

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de Master en
Génie des matériaux

**Simulation numérique du soudage TIG
de l'acier inoxydable duplex 2205**

Aissa BARI

Sous la direction de :

M. Dr. Kamel ABADLI

Présenté et soutenu publiquement le **29/06/2017**

Composition du Jury :

Président	M. Mohamed Lamine DJEGHLAL,	Professeur	ENP Alger
Promoteur	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Docteur	ENP Alger

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de Master en
Génie des matériaux

**Simulation numérique du soudage TIG
de l'acier inoxydable duplex 2205**

Aissa BARI

Sous la direction de :

M. Dr. Kamel ABADLI

Présenté et soutenu publiquement le **28/06/2017**

Composition du Jury :

Président	M. Mohamed Lamine DJEGHLAL,	Professeur	ENP Alger
Promoteur	M. Kamel ABADLI	Docteur	ENP Alger
Examineur	M. Abdelmadjid KASSER	Docteur	ENP Alger

الهدف من هذا العمل هو محاكاة رقمية للحام تيغ على الفولاذ المقاوم للصدأ المزدوج البنية (UNS S 31803)، لقد تتبعنا توزيع الحرارة، والتشوه، والإجهاد المتبقية، وتأثير سرعة اللحام. برامج المحاكاة المستخدمة هي: (Solid works, MSC Patran, Simufact.welding). أظهرت النتائج تشوه ضعيف وتجانس توزيع الإجهاد المتبقي. في هذا السبب الفولاذ المقاوم للصدأ على الوجهين لديه قابلية لحام جيدة. **الكلمات المفتاحية:** المحاكاة الرقمية، تيغ، الفولاذ المقاوم للصدأ دوبلكس، تشويه، الإجهاد المتبقية، سرعة لحام.

Abstract

The objective of this work is the numeric simulation of TIG welding on a duplex stainless steel UNS S 31803. We followed the distribution of the temperature, the distortion, the residual stress, and the effect of the welding speed.

The software of the simulations used are: Solid works, MSC Patran, Simufact.welding.

The results show a weak distortion and a homogeneity of distribution of the residual stress. In this reason the duplex stainless steel has a good weldability.

Key words: numeric simulation, TIG, steels stainless duplex, distortion, residual stress, welding speed.

Résumé

L'objectif de ce travail est la simulation numérique de soudage TIG sur un acier inoxydable duplex UNS S 31803. Nous avons suivi la distribution de la température, la distorsion, les contraintes, et l'effet de la vitesse de soudage.

Les logiciels des simulations utilisées sont: Solidworks, MSC Patran, Simufact.welding.

Les résultats montrent une faible distorsion et une homogénéité de distribution des contraintes thermique résiduelle. En ce raison l'acier inoxydable duplex a une bonne soudabilité.

Mots clés: simulation numérique, TIG, aciers inoxydable duplex, distorsion, contraintes résiduelle, vitesse de soudage.

Remerciement

Premièrement, je remerciais **Allah** pour m'avoir aidé à ce travail et tout mon parcours scolaire.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur **M. K.ABADLI**, pour m'avoir dirigé et encouragé, pour sa disponibilité, son aide, et ces conseils durant toute la période de mon travail.

Je remerciais **M. M.DJEGHLAL**, d'avoir examiné mon travail et présider le jury, également Monsieur **M. A. KASSER** qui a accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je remercie également tous mes enseignants du département de métallurgie qui m'ont dirigée durant ma formation.

Enfin je remercie tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire de près ou de loin.

Table de Matière

Table de Matière

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 9

CHAPITRE I ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction..... 11

I.2 Caractéristique des aciers inoxydables duplex..... 11

I.2.1 Composition chimique 11

I.2.2 Propriétés physiques 11

I.2.3 Propriétés mécaniques..... 12

I.3 Soudage et soudabilité des aciers duplex 12

I.3.1 Définition du soudage 13

I.3.2 Caractéristique physique de l'opération du soudage 13

I.3.2.1 Caractéristique du cycle thermique 13

I.3.2.2 Caractéristique métallurgique..... 14

I.3.2.3 Caractéristiques mécaniques et contraintes résiduelles..... 15

I.3.3 Solidification et structure des soudures duplex..... 15

I.4 Procédés de soudage TIG 16

I.4.1 L'arc électrique..... 16

I.4.2 Principe du soudage TIG..... 17

I.4.3 Rendement 18

I.5 Simulation Numérique du soudage 19

I.5.1 Données nécessaires à la simulation numérique du soudage 19

I.5.1.1 Le calcul thermique 19

I.5.1.2 Le calcul mécanique 20

I.5.2 Limites et avantages de la simulation..... 20

CHAPITRE II SIMULATION NUMÉRIQUE

II.1 Introduction 22

II.2 Présentation du logiciel Simufact.welding 22

II.3 Modèle du matériau 23

II.3.1 Modèle Géométrique..... 23

II.3.2 Propriétés thermique et mécanique..... 23

II.4 Le Maillage 24

II.5 Condition aux limites..... 25

II.6 Paramètres du procédé de soudage..... 25

II.6.1 Paramètres électrique..... 25

II.6.2 Source de chaleur 26

CHAPITRE III RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

III.1 Introduction	28
III.2 Analyse thermique	28
III.2.1 Distribution des températures	28
III.2.2 Cycle thermique dans le cordon.....	30
III.2.3 Cycle thermique dans la ZAT	31
III.3 Analyse mécanique	32
III.3.1 Distribution des contraintes effective	32
III.3.2 Distribution des contraintes principal.....	33
III.3.3 Distribution des distorsions.....	34
III.3.4 Distribution de la déformation	35
III.4 Influence de la vitesse de soudage	36
III.4.1 Sur la distribution de la Température.....	36
III.4.2 Sur la Température maximale atteinte	37
III.4.3 Sur les contraintes	38
III.4.4 Sur les distorsions.....	39
III.5 Le soudage multi-passe	40
III.6 Interprétation	41
Conclusion générale	42
Bibliographies	43

Liste des figures

Figure I-1 Variation de la température θ en fonction du temps t	13
Figure I-2 Variation de la température θ en fonction de la distance x	14
Figure I-3 les différentes zones de soudure	14
Figure I-4 Microstructure de la zone fondue d'un acier duplex soudé UNS S 31803.....	15
Figure I-5 Diagramme de schaeffler des aciers inoxydables	16
Figure I-6 Principe du soudage (manuel) à l'arc électrique avec électrode réfractaire .	18
Figure II-1 Logiciel de simulation du soudage Simufact.welding.	22
Figure II-2 Modèle géométrique 1.....	23
Figure II-3 Modèle géométrique 2.....	23
Figure II-4 Matériaux utilisé pour la simulation.	24
Figure II-5 Maillage du modèle géométrique 1.....	24
Figure II-6 Maillage du modèle géométrique 2.....	24
Figure II-7 pince et porter utilisé comme condition aux limites mécanique.....	25
Figure II-8 position des condition au limites mécaniques.	25
Figure II-9 modèle de la source de chaleur.	26
Figure III-1 La distribution de la température après 3s.	28
Figure III-2 La distribution de la température après 6s.	28
Figure III-3 la distribution de la température après 11s.	29
Figure III-4 la distribution de la température après 23s.	29
Figure III-5 la distribution de la température après 59s.	29
Figure III-6 la distribution de la température après 200s.....	29
Figure III-7 Le cycle thermique du soudage dans différents point dans le cordon.	30
Figure III-8 Position des particules.	30
Figure III-9 Le cycle thermique du soudage dans différents point dans la ZAT.	31
Figure III-10 Position des particules dans la ZAT.	31
Figure III-11 La distribution des contraintes dans les pipes.	32
Figure III-12 La distribution des contraintes près de la ligne de liaison.	32
Figure III-13 contraintes normales σ_{xx}	33
Figure III-14 contraintes normales σ_{yy}	33
Figure III-15 contraintes normales σ_{zz}	33
Figure III-16 Distorsion suivant x	34
Figure III-17 Distorsion suivant y	34
Figure III-18 Distorsion suivant z	34
Figure III-19 Distribution de la déformation plastique.	35
Figure III-20 Distribution de la déformation élastique.....	35

Figure III-21 Déformation plastique Effective des deux pipes.....	35
Figure III-22 Distribution de la température dans le cas de 10 mm/s.	36
Figure III-23 Distribution de la température dans le cas de 15 mm/s.	36
Figure III-24 Distribution de la température dans le cas de 20 mm/s.	36
Figure III-25 Température maximale atteinte pour V=10 mm/s.....	37
Figure III-26 Température maximale atteinte pour V=15 mm/s.....	37
Figure III-27 Température maximale atteinte pour V=20 mm/s.....	37
Figure III-28 Distribution des contraintes pour V=10 mm/s.	38
Figure III-29 Distribution des contraintes pour V=15 mm/s.	38
Figure III-30 Distribution des contraintes pour V=20 mm/s.	38
Figure III-31 Distribution des distorsions pour V=10 mm/s.	39
Figure III-32 Distribution des distorsions pour V=15 mm/s.	39
Figure III-33 Distribution des distorsions pour V=20 mm/s.	39
Figure III-34 Distribution des contraintes après 2ème passe.....	40
Figure III-35 Distribution des distorsion après 2ème passe.....	40

Liste des tableaux

Tableau I-1 Composition chimique des aciers duplex	11
Tableau I-2 Quelques propriétés physiques à la température ambiante de quelques nuances austéno-ferritiques	12
Tableau I-3 Quelques propriétés mécaniques de quelques nuances austéno-ferritiques	12
Tableau II-1 paramètre du soudage utilisés.	26

Introduction générale

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) sont des alliages biphasés à base de fer-chrome-nickel-molybdène, constitués des quantités approximativement égales de l'austénite (γ) et de la ferrite (α). Ils ont une résistance mécanique plus que celle des aciers inoxydables austénitiques, une ténacité plus élevée que les aciers inoxydables ferritiques, une bonne soudabilité et une forte résistance à la corrosion sous contrainte.

En raison de ces propriétés spéciales qui leur assurent une haute performance, aujourd'hui les aciers inoxydables duplex sont utilisés dans une large gamme d'industries, telles que la pétrochimie, la marine, les industries nucléaires, et bien d'autres domaines. Du fait qu'une grande partie de ces applications utilise le soudage comme procédé d'assemblage, de fabrication ou de maintenance, la compréhension de l'opération du soudage de ces aciers joue un rôle primordial dans leur mise en œuvre.

La présente étude portait sur la simulation numérique du soudage TIG sur un acier inoxydable duplex de nuance UNS S 31803. Dans cette étude nous allons essayer d'évaluer et prédire la distribution de température, les déformations, et les contraintes après le soudage de deux pipes en T en utilisant le logiciel Simufact.welding qui base sur la méthode des éléments fini.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres:

Un premier chapitre d'étude bibliographique qui sera de toute évidence indispensable afin de mieux cerner le cadre de notre travail, dans cette partie nous allons définir les aciers inoxydables les duplex, leurs propriétés physique et chimique. Ainsi, nous allons exposer le soudage TIG et la soudabilité des aciers duplex,

Le deuxième chapitre décrire les étapes que nous avons suivi afin de réaliser ce travail de simulation, les modèles géométriques, les propriétés de matériau, le choix du maillage, et les paramètres de soudage utilisé dans les essais de cette simulation.

Un dernier chapitre pour la présentation des résultats et interprétation.

On finit ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Étude Bibliographique

Chapitre I Étude Bibliographique

I.1 Introduction

Selon la norme Européenne **EN 10088-1**, un acier inoxydable est un acier dont l'élément d'alliage de base est le chrome à des teneurs supérieures à **10.5%** [1]. L'inoxidabilité est due la formation d'une couche passive d'oxyde de chrome. Ces alliages contiennent peu de carbone pour éviter la précipitation de carbures de chrome, et beaucoup d'éléments agissant sur la résistance à la corrosion.

I.2 Caractéristique des aciers inoxydables duplex

Les aciers inoxydables peuvent être classés de diverses manières selon les critères de classification considérés. La classification qui est de loin la plus utilisée est celle tenant compte de la structure qui, associée à la composition chimique, permet de définir le plus complètement les grandes familles d'aciers inoxydables que sont [2]:

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée).
- Les aciers martensitiques (structure quadratique).
- Les aciers austénitiques (structure cubique à faces centrées).
- Les aciers austéno-ferritiques (duplex).

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) sont des alliages fer-chrome-molybdène de structure biphasée dont les proportions en éléments constitutifs permettent l'optimisation de l'équilibre des fractions volumiques d'austénite et de ferrite [3].

I.2.1 Composition chimique

Les aciers inoxydables duplex sont équilibrés chimiquement en éléments alphas et gammas pour présenter à la température ambiante leur structure mixte de 50% d'austénite et 50% de ferrite. Ils caractérisés par un taux de carbone plus faible et un taux de chrome et de nickel élevé, et un peu du molybdène, cuivre et azote. **Le tableau I.1** présente la composition chimique des aciers inoxydable duplex.

Tableau I-1 Composition chimique des aciers duplex [4].

Élément	Cr	Ni	Mo	Cu	N	C
%	19 – 26	4 – 8	1.5 – 4	≤ 2	≤ 0.3	≤ 0.03

I.2.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des aciers duplex se situent systématiquement entre celles des aciers austénitiques et celles des aciers au carbone, mais tendent à être plus proches de celles des aciers austénitiques. Les aciers inoxydables duplex ont des coefficients de dilatation thermique faibles, voisins de ceux des aciers au Carbone, ce qui les rend convenables aux conditions de cyclage thermique [1, 5]. Leur conductivité thermique est

assez importante comparée à celle des aciers austénitiques. Le **tableau I.2** présente quelques propriétés physiques des quelques nuances des aciers austéno-ferritiques.

Tableau I-2 *Quelques propriétés physiques à la température ambiante de quelques nuances austéno-ferritiques [5].*

Désignation	UNS number	Densité (g/cm ³)	Chaleur spécifique (J/kg°K)	Résistivité électrique (μΩ/m)	Module de Young (GPa)
2304	S32304	7.75	482	—	200
2205	S31803	7.85	482	0.80	200
2205	S32550	7.81	488	0.84	201
2307	S32550	7.79	485	—	200

I.2.3 Propriétés mécaniques

Le **tableau I.3** donne quelques propriétés mécaniques de tôles en aciers inoxydables duplex. Les variations de ces propriétés ont fait l'objet d'études détaillées pour préciser l'influence de la structure biphasée, la composition chimique, les températures de traitement, ainsi que l'influence des durées de maintien [1]. Il est ainsi possible d'ajuster le matériau aux nécessités diverses de l'utilisation, par exemple l'augmentation de la dureté pour mieux résister à l'abrasion.

Tableau I-3 *Quelques propriétés mécaniques de quelques nuances austéno-ferritiques [5].*

Désignation	Dénomination UNS	Résistance à la traction (minimum)	Limite élastique (minimum)	Élongation (minimum)	Dureté (maximum)	
					Brinell	HRB
2304	S32304	600	400	25.0	290	32
2205	S31803	620	450	25.0	293	31
2505	S32550	760	550	15.0	302	32
2507	S32750	795	550	15.0	310	32

I.3 Soudage et soudabilité des aciers duplex

Les aciers inoxydables duplex présentent une meilleure aptitude au soudage. Ils se prêtent bien à tous les procédés de soudage et permettent des assemblages d'excellente qualité [2]. Ils se soudent sans difficulté si un certain nombre de précautions ont été prises.

Ces derniers toutes visent à maintenir le taux de ferrite dans le métal fondu et dans la zone affectée thermiquement au voisinage de 50 % [6].

I.3.1 Définition du soudage

Le soudage est défini comme étant un procédé d'assemblage qui y a pour but d'assurer une continuité physique entre les deux éléments à rassembler. Cette dernière peut être obtenue par deux méthodes fondamentales différentes, soit par contact liquide/liquide (fusion locale) ou par contact solide/solide (cas de la diffusion).

On distingue, selon la nature des matériaux à souder, deux types de soudures ; la soudure Autogène ou le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder, et la soudure Hétérogène, lorsque le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

I.3.2 Caractéristique physique de l'opération du soudage

I.3.2.1 Caractéristique du cycle thermique

La diffusion dans le métal de l'énergie apportée fait du soudage une véritable opération de traitement thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée. Ces effets sont caractérisés par [7]:

- Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et la température de fusion du métal.
- Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement des paramètres de soudage.

Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage, en un point donné de l'assemblage, il faut connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps. La courbe correspondante $\theta = f(t)$, tracée en un point A voisin d'une soudure (**figure I.1**).

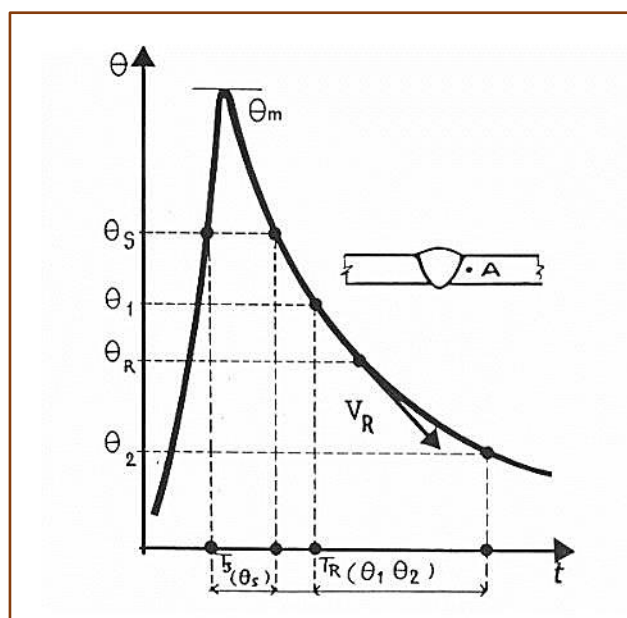


Figure I-1 Variation de la température θ en fonction du temps t [8].

I.3.2.2 Caractéristique métallurgique

Les grandeurs associées au cycle thermique nous permettent d'accéder à la connaissance ou à la prévision des phénomènes métallurgiques qui prennent naissance en ce point. Par exemple, la répartition thermique aux alentours d'une soudure. Cette répartition se détermine par le tracé de la courbe $\theta_m = f(x)$ (**figure I.2**), qui donne la variation de la température maximale θ_m atteinte en chaque point en fonction de la distance x .

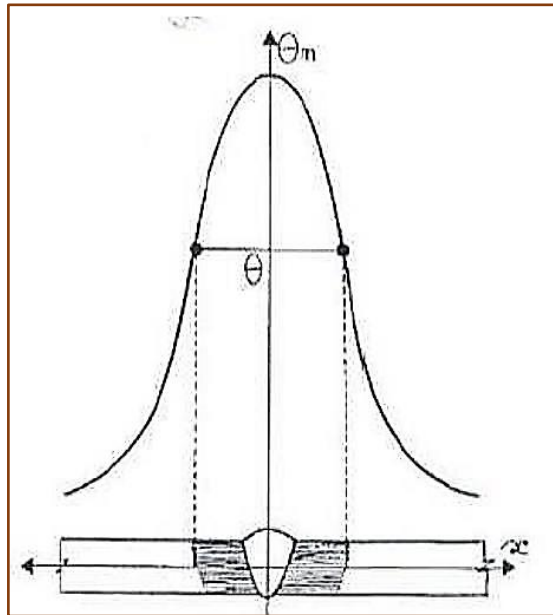


Figure I-2 Variation de la température θ en fonction de la distance x [8]

Pendant le cycle de soudage, le déplacement du volume thermique provoque, perpendiculairement à la ligne de fusion, des changements microstructuraux dans le métal de base. Ces modifications dépendent de la température maximale atteinte et de la cinétique de refroidissement en ce point. À partir de l'axe du cordon, on distingue successivement les zones suivantes (**figure I.3**) [2, 8]:

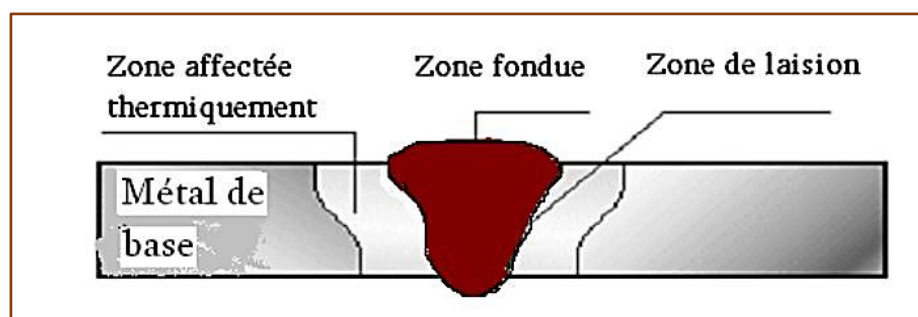


Figure I-3 les différentes zones de soudure [2]

- ❖ **Métal de base (MB)** : métal des pièces à assembler.
- ❖ **La zone affectée thermiquement (ZAT)** : partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage.
- ❖ **La zone de liaison (ZL)** : zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement.
- ❖ **La zone fondue (ZF)** : c'est le volume qu'occupe le métal fondu après solidification dans les soudures par fusion.

I.3.2.3 Caractéristiques mécaniques et contraintes résiduelles

Les principales spécificités que représente l'opération de soudage sur la caractérisation d'un assemblage sont [9]:

- l'hétérogénéité de la microstructure ;
- les différentes propriétés mécaniques des matériaux en présence (métal de base et zone fondue) ;
- l'état des contraintes résiduelles de soudage ;

En ce qui concerne les contraintes résiduelles, leur origine est implicitement liée à l'histoire thermo- métallurgique du soudage et à l'interaction des deux premiers points qui ont été développés précédemment, c'est à dire :

- les dilatations et contractions dues au gradient thermique rencontré au cours du soudage (chauffage et refroidissement) ;
- les déformations plus ou moins élevées des assemblages soudés dues à leur géométrie et à l'intensité des bridages trouvés dans de nombreuses configurations de soudage (raidisseurs, positions diverses ...);
- les transformations métallurgiques qui entraînent des modifications des propriétés mécaniques des matériaux.

I.3.3 Solidification et structure des soudures duplex

Plusieurs études ont confirmé que les soudures d'aciers inoxydables duplex se solidifient en mode totalement ferritique. Cette solidification est suivie d'une transformation en austénite à l'état solide. Au début de la transformation, l'austénite se forme dans les joints de grains ferritiques par un mécanisme de germination et de croissance et prend souvent des aspects de type « Widmanstätten » (**figure I.4**). Cette transformation se poursuit avec le refroidissement et donne lieu à la formation d'austénite intra-granulaire [1, 10].

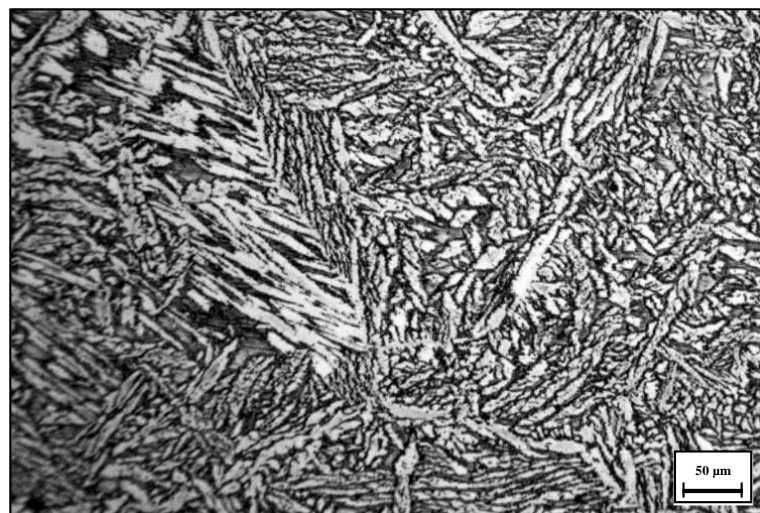


Figure I-4 Microstructure de la zone fondue d'un acier duplex soudé UNS S 31803.

La structure de solidification des aciers inoxydables dépend des influences relatives des éléments d'alliage qu'ils contiennent. Ces effets sont quantifiés par les formules empiriques exprimées en terme d'équivalents chrome et nickel ($Cr_{\text{éq}}$, $Ni_{\text{éq}}$) proposées par Long et Delon [2] :

$$Cr_{\text{éq}} = (\%Cr) + 1.5(\%Si) + (\%Mo) + 0.5(\%Nb)$$

$$Ni_{\text{éq}} = (\%Ni) + 0.5(\%Mn) + 30(\%C) + 30(\%N)$$

Ainsi, la structure de solidification d'une soudure d'acier inoxydable en fonction de sa composition chimique est souvent prédite en positionnant les équivalents Cr et Ni dans le diagramme de Schaeffler (**figure I.5**).

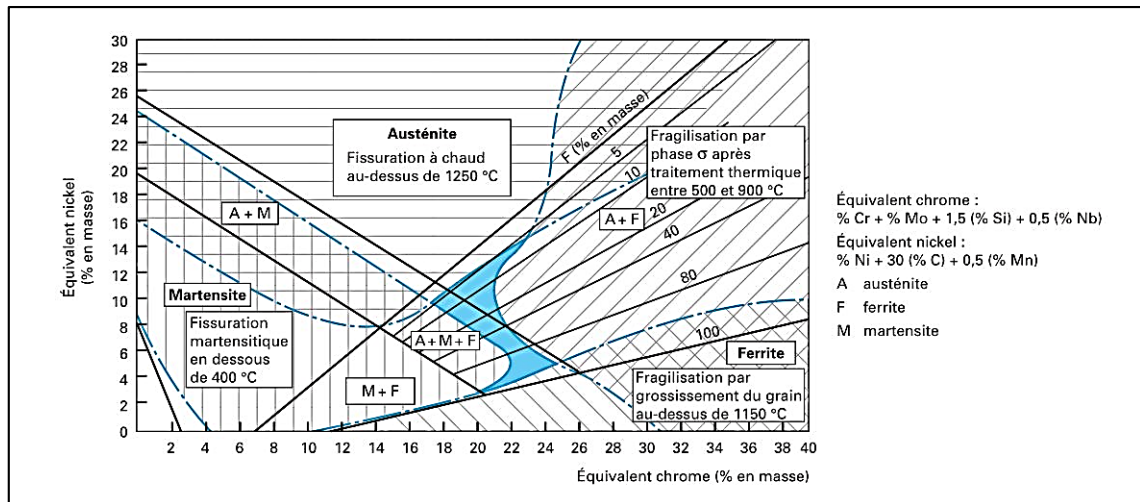


Figure I-5 Diagramme de schaeffler des aciers inoxydables [11].

I.4 Procédés du soudage TIG

I.4.1 L'arc électrique

A la séparation des deux parties d'un contact électrique parcouru par un courant suffisant, il y a création d'un arc électrique. Celui-ci résulte de l'ionisation de l'air ambiant (ou du diélectrique) situé entre les deux parties du contact. La température élevée de l'arc a pour effet de volatiliser le métal constituant les contacts. Un transfert de matière peut même avoir lieu à travers l'arc provoquant ainsi une érosion des contacts. Afin d'éviter la détérioration des contacts, il faut éteindre l'arc le plus rapidement possible. C'est pourquoi plusieurs dispositifs d'extinction d'arc sont mis en œuvre dans la fabrication de composants tels : interrupteur, contacteur, disjoncteur etc. ...

La température de l'arc est très élevée (entre 2500 et 5000 °C), c'est la raison pour laquelle il y a volatilisation du métal qui compose les contacts électriques. Cette élévation de température est telle qu'elle entraîne une élévation de la pression si l'arc a lieu dans une enceinte fermée (volume constant) ce qui est le cas d'une armoire par exemple.

Facteur influencé sur l'arc électrique

- Nature du courant :

Si la source de tension est continue il est nécessaire de forcer le courant à décroître puis à s'annuler, alors que si la source de tension est alternative (50 ou 60 Hz en général), le courant s'annule de lui-même. Le problème consistera alors à empêcher le réamorçage de l'arc après le passage par zéro du courant.

- Géométrie :

Plus la tension d'arc (qui s'oppose à la source) sera élevée plus le courant diminuera, ce qui signifie qu'en augmentant la tension UN arc définie plus haut on diminue le courant.

Les idées qui en découlent sont donc de diviser l'arc électrique principal en plusieurs « sous arc » afin de multiplier les chutes de tension anodique et cathodique d'une part et d'allonger d'autre part la longueur totale de l'arc.

- Milieu diélectrique :

L'ionisation du milieu baignant les contacts est directement liée à sa température, plus celle-ci est élevée et plus l'ionisation est facilitée. La désionisation rapide nécessite donc un refroidissement des gaz rendus conducteurs.

Parmi les procédés du soudage à l'arc les plus utilisés pour le soudage des aciers inoxydables on trouve le soudage TIG (Tungsten Inert Gaz Welding) et le soudage à l'arc avec électrode enrobée.

I.4.2 Principe du soudage TIG

Le procédé TIG, « Tungstène Inerte Gas », consiste à créer une source de chaleur à partir d'un arc électrique jaillissant dans une atmosphère gazeuse inerte entre une électrode réfractaire du tungstène et une pièce à souder servant d'anode.

Le soudage TIG peut s'effectuer sans métal d'apport, contrairement à d'autres procédés à l'arc (électrode enrobée, MIG, MAG,...). Néanmoins, un supplément de matière peut être apporté, sous forme de fil ou de baguette [12].

La plupart des métaux d'apport pour le soudage des aciers inoxydables duplex sont décrits comme « assortis » (comparables au métal de base) ; en fait, par rapport au métal corroyé de base, ils sont habituellement sur alliés en nickel (environ 2-4 % de nickel en plus), tandis que leur teneur en azote est généralement légèrement inférieure à celle du métal de base [4].

L'appareillage comporte une source de courant alternative ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires (**figure I.6**).

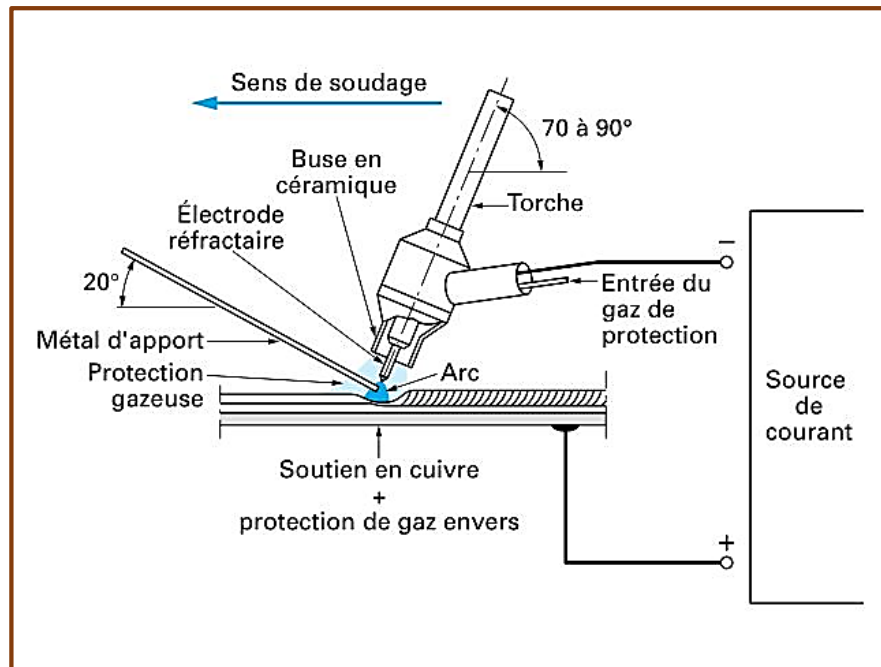


Figure I-6 Principe du soudage (manuel) à l'arc électrique avec électrode réfractaire [6].

Le soudage des aciers inoxydables est toujours effectué en courant continu en polarité directe (pôle négatif du générateur relié à l'électrode). Dans ces conditions, c'est la pièce qui est soumise au bombardement électronique alors que l'électrode réfractaire ne s'use que très peu. Le soudage peut se faire manuellement (torche tenue à la main) ou de manière automatique. Le flux de gaz inerte qui protège la zone de l'arc de l'atmosphère ambiante permet d'obtenir un arc très stable [6].

I.4.3 Rendement

La puissance délivrée par le générateur de soudage alimente le plasma d'arc ainsi que l'électrode de soudage. Une partie de cette énergie est perdue dans l'atmosphère ambiante et le reste est transféré à l'assemblage. Ainsi le rendement est défini dans la littérature comme le rapport de la puissance transférée dans la pièce W_p à la puissance de soudage délivrée par le générateur :

$$\eta = \frac{W_p}{UI}$$

Le rendement du procédé ne varie pas de façon significative en fonction du courant de soudage pour chaque procédé. Pour le soudage TIG, il est de 0.67 ± 0.05 .

I.5 Simulation Numérique du soudage

I.5.1 Données nécessaires à la simulation numérique du soudage

La simulation numérique du soudage nécessitent des données thermiques et mécaniques à chaque température et pour chaque phase de chaque matériau, dans le cas des matériaux à transformations métallurgiques. Ces données sont :

- Diagramme TRC (Transformations en Refroidissement Continu) ou TRCS (Transformations en Refroidissement en Conditions de Soudage), composition chimique,
- Masse volumique, conductivité thermique, chaleur spécifique,
- Courbes de dilato-métrique à des vitesses représentatives du procédé, Coefficient de dilatation,
- Limite élastique, module d'Young, coefficient de Poisson,
- Courbes caractérisant le comportement plastique.

La base de données, nécessaire à un calcul thermique, métallurgique et mécanique, reste à ce jour, un problème que tous les utilisateurs du logiciel rencontrent. En effet, ces données n'existent pas forcément dans la littérature et sont généralement délicates à déterminer expérimentalement. Pour arriver à réaliser la simulation numérique du soudage, nous devons alors faire certaines hypothèses sur les données d'entrée et sur le calcul.

I.5.1.1 Le calcul thermique

La partie thermique est gouvernée par l'équation de la chaleur qui permet de connaître la température en tout point du matériau et à chaque instant :

$$\rho(T)C_p(T) \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \underline{q} + \dot{w}$$

Où ρ , C_p et T sont respectivement : la masse volumique, la capacité calorifique et la température.

\dot{w} est la source interne de chaleur due à deux phénomènes : la conversion partielle de la puissance mécanique en énergie thermique et l'enthalpie de fusion ou de cristallisation H :

$$\dot{w} = \underline{\sigma} : \underline{\dot{\epsilon}} + H$$

On suppose que le matériau suit la loi de conduction de Fourier, c'est-à-dire que le flux de chaleur est une fonction linéaire du gradient thermique :

$$\underline{q} = -\lambda \cdot \nabla T$$

Où k est la conductivité thermique.

Cette équation nécessite une bonne connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites thermiques du domaine pour être résolue.

1.5.1.2 Le calcul mécanique

Le calcul mécanique peut se faire avec un matériau à comportement plastique ou viscoplastique. Dans le cas d'un acier duplex, qui a un comportement plastique.

Nous admettons que la thermo-plasticité est suffisante pour décrire le comportement de l'acier lors d'une simulation numérique de soudage. En effet, la rapidité des cycles thermiques permet de négliger les phénomènes visqueux. De plus, le phénomène d'écroutissage de matériau est pris en compte dans le calcul. Plusieurs modèles de comportement élasto-plastique sont compatibles avec la simulation des [13]:

- plasticité parfaite,
- écroutissage cinématique,
- écroutissage isotrope.

L'influence de l'histoire thermique sur l'histoire mécanique résulte à la fois des variations des caractéristiques mécaniques (module d'Young, limite d'élasticité) avec la température, des dilatations et concentrations d'origine thermique.

I.5.2 Limites et avantages de la simulation

L'ordinateur permet aujourd'hui de simuler des phénomènes très complexes tel qu'un soudage complet mais la puissance reste encore insuffisante pour représenter l'ensemble des phénomènes qui se produisent hors certains domaines : la simulation de l'évolution du temps reste encore très difficile au-delà de quelques heures.

– La simulation permet d'effectuer des recherches sur un système isolé, en faisant varier les paramètres un à un et en recommençant avec les mêmes conditions initiales.

– L'expérimentation, sauf pour les phénomènes simples, ne permet pas toujours d'isoler le système à étudier de son environnement; la maîtrise des conditions initiales peut être compliquée et l'expérience peut détruire le système étudié ou le modifier suffisamment pour empêcher de recommencer.

– La simulation est souvent moins chère que l'expérimentation et comporte beaucoup moins de risques lorsque l'homme fait partie du système étudié. Les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus rapidement.

– La simulation (surtout numérique) est basée sur une connaissance des phénomènes qui ne peut être obtenue que par l'expérimentation. Une simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant obtenu par des expérimentations sur des phénomènes antérieurs et analogues. Quelle que soit la qualité de la simulation, elle ne remplace pas totalement l'expérimentation.

– Certaines simulations ont un coût très élevé (même s'il reste faible devant celui de l'expérimentation). Ceci explique que les utilisateurs de la simulation, en particulier lorsqu'elle utilise des moyens de calculs exceptionnels, sont les industries à forte valeur ajoutée (aéronautique et espace, nucléaire) ou à risque élevé (militaire).

Chapitre II

Simulation Numérique

Chapitre II Simulation Numérique

II.1 Introduction

Ce chapitre à pour décrire les étapes que nous avons suivi afin de réaliser ce travail de simulation numérique du soudage TIG, nous allons exposer les modèles géométriques, les propriétés de matériau, le choix du maillage, et les paramètres de soudage utilisé dans les essais de cette simulation.

II.2 Présentation du logiciel Simufact.welding

Simufact.welding (**figure II.1**) est logiciel de simulation du soudage basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel aide à trouver les éléments de fixation optimale pour un procédé de soudage, il est utilisé par les ingénieurs industriels pour déterminer la meilleure séquence de soudage. De plus, il permet de produire en série des parties de tolérance très précise.

Originellement, Simufact.welding a été conçu comme un outil de simulation du soudage des structures, pour calculer distorsions et les contraintes résiduelle basé sur une description mathématique de la source de chaleur équivalentes.

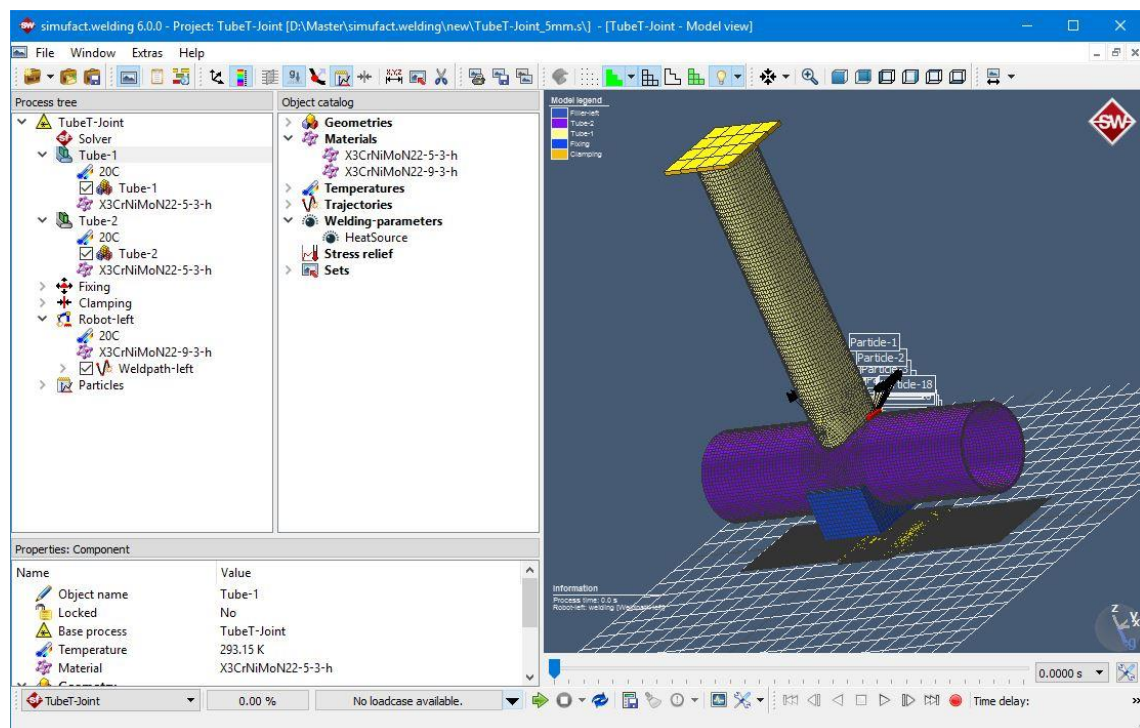


Figure II-1 Logiciel de simulation du soudage Simufact.welding.

II.3 Modèle du matériau

II.3.1 Modèle Géométrique

Nous avons utilisé deux modèles géométriques dans notre simulation. Le premier modèle constitué de deux pipes en T. Un présenté en vert dans la **figure II.2**, il est 70 mm de diamètre. La deuxième pipe est de 100 mm de diamètre.

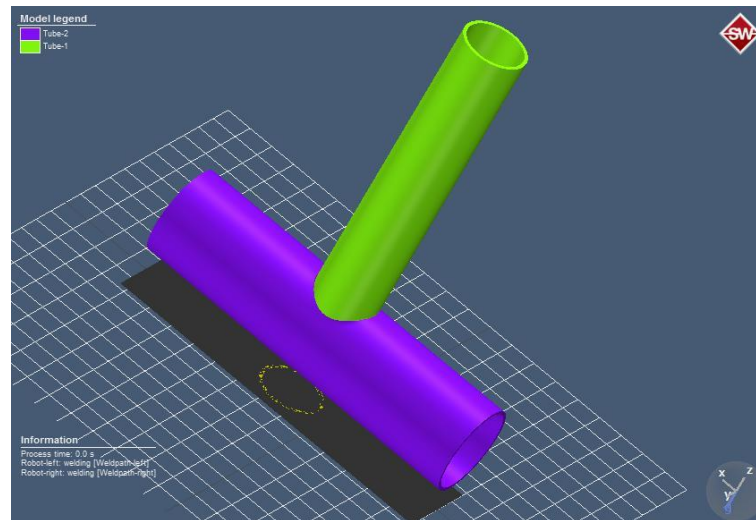


Figure II-2 Modèle géométrique 1.

- Le deuxième modèle consacré pour l'essai de soudage multi-passe, il consiste à un plaque de 270X200X30 mm de dimension (**Figure II-3**).

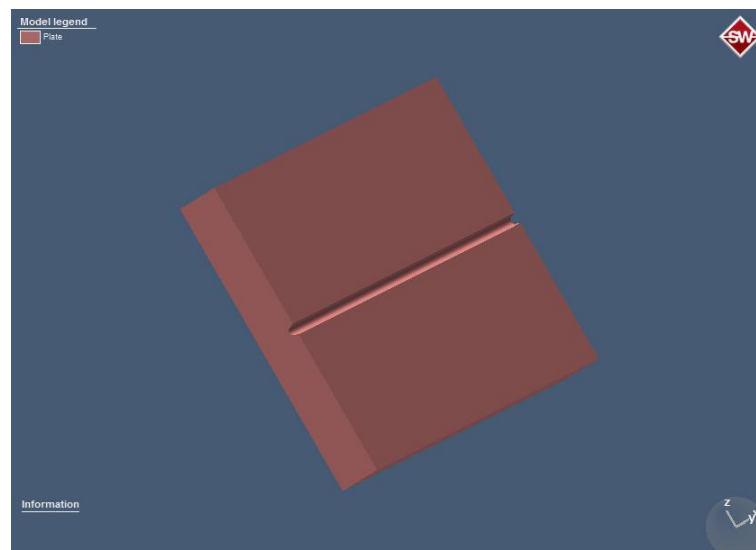


Figure II-3 Modèle géométrique 2.

II.3.2 Propriétés thermique et mécanique

Simufact.welding a une bibliothèque qui contient plusieurs type de matériau qu'on peut les utilisé, dans notre cas nous avons utilisé un acier inoxydable austéno-ferritique (duplex) de désignation ASTM A 790 UNS S 31803 et dont le nom commercial est SAF 2205 (**Figure II-4**). Ce choix est motivé par des raisons de la bonne soudabilité de ce matériau.

La composition du métal d'apport doit être aussi proche que possible de celle du métal de base afin d'obtenir une homogénéité aux niveaux des joints soudés. Le métal d'apport utilisé dans cette étude est selon la norme ASME SECTION IX 2000, **ER2209** pour le procédé TIG sous forme de baguette.

Simufact.welding nous permet de introduire un nouveau matériau, et de modifier ses propriétés thermique, mécanique, électrique de notre matériau. Les propriétés de l'acier utilisé ont été exposées dans l'annexe.

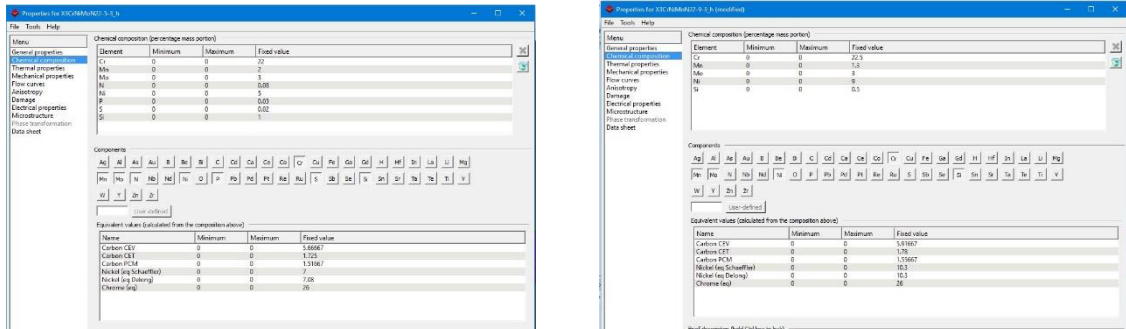


Figure II-4 Matériaux utilisés pour la simulation.

II.4 Le Maillage

Le modèle se compose d'une zone maillée plus fine autour du cordon de soudure contenant des éléments de taille de **0,5 mm**, mis en évidence dans la figure II-5 et II-6, et un maillage plus grossier sur les parties plus loin. Le modèle entier se compose des éléments quadratiques.

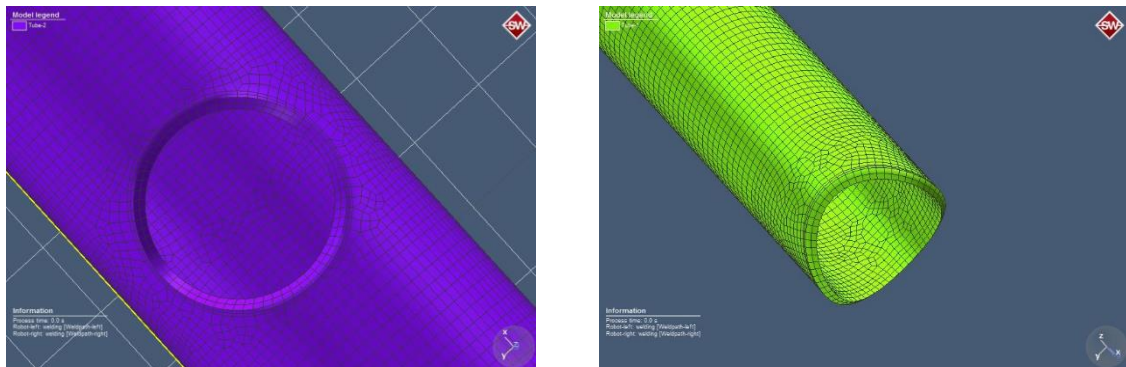


Figure II-5 Maillage du modèle géométrique 1.

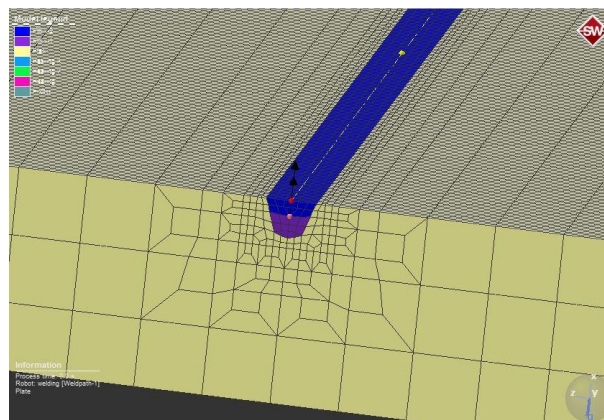


Figure II-6 Maillage du modèle géométrique 2.

II.5 Condition aux limites

En plus, comme conditions aux limites mécaniques, nous avons utilisé des outils de fixation (**Figure II-7, II-8**) sur les extrémités des tubes, la force utilisée sur le pince est égale à 500 N.

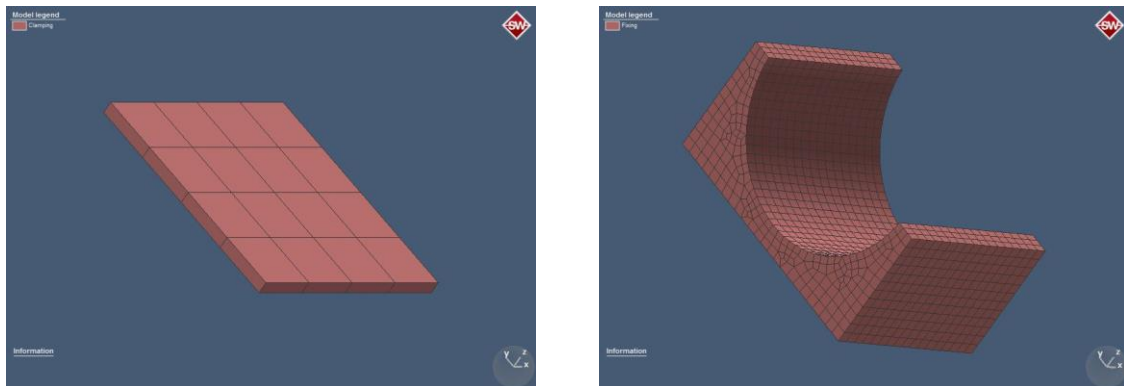


Figure II-7 pince et porter utilisé comme condition aux limites mécaniques.

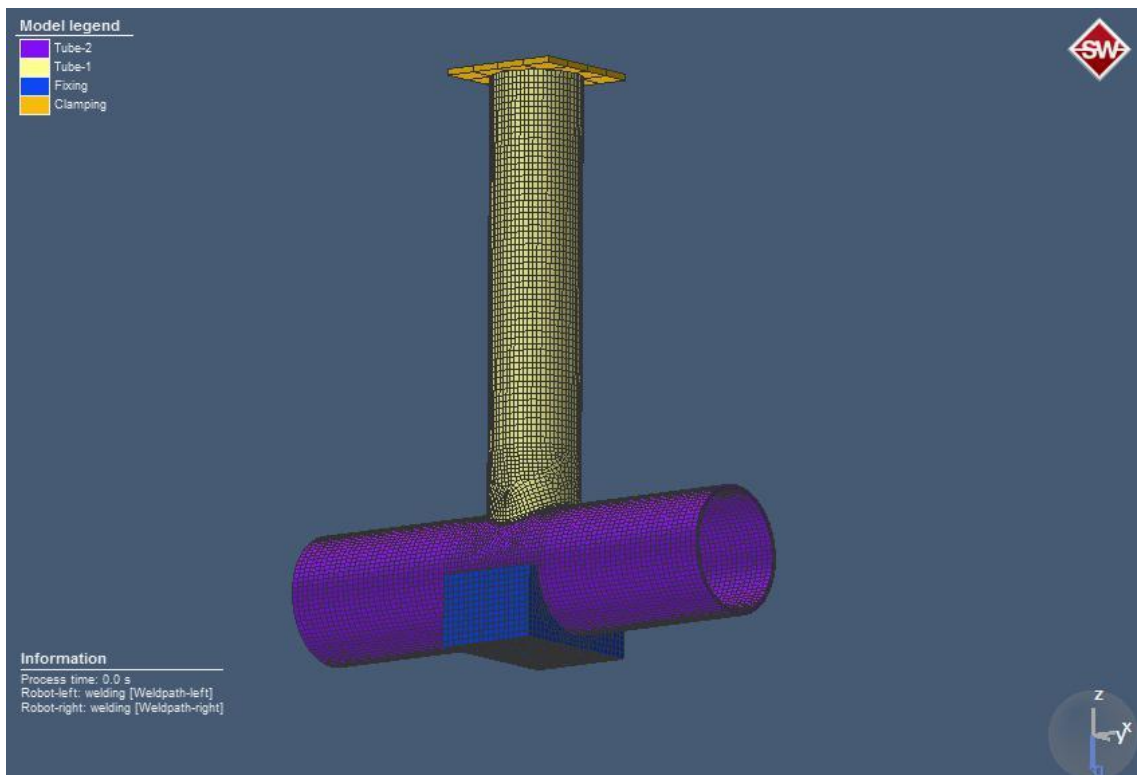


Figure II-8 position des conditions aux limites mécaniques.

II.6 Paramètres du procédé de soudage

II.6.1 Paramètres électriques

Les valeurs des différents paramètres du procédé de soudage (telle que la tension et l'intensité) utilisés initialement ont été choisies en concordance avec le procédé de soudage TIG. C'est pourquoi les valeurs de ces paramètres ont été ajustées raisonnablement afin que les températures moyennes atteignent un seuil qui concorde

avec la réalité du soudage. Les paramètres de soudage utilisés sont présentés dans **Le tableau II-1**.

Tableau II-1 paramètre du soudage utilisés.

essai	Vitesse d'avance (mm/s)	Intensité de courant (A)	Tension (V)
1	20	140	20

Pour analyser l'effet de la vitesse du soudage, nous avons répété la simulation avec différentes vitesses d'avances 15, 10, puis 5 mm/s.

II.6.2 Source de chaleur

L'utilisateur de Simufact.welding a le choix entre une source de la chaleur conventionnelle (soudure de l'arc) ou une source de la chaleur laser très concentrée. Dans notre cas, nous avons sélectionné « **Conventionnel** » (**Figure II-8**), qui est le modèle de double ellipsoïde de **Goldak**, qui est une bonne approche pour l'arc de la plupart des procédés de soudage à l'arc électrique.

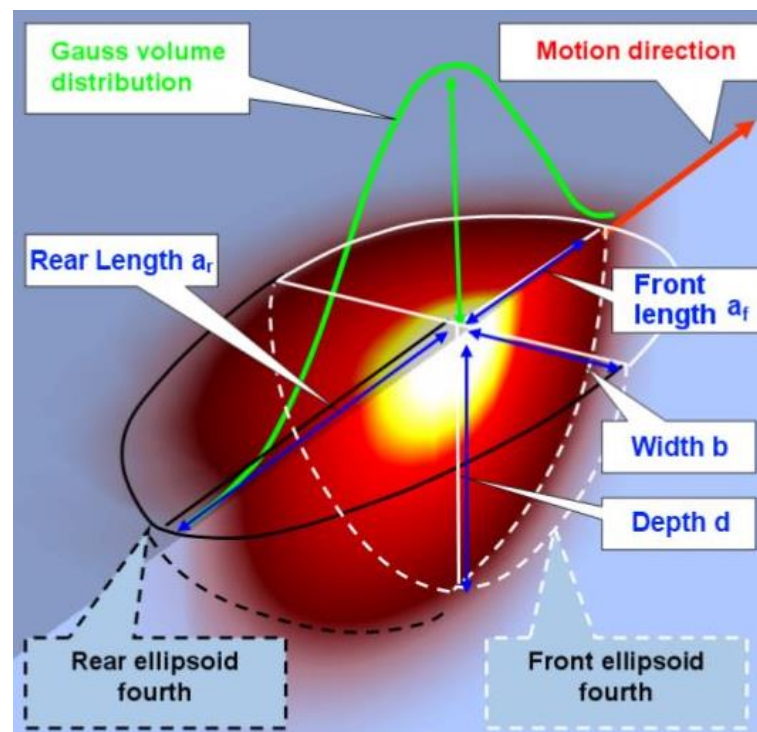


Figure II-9 modèle de la source de chaleur.

Chapitre III

Résultats et interprétation

Chapitre III Résultats et interprétation

III.1 Introduction

L'objectif de ce travail est la simulation numérique du soudage TIG sur l'acier inoxydable duplex de nuance UNS S 31803. Pour cela nous intéressons aux aspects suivants:

- La distribution de la température au cours de l'opération du soudage.
- La distribution des contraintes, distorsions, et des déformations au cours du soudage
- Soudage multi-passe.
- L'effet de la vitesse du soudage.

III.2 Analyse thermique

III.2.1 Distribution des températures

Simufact.welding nous permet de suivre la distribution de la température dans et autour le cordon de soudure, les figures III.1, III.2, III.3, III.4, III.5, III.6, présentent cette distribution dans les instants 3, 6, 11, 14, 23, 59, et 200 respectivement pour l'essai 1.

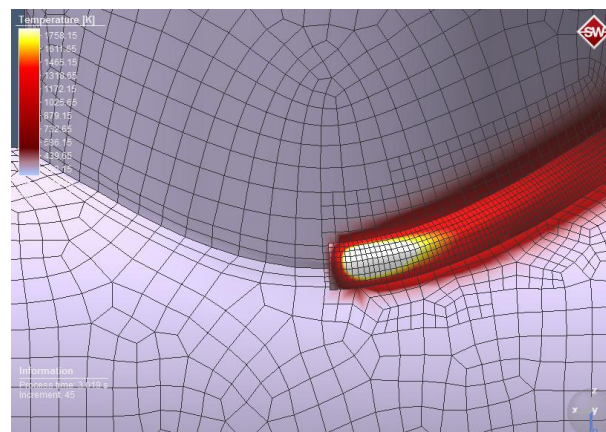


Figure III-1 La distribution de la température après 3s.

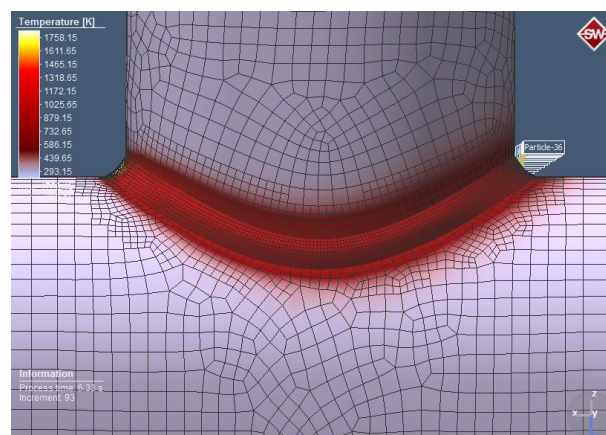


Figure III-2 La distribution de la température après 6s.

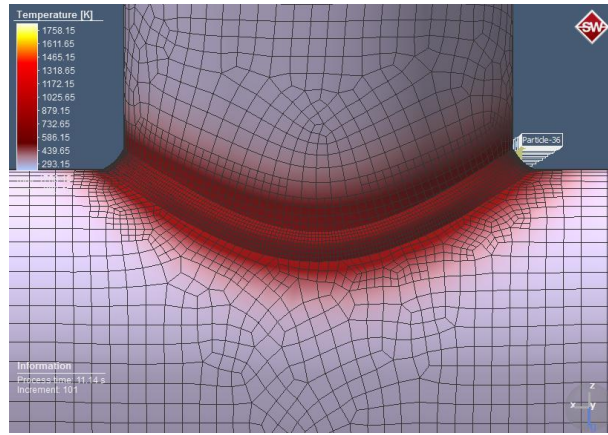


Figure III-3 la distribution de la température après 11s.

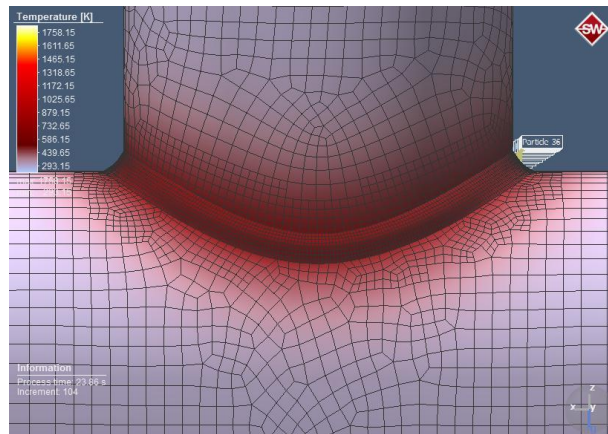


Figure III-4 la distribution de la température après 23s.

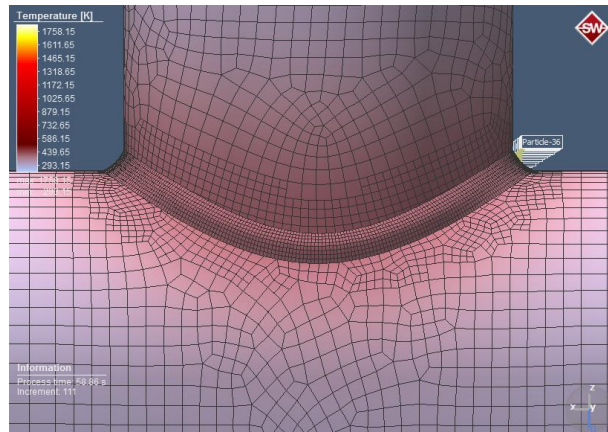


Figure III-5 la distribution de la température après 59s.

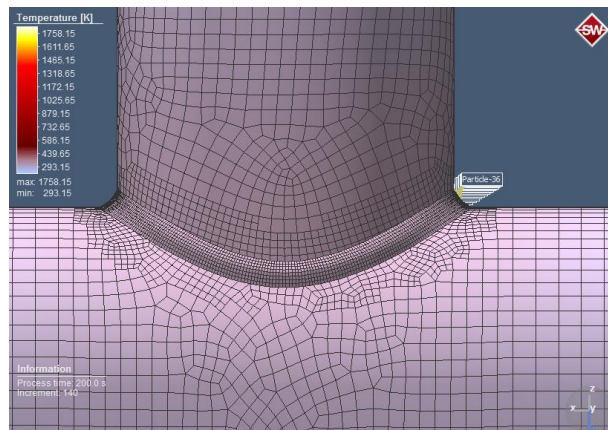


Figure III-6 la distribution de la température après 200s.

III.2.2 Cycle thermique dans le cordon

La figure III.7 présent le cycle thermique du soudage dans le cordon de soudure. Nous remarquons que la vitesse d'échauffement et de refroidissement sont très élevées.

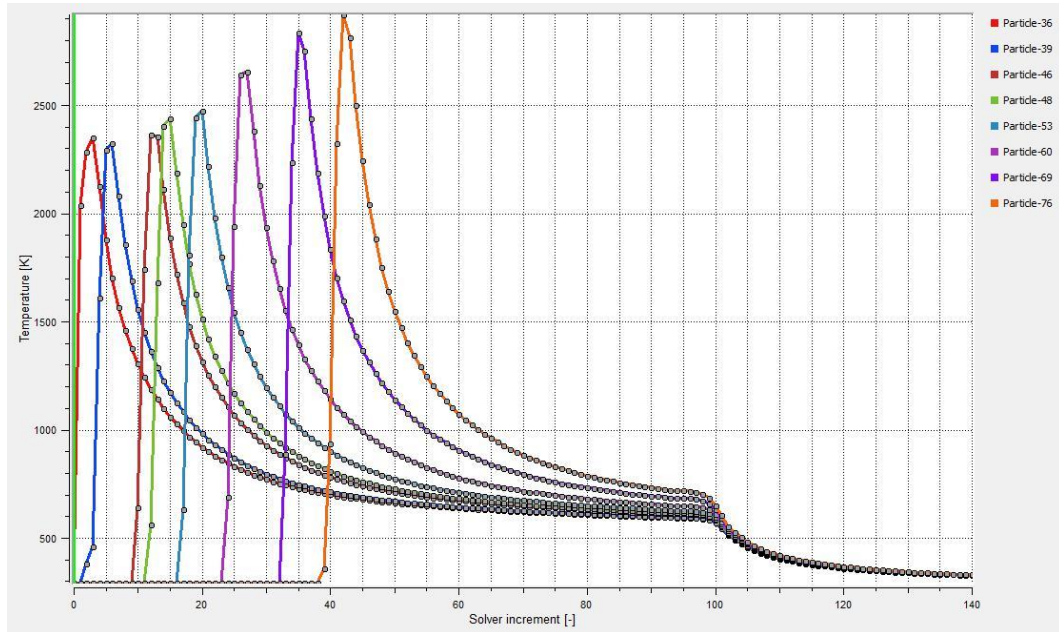


Figure III-7 Le cycle thermique du soudage dans différents point dans le cordon.

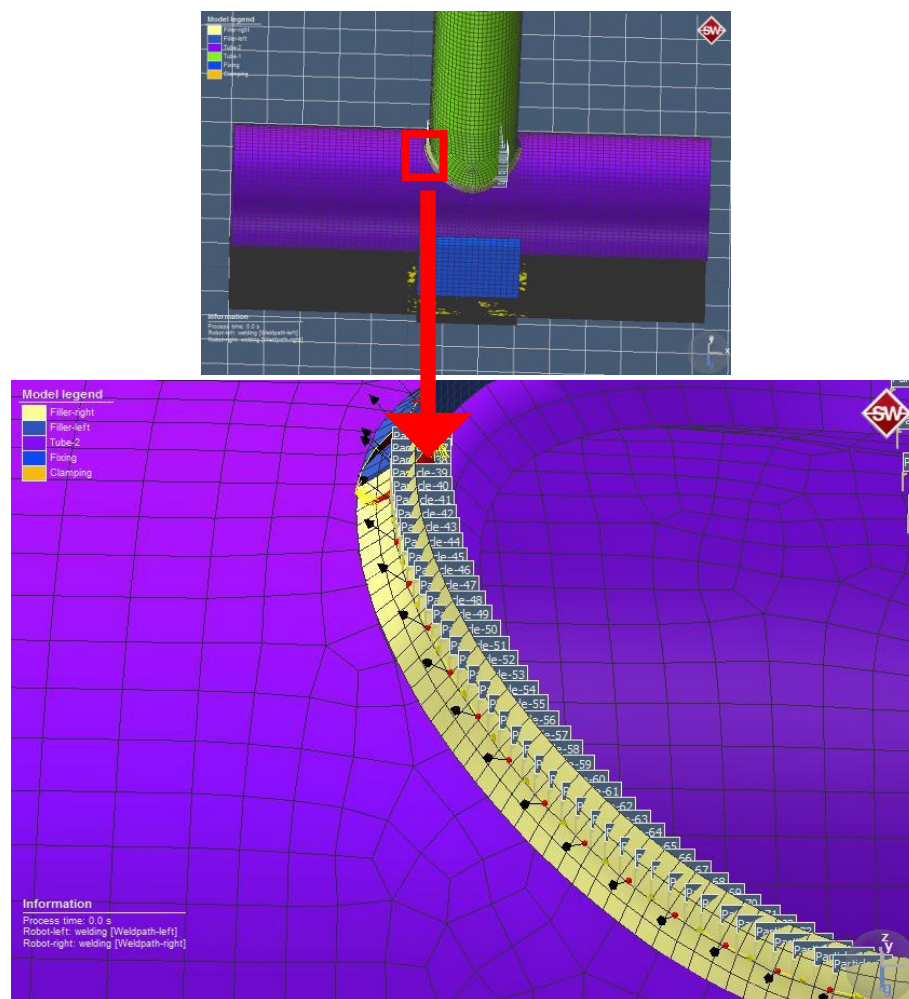


Figure III-8 Position des particules.

III.2.3 Cycle thermique dans la ZAT

La figure III.9 présent le cycle thermique du soudage dans le cordon de soudure. Nous remarquons que la vitesse d'échauffement est très élevée, mais celle de refroidissement est moins marquée que dans le cordon.

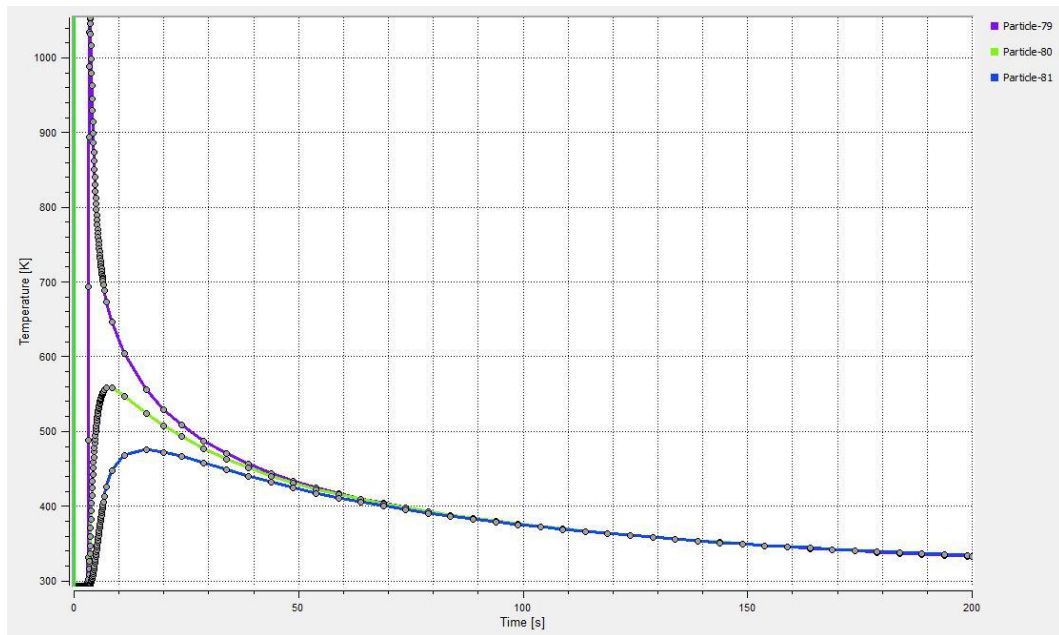


Figure III-9 Le cycle thermique du soudage dans différents point dans la ZAT.

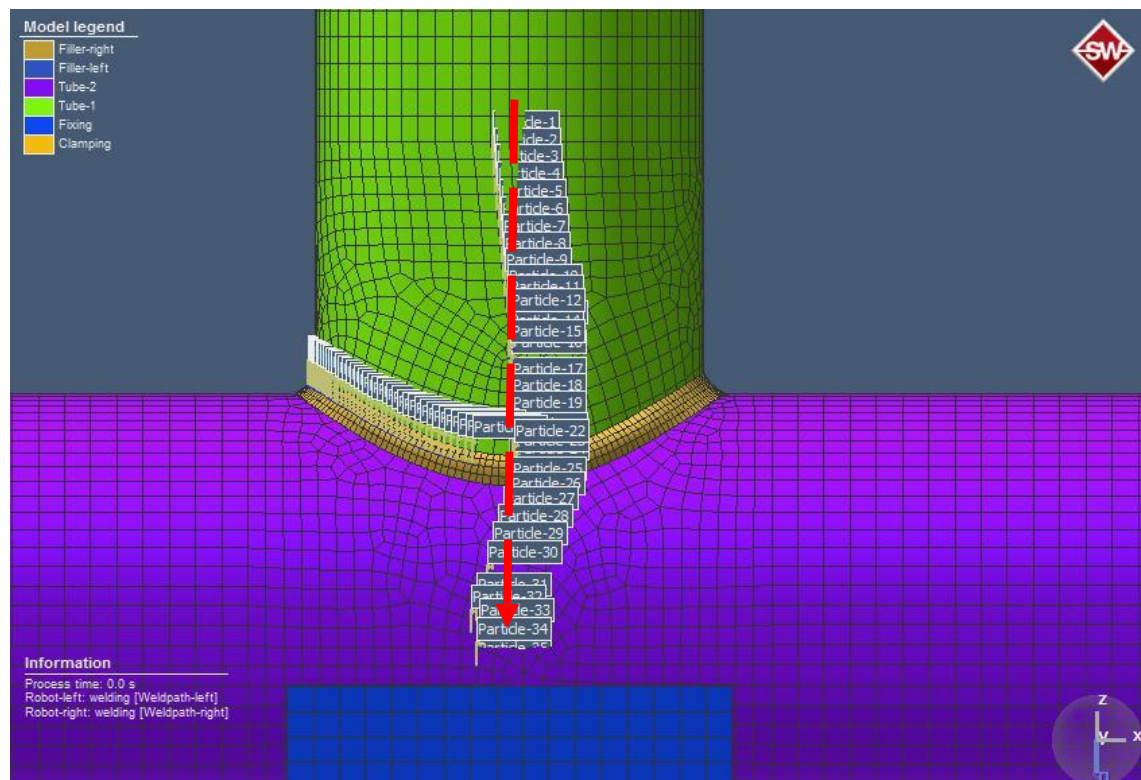


Figure III-10 Position des particules dans la ZAT.

III.3 Analyse mécanique

III.3.1 Distribution des contraintes effective

La figure III.11 présent la distribution des contraintes effective, on remarque une homogénéité de distribution en fonction de la distance au cordon de la soudure, ou les contraintes sont plus faibles qu'on aller plus loin du cordon. On remarque aussi un taux très basse des contraint près de la ligne de liaison (Figure III.12).

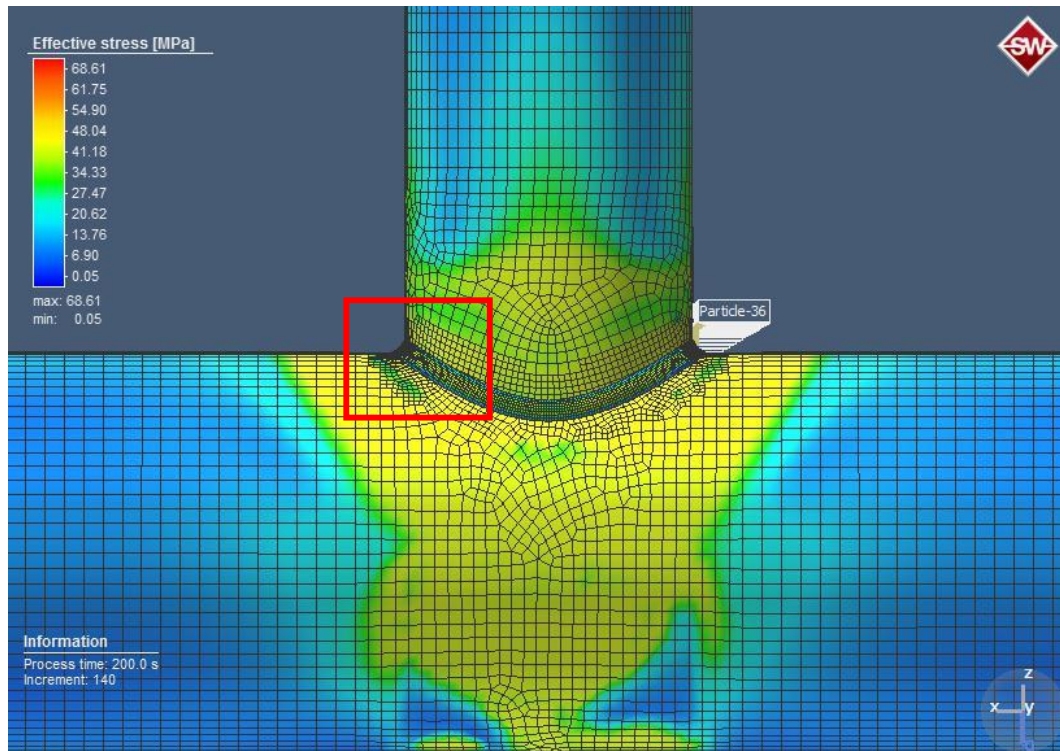


Figure III-11 La distribution des contraintes dans les pipes.

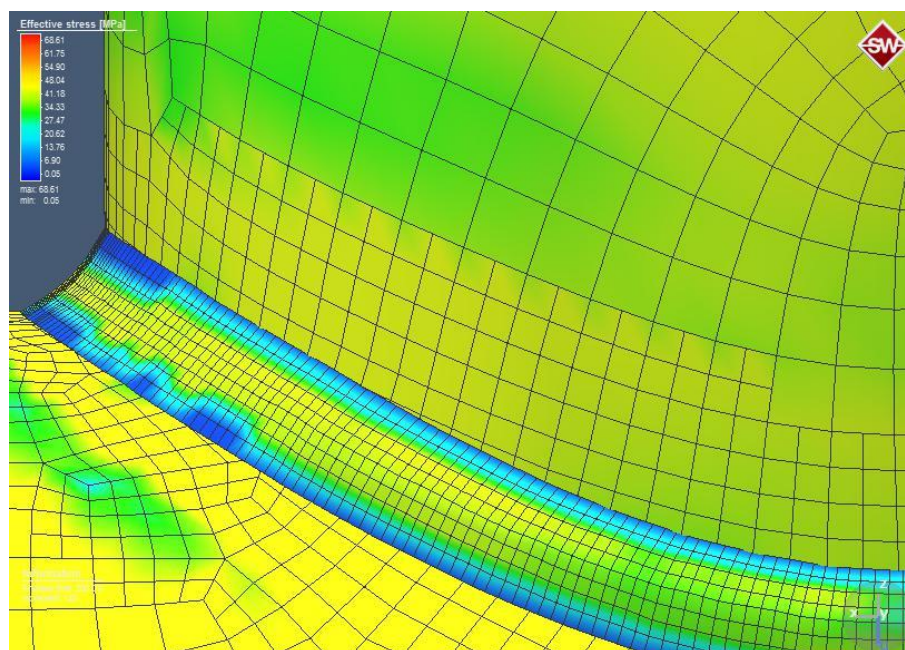


Figure III-12 La distribution des contraintes près de la ligne de liaison.

III.3.2 Distribution des contraintes principal

Les figures III.13, III.14, III.15, présentent les contraintes principales σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} .

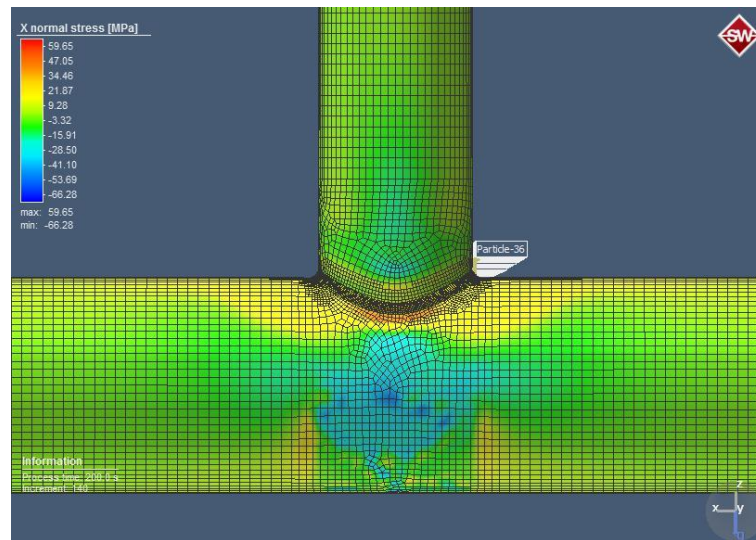


Figure III-13 contraintes normales σ_{xx} .

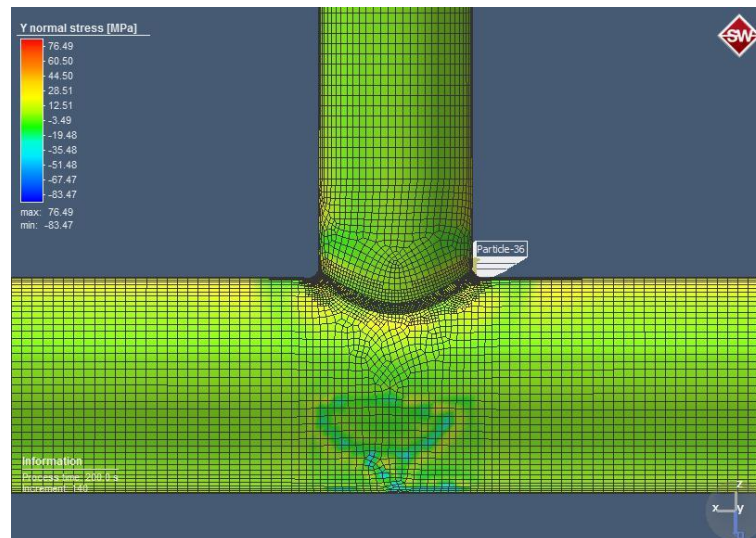


Figure III-14 contraintes normales σ_{yy} .

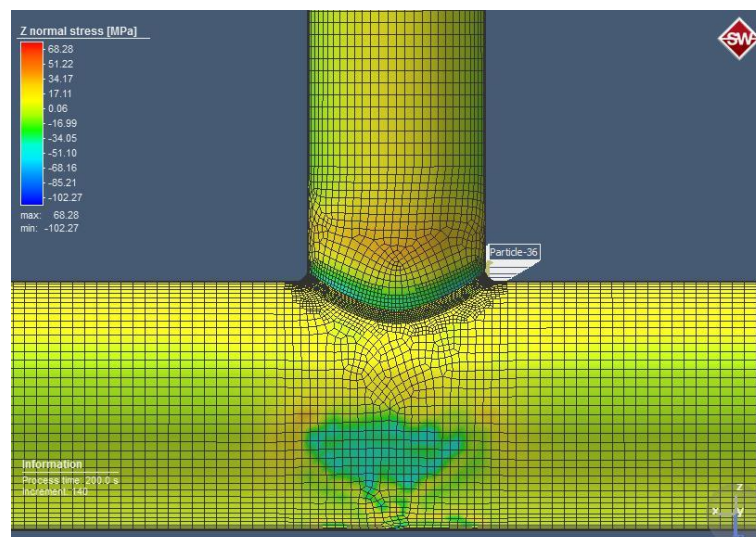


Figure III-15 contraintes normales σ_{zz} .

III.3.3 Distribution des distorsions

Les figures III.16, III.17, III.18, présentes les distorsions suivant les axes x, y, et z.

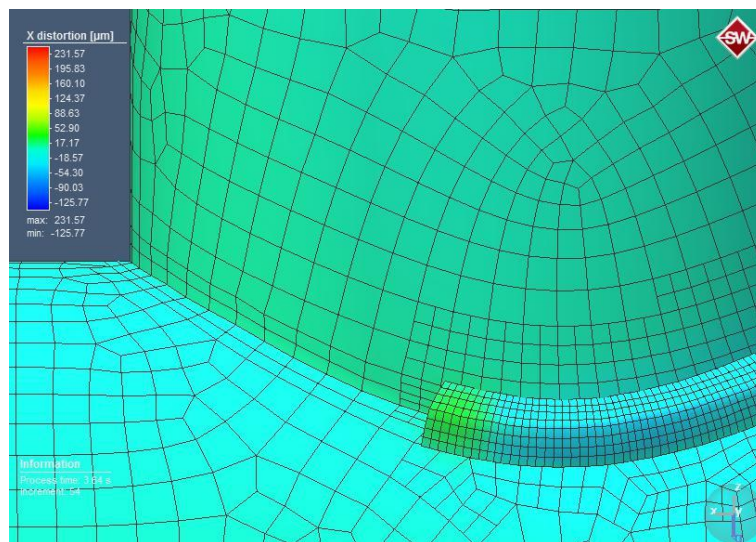


Figure III-16 Distorsion suivant x.

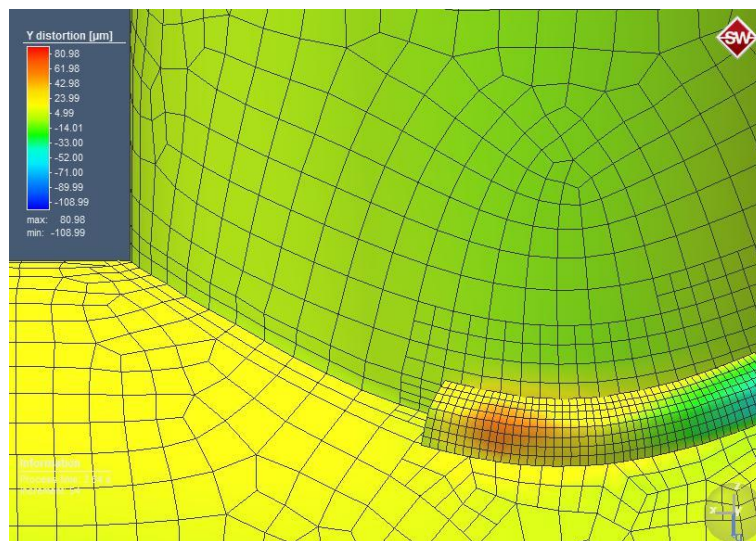


Figure III-17 Distorsion suivant y.

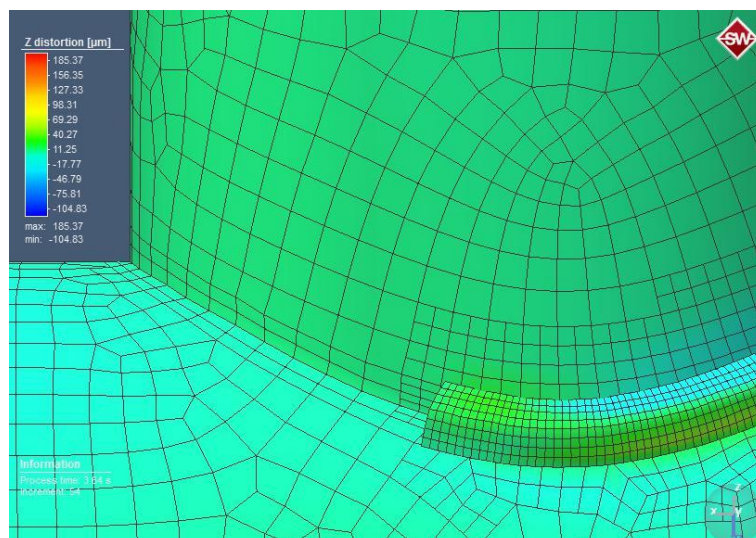


Figure III-18 Distorsion suivant z.

III.3.4 Distribution de la déformation

La figure III.19 présent la distribution de la déformation plastique dans la soudure après 3s. La figure III.20 présent la distribution de la déformation élastique.

On remarque une zone de déformation élastique plus élevée près de ligne de liaison.

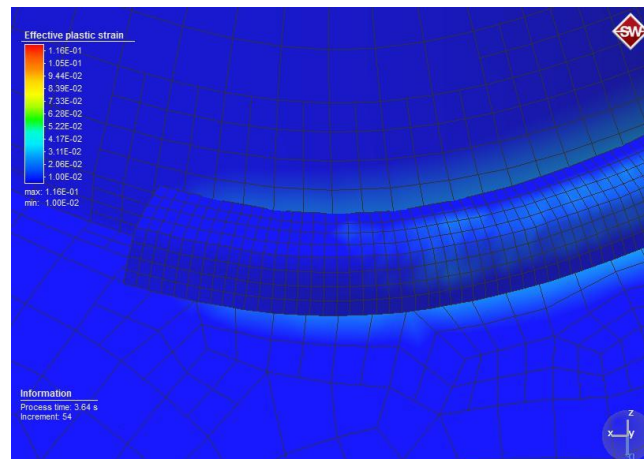


Figure III-19 Distribution de la déformation plastique.

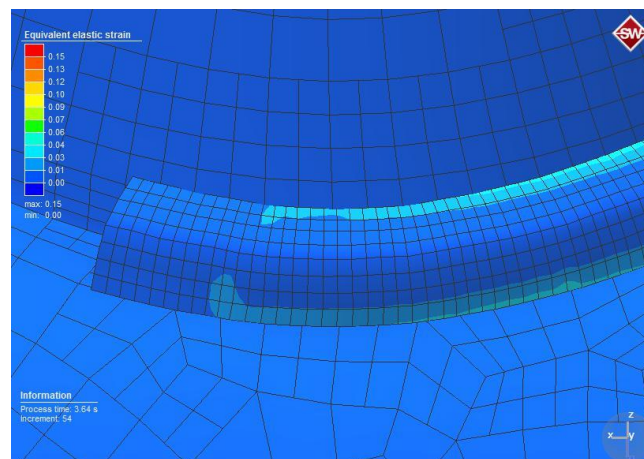


Figure III-20 Distribution de la déformation élastique.

La figure III.21 présente l'évolution de la déformation plastique effective maximum dans les deux pipes. On remarque une déformation plus dans le pipe en haut qui dû à la fixation.

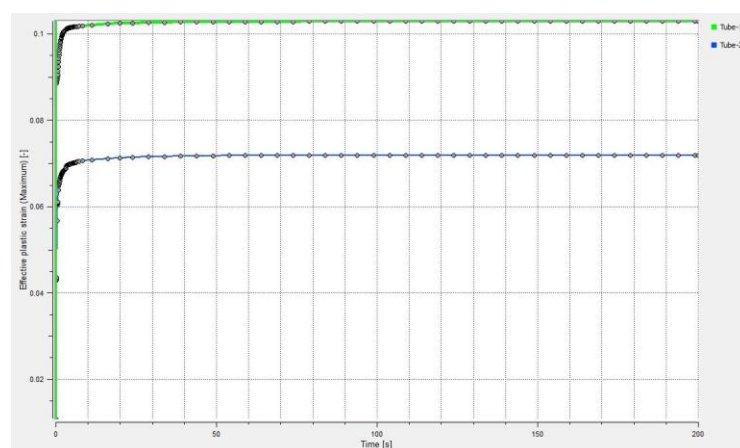


Figure III-21 Déformation plastique Effective des deux pipes.

III.4 Influence de la vitesse de soudage

III.4.1 Sur la distribution de la Température

Les figures III.22, III.23, et III.24, présente la distribution de température dans les deux pipe pour différents vitesse d'avance. Nous avons remarqué que la température atteint dans le cas d'une vitesse de 10 mm/s est plus élevée que celle dans le cas de 15 mm/s, et cette dernière plus que celle de 20 mm/s.

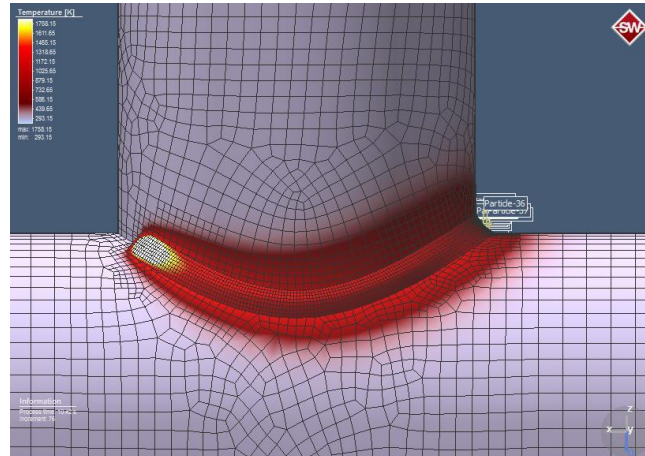


Figure III-22 Distribution de la température dans le cas de 10 mm/s.

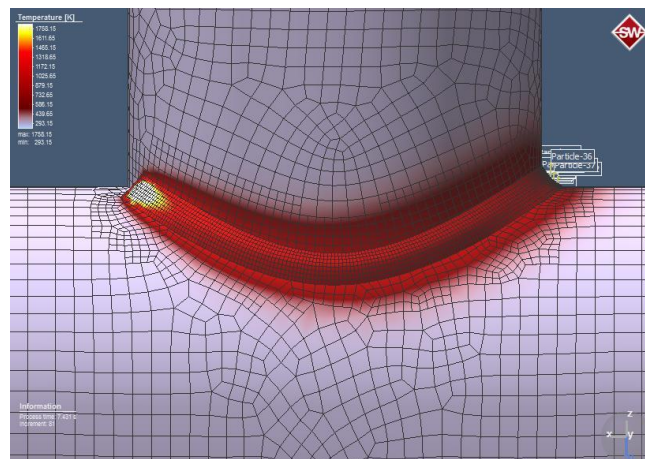


Figure III-23 Distribution de la température dans le cas de 15 mm/s.

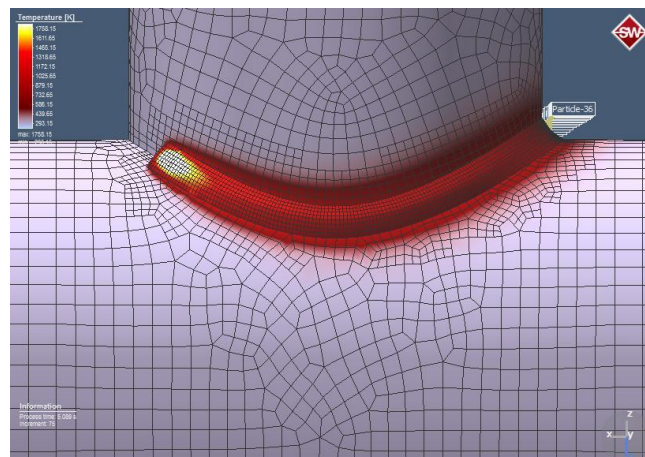


Figure III-24 Distribution de la température dans le cas de 20 mm/s.

III.4.2 Sur la Température maximale atteinte

Les figures III.25, III.26, III.27, présentent la distribution de la température maximale atteinte à un point pendant l'opération du soudage pour des différentes vitesses d'avance. Nous remarquons que plus la vitesse est élevée plus la température maximale est importante.

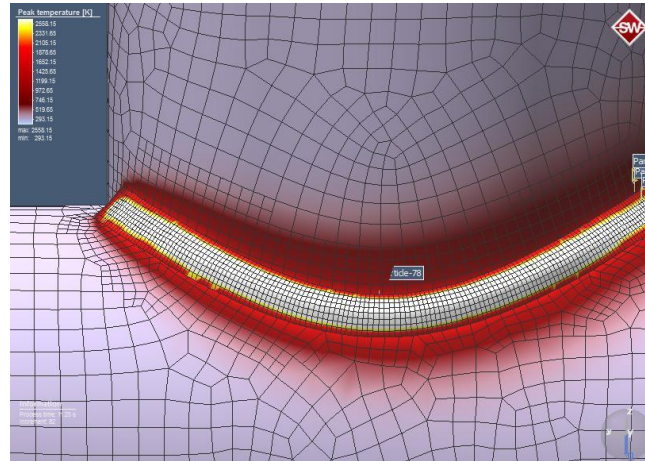


Figure III-25 Température maximale atteinte pour $V=10$ mm/s.

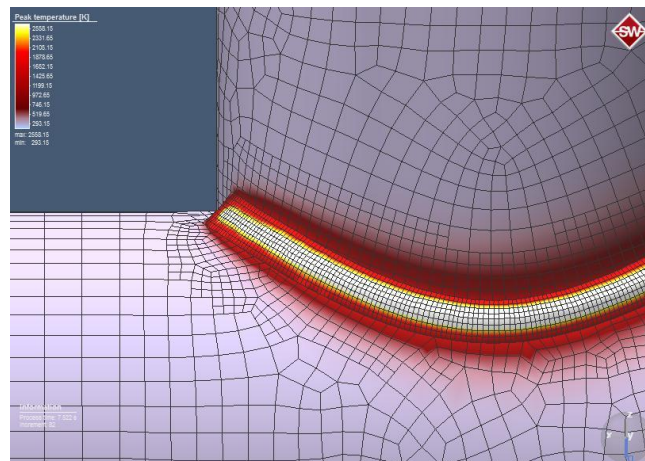


Figure III-26 Température maximale atteinte pour $V=15$ mm/s.

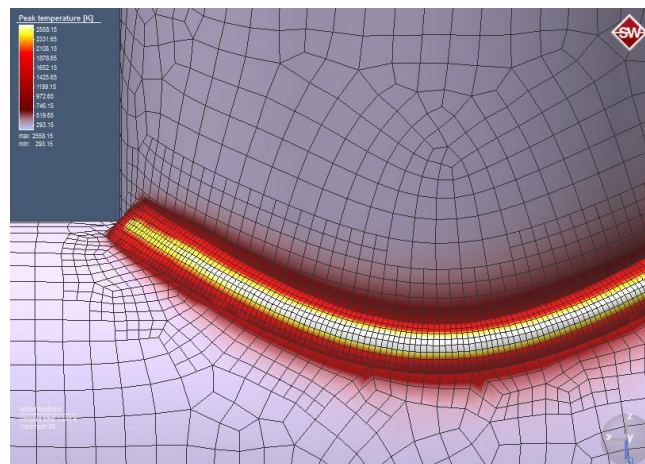


Figure III-27 Température maximale atteinte pour $V=20$ mm/s.

III.4.3 Sur les contraintes

Les figures III-28, III-29, III-30, présentent les distributions des contraintes pour des vitesses de soudage, 10, 15, et 20 mm/s respectivement. On remarque que plus la vitesse de soudage est élevée les contraintes sont plus intense.

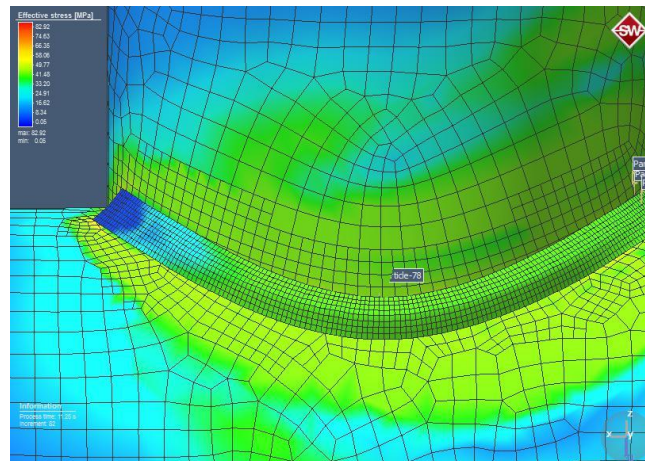


Figure III-28 Distribution des contraintes pour $V=10$ mm/s.

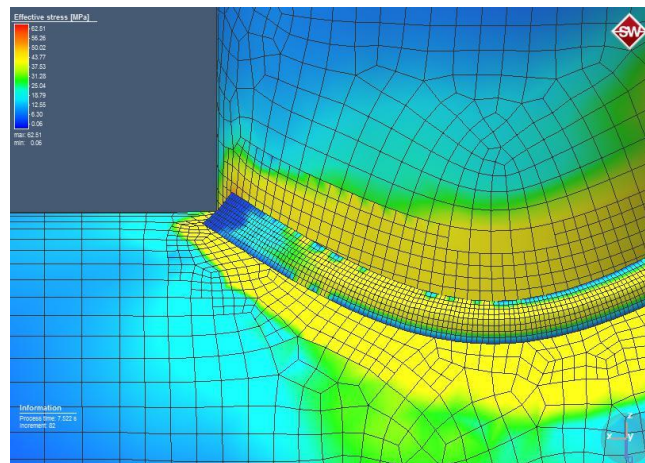


Figure III-29 Distribution des contraintes pour $V=15$ mm/s.

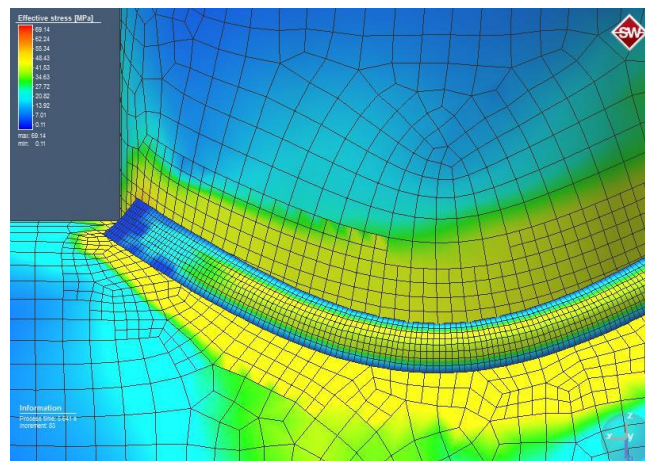


Figure III-30 Distribution des contraintes pour $V=20$ mm/s.

III.4.4 Sur les distorsions

Les figures de la distribution des distorsions pour les différents vitesses d'avance (**III-31**, **III-32**, **III-33**), montre que plus cette dernière est élevée plus les distorsions sont important.

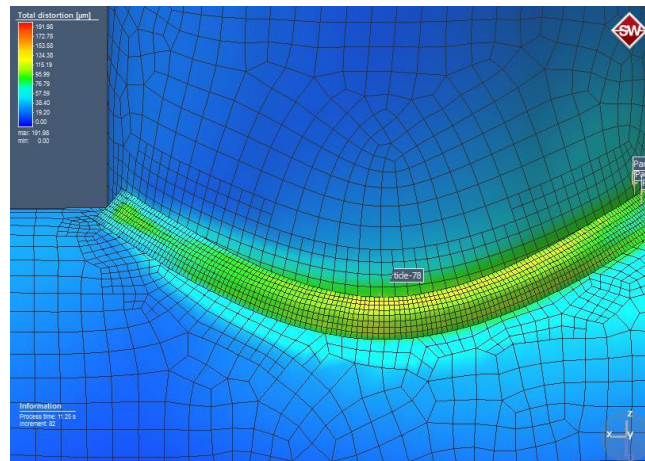


Figure III-31 Distribution des distorsions pour $V=10$ mm/s.

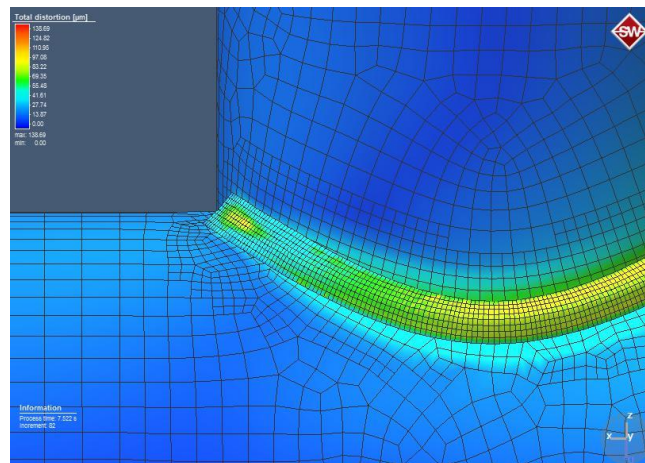


Figure III-32 Distribution des distorsions pour $V=15$ mm/s.

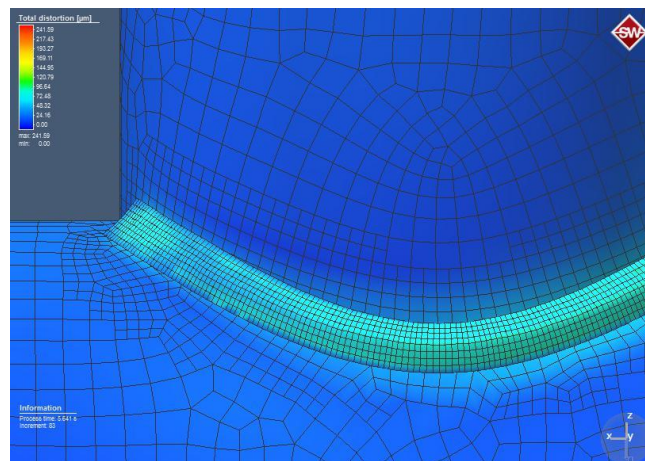


Figure III-33 Distribution des distorsions pour $V=20$ mm/s.

III.5 Le soudage multi-passe

Les figures III.23, présentent la distribution des contraintes résiduelle après deux passes. Nous remarquons les contraintes maximal se situer à la ZAT.

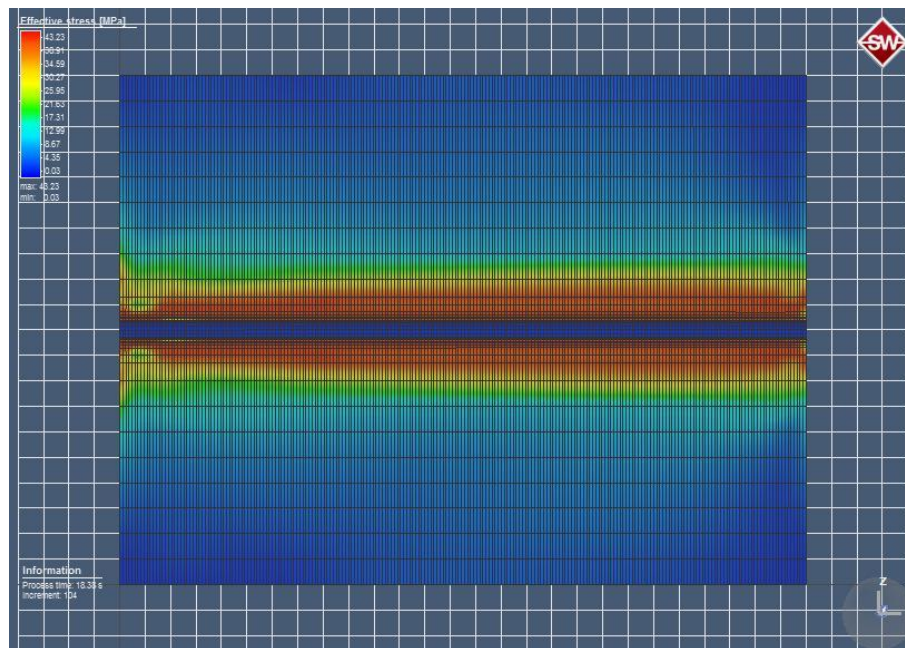


Figure III-34 Distribution des contraintes après 2ème passe.

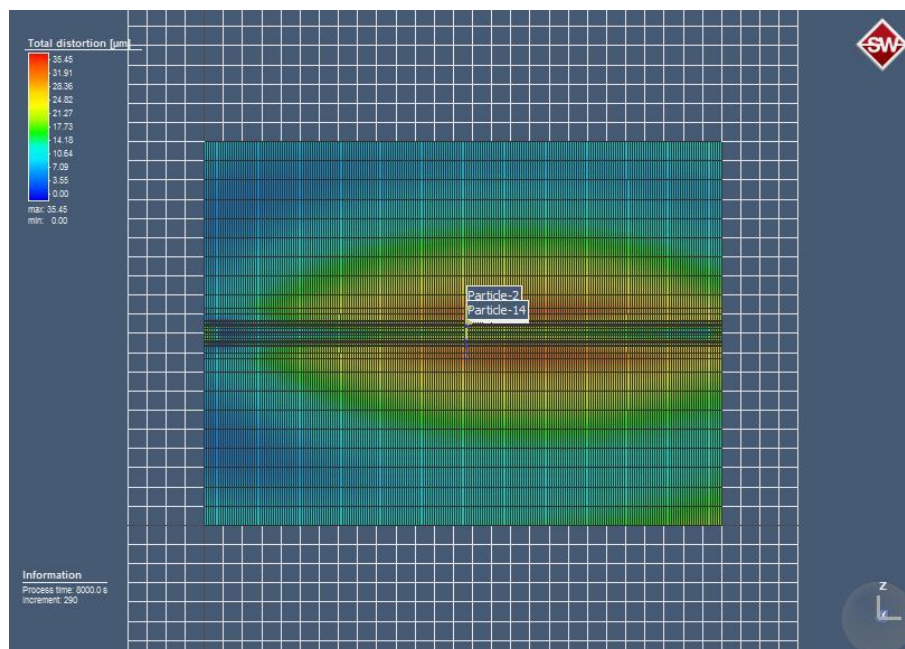


Figure III-35 Distribution des distorsion après 2ème passe.

III.6 Interprétation

Ce travail a porté sur la prédiction numérique de la distribution de la température, des distorsions, et des contraintes, engendrées par le procédé de soudage TIG sur un acier inoxydable duplex UNS31803, par la méthode des éléments finis. Les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel Simufact.welding, en utilisant la méthode du double ellipsoïde et une distribution gaussienne du flux de chaleur pour simuler la source de chaleur.

Nous avons exposé la distribution de la température dans des différents instants de la simulation, ou on a remarqué que la répartition thermique à l'intérieur de la soudure (diffusion de la chaleur), s'effectue si on peut dire suivant des lignes isothermes. Ceci nous a permis de déterminer les frontières de la zone affectée thermiquement.

L'allure des cycles thermiques est représentative des vitesses de chauffage et de refroidissement en fonction de la distance du déplacement de l'arc : la vitesse de montée en température dans le cordon est instantanée alors que celle dans la ZAT est relativement lente.

Les contraintes et les retraits sont dus aux phénomènes thermiques et métallurgiques mis en jeu dans les pipes soudées.

Nous avons trouvé que pour une vitesse de soudage lente, la température maximale atteinte dépasse de loin la température de fusion du métal (>2300 K) et cela affecte le cours du soudage par l'influence de cette température sur la solidification du métal et le collage des deux bouts à souder. Et on constate alors que cette température est très lente par rapport à la vitesse de soudage souhaitée optimale.

Pour une vitesse de soudage $V = 20$ mm/s, la température de fusion du métal n'est atteinte qu'après 05 cm de soudage et cela explique le non collage des deux pipes à souder qu'après cette distance. Mais la deuxième vitesse de soudage 15 mm/s s'annonce comme le meilleur modèle proposé de vitesse de soudage et la température atteinte assure le soudage et le collage des deux pipes à souder dès le départ jusqu'à la fin de soudage, nous estimons que cette vitesse de soudage est la plus proche de la vitesse optimale adéquate si ce n'est pas celle-ci.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est la simulation d'une opération de soudage TIG sur un acier inoxydable duplex UNS S31803, nous avons essayé de prédire les distorsions et contraintes de soudage. Après la réalisation de ce travail nous étirons les conclusions suivantes :

La connaissance du flux thermique et du champ de température lors d'un procédé de soudage est primordiale pour toute étude du comportement thermique ou mécanique (ou métallurgique) des soudures.

Le cycle thermique du soudage affecte directement le comportement thermique et mécanique de structure pendant l'opération de soudage.

La température élevée d'un procédé tel que le soudage TIG et le refroidissement ultérieur des éléments soudés génèrent une distribution de contraintes au voisinage du cordon de soudure et des déformations indésirables dans la structure soudée.

La simulation numérique des procédés de soudage est l'une des questions les plus compliquées dans les analyses réalisées à l'aide de la Méthode des éléments finis. C'est en raison d'un grand nombre de facteurs doit être pris en compte.

La simulation numérique est un outil adapté à la compréhension et à l'exploration des procédés de soudage. Toutefois, la mise au point de cet outil suppose toujours des hypothèses simplificatrices devant être validées par comparaison de ses résultats avec l'expérience. Seule cette validation assure ensuite la pertinence de l'exploitation de l'outil de simulation.

Bibliographies

- [1] **R. N. Gunn**, Duplex stainless steels, ABINGTON PUBLISHING, Cambridge England, 2000.
- [2] **R. Badji**, Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205, thèse de doctorat, Université paris 13 et L'ENP d'Alger, 2008.
- [3] **Iris Alvarez-Armas**, Duplex stainless steels, ISTE Ltd, London, UK, 2009.
- [4] **IMO**, Guide pratique pour le travail des aciers inoxydables duplex, international molybdenum association, London, UK, 2011.
- [5] **I. Chouffa**, Effets du vieillissement thermique sur la résistance à la corrosion d'une soudure en acier inoxydable duplex 2205, projet de fin d'étude, ENP, Alger, 2013.
- [6] **P.J. Cunat**, Aciers inoxydables : Mise en œuvre, Techniques de l'ingénieur, M4542.
- [7] **A.P.Lambert**, Rupture par clivage de microstructures d'aciers bainitiques obtenues en conditions de soudage, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 03 Mai 2001.
- [8] **H.Granjon**, Bases métallurgiques du soudage, Editions Eyrolles, 1989.
- [9] **P.Berthet**, déformation et contraintes en soudage, Publication de la soudure autogène, 1988.
- [10] **Y. Kchaou**, Etude comparative de la tenue mécanique des joints soudés des réservoirs sous pression de deux aciers inoxydables super austénitique et duplex, Thèse doctorat, École Nationale d'Ingénieur, Sfax, Tunisie, 2015.
- [11] **P.J.Cunat**, Aciers inoxydables : Critères de choix et structure, Techniques de l'ingénieur, M4540, 2000.
- [12] **Roland CAZES**, Soudage à l'arc, Techniques de l'ingénieur, B7730.
- [13] **M. Clergé**, Simulation numérique du soudage à l'électrode enrobée d'assemblages d'angle en acier 5355, thèse de doctorat, METZ, France, 2000.