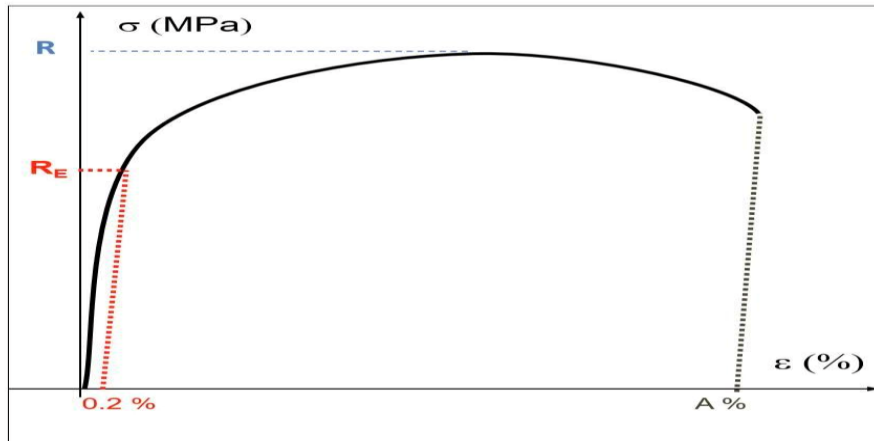


Figure 3 .12 La courbe de traction relativisée

Eprouvait :

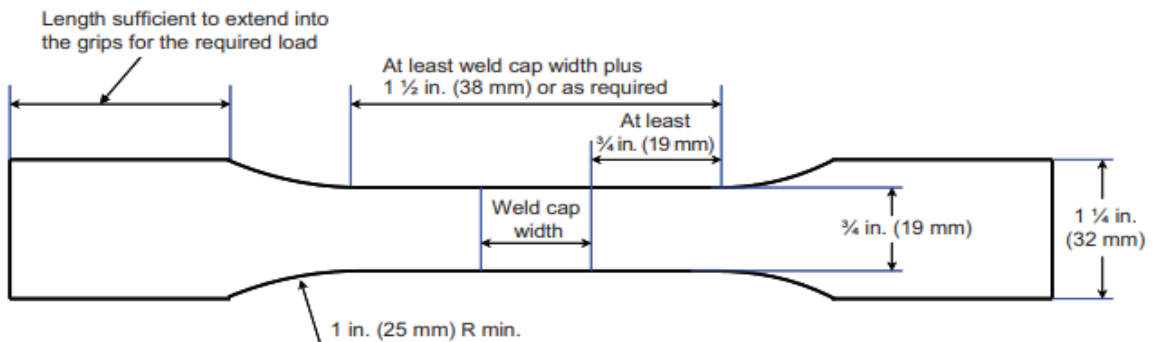


Figure 3 .13 Eprouvait d'essai de traction

Les résultats de l'essai :

| Code | Mechanical characteristics | | | Desision |
|---------------|----------------------------|----------|---------------------------|----------|
| | F max (KN) | Rm (Mpa) | Obeservation | |
| 1 | 194.77 | 645.62 | Out welding | Accepted |
| 2 | 198.88 | 640.53 | Out welding | Accepted |
| 3 | 199.73 | 654.98 | Out welding | Accepted |
| 4 | 198.04 | 652.01 | Breakage in the weld seam | Refused |
| Retest | | | | |
| 1 | 198.28 | 651.74 | Out welding | Accepted |
| 2 | 198.41 | 655.71 | Out welding | Accepted |

Figure 3 .14 Les résultats de l'essai

III .3 .2.2 Test de pliage :

Le test de pliage implique la création d'un échantillon de soudure qui est ensuite soumis à une charge de flexion. L'échantillon est plié à un angle spécifique et la force nécessaire pour réaliser le pliage est mesurée. La qualité de la soudure est évaluée en fonction de la résistance de l'échantillon à la déformation, de la présence de fissures ou de défauts.

Les critères de qualification pour le test de pliage comprennent la capacité de l'échantillon à se plier sans fissures, la capacité de l'échantillon, et la présence de défauts tels que des fissures, des plis ou des bulles. Ensuite soumis à une charge de flexion dans un gabarit de pliage spécifique. L'échantillon est plié à un angle spécifique et la force nécessaire pour réaliser le pliage est mesurée.



Figure 3 .15 D'essai de de pliage

Eprouvait :

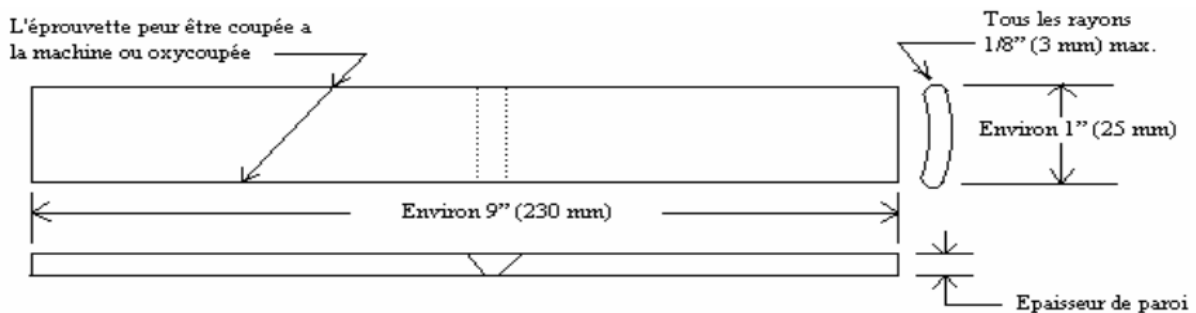


Figure 3 .16 Eprouvait D'essai de de pliage

Les résultats de l'essai :

| Dimensions | | Code | Bend Angle | Mandrel Dimensions | position | Observation | Résultats |
|------------|----------|------|------------|--------------------|-----------|-------------|-----------|
| Larg (mm) | Thk (mm) | | | | | | |
| 25.04 | 12.07 | 1 | 90 | U | face band | RAS | Accepted |
| 25.07 | 12.03 | 2 | 90 | U | face band | RAS | Accepted |
| 25.05 | 12.02 | 3 | 90 | U | face band | RAS | Accepted |
| 25.1 | 12.07 | 4 | 90 | U | face band | RAS | Accepted |
| 25.09 | 12.09 | 5 | 90 | U | root band | RAS | Accepted |
| 25.04 | 12.01 | 6 | 90 | U | root band | RAS | Accepted |
| 25.06 | 12.10 | 7 | 90 | U | root band | RAS | Accepted |
| 25.03 | 12.05 | 8 | 90 | U | root band | RAS | Accepted |

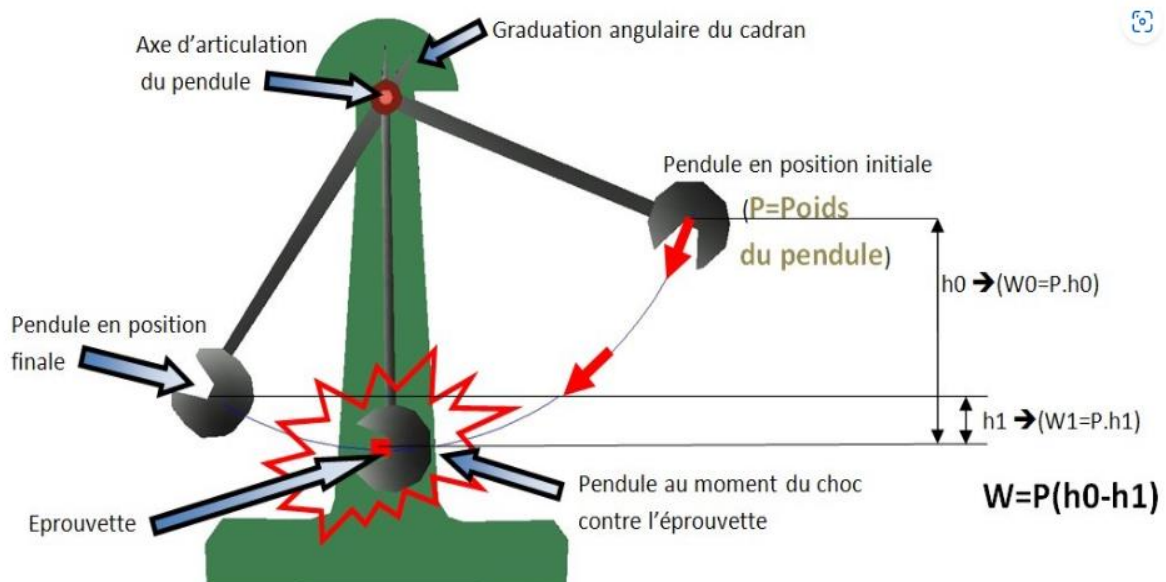
Figure 3 .17 Les résultats de l'essai

III .3 .2.3 Essai de résilience :

L'essai de résilience est une méthode de test qui mesure la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie en cas de choc. Cet essai effectué sur des métaux et des alliages métalliques pour évaluer leur résistance aux chocs et leur ténacité.

Le test de résilience implique la création d'un échantillon de matériau qui est ensuite soumis à une charge de choc. L'échantillon est frappé avec une masse pendulaire à une vitesse et selon un angle spécifique, et l'énergie absorbée par l'échantillon est mesurée.

Les résultats du test de résilience sont utilisés pour évaluer la résistance du matériau aux chocs et pour déterminer sa capacité à absorber de l'énergie en cas de choc.



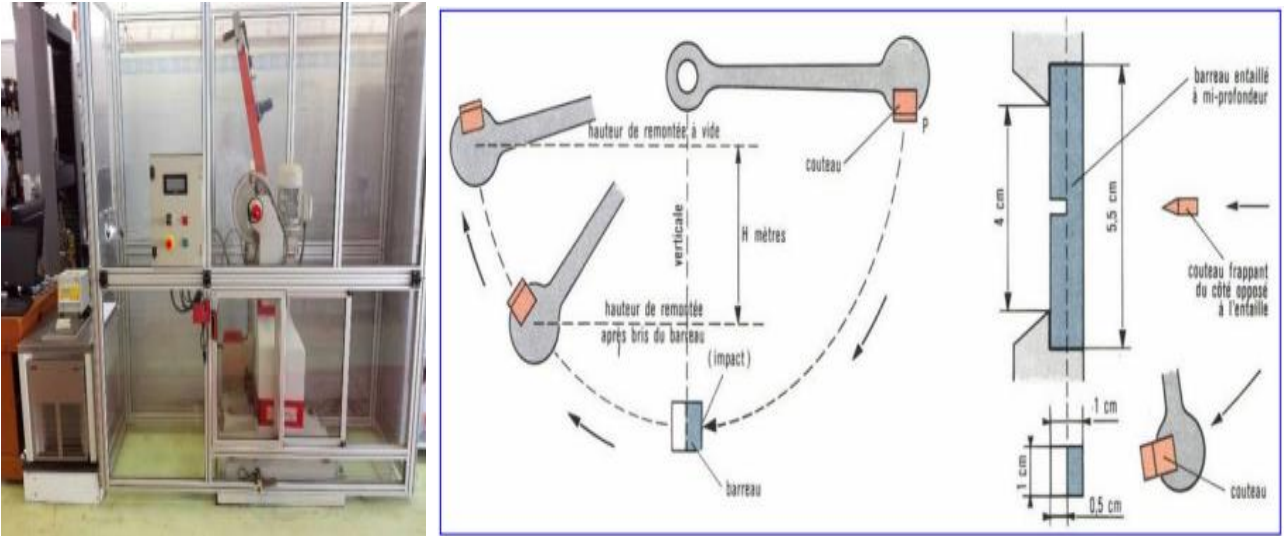


Figure 3 .18 Essai de résilience

L'énergie absorbée : $W=P (h_0-h_1)$ (P en N)

La résistance Kcv : $KcV (J/cm^2) = W/S$

Les résultats de l'essai :

N° Rapport : 007/21

| Zone | N° Test | Test Temp (C°) | Dimension L x L x Ep (mm) | Energy (J) | Moyen | Desision | shear area (%) | Desision |
|------|---------|----------------|---------------------------|------------|-------|----------|----------------|----------|
| WM | 1 | -18 | 10x10x8 | 94 | 92.00 | Accepted | 59 | Accepted |
| | 2 | -18 | 10x10x8 | 100 | | | 62 | Accepted |
| | 3 | -18 | 10x10x8 | 82 | | | 66 | Accepted |

Figure 3 .19 Les résultats de l'essai

III .3 .2.4 Essai de dureté :

Les tests de dureté mesurent la résistance des matériaux à l'usure. Depuis chaque opération Lors de la soudure a des effets métallurgiques, certaines spécifications exigent une limite supérieure à la dureté acceptable de diverses zones de soudure.

L'essai de dureté est effectué avec un équipement qui, sous une charge spécifique, force un petit durcissement bille d'acier ou pointe de diamant dans le surface du métal. La profondeur de pénétration est soit mesuré directement par la machine, ou déduit des dimensions de l'empreinte. Association d'un Avec chaque profondeur d'impression possible, l'inspecteur peut développer une échelle de dureté.

Cette approche de test est utilisée par les trois appareils de mesure de dureté les plus courants : le Brinell, Rockwell et Vickers testeurs de dureté.

Les indices de dureté peuvent varier d'une méthode à l'autre en raison de différences dans les formules utilisées pour définir les indices de dureté, dans le type de matériau et forme utilisée pour faire l'impression, et dans la charge imposée.

- Brinell : le principe est de mesurer la surface de l'empreinte laissée dans le matériau à tester par un pénétrateur sous l'action d'une charge, le pénétrateur est une bille en acier trempé de 5 ou 10 mm de diamètre, la charge entre 500 et 3000 kg, la durée d'application entre 10 et 30 secondes.

$$Hb = 0.102 F / s$$

$$S = 0.5 \pi D ((D - \sqrt{D^2 - a^2}))$$

0.102 : un facteur de conversion de newton en kg

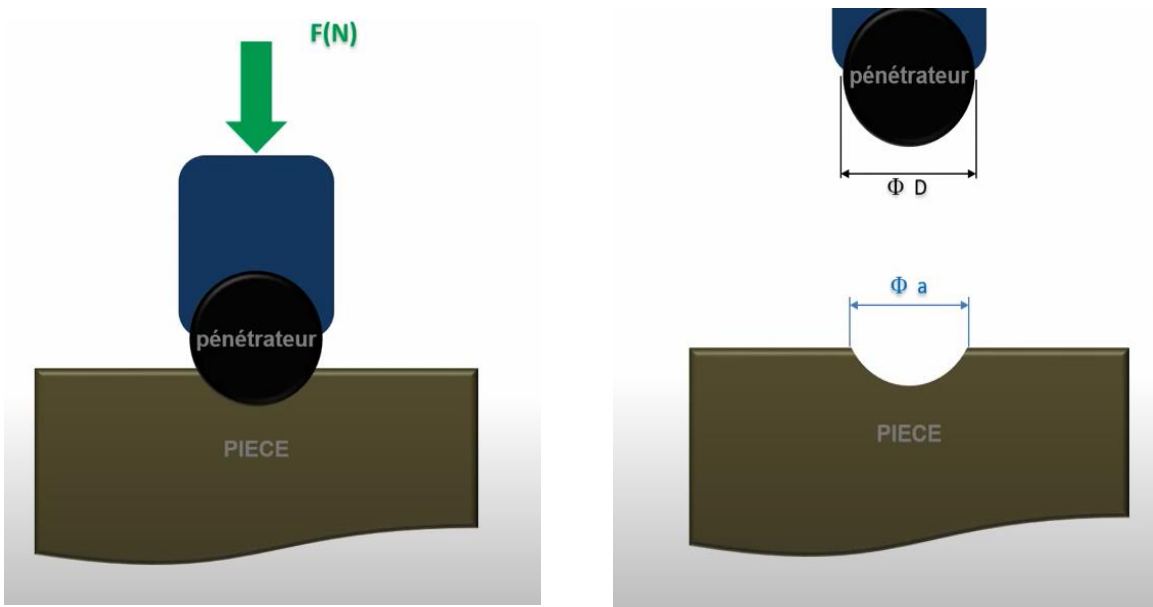


Figure 3 .20 Essai de dureté Brinell

- Vickers : le même principe de Brinell avec un pénétrateur pyramide en diamant de base carré, la charge entre 5 et 1000 kg, la durée d'application est quelque second.

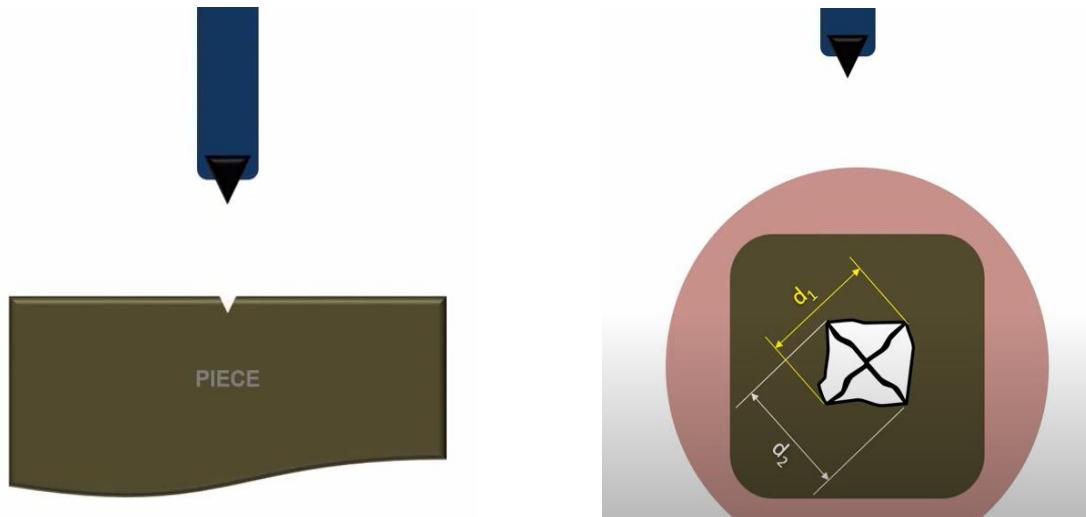


Figure 3 .21 Essai de dureté Vickers

$$H_v : 0.189 F / d^2$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

0.189 : un facteur qui donne la géométrie plus une convention de newton en kg

- Rockwell : le principe est mesurer la profondeur de l'empreinte résultat de l'action d'une charge principale, la charge principale est précédée par une perchage destinée à éliminer l'effet de surface, le pénétrateur est une bille n'acier trempé ou une pointe en diamant, la durée d'application est quelque second.

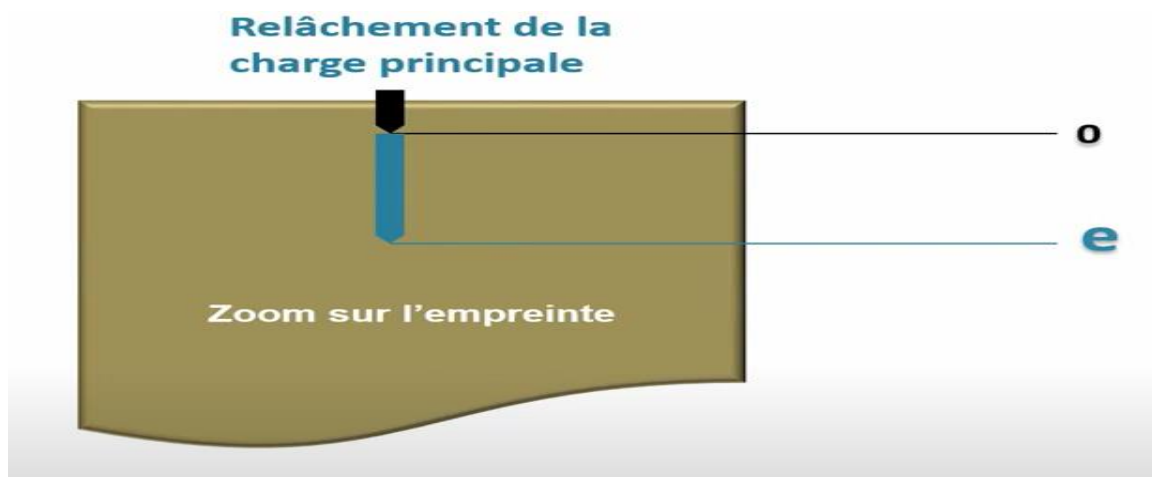


Figure 3 .22 Essai de dureté Rockwell

Bille : $H_r = 130 - e/2$

Diamant : $H_r = 100 - e/2$

Les résultats de l'essai :

| 12 o'clock | | 06 o'clock | | 03 o'clock | | 10 o'clock Seam | | 02 o'clock Seam | |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| Point | Valeurs | Point | Valeurs | Point | Valeurs | Point | Valeurs | Point | Valeurs |
| P1 | 216 | P1 | 204 | P1 | 220 | P1 | 219 | P1 | 200 |
| P2 | 187 | P2 | 194 | P2 | 185 | P2 | 177 | P2 | 206 |
| P3 | 194 | P3 | 214 | P3 | 185 | P3 | 190 | P3 | 195 |
| P4 | 213 | P4 | 197 | P4 | 207 | P4 | 199 | P4 | 193 |
| P5 | 207 | P5 | 198 | P5 | 192 | P5 | 194 | P5 | 194 |
| P6 | 201 | P6 | 196 | P6 | 197 | P6 | 205 | P6 | 190 |
| P7 | 185 | P7 | 186 | P7 | 183 | P7 | 172 | P7 | 189 |
| P8 | 231 | P8 | 217 | P8 | 220 | P8 | 219 | P8 | 216 |
| P9 | 224 | P9 | 230 | P9 | 226 | P9 | 225 | P9 | 221 |
| P10 | 179 | P10 | 177 | P10 | 177 | P10 | 179 | P10 | 181 |
| P11 | 199 | P11 | 190 | P11 | 177 | P11 | 196 | P11 | 196 |
| P12 | 194 | P12 | 184 | P12 | 182 | P12 | 186 | P12 | 179 |
| P13 | 191 | P13 | 190 | P13 | 183 | P13 | 186 | P13 | 177 |
| P14 | 192 | P14 | 197 | P14 | 200 | P14 | 179 | P14 | 199 |
| P15 | 180 | P15 | 180 | P15 | 195 | P15 | 196 | P15 | 192 |
| P16 | 237 | P16 | 224 | P16 | 227 | P16 | 197 | P16 | 201 |
| P17 | 184 | P17 | 192 | P17 | 178 | P17 | 178 | P17 | 204 |
| P18 | 194 | P18 | 181 | P18 | 200 | P18 | 178 | P18 | 172 |
| P19 | 215 | P19 | 196 | P19 | 201 | P19 | 201 | P19 | 223 |
| Min | 179 | Min | 177 | Min | 177 | Min | 172 | Min | 172 |
| Max | 237 | Max | 230 | Max | 227 | Max | 225 | Max | 223 |
| Decision | Accepted | Decision | Accepted | Decision | Accepted | Decision | Accepted | Decision | Accepted |

Figure 3 .23 Les résultats de l'essai

III .3 .2.5 Examens Macrographiques :

Est un test d'assurance qualité de soudage dans lequel un échantillon est préparé avec une finition fine, gravé et examiné sous faible grossissement. Cet essai est utilisé pour révéler la microstructure

Globale du métal fondu et de la zone affectée par la chaleur ainsi que tout défaut de surface pouvant être présent.

Le macro test est généralement effectué sur un échantillon du métal fondu, mais peut également être effectué sur la zone affectée thermiquement. Le test consiste d'abord à préparer l'échantillon en l'usinant pour obtenir une finition très lisse. L'échantillon est ensuite gravé avec une solution acide, révélant la microstructure du métal. Enfin, l'échantillon est examiné au microscope pour rechercher d'éventuels défauts.

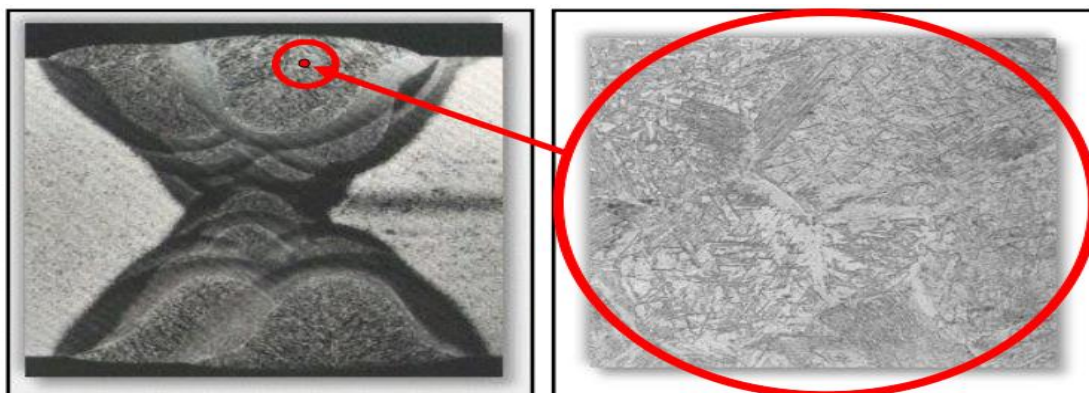


Figure 3 .24 Examens Macrographiques

III.4 -Conclusion :

En conclusion, les tests destructifs sont une méthode importante pour évaluer la qualité et la fiabilité des soudures. Ils permettent de détecter les défauts de soudure et de mesurer les propriétés mécaniques des soudures. Les résultats des tests destructifs sont utilisés pour qualifier les procédures de soudage et pour s'assurer que les soudures sont conformes aux normes et aux spécifications requises.

La qualification des procédures de soudage est un processus essentiel pour garantir la qualité et la sécurité des soudures. Cette qualification implique la sélection des paramètres de soudage appropriés, la réalisation de tests de soudage et de tests destructifs, et la documentation des résultats. Les procédures de soudage qualifiées sont utilisées pour assurer la répétabilité et la fiabilité des soudures dans la production en série.

Chapitre IV : Etude numérique

IV .1 Introduction :

La simulation d'un essai mécanique est une méthode courante pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux. Cette méthode permet de prédire le comportement du matériau sous charge et de comprendre comment il se déforme et se fracture.

Dans ce chapitre, nous allons explorer comment simuler un essai de traction en utilisant le logiciel Abaqus. Nous allons commencer par décrire les étapes nécessaires pour préparer la géométrie et les propriétés matérielles du modèle. Ensuite, nous allons décrire comment appliquer les conditions de charge appropriées pour simuler l'essai de traction.

Enfin, nous allons analyser les résultats de la simulation pour comprendre le comportement du matériau et extraire les propriétés mécaniques pertinentes. Cette simulation sera utile pour confirmer la qualité et la sécurité du joint de soudage et qualifier la procédure de soudage.

IV .2 Généralité sur le code de calcul ABAQUS: (14)

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels.

ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

ABAQUS compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

Abaqus permet de :

1. Modélisation géométrique : Abaqus permet de créer des modèles géométriques de structures complexes en utilisant des outils de modélisation 3D.
2. Définition des matériaux : Le logiciel permet de définir les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les modèles, y compris les propriétés élastiques, plastiques, viscoélastiques et thermiques.
3. Définition des charges : Abaqus permet de définir différents types de charges, y compris des forces, des moments, des pressions, des températures, des vitesses, etc.

4. Analyse statique et dynamique : Abaqus permet de réaliser des analyses statiques et dynamiques pour évaluer le comportement des structures sous différentes conditions.
5. Analyse thermique : Le logiciel permet de réaliser des analyses thermiques pour évaluer la réponse des structures à des conditions de température.
6. Analyse de contact : Abaqus permet de réaliser des analyses de contact pour évaluer les interactions entre les différentes parties des structures.
7. Analyse de fatigue : Le logiciel permet de réaliser des analyses de fatigue pour évaluer la durée de vie des structures soumises à des charges répétitives.
8. Analyse de rupture : Abaqus permet de réaliser des analyses de rupture pour évaluer la résistance des structures à la rupture sous différentes conditions.
9. Visualisation des résultats : Le logiciel permet de visualiser les résultats des analyses sous forme de graphiques, de tableaux et de modèles 3D.

IV .2 .1 Organisation de l'interface Abaqus : (15)

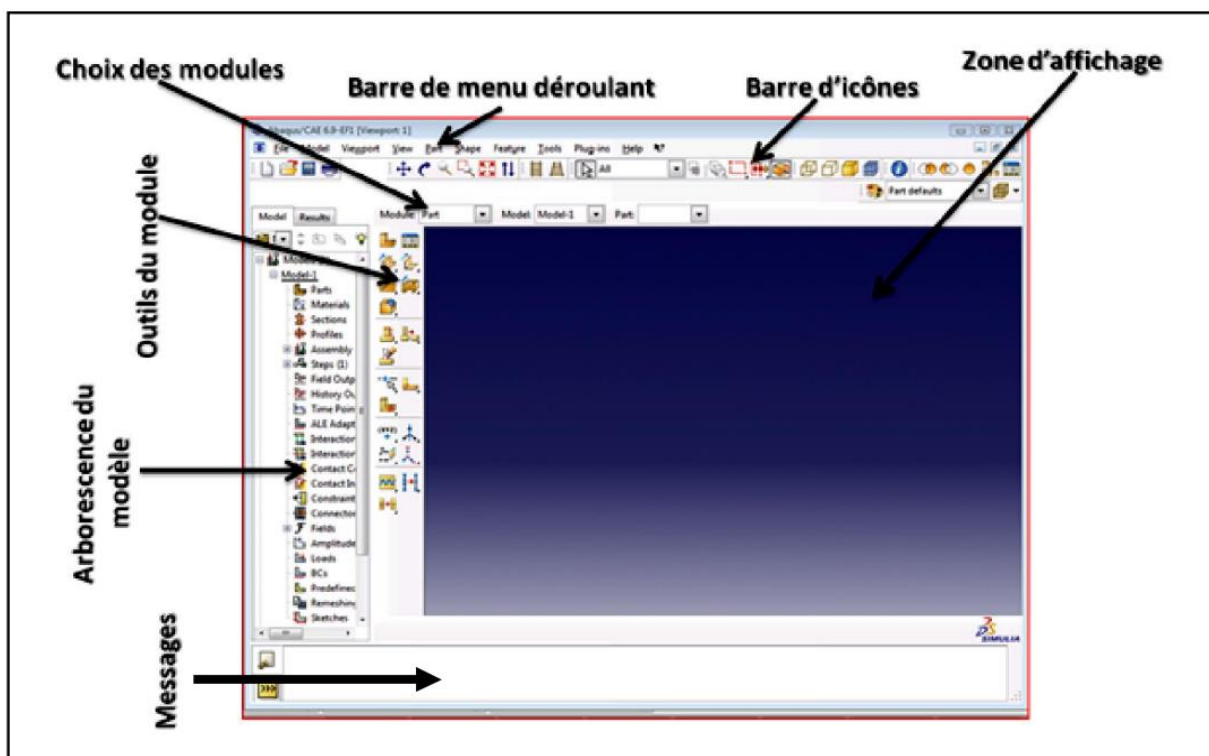


Figure 4 .1 L'interface Abaqus

IV .2 .2 Les modules :

Pour obtenir un jeu de données complet, il est nécessaire de parcourir successivement les différents modules.

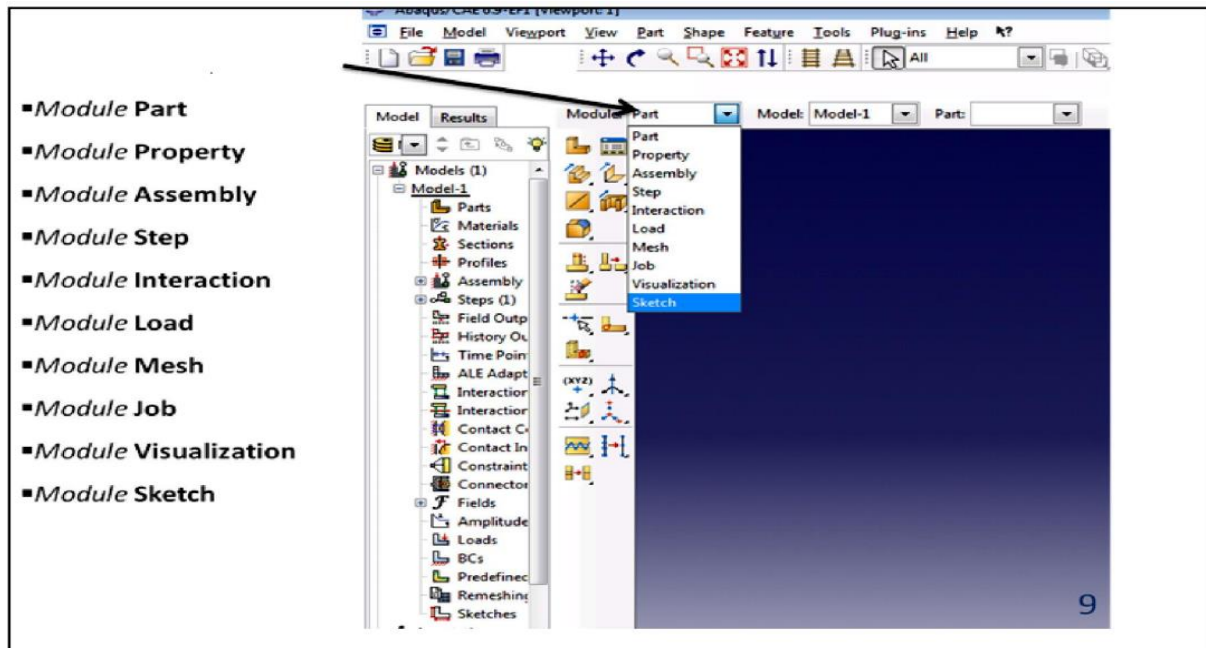


Figure 4.2 Les modules d'abaques

- Le module Part : permet de créer des modèles géométriques 3D de pièces ou de structures à partir de formes de base telles que des solides, des surfaces, des lignes et des points.
- Le module Property : est un outil qui permet de définir les propriétés matérielles.
- Le module ASSEMBLY : est utilisé pour créer et assembler des modèles de structures complexes à partir de plusieurs composants individuels.
- Le module Step : qu'on précise les sorties désirées. Il y a 2 types de sorties : des sorties de type champ qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.
- Le module Interaction : permet de modéliser les interactions entre différents composants d'un système, tels que des contacts, des frottements, des liaisons, etc.
- Le module Load : permet de définir les charges appliquées pour simuler les conditions réelles de fonctionnement du système. Les charges peuvent être appliquées sur des éléments, des surfaces, des nœuds ou des corps entiers.
- Le module Mesh : permet de créer des maillages pour les modèles 3D, 2D et 1D. La qualité du maillage est un facteur important pour la précision des résultats de simulation. Un maillage bien construit permet de réduire les erreurs de calcul et d'obtenir des résultats plus précis.
- Le module "job" : permet de soumettre un travail (ou une simulation) pour l'analyse. Il est généralement utilisé après la création d'un modèle, la définition des étapes d'analyse, et la création d'un fichier d'entrée. Ce module charge les modules nécessaires pour exécuter le travail et le soumet à la file d'attente pour le traitement.
- Le module "visualization" : est utilisé pour visualiser les résultats de l'analyse après qu'elle ait été effectuée. Ce module offre de nombreuses fonctionnalités pour visualiser les résultats.
- Le module "sketch" : est utilisé pour créer des esquisses 2D qui peuvent être utilisées pour générer des géométries complexes en 3D. Les esquisses sont créées en utilisant des outils de dessin tels que des lignes, des arcs, des cercles, des ellipses, etc. qui peuvent

être modifiés à l'aide d'opérations de transformation telles que l'échelle, la rotation, le décalage, etc.

IV.3 Les étapes de simulation :

Création d'un modèle géométrique: Nous dessinons d'abord chaque partie séparément à l'aide des outils

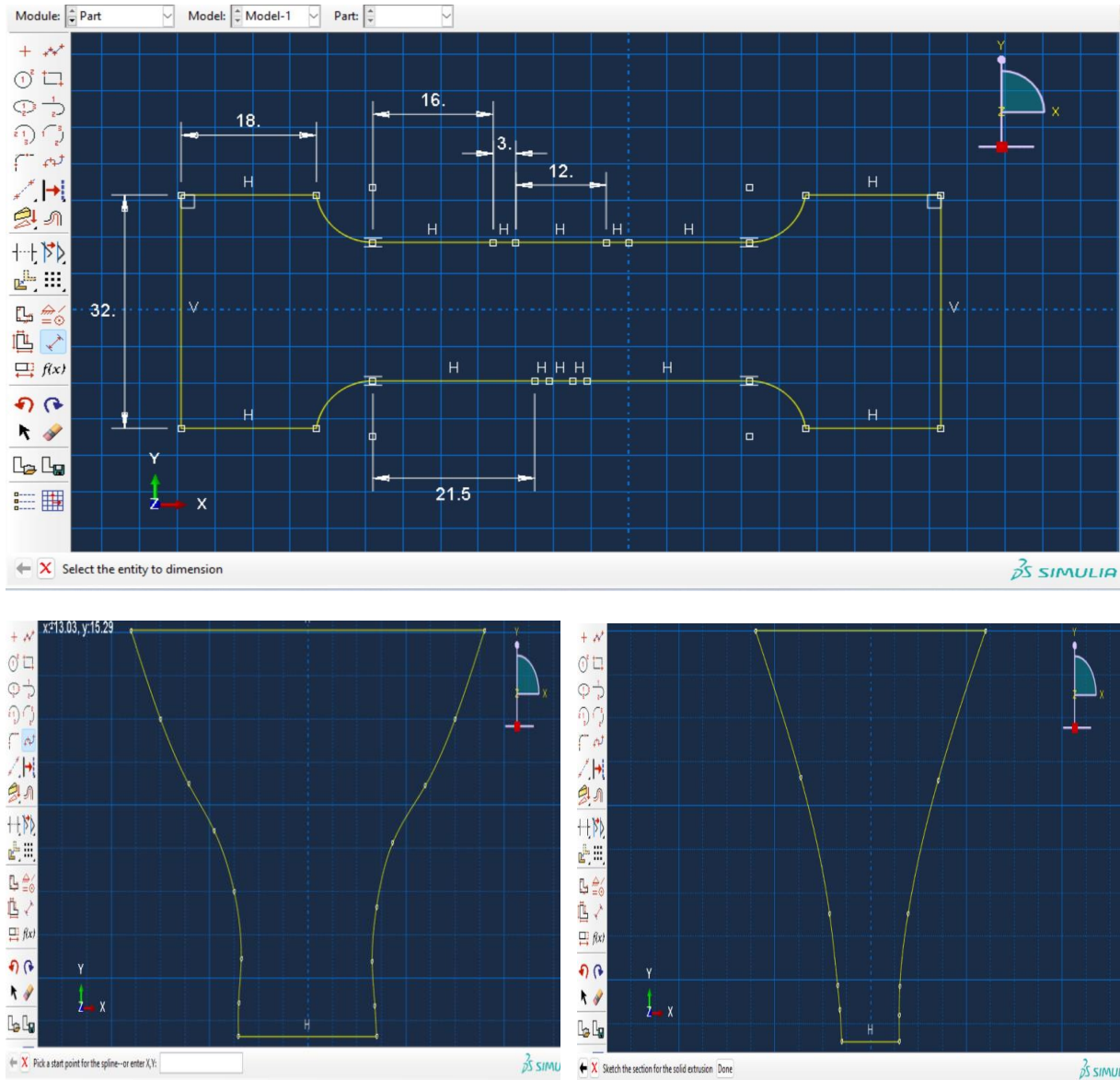


Figure 4.3 Le model géométrique

Après la création du modèle on le donne une épaisseur pour le transformer en 3D

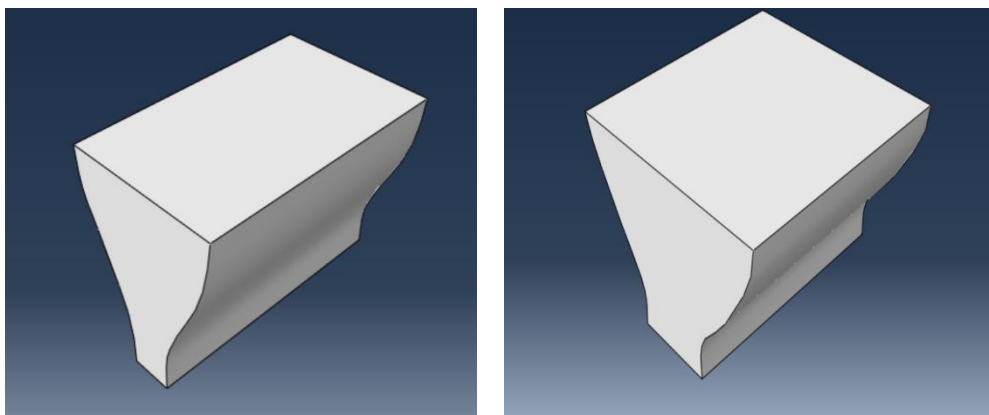
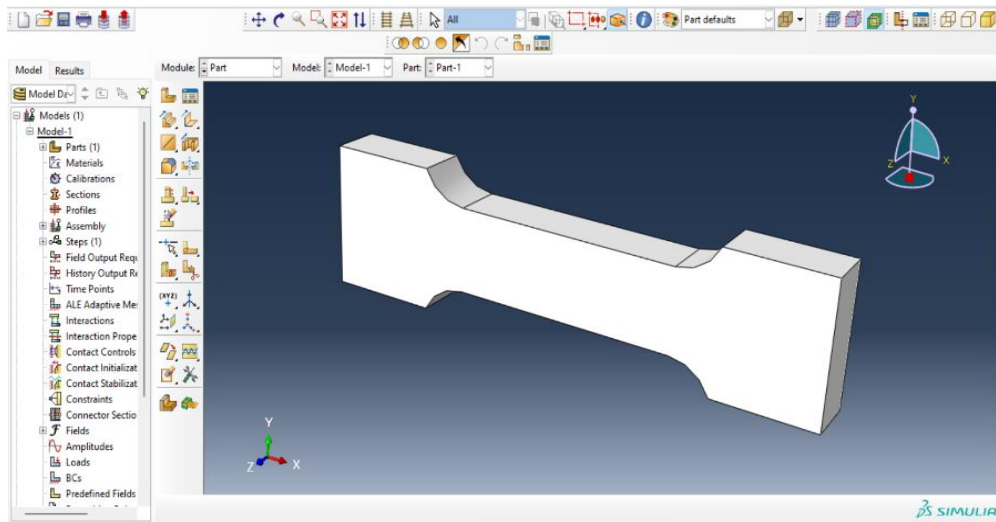


Figure 4.4 Le model en 3D

Attribution des propriétés des matériaux: Les propriétés des matériaux, telles que la densité, le module de Young et le coefficient de Poisson limite d'élasticité, déformation plastique doivent être définies pour chaque matériau le modèle.

- Limite d'élasticité minimale : 448 MPa (65 000 psi)
- Module de Young : 210 Gpa
- Le coefficient de Poisson : 0.3

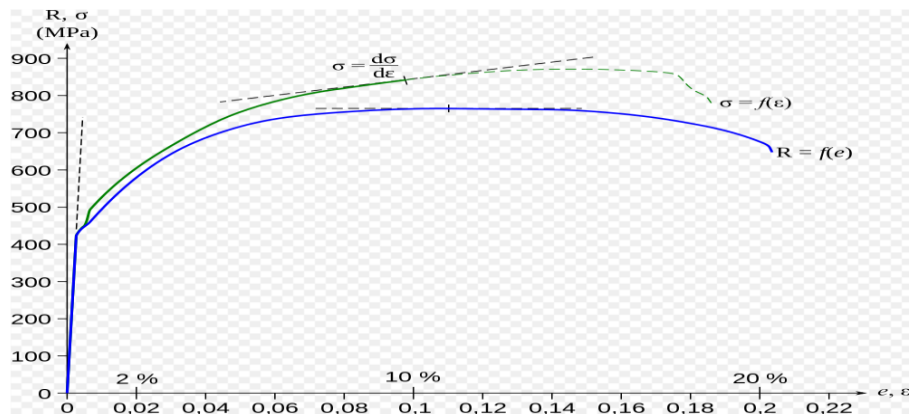


Figure 4.5 La courbe contrainte déformation de l'acier api 5LX65

Assemblage des trois pièces : le module « assembly » permet nous d'assemblé les pièces sous leur forme finale.

En utilisant la propriété « Cut » pour donner chaque pièce sa place :

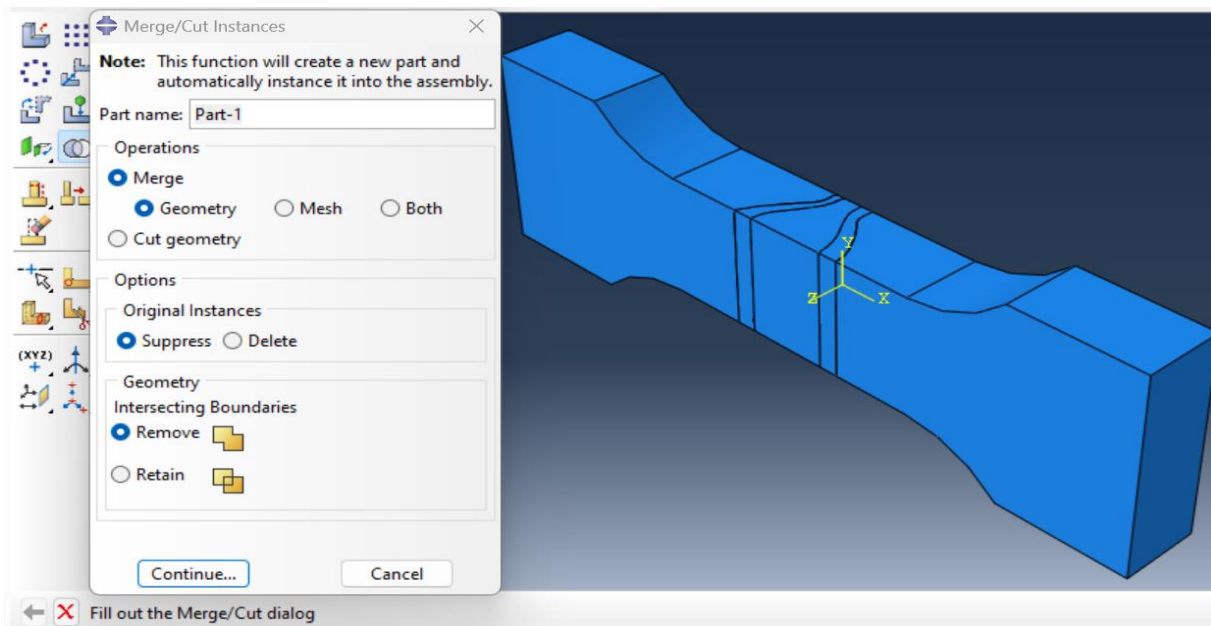


Figure 4 .6 Le module « Assembly »

Module « Step » : Dans le module « step », nous créons une procédure static. Un point important pour cette simulation est de bien définir le temps de calcul ainsi que l'incrémentation. Pour notre projet, nous avons spécifié un temps de simulation de 1 ms avec un facteur d'échelle de temps pour l'incrémentation automatique de 0.1. Ces données sont le fruit de nombreux essais de simulations. Ces deux paramètres jouent un rôle important dans la résolution de la simulation pour ne pas avoir une distorsion d'élément trop importante et que le calcul puisse aboutir.

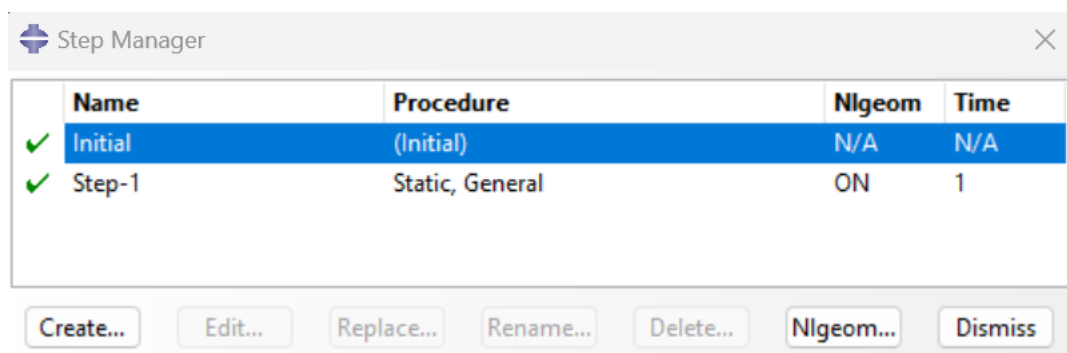


Figure 4 .7 Le Module « Step »

En utilise le module « l'interaction » pour une l'interaction cohésive, c'est une méthode permettant de modéliser la rupture d'une interface entre deux matériaux ou deux parties. Dans

Abaqus, cette méthode peut être implémentée à l'aide de l'option d'interaction cohésive qui permet de définir les propriétés de la décohésion d'un matériau.

L'interaction cohésive est basée sur la notion d'une zone de rupture localisée le long de l'interface entre deux matériaux. Cette zone de rupture est caractérisée par une résistance à la décohésion qui signifie la quantité d'énergie nécessaire pour séparer les deux matériaux sur une unité de surface. Cette résistance est exprimée en termes de déchirement critique.

En prend la surface la plus fort comme un master surface et l'autre comme le slave surface.

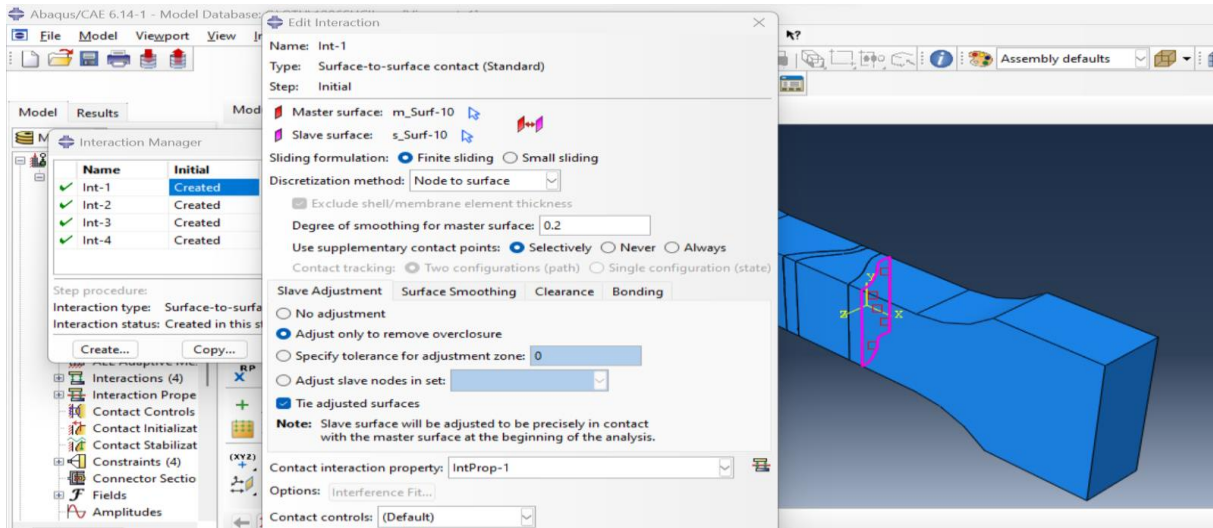


Figure 4.8 Le module « l'interaction »

Nous allons définir les deux chargements nécessaires à la simulation. Tout d'abord nous commandons l'outil en déplacement en ajoutant une condition à la limite dans le « step ». Notre but étant d'encastrer une surface et appliquer une pression maximale à l'autre surface.

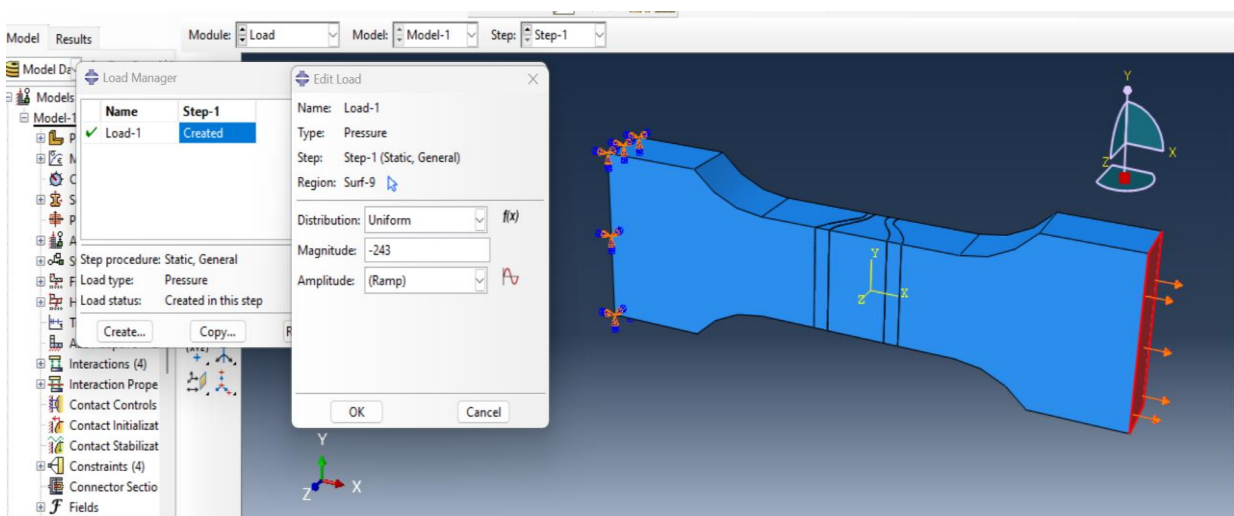


Figure 4.9 Le module « Load »

Le maillage est une étape essentielle de la modélisation numérique par éléments finis dans Abaqus en utilise le module « mesh » pour consiste à diviser le modèle géométrique en une série de petits éléments finis pour représenter le comportement mécanique de la structure. Abaqus propose des options de maillage raffiné pour affiner la résolution de la grille dans les zones de stress élevé.

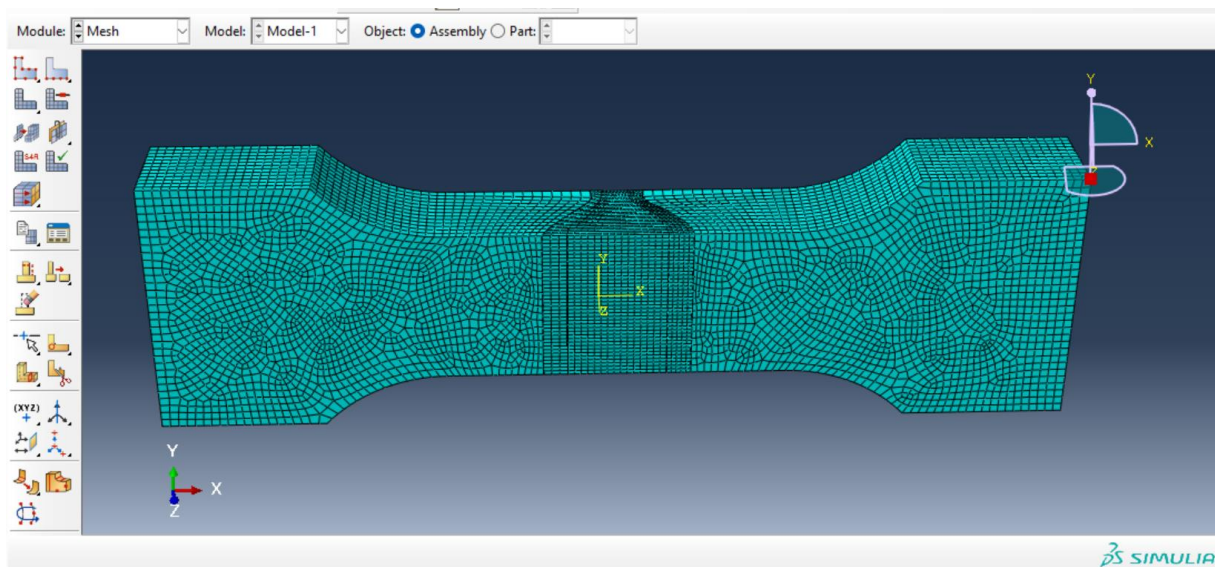


Figure 4 .10 Le maillage du model

Une fois le maillage terminé, le modèle peut être analysé en appliquant des charges et des contraintes pour obtenir des résultats précis sur le comportement de la structure utilisent le module « job ».

Nous notons que les résultats obtenus sur un PC de 8 cœurs, d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz et de 8 GB de RAM.

IV .4 -Conclusion :

La simulation avec Abaqus est un outil puissant pour étudier la réponse mécanique des structures et des composants dans une variété d'industries allant de l'aérospatiale à l'automobile et à la construction.

En utilisant des paramètres précis, des modèles mathématiques sophistiqués et des simulations informatiques avancées, les ingénieurs peuvent obtenir des résultats précis et fiables pour des problèmes complexes. Cependant, la simulation ne doit pas remplacer les tests physiques et les essais de validation, mais plutôt être utilisée en conjonction avec eux pour fournir une approche complète pour la conception et l'analyse de la performance des produits et des systèmes.

En fin, la simulation avec Abaqus est un outil précieux pour les ingénieurs et les scientifiques qui cherchent à développer des produits de haute qualité, sûrs et fiables, tout en réduisant les coûts et les délais de développement.

Chapitre V : Résultat et discussion

V.1 Introduction :

Le présent chapitre est consacré à la présentation des résultats et à la discussion des résultats obtenus à partir d'une simulation réalisée avec le logiciel ABAQUS. Cette simulation a consisté en la modélisation d'un test de traction sur un échantillon normalisé, utilisant la méthode des éléments finis pour approfondir l'étude du comportement mécanique d'un joint soudé.

V.2 Graphe et interprétation :

Tout d'abord en va tracer le chemin et extrayons le graph ensuite nous traitons avec l'Excel et après en fait l'interprétation des graphes pour les résultats obtenue suivante :

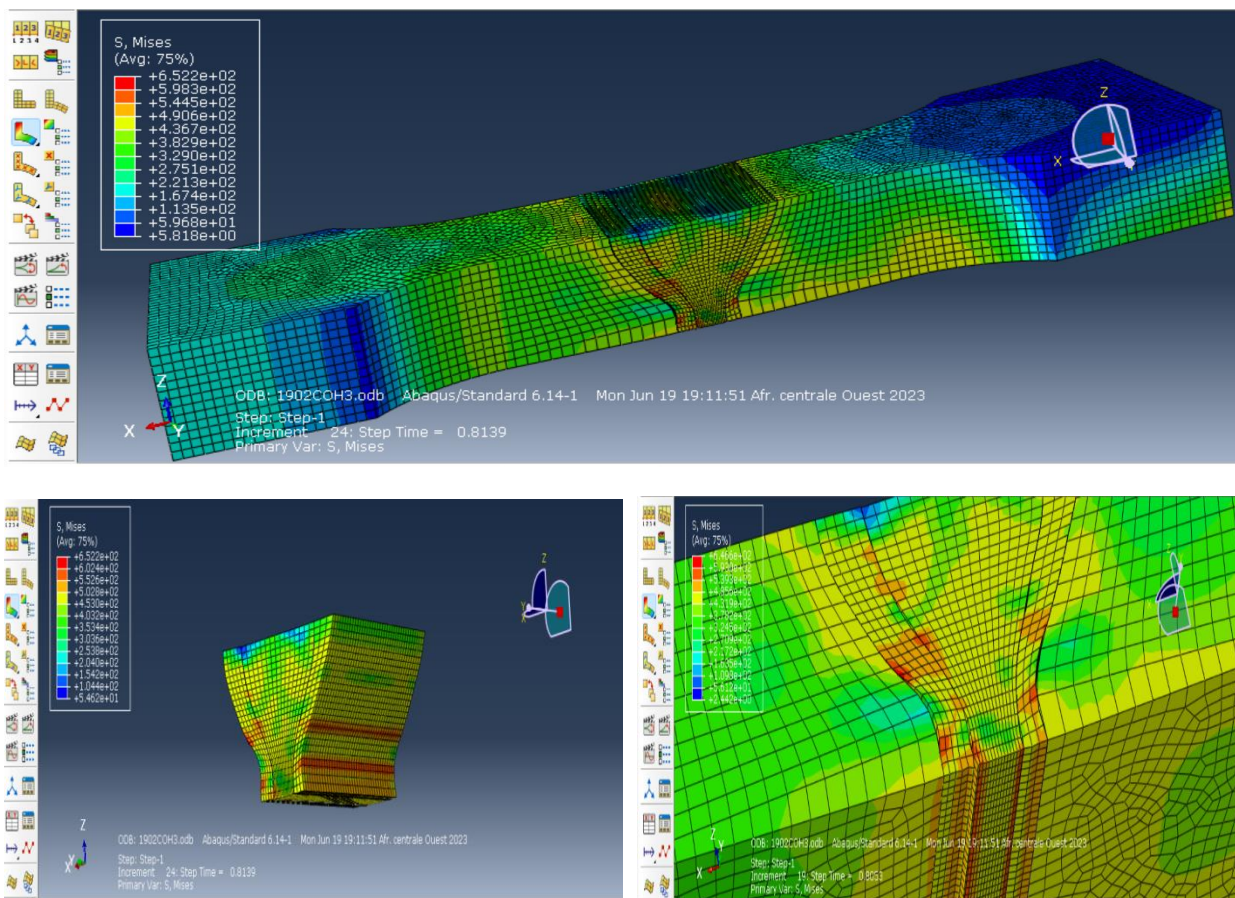


Figure 5.1 Le résultat du module « job »

- Chemin N1 :

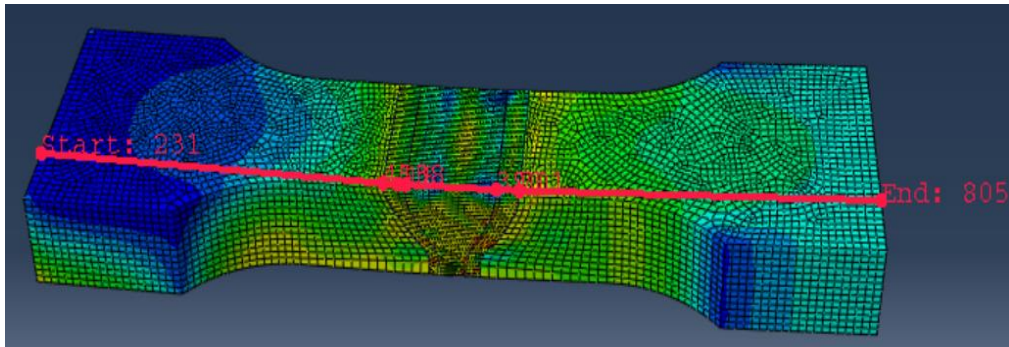


Figure 5.2 Chemin N1

- Graphe de Chemin N1 :

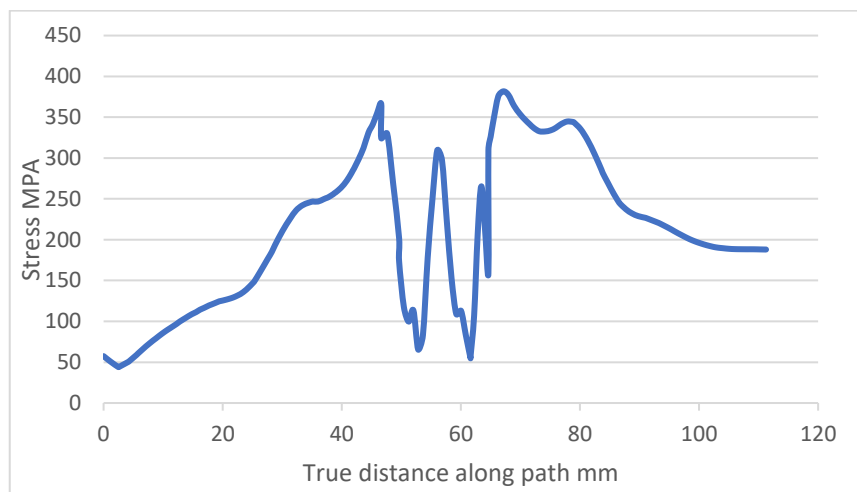


Figure 5.3 Graphe du Chemin N1

Nous avons remarqué que les niveaux de contraintes augmentent au fur et à mesure qu'on approche dans la zone de soudure jusqu'à ce qu'il atteigne le seuil maximal de 380 MPa et ce au niveau de l'interface entre l'acier X65 et la zone affectée thermiquement (ZAT)

Tandis que les prélèvements des niveaux montrent une chute dans la zone affectée thermiquement, Le métal fondu présente des contraintes comparables à celles enregistrées dans le métal de base X65.

Dans le deuxième chemin localisé au milieu du spécimen :

- Chemin N2 :

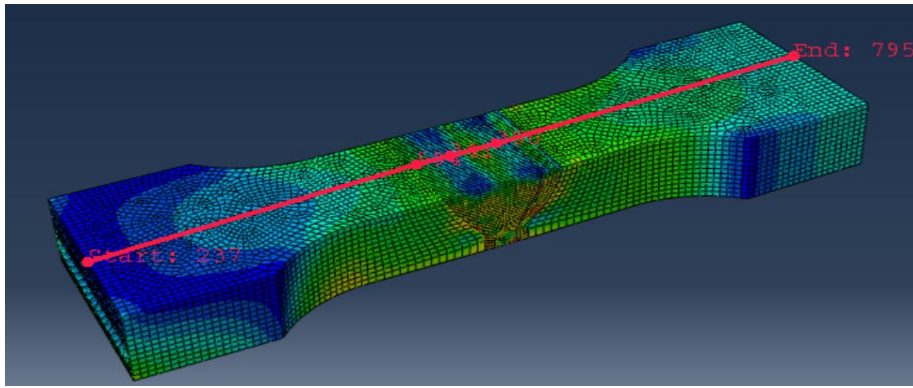


Figure 5. 4 Chemin N2

- Graphe de Chemin N2:

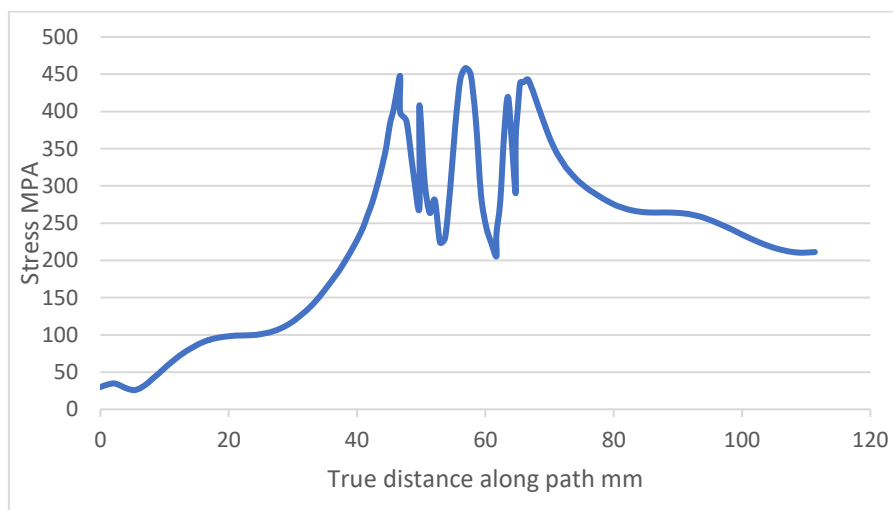


Figure 5.5 Graphe du Chemin N2

L'analyse a révélé une augmentation progressive des niveaux de contraintes le long de l'acier X65, atteignant un seuil de 450 MPa, suivi d'une diminution en traversant la zone affectée thermiquement jusqu'à 200 MPa. Une autre augmentation des niveaux de contraintes a été observée dans la zone fondue jusqu'à 450 MPa, suivie d'une nouvelle diminution lors du passage par la ZAT. Enfin, une augmentation des niveaux de contraintes et une stabilisation autour de 200 MPa ont été constatées dans l'acier X65.

En peut comparer les deux graphes :

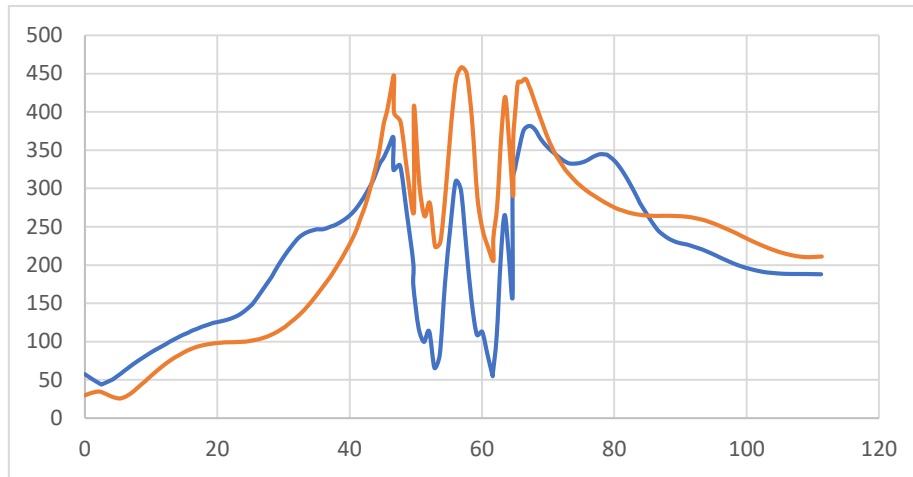


Figure 5.6 Comparaison des deux graphes 1 et 2

En comparant les deux graphes, il a été constaté une augmentation similaire des niveaux de contrainte à mesure que l'on se rapproche de la zone affectée thermiquement. Toutefois, le seuil maximal de contrainte dans le deuxième graphe était plus élevé, atteignant 450 MPa, par rapport au premier graphe. Ensuite, une chute jusqu'à 280 MPa a été observée, qui est plus petite que celle du premier graphe, qui est de 50 MPa. Par la suite, les niveaux de contrainte ont augmenté à nouveau jusqu'à 400 MPa dans la ZAT, puis ont chuté à 220 MPa à l'interface entre la ZAT et la ZF. Enfin, les niveaux de contrainte ont augmenté à nouveau jusqu'à atteindre des niveaux comparables à ceux enregistrés dans le métal de base X65.

En conclusion, l'analyse des niveaux de contrainte dans l'échantillon étudié a permis de tirer plusieurs conclusions. Les niveaux de contrainte ont augmenté progressivement à mesure que l'on se rapproche de la zone de soudure, atteignant une valeur maximale de 450 MPa à l'interface entre l'acier X65 et la ZAT, indiquant une concentration des contraintes dans cette zone, probablement due aux effets thermiques et structuraux liés au processus de soudage. En revanche, les prélèvements effectués dans la ZAT ont montré une diminution des niveaux de contrainte par rapport à la zone adjacente, pouvant s'expliquer par des processus de relaxation ou de redistribution des contraintes à proximité de la ZAT.

- Chemin N3 :

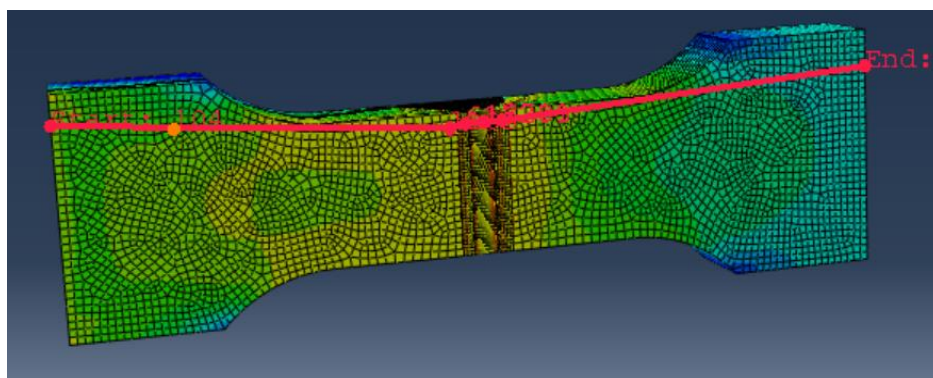


Figure 5.7 Chemin N3

- Graphe de Chemin N3:

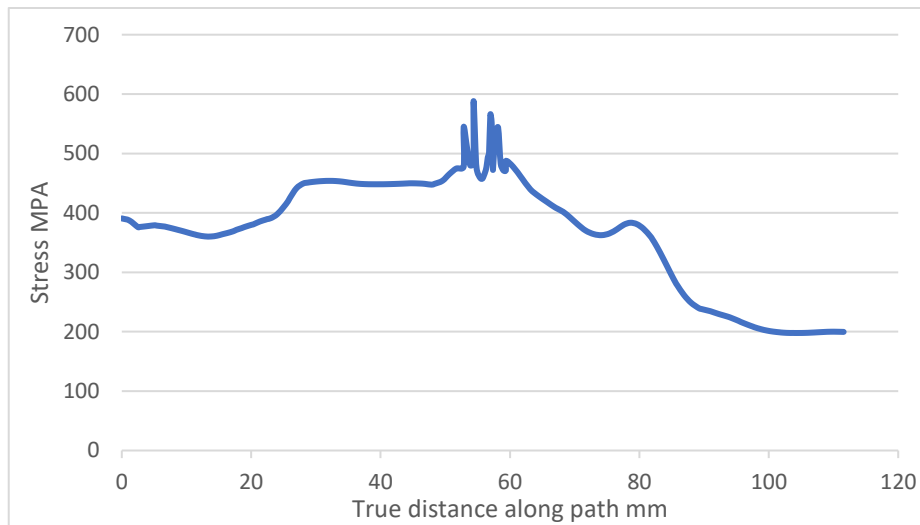


Figure 5. 8 Graphe du Chemin N3

L'analyse des niveaux de contrainte dans l'échantillon étudié a révélé une augmentation progressive à mesure que l'on s'approche de la zone de soudage, atteignant un seuil maximal d'environ 600 MPa, suivi d'une diminution des niveaux de contrainte le long du métal de base.

- Chemin N4 :

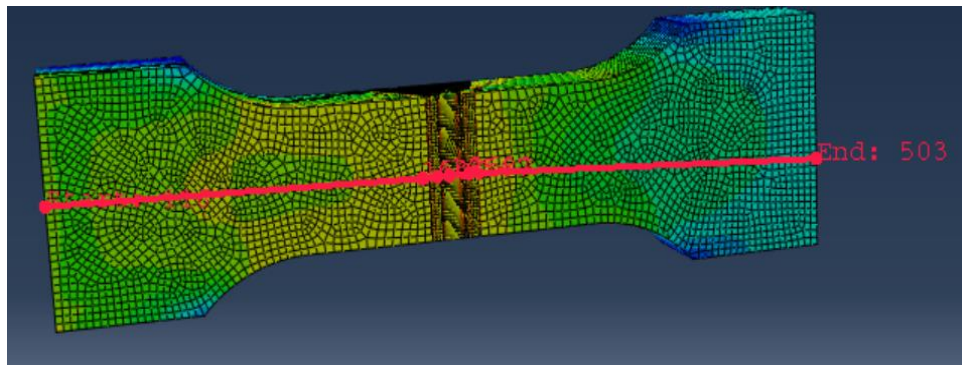


Figure 5. 9 Chemin N4

- Graphe de Chemin N4:

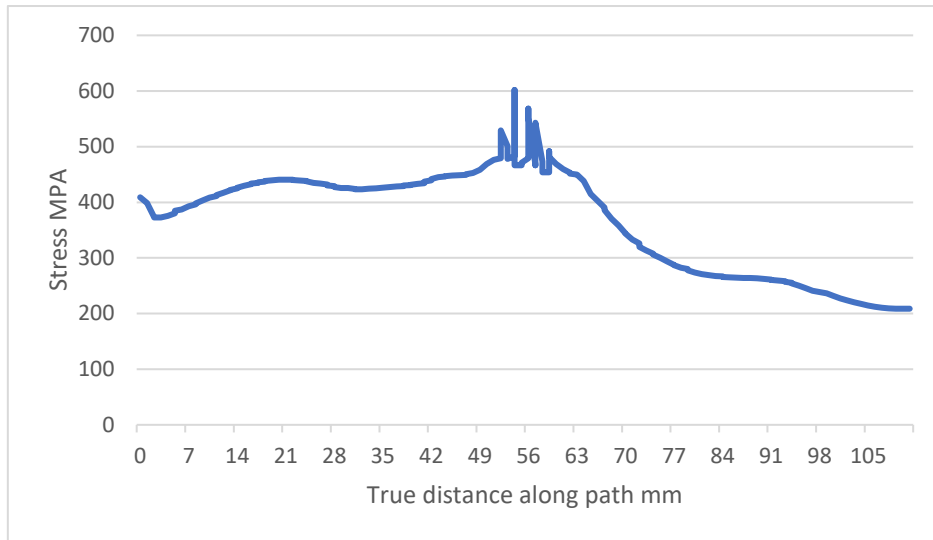


Figure 5. 10 Graphe du Chemin N4

En examinant les niveaux de contrainte dans l'échantillon étudié, il a été observé une augmentation graduelle à mesure que l'on se rapproche de la zone de soudure, atteignant un pic maximal d'environ 600 MPa, suivi d'une diminution des niveaux de contrainte le long du métal de base.

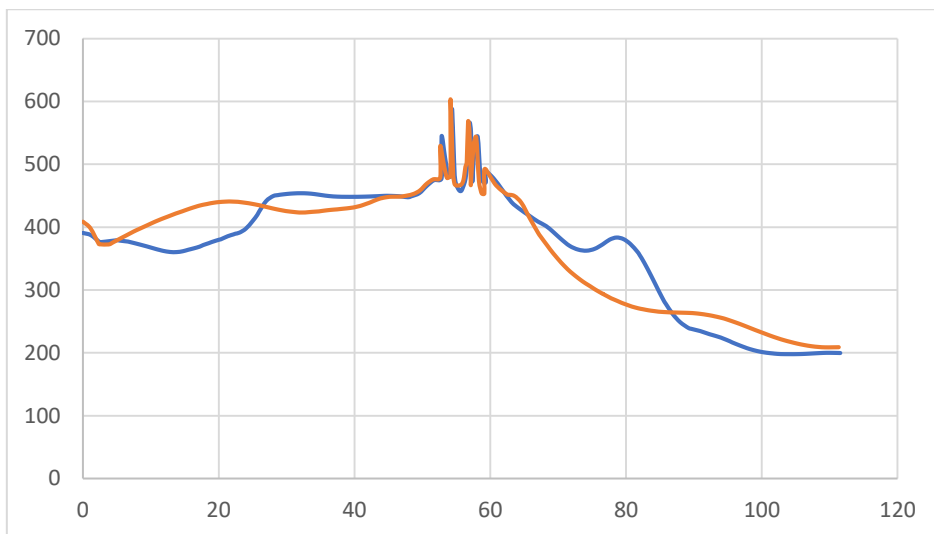


Figure 5. 11 Comparaison des deux graphe 3 et 4

L'analyse comparative des deux graphes a révélé une augmentation similaire des niveaux de contrainte à mesure que l'on se rapproche de la zone affectée thermiquement, bien que le seuil maximal de contrainte dans le deuxième graphe soit comparable à celui du premier graphe. En outre, il a été observé que l'augmentation et la diminution des niveaux de contrainte dans le deuxième graphe se produisent légèrement plus rapidement que dans le premier graphe.

En tirant des conclusions à partir de ces observations, il est possible de constater que la partie supérieure de l'échantillon est plus résistante que la partie inférieure, ce qui suggère que l'usure de la pièce se produit de la partie basse vers la partie haute.

- Chemin N5 :

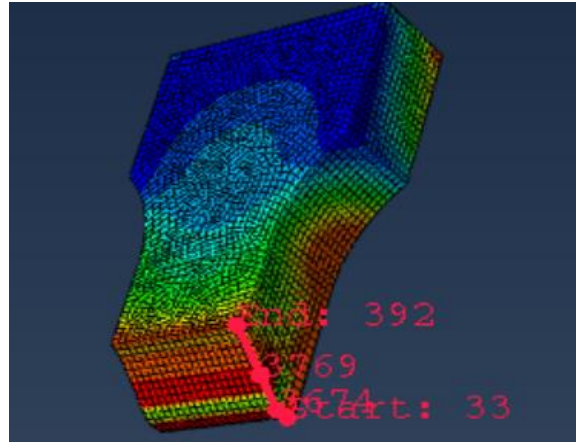


Figure 5.12 Chemin N5

- Graphe de Chemin N5:

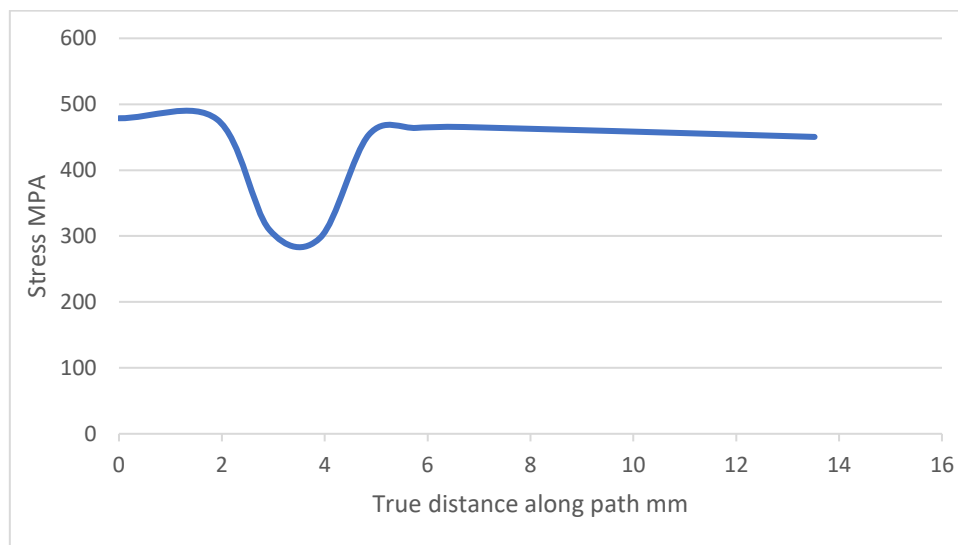


Figure 5.13 Graphe du Chemin N5

En interprétant le graphe de contrainte, on peut constater que les niveaux de contrainte restent stables à 500 MPA, puis chutent au moins de 300 MPA, avant de connaître une augmentation suivie d'une stabilité à 450 MPA.

- Chemin N6 :

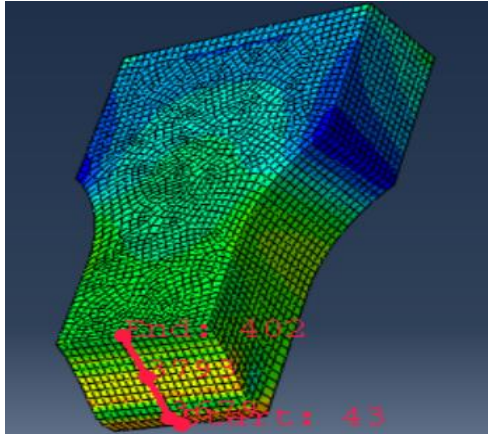


Figure 5. 14 Chemin N6

- Graphe de Chemin N6:

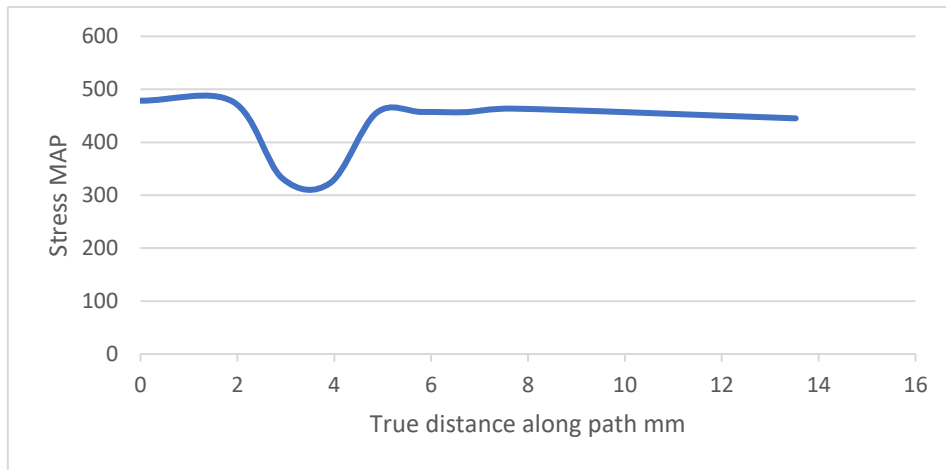


Figure 5.15 Graphe du Chemin N6

En interprétant le graphe de contrainte, il est possible de remarquer une stabilité des niveaux de contrainte à 500 MPa, suivie d'une chute jusqu'à 300 MPa, puis d'une augmentation et d'une nouvelle stabilité à 450 MPa.

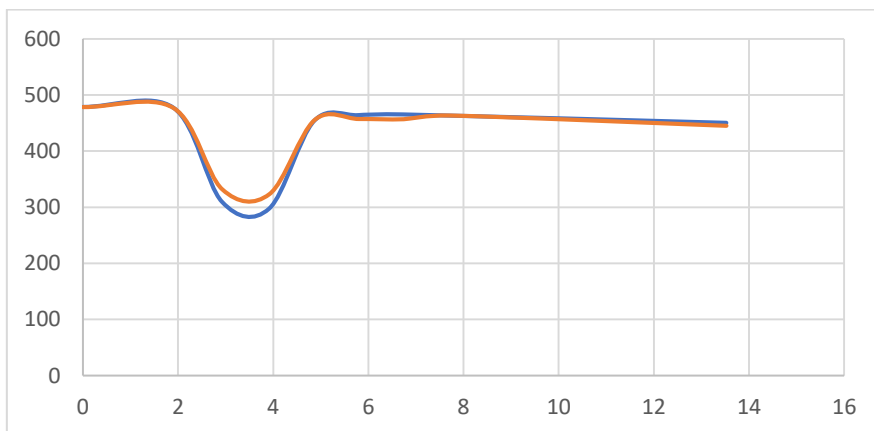


Figure 5. 16 Comparaison des deux graphe 5 et 6

En comparant les deux graphes, il est possible de conclure qu'ils sont similaires, car ils présentent la même chute de niveaux de contrainte, ce qui suggère une zone de métal de base plus faible.

- Chemin N7 et 8 :

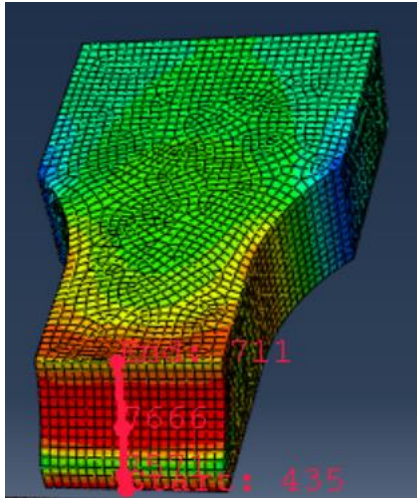


Figure 5. 17 Chemin N7

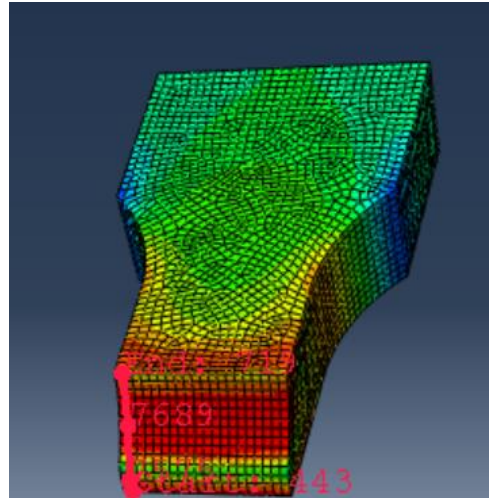


Figure 5. 18 Chemin N8

- Graphe de Chemin N7:

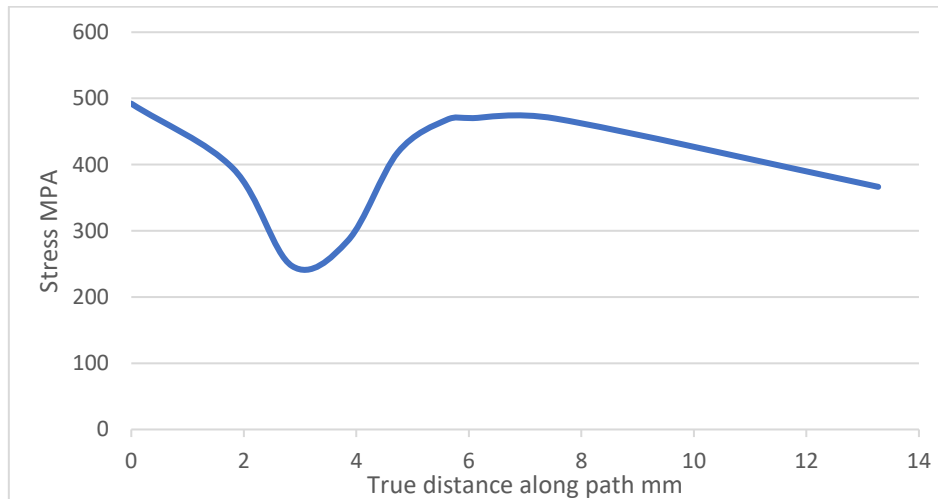


Figure 5. 19 Graphe du Chemin N7

L'interprétation du graphe N7 révèle une chute des niveaux de contrainte de 500 MPa à 250 MPa sur les deux premiers millimètres, après une augmentation des niveaux de contrainte jusqu'au niveau initial, suivie d'une stabilisation relative.

- Graphe de Chemin N8:

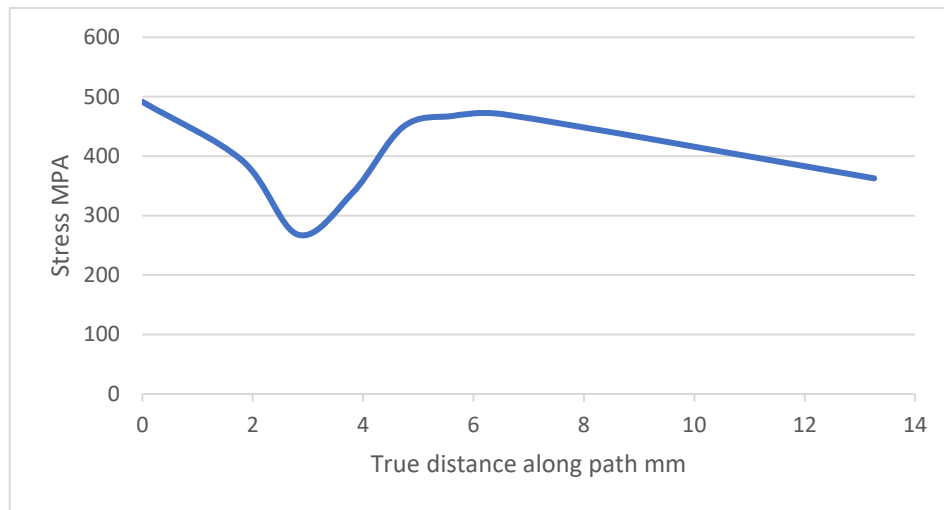


Figure 5. 20 Graphe du Chemin N8

D'après l'analyse du graphe N7, il a été constaté une diminution des niveaux de contrainte de 500 MPa à 250 MPa sur les deux premiers millimètres, suivie d'une augmentation jusqu'au niveau initial, puis d'une stabilisation relative.

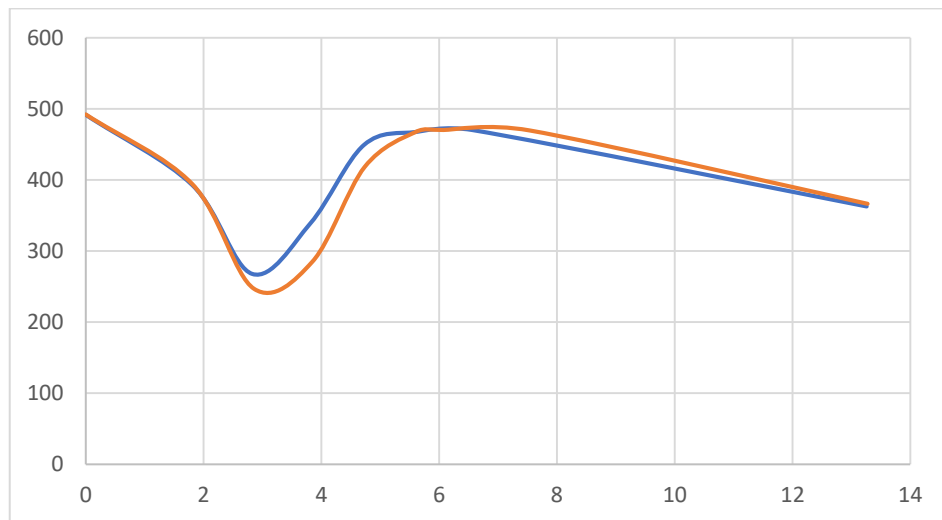


Figure 5. 21 Comparaison des deux graphe 7 et 8

Nous avons observé que les graphes du côté gauche et du côté droit présentaient des similitudes, à l'exception d'une légère différence : la chute des niveaux de contrainte dans les graphes du côté droit était plus importante que celle du côté gauche, atteignant 250 MPa à droite et environ 300 MPa à gauche.

- Chemin N9 :

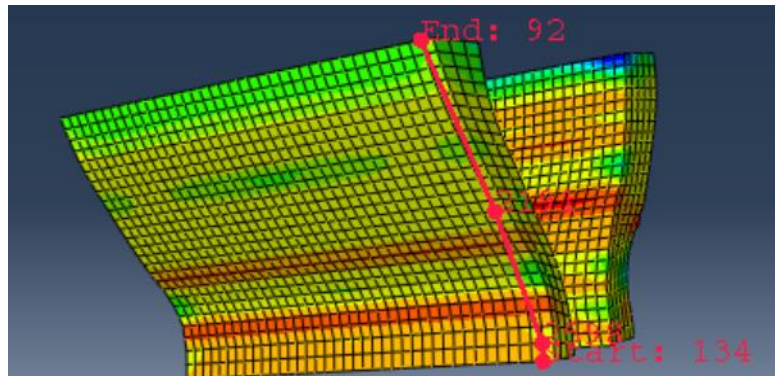


Figure 5. 22 Chemin N9

- Graphe de Chemin N9:

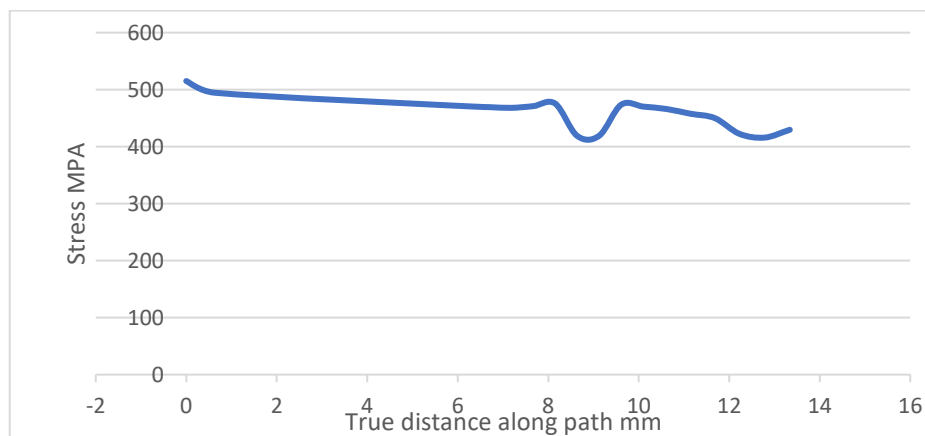


Figure 5.23 Graphe du Chemin N9

Suite à l'observation du graphe de contrainte de la zone affectée thermiquement (ZAT), il a été constaté que les niveaux de contrainte demeurent stables à 500 MPa, après une chute à 400 MPa entre 8 mm et 9,5 mm, suivie d'une augmentation et d'une stabilisation à 500 MPa.

- Chemin N10 :

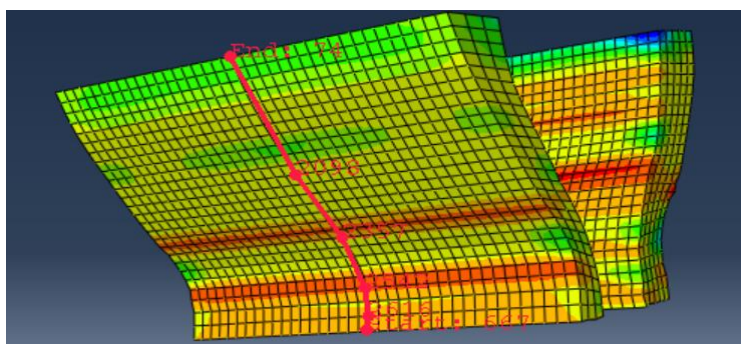


Figure 5. 24 Chemin N10

- Graphe de Chemin N10:



Figure 5.25 Graphe du Chemin N10

Lors de l'analyse de la trajectoire de la partie extérieure de la zone affectée thermiquement, une augmentation des niveaux de contrainte a été observée, atteignant environ 580 MPa, suivie d'une chute jusqu'au niveau initial de 500 MPa. Cette tendance a été suivie d'une nouvelle augmentation, également autour de 580 MPa, puis d'une stabilisation entre le 6ème et le 9ème millimètre. Par la suite, une chute des niveaux de contrainte jusqu'à 400 MPa a été notée, suivie d'une nouvelle augmentation et d'une nouvelle chute jusqu'à la stabilisation finale.

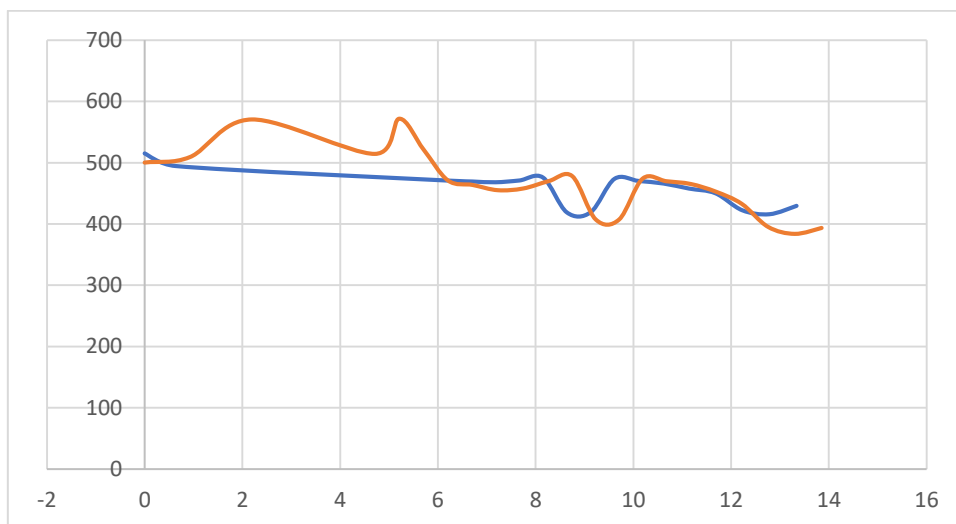


Figure 5.26 Comparaison des deux graphe 9 et 10

Lors de l'observation des deux graphes, il a été constaté des différences notables en termes de niveaux de contrainte. Alors que le graphe N9 présentait une stabilisation à 0 mm jusqu'à 8 mm, le graphe N10 montrait une augmentation des niveaux de contrainte jusqu'à environ 580 MPa après le 8ème millimètre. Les deux graphes ont ensuite connu une chute jusqu'à 400 MPa, suivie d'une nouvelle augmentation et d'une autre chute jusqu'à la stabilisation finale.

- Chemin N11 :

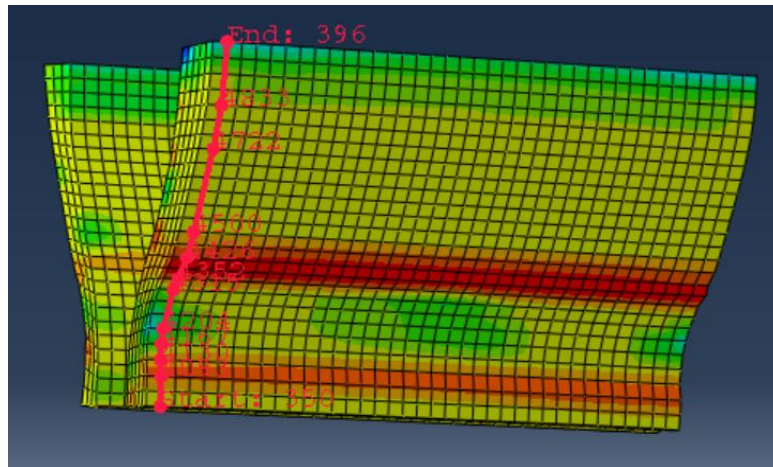


Figure 5. 27 Chemin N11

- Graphe de Chemin N11:

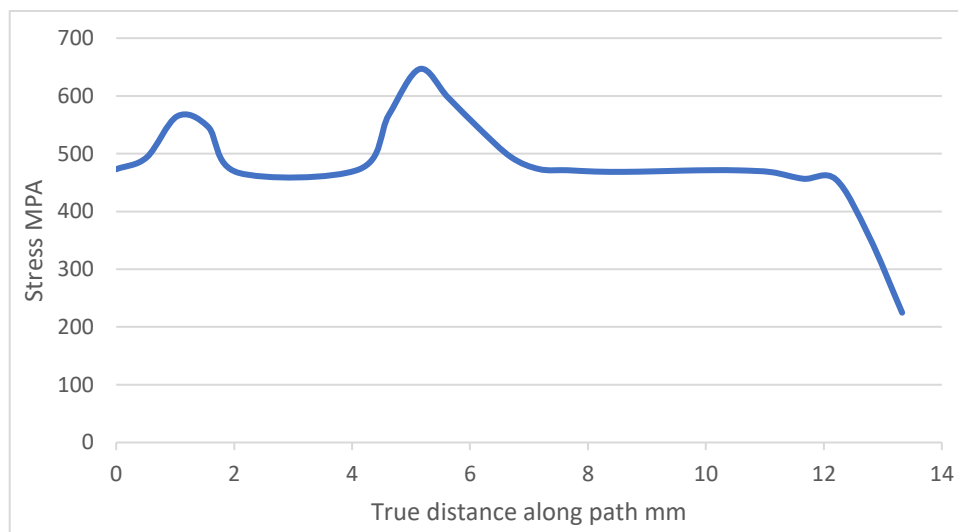


Figure 5. 28 Graphe du Chemin N11

Une augmentation des niveaux de contrainte a été observée, atteignant environ 580 MPa, suivie d'une chute de 100 MPa. Cette tendance a été suivie d'une stabilisation, puis d'une nouvelle augmentation jusqu'à un seuil de 650 MPa, suivie d'une chute et d'une nouvelle stabilisation entre 8 mm et 12 mm. Enfin, une chute des niveaux de contrainte jusqu'à 200 MPa a été observée.

- Chemin N12 :

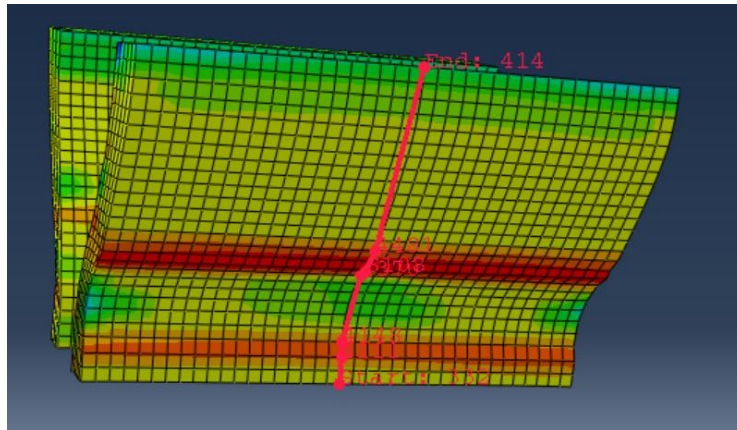


Figure 5. 29 Chemin N12

- Graphe de Chemin N12:

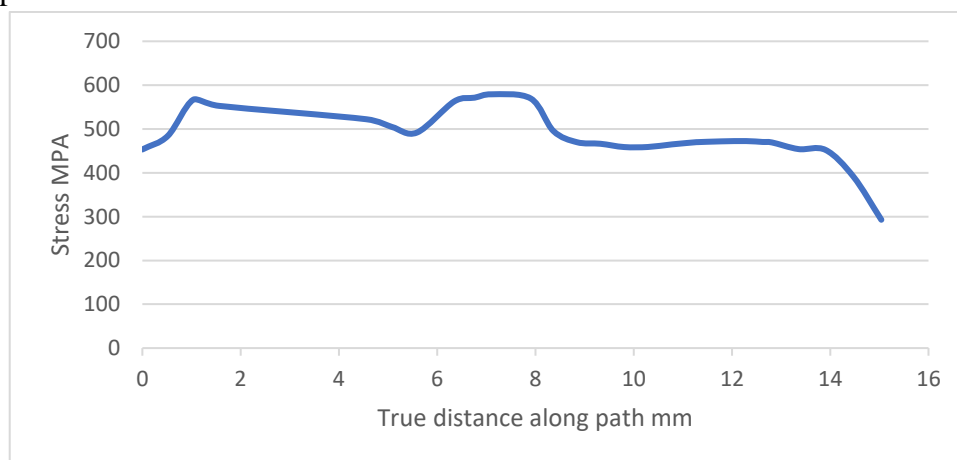


Figure 5. 30 Graphe du Chemin N12

Il a été observé une augmentation initiale des niveaux de contrainte jusqu'à 580 MPa, suivie d'une stabilisation. Par la suite, une autre augmentation a été observée, atteignant près de 600 MPa entre 6 mm et 8 mm, suivie d'une stabilisation relative jusqu'à 14 mm. Enfin, une chute des niveaux de contrainte jusqu'à 300 MPa a été constatée.

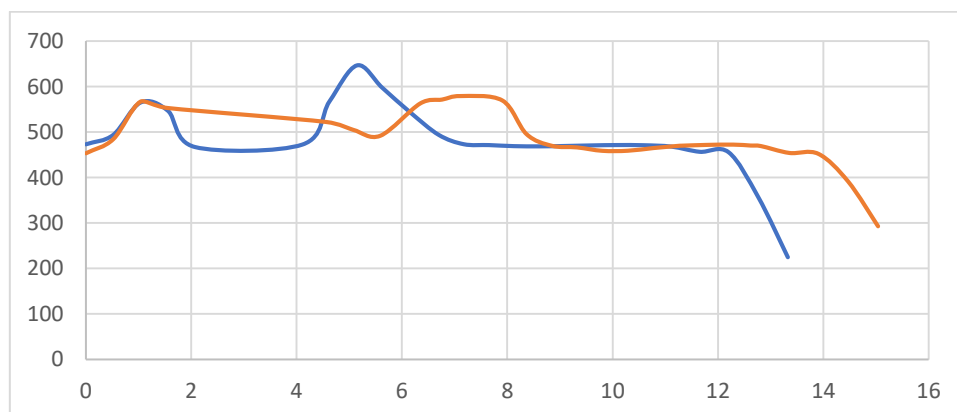


Figure 5. 31 Comparaison des deux graphe 11 et 12

Lors de l'examen des deux graphes de contrainte, une différence notable a été observée entre ces derniers. Cette observation souligne la présence de contraintes non homogènes dans la zone affectée thermiquement, résultant de la chaleur générée pendant le soudage. Cette variation peut entraîner une augmentation des niveaux de contrainte dans certaines zones de la ZAT, affectant ainsi la durabilité et la résistance de la pièce soudée.

- Chemin N13:

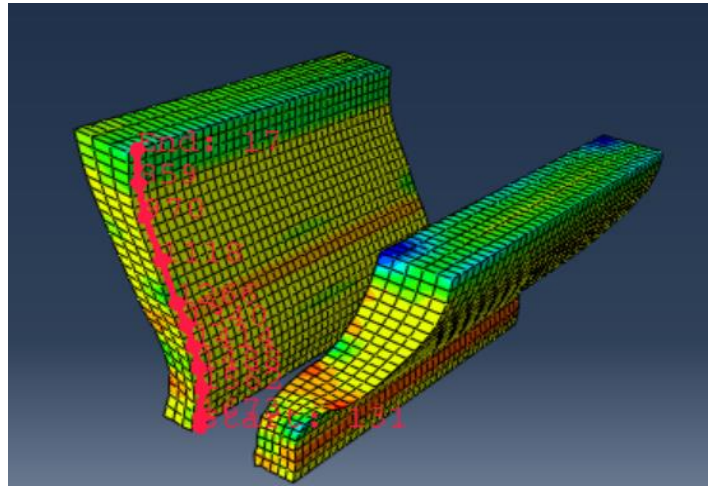


Figure 5. 32 Chemin N13

- Graphe de Chemin N13:

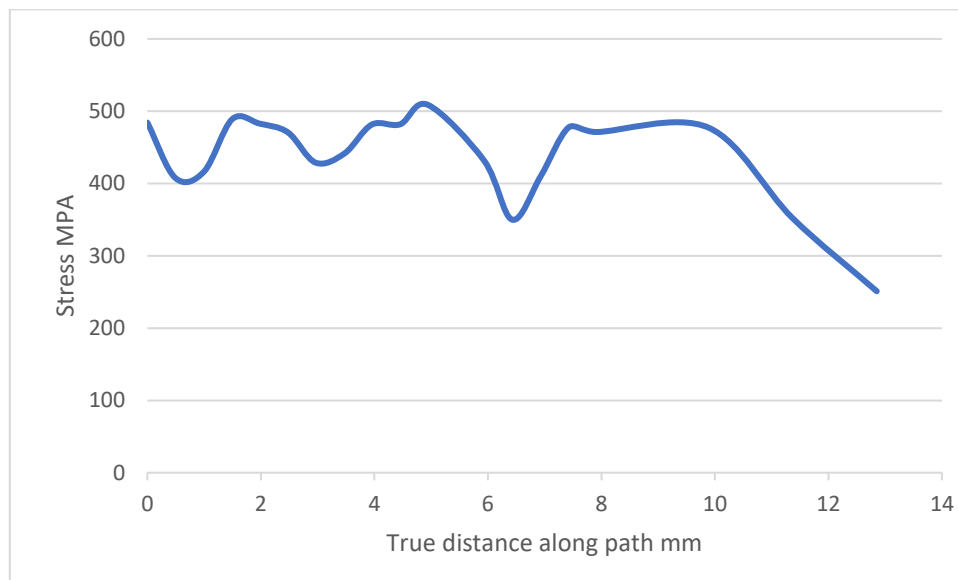


Figure 5. 33 Graphe du Chemin N13

L'examen du graphe de contrainte entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement a révélé une fluctuation de niveaux de contrainte entre 0 mm et 6 mm, suivie d'une chute jusqu'à 350 MPa. Cette tendance a été suivie d'une augmentation des niveaux de contrainte initiaux, puis d'une stabilisation, et enfin d'une autre chute entre 8 mm et 13 mm.

- Chemin N14 :

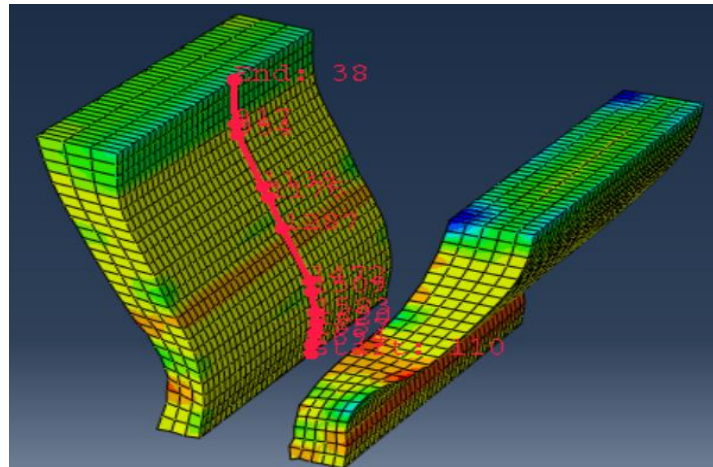


Figure 5. 34 Chemin N14

- Graphe de Chemin N14:

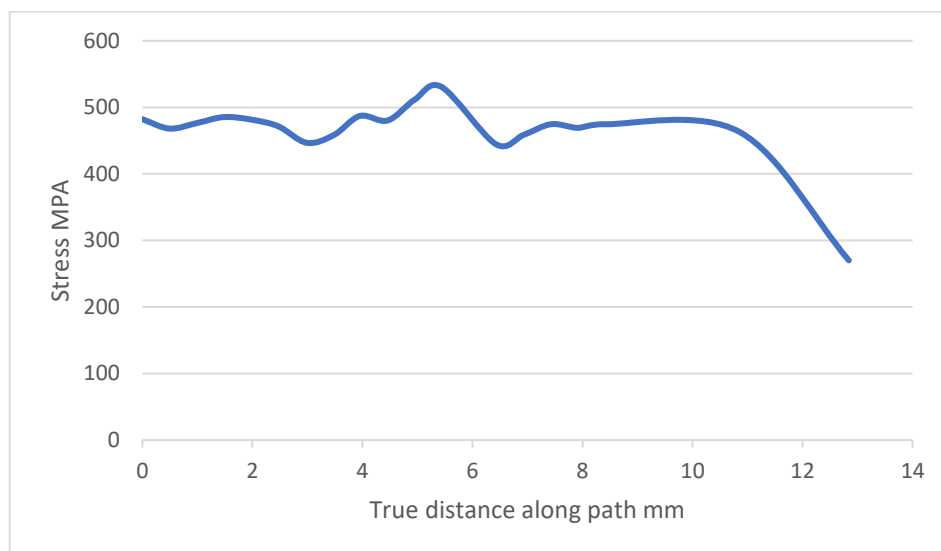


Figure 5. 27 Graphe du Chemin N14

L'analyse du graphe N14 a révélé une stabilisation relative des niveaux de contrainte entre 0 mm et 5 mm, suivie d'une augmentation significative d'environ 550 MPa. Cette tendance a été suivie d'une stabilisation des niveaux de contrainte entre 7 mm et 11 mm, atteignant un niveau de 470 MPa, puis d'une chute des niveaux de contrainte jusqu'à 280 MPa à la fin de la zone étudiée.

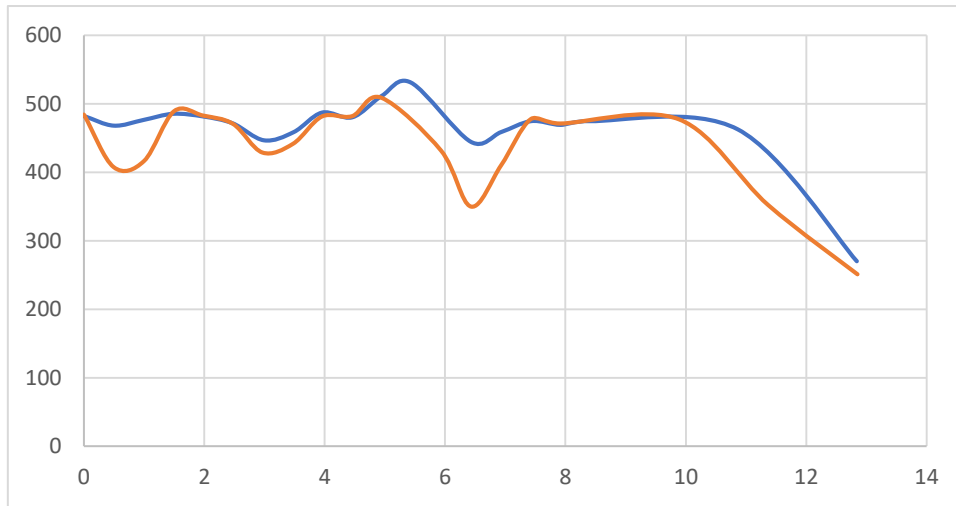


Figure 5. 35 Comparaison des deux graphe 13 et 14

En analysant les deux graphes de contrainte, nous avons constaté une différence entre le premier et le deuxième graphe. Cette différence est due à la présence de contraintes non homogènes dans la zone affectée thermiquement, qui se traduit par une variation des niveaux de contrainte dans cette zone.

- Chemin N15 :

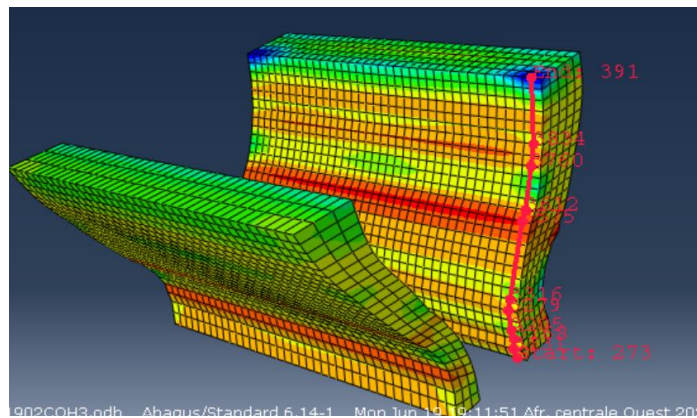


Figure 5. 36 Chemin N15

- Graphe de Chemin N15:

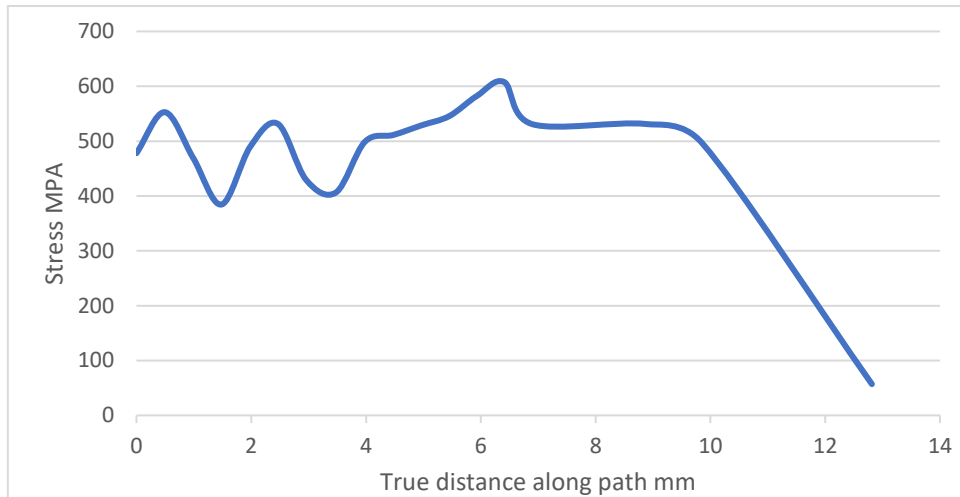


Figure 5. 37 Graphe du Chemin N15

Dans l'observation du graphe du chemin extérieur de la zone affectée thermiquement, une augmentation significative des niveaux de contrainte jusqu'à 550 MPa a été constatée, suivie d'une chute jusqu'à 400 MPa. Cette tendance a été suivie d'une autre augmentation et d'une chute jusqu'à 4 mm, suivie d'une augmentation des niveaux de contrainte jusqu'au seuil de 600 MPa, puis d'une stabilisation des niveaux de contrainte entre 7 mm et 10 mm. Enfin, une diminution des niveaux de contrainte a été observée jusqu'à la fin de la zone étudiée.

- Chemin N16 :

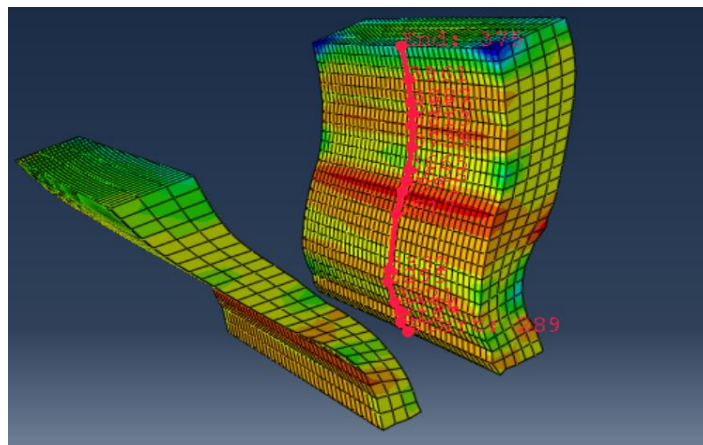


Figure 5. 38 Chemin N16

- Graphe de Chemin N16:

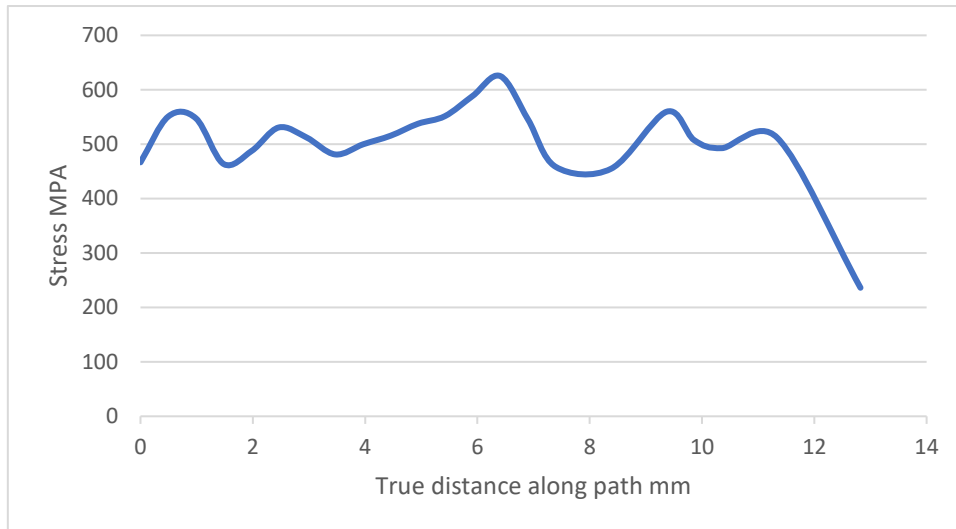


Figure 5.39 Graphe du Chemin N16

En analysant le graphe du chemin extérieur de la zone affectée thermiquement, une augmentation significative des niveaux de contrainte a été observée jusqu'à 620 MPa, suivie d'une chute jusqu'à 450 MPa. Cette tendance a été suivie d'une nouvelle augmentation et chute jusqu'à 4 mm, puis d'une augmentation des niveaux de contrainte jusqu'à atteindre le seuil de 610 MPa. Une stabilisation des niveaux de contrainte a ensuite été constatée, suivie d'une diminution jusqu'à la fin de la zone étudiée.

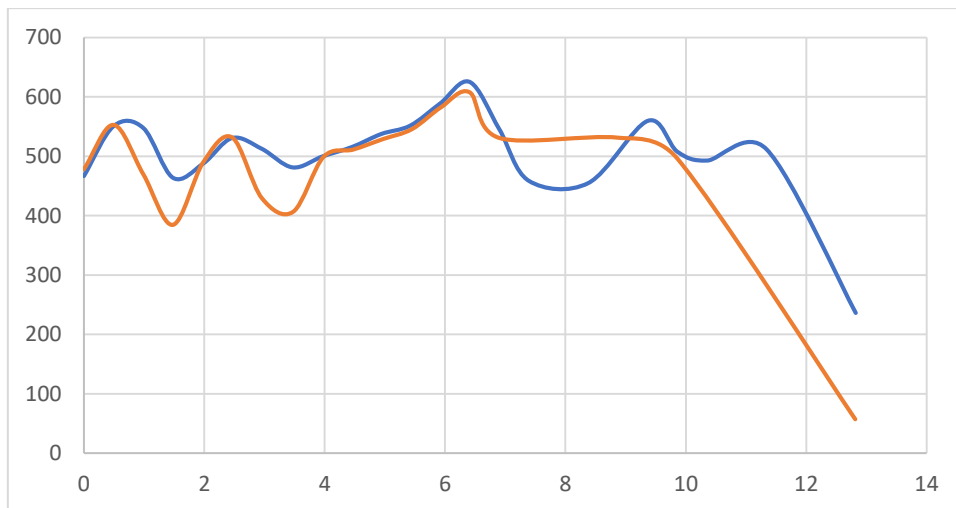


Figure 5.40 Comparaison des deux graphes 15 et 16

En remarque que la même remarque que du côté gauche, dans ce côté droit nous avons remarqué une disparité entre eux. Cette disparité peut être attribuée à la présence de contraintes non uniformes dans la zone affectée thermiquement.

- Chemin N17:

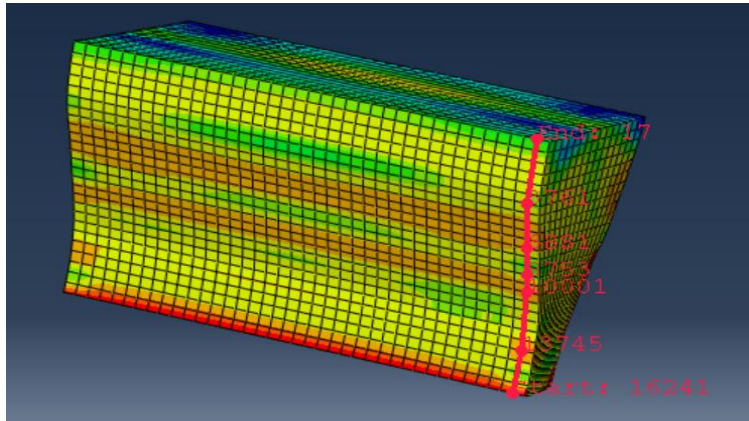


Figure 5. 41 Chemin N17

- Graphe de Chemin N17:

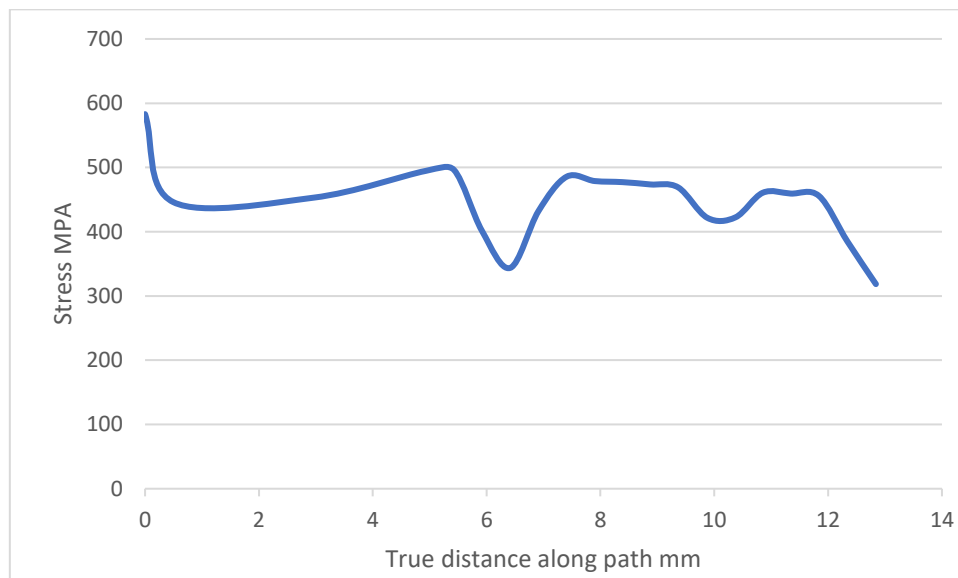


Figure 5. 42 Graphe du Chemin N17

Nous avons constaté une diminution des niveaux de contrainte de 600 MPa à 450 MPa, suivie d'une stabilisation entre 0,5 mm et 6 mm, puis d'une chute à 330 MPa. Cette tendance a été suivie d'une autre stabilisation, puis d'une chute à 420 MPa, avant une dernière stabilisation et une chute jusqu'à 300 MPa à la fin de la zone étudiée.

- Chemin N18 :

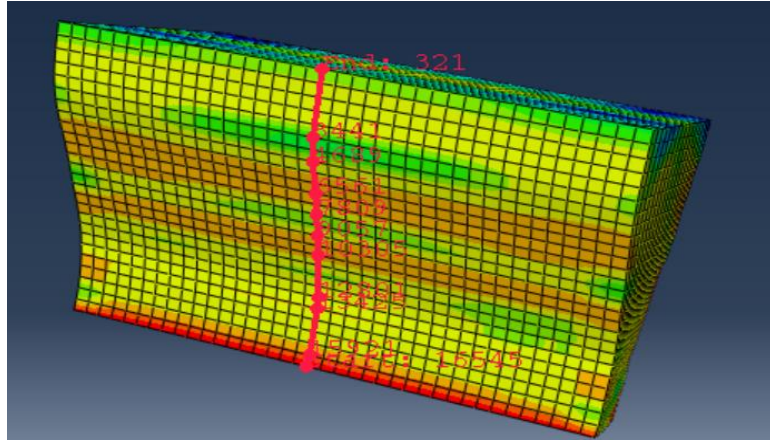


Figure 5. 43 Chemin N18

- Graphe de Chemin N18:

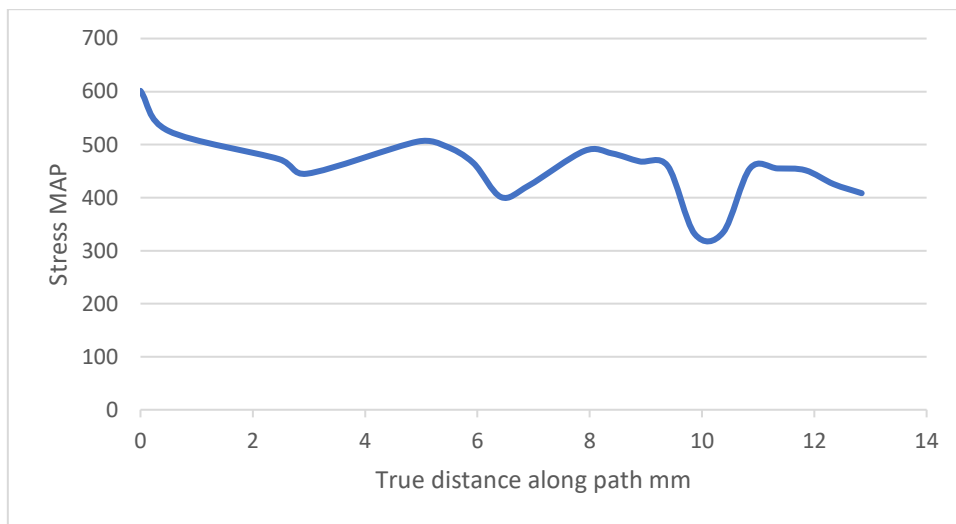


Figure 5. 44 Graphe du Chemin N18

Il convient de noter une diminution significative des niveaux de contrainte, passant de 600 MPa à 420 MPa. Cette chute a été suivie d'une augmentation jusqu'à 500 MPa à 4 mm, puis d'une stabilisation des niveaux de contrainte avant une nouvelle chute jusqu'à 400 MPa entre 6 et 7 mm. Ensuite, une augmentation jusqu'à 500 MPa a été observée, suivie d'une stabilisation entre 7 et 9 mm, puis d'une nouvelle chute des niveaux de contrainte jusqu'à 300 MPa. Une remontée jusqu'à 480 MPa a été notée, suivie d'une chute finale.

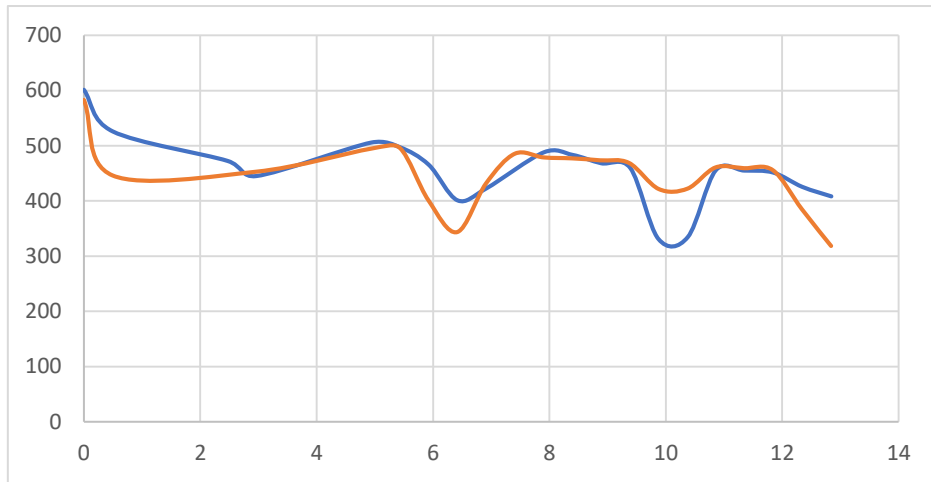
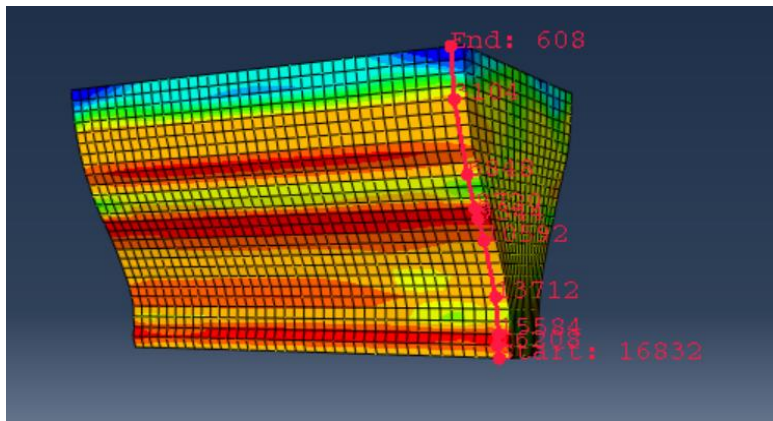


Figure 5.45 Comparaison des deux graphes 17 et 18

Nous avons constaté que les deux graphes se ressemblent, avec une légère différence : la chute de contrainte dans le deuxième graphe est plus significative que celle du premier graphe. Nous pouvons donc en conclure que la partie la plus fragile de la zone fondue.

- Chemin N19 :



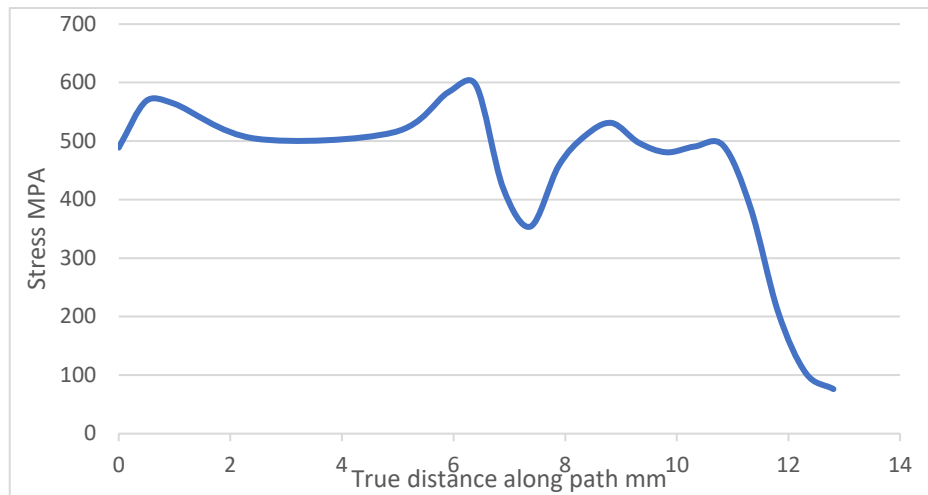


Figure 5. 47 Graphe du Chemin N19

Nous avons pu observer une élévation des niveaux de contrainte jusqu'à 580 MPa, suivie d'une chute jusqu'à 500 MPa. Cette dernière a été accompagnée d'une stabilisation sur une plage de 2 mm à 6 mm. Par la suite, une nouvelle augmentation des niveaux de contrainte jusqu'à la valeur seuil de 600 MPa a été constatée, suivie d'une chute jusqu'à 350 MPa. Une nouvelle élévation jusqu'à 520 MPa a été observée, puis une stabilisation a eu lieu avant une chute finale atteignant la valeur minimale de 80 MPa.

- Chemin N20 :

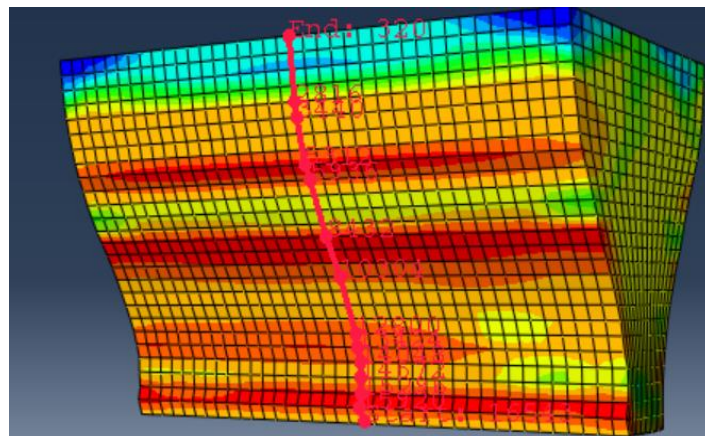


Figure 5. 38 Chemin N20

- Graphe du Chemin N20 :

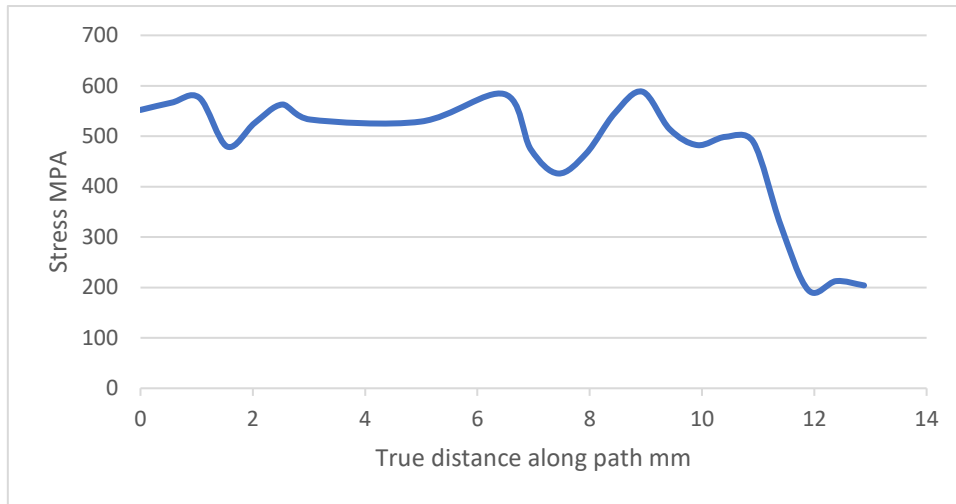


Figure 5. 49 Graphe du Chemin N20

Nous avons observé une augmentation des niveaux de contrainte atteignant 580 MPa, suivie d'une chute jusqu'à 500 MPa, pendant laquelle une stabilisation s'est produite sur une plage de 2 mm à 6 mm. Ensuite, nous avons constaté une nouvelle augmentation des niveaux de contrainte jusqu'à la valeur seuil de 600 MPa, suivie d'une chute jusqu'à 400 MPa. Une nouvelle élévation jusqu'à 600 MPa a été observée, suivie d'une stabilisation, avant une chute finale atteignant la valeur minimale de 200 MPa

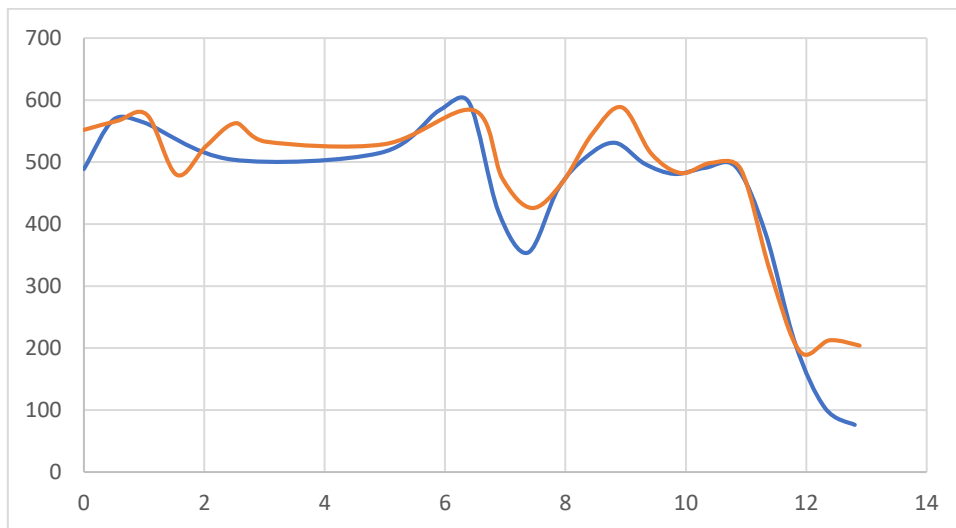


Figure 5. 50 Comparaison des deux graphe 19 et 20

Nous avons également remarqué que les deux graphes présentent une similitude quasi totale. De ce fait, nous pouvons en déduire que les niveaux de contrainte se sont répartis de manière homogène dans la zone fondue, contrairement à la zone affectée thermiquement.

V. 3 Conclusion :

En somme, ce mémoire présente une qualification de la soudure à partir d'une simulation réalisée avec le logiciel ABAQUS, en modélisant un test de traction sur un échantillon normalisé. La simulation s'est basée sur la méthode des éléments finis pour étudier et approfondir l'investigation du comportement mécanique du joint de soudure, notamment en étudiant les déformations et la répartition des contraintes jusqu'à la limite élastique. Les résultats obtenus ont démontré que la simulation a été capable de reproduire les caractéristiques, avec des déformations, des contraintes et des réactions en accord avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.

Le niveau de sollicitations de l'acier X65 varie légèrement selon sa position sur la surface, étant plus élevé au centre et plus faible aux extrémités, en particulier sur la face supérieure. En revanche, la face inférieure montre un niveau de sollicitation plus convergent. La zone de contact entre l'acier X65 et la ZAT présente une cartographie de contrainte hétérogène, avec un niveau de chargement plus élevé sur les côtés supérieur et inférieur par rapport au centre. En effet, le niveau de sollicitation dans cette zone atteint presque la moitié de la valeur maximale enregistrée aux extrémités.

Les contraintes au niveau de la ZAT, dans la zone de contact entre X65 et la ZAT, sont plus importantes de 16% au centre par rapport aux extrémités, en particulier dans la partie inférieure, tandis que dans la partie supérieure, on observe une coïncidence des niveaux de contrainte avec une légère interférence. Dans la zone de contact entre la ZAT et la ZF, nous avons remarqué une harmonisation des niveaux de sollicitation, sauf au début où l'on observe un petit écart de 60 Mpa. Quant aux contraintes au niveau de la ZF et de la ZAT, nous avons noté une harmonisation des niveaux de sollicitation.

L'interface représente la région de départ des fissures, dont la sollicitation non uniforme engendre des zones à risque. Ces zones, caractérisées par une concentration de contraintes, sont fragilisées et favorisent l'amorçage des fissures. Elles constituent les sites de rupture potentielle.

Comme solution on peut proposer :

Préchauffage : Le préchauffage de la pièce avant le soudage peut aider à réduire les contraintes thermiques et à minimiser la formation de fissures dans la ZAT.

Traitement thermique : Le traitement thermique peut aider à normaliser la microstructure de la ZAT et à améliorer les propriétés mécaniques de la zone environnante.

Références bibliographiques :

- [1] dz.linkedin.com/company/sarpi - Google Search
(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+https://dz.linkedin.com/company/sarpi&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1>
- [2] Dz, E. (n.d.). Services et systèmes de télécommunication et vidéosurveillance Salticom Algérie. <https://www.salticom.com/>
- [3] Universalis, E. (n.d.). Raymond CABET - Auteur - Encyclopædia Universalis.Universalis. <https://www.universalis.fr/auteurs/raymond-cabet/>
- [4] Contributeurs aux projets Wikimedia. (2023). Soudage. fr.wikipedia.org. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage>
- [5] Portail Soudeurs.com - Site Technique francophone de référence du soudeur.
(n.d.). <https://www.soudeurs.com/>
- [6] Portail Soudeurs.com - Site Technique francophone de référence du soudeur.
(n.d.). <https://www.soudeurs.com/>
- [7] API 1104 Sources de tuyauterie et installations connexes – fabricant de tuyaux en acier abter,tube et enveloppe de gaz naturel,tuyau en acier sans soudure, OCTG,.(n.d.). <https://www.abtersteel.com/fr/news/products-news/api-1104-sources-of-piping-and-related-facilities/>
- [8] udey.com/topic/cissp/?sort=price-high-to-low&category=IT%20%26%20Software%7CTest%20Prep&subcategory=IT%20Certification%7CNetwork%20Security%7COther%20in%20Test%20Prep&instructionalLevel=all%7CIntermediate&lang=en&closedCaptionAvailable=1&quizAvailable=1&price=price-paid&locale=fr_FR – Google Search.(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+https://www.udemy.com/topic/cissp/?sort%3Dprice-high-to-low%26category%3DIT%2520%2526%2520Software%257CTest%2520Prep%26subcategory%3DIT%2520Certification%257CNetwork%2520%2526%2520Security%257COther%2520in%2520Test%2520Prep%26instructionalLevel%3Dall%257CIntermediate%26lang%3Den>

%26closedCaptionAvailable%3D1%26quizAvailable%3D1%26price%3Dprice-paid%26locale%3Dfr_FR&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1

[9] Thèses-Algérie: Doctorat, Magister, Master. . . (n.d.-b). <https://www.theses-algerie.com/2435411965715341/these-de-doctorat/universite-badji-mokhtarannaba/influence-du-flux-de-soudage-sur-la-qualite-de-la-soudure-des-pipelines>

[10] dspace.univadrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/146/1/Contr%C3%B4le%20non%20destructif%20CND.pdf - Google Search.(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+https://dspace.univadrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/146/1/Contr%C3%B4le%20non%20destructif%20CND.pdf&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1>

[11] cscexpertise.crti.dz/control-par-ressuage.php - Google Search.(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+https://cscexpertise.crti.dz/control-par-ressuage.php&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1>

[12] [Eis.hu.edu.jo](https://eis.hu.edu.jo) - GoogleSearch.(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+https://eis.hu.edu.jo/&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1>

[13] Rocardier. (2022). Défauts des soudures. Rocardier. <https://www.rocardier.com/defauts-des-soudures/>

[14] perso.univ-lemans.fr/~nerrien - GoogleSearch.(n.d.). <https://www.google.com/search?q=About+http://perso.univ-lemans.fr/~nerrien/&tbm=ilp&biw=1366&bih=657&dpr=1>

[15] Bouleftour, A. (2015, December 17). Evaluation d'éléments finis volumiques dans Abaqus sur des cas tests non linéaires géométriques <http://archives.univbiskra.dz/handle/123456789/6658>