

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Systèmes Energétiques Et Développement Durable

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

**MASTER
CONCEPTION ET PRODUCTIQUE**

Thème

**Optimisation de la vitesse de
soudage a l'arc électrique des
aciers**

Présenté par:

HICHEM BEKOUCHE

Proposé et dirigé par:

Dr. CHEMSEDDINE DERFOUF

Promotion : Juin 2013

DÉDICACE

A celle pour qui mon cœur vibre encore et toujours, a mon premier et seul amour, ma mère.

A celui qui m'a appris à être ce qui je suis, à être près de moi quand il le faut pour m'orienter avec ses valeureux conseils, mon père.

A mes frères Ahmed Ali et Houcine, et mes soeurs Nora Samra et karima.

A tous mes amis et tous ceux qui m'aiment je dédie ce modeste travail.

REMERCIEMENT

Je remercie dieu le tout le puissant de m'avoir donné patience, santé et volonté tout au long de mes études.

Un grand merci

A mon encadreur monsieur Chemseddine derfouf qui a suivi mon travail du début jusqu'à la fin et mis à ma disposition la documentation nécessaire.

A tous les enseignants de département de la génie mécanique.

A tous mes amis qui ma encouragée pendant cette étude.

Sommaire	
Chapitre I / Généralité sur le soudage.....	3
I.1 Historique sur le soudage	3
I.2 Le soudage de nos jours.....	3
I.3 Définition du soudage	4
I.3.1 La soudure peut être hétérogène.....	5
I.3.2 Soudo-Brasage.....	5
I.3.3 Brasage tendre.....	5
I.3.4 Brasage fort.....	6
I.4 Le soudage par fusion	6
I.5 Détails métallurgiques sur les différentes zones D'un assemblage soudé.....	7
I.5.1 Le métal de base (M.B).....	7
I.5.2 La zone fondue (Z.F).....	8
I.5.3 La zone thermiquement effectuée (Z.A.T).....	8
I.5.4 Zone de liaison.....	8
I.6 Morphologie de la zone de fusion.....	9
I.7 La soudabilité.....	11
I.8 La classification des procédés de soudage.....	12
I.9 Détails sur les procédés de soudage de l'énergie thermochimique.....	13
I.9.1 Soudage oxyacétylénique.....	13
I.9.1.a L'oxygène (O ₂).....	14
I.9.1.b L'acétylène (C ₂ H ₂).....	14
I.9.2 Soudage Aluminothermique.....	14
I.10 Détails sur les procédés de soudage de l'énergie Electrique.....	15
I.10.1 Soudage a l'arc électrique.....	15

I.10.2 Soudage en atmosphère inerte (T.I.G).....	15
I.10.3 Soudage avec électrode enrobée.....	16
I.10.4 Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G et M.A.G).....	16
I.10.5 Soudage automatique sous flux solide (arc submerge).....	16
I.10.6 Soudage par résistance électrique.....	18
I.10.6.1 Soudage par points.....	18
I.10.6.2 Soudage à la molette.....	18
I.10.6.3 Soudage en bout par étincelage.....	19
I.10.7 Soudage par induction.....	19
I.10.8 Soudage par friction.....	19
I.10.9 Soudage par ultrasons.....	19
I.11 Facteurs influençant dans le choix d'un procédé de soudage.....	19
I.12 Effet des paramètres de soudage.....	20
I.13 La soudabilité des métaux.....	20
I.14 Soudabilité de l'acier.....	20
<hr/> <hr/>	
Chapitre II /Paramètres techniques du procédé de soudage à l'arc électrique.....	22
II.1 Introduction.....	22
II.2 La relation entre intensité du courant I, de la tension du courant U et la longueur de l'arc L.....	22
II.2.1 Puissance d'arc.....	23
II.2.2 Caractéristiques des soudeuses à l'arc.....	24
II.2.3 Soudeuses à courant constant.....	24
II.2.4 Soudeuses à potentiel constant.....	26
II.2.5 Types de courant.....	26

II.3.1 La section de l'électrode enrobée (métal d'apport).....	28
II.3.2 Nature d'électrode enrobée de soudage d'arc.....	29
II.3.3 Role de l'enrobage de l'électrode.....	29
II.4 Le chanfrein de soudage.....	30
II.4.1 Règles générales de préparation des chanfreines du soudage.....	30
II.4.2 Types de chanfreine utilisée en soudure.....	31
II.5 Schéma de principe.....	32
II.5.1 Définition du procédé.....	32
II.5.2 Principe du procédé.....	33
II.5.3 Position de soudage.....	34
II.6 Définition de l'électrode enrobée.....	34
II.6.1 Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées.....	35
II.6.2 Choix d'une électrode enrobée	35
II.7 Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	36
<hr/> <hr/>	
Chapitre III/Etude Numérique du soudage à l'arc électrique sous flux solide.....	38
III.1 Introduction.....	38
III.2 Travaux antérieurs dans le domaine de la simulation numérique du soudage à l'arc électrique sous flux.....	39
III.2.1 Analyse Inverse Thermique.....	39
III.2.2 Applications: Réparation et soudage multipasse.....	40
III.3 Soudage hétérogène Acier Aluminium.....	41
III.4 Dans le domaine de la modélisation pour prédire la micro ségrégation et la résistance à la corrosion par piqûres de soudures en aciers inoxydables austénitiques.....	43

III.5 Dans le domaine de la prédiction des contraintes et des déformations dans les joints soudés.....	44
III.6 Contraintes et distorsions dans les assemblages soudés.....	45
III.7 Calcul des contraintes et distorsion par Méthode des Eléments Finis.....	47
III.8 La SNS pour des études industrielles.....	48
III.9 Exemple pratique du modèle numérique proposé.....	50
III.9.1 Les paramètres de soudage.....	51
III.9.2 Modèle de l'étude numérique proposée.....	52
III.10 Formulation numérique de l'étude thermique du soudage.....	52
III.10.1 Algorithme de résolution adoptée.....	55
III.10.2 Conditions aux limites.....	56
<hr/> <hr/>	
Chapitre VI/Résultats Numériques.....	57
VI.1 Simulation 01 pour une vitesse de soudage de $V_s=10\text{mm/s}$	57
VI.2 Simulation 01 pour une vitesse de soudage $V_s=16\text{ mm/s}$	63
VI.3 Simulation pour une vitesse de soudage de $V_s = 20\text{ mm/s}$	69
VI.4 Comparaison des différents modèles de soudage à différentes vitesses et interprétations.....	72
VI.5 Interprétation.....	73
Conclusion & recommandation.....	74

Sommaire de Figures

Figure I.1: Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion.....	7
Figure I.2: Cycle thermique en soudage et transformations Structurales.....	10
Figure I.3: Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie.....	12
Figure I.4: Energie spécifique des différents procédés de soudage.....	13
Figure I.5: schéma de soudage tig.....	15
Figure I.6: schéma de soudage mig/mag.....	16
Figure I.7: schéma de soudage par points.....	18
Figure I.8 : schéma de soudage à la molette.....	18
<hr style="border: 2px solid black;"/>	
Figure II.1: La relation entre intensité du courant I, de la tension du courant U et la longueur de l'arc L.....	22
Figure II.2: Puissance de l'arc en fonction de courant de soudage.....	23
Figure II.3: Courbes caractéristiques minimales et maximales des soudeuses à courant constant (courbes tombantes).....	24
Figure II.4: Courbe tension intensité avec contrôle d'arc.....	25
Figure II.5: Courbes caractéristiques minimale et maximale des soudeuses à potentiel constant (courbes horizontales).....	26
Figure II.6: Courant continu avec polarité normale et avec polarité Inverse.....	27
Figure II.7: Fréquence normale du courant alternative.....	27
Figure II.8: quelque exemple sur les chanfreins utilisés en soudage.....	31
Figure II.9 : Schéma de principe du soudage à l'arc manuel.....	32
Figure II.10 : Schéma de principe de l'amorçage du soudage à l'arc Manuel.....	32
Figure II.11: Schéma du choix de distance du soudage à l'arc Manuel.....	33
Figure II.12: Schéma de principe optimal du soudage à l'arc manuel.....	33
<hr style="border: 2px solid black;"/>	
Figure III.1: Prédiction du risque de fissuration en un soudage multipasse.....	39
Figure III.2.: Prédiction du risque de fissuration en un soudage multipasse.....	40

Figure III.3: Modélisation de la microstructure de l'acier réfractaire moulé.....	41
Figure III.4: Prédiction du risque de fissuration dans la microstructure....	41
Figure III.5: Prédiction de l'épaisseur de la couche de réaction entre l'acier et l'aluminium.....	42
Figure III.6: la prédiction des contraintes et des déformations dans les joints soudés	45
Figure III.7:simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis I..	46
Figure III.8:simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis II.	46
Figure III.9:Transformations métallurgiques dans la zat.....	48
Figure III.10: Transformations structurales.....	48
Figure III.11:contraintes lors du remplissage d'un chanfrein en x.....	50
Figure III.12: bouteille à gaz ménagère qui se confectionne dans l'unité SNS BAG de Batna.....	51
Figure III.13: Schéma du modèle de soudage étudié.....	52
Figure III.14: Schéma du modèle discrétisée du soudage.....	53
Figure III.15 : Maillage et disposition du modèle d'étude de la bouteille et disposition du volume de contrôle.....	53
Figure III.16: Maillage et disposition du modèle d'étude de la bouteille et disposition du volume de contrôle.....	54
Figure III.17: schéma adopté du mode de résolution.....	55
<hr/>	
Figure VI.1: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 03$ secondes.....	57
Figure VI.2: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 26$ secondes.....	58
Figure VI.3: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 60$ secondes.....	58
Figure VI.4: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 80$ secondes.....	59
Figure VI.5: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 125$ secondes.....	59
Figure VI.6: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 160$ secondes.....	60
Figure VI.7: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 172$ secondes.....	60
Figure VI.8: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 190$ secondes.....	61
Figure VI.9: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 230$ secondes.....	61

Figure VI.10: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 10\text{mm/s}$ à $t = 320$ secondes.....	62
Figure VI.11: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 01$ secondes.....	63
Figure VI.12: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 10$ secondes.....	63
Figure VI.13: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 20$ secondes.....	64
Figure VI.14: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 40$ secondes.....	64
Figure VI.15: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 80$ secondes.....	65
Figure VI.16: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 100$ secondes.....	65
Figure VI.17: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 140$ secondes.....	66
Figure VI.18: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 160$ secondes.....	66
Figure VI.19: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 190$ secondes.....	67
Figure VI.20: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 250$ secondes.....	67
Figure VI.21: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 300$ secondes.....	68
Figure VI.22: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 16\text{mm/s}$ à $t = 320$ secondes.....	68
Figure VI.23: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 01$ secondes.....	69
Figure VI.24: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 20$ secondes.....	69
Figure VI.25: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 50$ secondes.....	70
Figure VI.26: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 55$ secondes.....	70
Figure VI.27: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 70$ secondes.....	71
Figure VI.28: simulation visuelle du soudage pour $V_s= 20\text{mm/s}$ à $t = 100$ secondes.....	71

Sommaire des Tableaux	
Tableau II.1 : Chaleur d des électro la pièce et de l'électrode.....	28
Tableau II.2 : Les choix de diamètre des électrodes.....	28
Tableau II.3 : Intensité moyenne de soudage pour la position à plat.....	35
Tableau II.4: préparations de joints.....	36
Tableau II.5 : Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	37
<hr/>	
Tableau III.1: Composition Chimique de l'Acier de base.....	51
Tableau III.2: Composition Chimique du métal d'apport.....	51
<hr/>	
Tableau VI.1 : Comparaison des différents modèles de soudage à différentes vitesses. La longueur de modèle considéré des deux bouts soudés est supposé égale 05 cm.....	72

Introduction

Le **soudage** est l'un des moyens d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler.

Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

Bernandos (1887) puis **Kjellberg** (1914) ont été les tout premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. Le Soudage d'acier est le plus largement utilisé procédé dans l'industrie raison de son efficacité et son faible coût de revient lors de ses usage.

Notre travail de PFE met à grand envergure l'usage des procédés de soudage spécialement celui de l'arc électrique notre étude comporte deux parties principales, une première qui concerne l'étude bibliographique et documentaire des procédés de soudage et du soudage et elle se compose de deux chapitres Généralité sur le soudage et les Paramètres techniques du procédé de soudage à l'arc électrique

Dans le premier chapitre nous avons identifié les différent types et procédés de soudage ainsi que les facteurs influençant dans le choix d'un procédé de soudage. dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les paramètres techniques du procédé de soudage à l'arc électrique

La seconde partie de notre travail concerne l'étude pratique, celle ci contient elle aussi deux chapitres (Chapitre III : Etude Numérique du soudage à l'arc électrique sous flux solide et Chapitre IV : Résultats Numériques)

Dans le chapitre III nous exposant les modèles numériques déjà utilisées dans les travaux scientifiques ultérieures retrouvé dans la littérature de ce domaine tout évoquant

les méthodes de convergence numérique utilisé pour proposer notre modèle numérique qui à déjà fait l'objet d'une validation, son usage sera dans le sens de simuler le soudage à l'arc électrique et d'identifier le transfert de chaleur dans le métal de base pour des différentes vitesses de soudage et qui sont V1 :10mm/s, V2 :16mm/s et V3 :20mm/s. dans le chapitre IV :des graphes de simulation collectés sous un environnement **Matlab** feront l'objet de nos résultats Numériques suivi de leurs interprétations

Enfin une conclusion et des recommandations seront la finalité de se travail.

I.Généralité sur le soudage :

I.1 Historique sur le soudage :

Les origines du soudage moderne datent la fin du 19 siècle et du début de 20^{ème} siècle.

A cette époque s'invente :

- ✓ Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : **Goldsmith**, Allemagne
- ✓ Le soudage avec électrode de charbonne : **Bernardo** et **Olszewski**, Russie
- ✓ Le soudage avec électrode fusible flue : **Slavian**, RUSSIE
- ✓ Le soudage avec électrode enrobée **Keller**, Suède
- ✓ Le soudage par résistance **Thompson**, USA
- ✓ Le soudage au gaz (chalumeau) : **Picard**, France

Le développement des procédés du soudage est devenu de plus en plus rapide avec l'invention du soudage avec les électrodes enrobées et le soudage au chalumeau oxyacétylénique, ce dernier a rendu possible la réalisation des premiers œuvres importants comme les bateaux, les ponts le bâtiment et les chaudières (surtout au USA et en Angleterre). L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile et parmi les nouveaux procédés nous pouvons nommer :

- ✓ Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 au USA
- ✓ Les soudages sous flux en 1935 au USA
- ✓ Le soudage vertical sous laitier en 1950 en URSS
- ✓ Le soudage sous la protection gazeuse de 1950 à 1960
- ✓ Le soudage avec fils fourre de 1950 à 1960
- ✓ Le soudage explosion de 1950 à 1960
- ✓ Le soudage par bombardement électronique en 1956 en France
- ✓ Le soudage au laser en 1965[1]

I.2 Le soudage de nos jours

Nous estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier sont destinés à la fabrication des produits soudés.

A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métallique à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydraulique.

Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés.

Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER [1].

I.3 Définition du soudage :

Nous appelons **soudage** l'opération qui permet d'obtenir des assemblages en mettant a profit l'aptitude a la liaison des atomes des pièces à souder nous utilisons a cette fin l'échauffement localisé ou global de ces pièces. Le soudage s'applique aussi bien aux métaux qu'aux matériaux non métalliques (matières plastique, verre, caoutchouc, etc.).

A l'état solide, tous les métaux sont des corps à structure cristalline la disposition des atomes dans les corps à structure amorphe verre, (résines, etc.) est chaotique. Pour obtenir une seule pièce à partir de l'élément souder, il faut approcher leurs particules élémentaires (ions, atomes) jusqu'à ce que nous observons s'établir entres elles des liaisons inter atomiques, cela s'obtient par un échauffement localisé ou globale, par une déformation plastique ou bien par l'action simultanée de ces deux facteurs. [2]

A ce stade, il est important de signaler que les propriétés du matériau sont en fonction de leurs structures internes, c'est-à-dire de sa structure atomique.

I.3.1 La soudure peut être hétérogène, si le métal qui compose le joint est de nature différente des à souder. Ou **autogène** si le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.

Il y'a aussi le :

I.3.2 Soudo-Brasage :

En soudo-brasage la pénétration des joints et le mode opératoire sont sensiblement les mêmes qu'en soudage autogène. Le métal d'apport vient mouiller les bords des pièces à souder pour assurer la liaison.

La température à obtenir varie les métaux à souder

- ✓ Acier : 750-950°C (rouge cerise)
- ✓ Fonte : 650-800°C (rouge sombre)
- ✓ Cuivre : 850-900°C
- ✓ Aluminium : 600°C

Il offre l'avantage de dilatation et de retraits moindre qu'en soudage autogène.

I.3.3 Brasage tendre :

La température de fusion du métal d'apport est ici très basse, inférieure à 400°C. Un tel type de joint n'est pas fait pour résister à des températures ou des efforts mécaniques élevés.

Les alliages d'apport de brasage sont à base d'Étain, de Plomb, de Cadmium (200° à 270°C).

Le brasage tendre se pratique aussi au fer à souder.

I.3.4 Brasage fort :

Le mode opératoire et la préparation des pièces sont proches du soudage autogène.

Le brasage est caractérisé par l'introduction entre deux surfaces présentant en général un faible écartement, un métal fondu à fort pouvoir mouillant.

En brasage fort la température de fusion du métal d'apport est supérieure à 450° C, les métaux ou alliages d'apport utilisés le plus souvent sont :

- ✓ le laiton (Cu +Zn)
- ✓ l'Argent
- ✓ le Cuivre

Le brasage est réalisé avec un apport très faible de métal, alors que le soudage nécessite un dépôt de métal d'apport relativement important variant avec la forme et les dimensions du joint à réaliser.

Dans le brasage fort, le métal d'apport a une résistance mécanique supérieure à celle des métaux d'apport employés dans le brasage tendre.

Le métal d'apport mouille et s'accroche aux tôles à souder des pièces de toutes sortes en fonte Acier, Bronze, Cuivre ou assembler des alliages. Il s'applique également à l'aluminium et ses alliages.

I.4 Le soudage par fusion :

Le principe de soudage par fusion consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder 1 et 2 à l'aide d'une source calorifique puissante qui peut être : un arc électrique, une flamme de gaz, une réaction chimique, un laitier fondu, l'énergie d'un faisceau électronique, un jet de plasma, l'énergie des rayons laser.

Dans tous ces cas, le métal d'un bord fondu sous l'action de la chaleur établit une liaison intime avec le métal en phase liquide de l'autre bord formant ainsi une certaine quantité de métal à l'état liquide appelée bain de fusion. Par suite de la solidification du métal contenu.

Dans le bain de fusion, nous obtenons un joint soude 4 (appelée encore soudure, cordon de soudure, cordon soude ou cordon tout court)

Le métal constituant le cordon soude ne peut provenir que de la fusion du bord 3 ou du métal d'apport introduit dans le bain de fusion.

La zone contenant des grains métal partiellement fondus à la frontière séparant le bord de la pièce à souder et le cordon est appelée zone liaison C est dans cette zone qu'il y a lieu liaisons, c'est dans cette zone qu'il y a lieu liaison inter atomique.

Ici le métal du cordon se joint fortement au métal des pièces à souder, alors que les salissures arantelles présentes sur ces dernières remontent à la surface sous forme de scories. [2]

Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales [3-1] [4-9] (Fig.1)

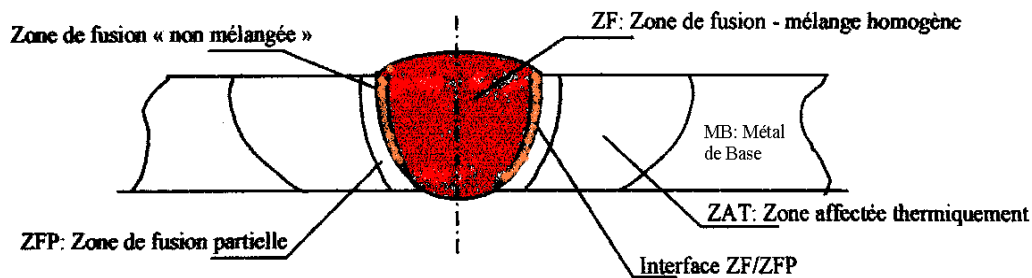


Figure I.1 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion [3], [4] et [5].

I.5 Détails métallurgiques sur les différentes zones d'un assemblage soudé :

I.5.1 Le métal de base (M.B):

Il constitue le métal des pièces à assembler, Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature légèrement différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques. L'importance des transformations est fonction

d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations.

I.5.2 La zone fondue (Z.F):

C'est la région ou l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport, le métal qui constitue la soudure est appelée métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé

I.5.3 La zone thermiquement affectée (Z.A.T) :

C'est la 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.

Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température à été suffisante pour entrainer une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique

Dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas eu transformation allotropique, mais seulement modification, par exemple, de la grosseur de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue:

- ✓ zone de surchauffe.
- ✓ zone austénitique.
- ✓ zone partiellement austénitisée.

I.5.4 Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la effectuée thermiquement (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui a été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage (fig.1)

La zone de fusion (**ZF**) est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés. La zone étroite à l'extrémité du bain de fusion est la zone « non mélangée » : dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base.

Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base. Le bain de fusion est délimité par l'interface de soudure qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée. Directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une zone de fusion partielle (**ZFP**), le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage.

Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle. La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

Finalement la seule partie de la pièce qui ne subit pas de modifications microstructurales est le métal de base non affecté. Le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure.

I.6 Morphologie de la zone de fusion :

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

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé [6].

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé. La (Figure 2) synthétise ces transformations:

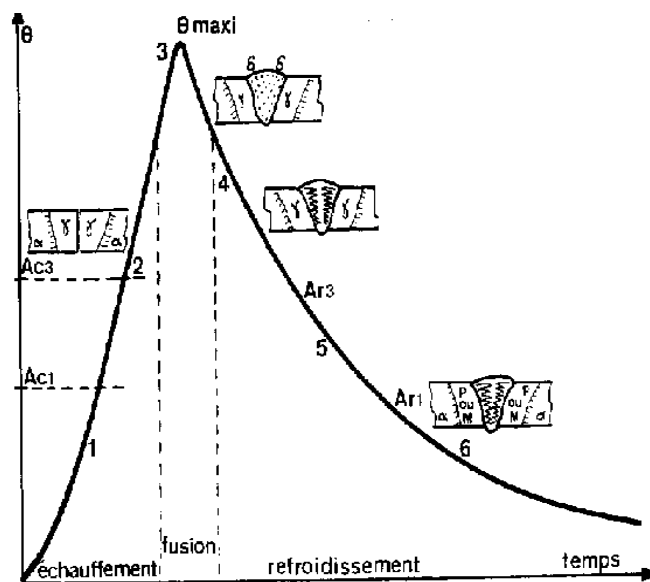


Figure I.2: Cycle thermique en soudage et transformations structurales [7].

1. Dilatation, plastification, Ac_1 : cessation des états hors équilibre.
2. Dilatation, plastification, Ac_3 : austénitisation (maille γ).
3. Dans la zone fondue: fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base,

dissolution de l'hydrogène (maille δ).

4. Solidification, formation des dendrites (maille γ), retrait, contraintes, Ar_3
5. Transformations allotropiques (M ou, M + F + C ou, F + C) diffusion de l'hydrogène, contraintes locales, Ar_1 , avec (M : Martensite, F : Ferrite et C : Cémentite).
6. Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles, dans certains cas, la fissuration à froid et la diffusion de l'hydrogène jusqu'à la température ambiante.

I.7 La soudabilité :

En dehors de contraintes relatives au mode opératoire (capacité à assurer la continuité physique du joint) ou à la conception de l'ensemble soudé (répartition des masses, déformations), on appelle soudabilité l'aptitude d'un métal ou d'un alliage à être assemblé par un procédé de soudage qui assure la continuité métallique du matériau.

La dilution du métal d'apport dans le métal de base et les effets de l'enrobage des électrodes ou du flux de protection, définissent l'importance des zones affectées thermiquement, en conséquence la soudabilité dépendra des choix effectués.

Plusieurs formules ont été proposées pour définir la soudabilité des aciers et apprécier l'effet sur la trempabilité, elles permettent de calculer le carbone équivalent par l'équation :

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Mo}{5} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%V}{10} \dots\dots\dots (I.1)$$

Comme exemple, un acier ayant un taux de carbone équivalent inférieur à 0,5 est généralement considéré comme soudable, pour un taux inférieur à 0,4 la sensibilité aux fissures est faible.

Les aciers faiblement alliés sont aisément soudables, pour les aciers fortement alliés dans la zone de dilution, qui présente une composition différente de celles du métal de base ou du métal d'apport, il peut se produire des trempes excessives, une fragilisation ou

des fissures.

Le choix du métal d'apport est primordial et dans certains cas il conviendra d'effectuer un préchauffage et (ou) un traitement thermique de revenu.

I.8 La classification des procédés de soudage:

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristique telles que:

- le type d'énergie mise en œuvre,
- les paramètres physiques (température ,pression. Milieu extérieur.)
- le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser

Les procédés de soudage peuvent être classés en fonction des énergies mise en œuvre

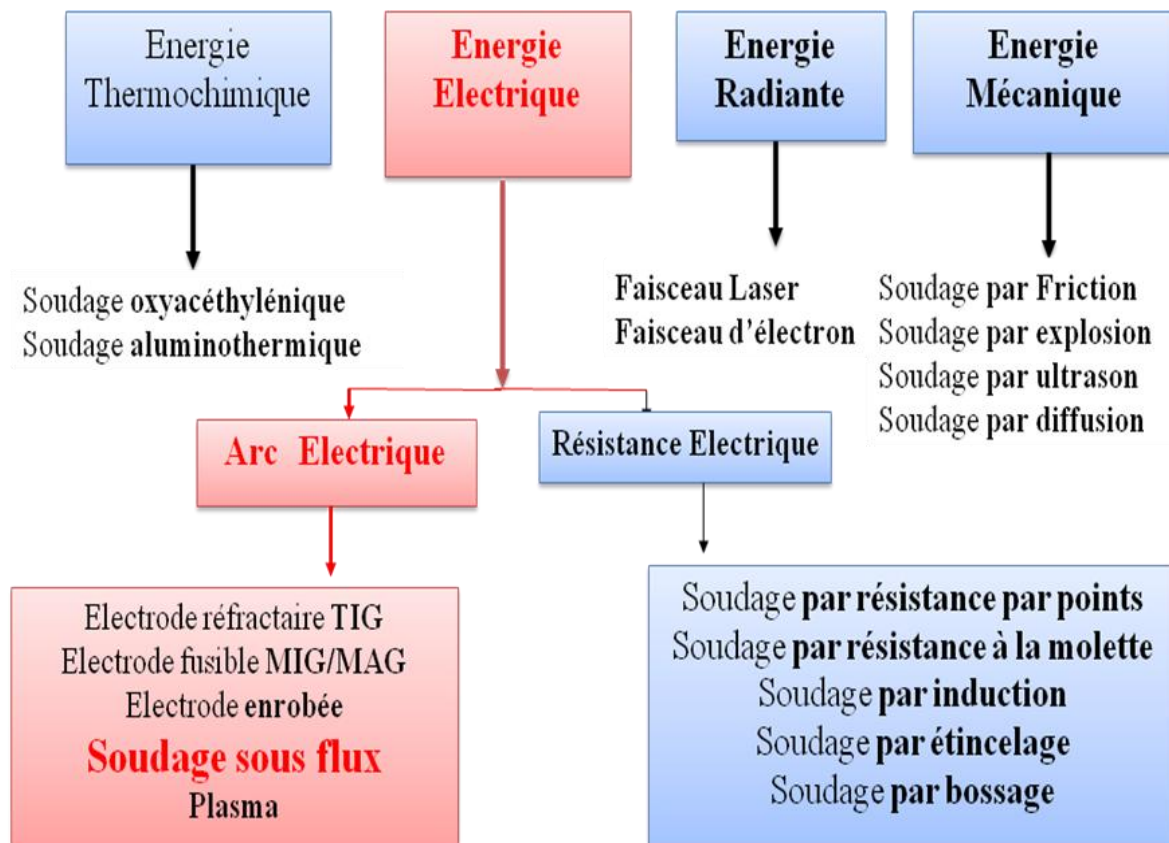


Figure I.3 : Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie [5].

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (Fig.1). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

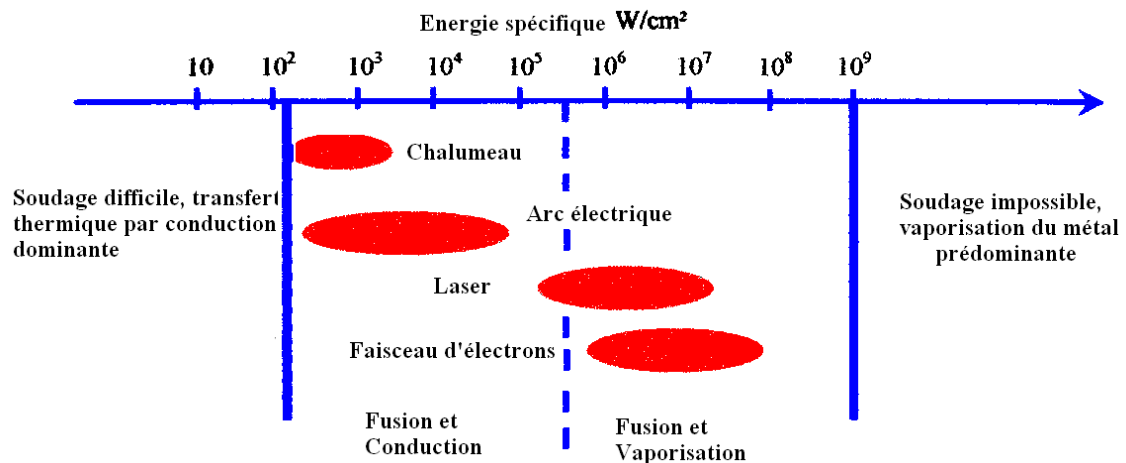


Figure I.4 : Energie spécifique des différents procédés de soudage [5].

I.9 Détails sur les procédés de soudage de l'énergie thermo-chimique:

I.9.1 Soudage oxyacétylénique :

Cela concerne la soudure autogène qui signifie que le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces souder. Et c'est vers la fin du siècle dernier et à la suite des travaux du français **Georges Claude** et de l'allemand **Von Linde** que née l'idée d'utiliser la flamme pour chauffer localement des pièces jusqu'à leur point de fusion dont le principal but est de les assembler. On peut obtenir cette flamme par la combustion d'un gaz combustible dans l'air étant composé de $4/5$ d'Azote qui ne participe pas à la combustion, on a donc cherché à utiliser un autre gaz comme carburant l'oxygène.

La haute température ($3000^\circ C$) de la flamme oxyacétylénique est obtenue par la combustion du mélange d'acétylène et de l'oxygène dans une proportion bien définie.

Le soudage oxyacétylénique est caractérisé par des vitesses d'échauffement et de refroidissement du métal plus faibles en comparaison avec d'autres procédés de soudage telle que le soudage à l'arc électrique ce qui conduit à la formation d'une structure à gros

grains dans le métal adjacent au cordon de soudure, ce qui diminue la résistance du joint soudé et provoque des déformations importantes de la pièce soudée.

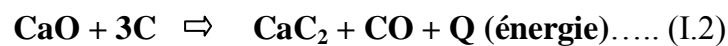
I.9.1.a L'oxygène (O₂)

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

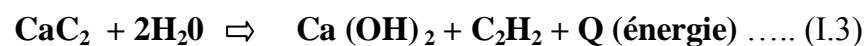
I.9.1.b L'acétylène (C₂H₂)

L'acétylène (C₂H₂) est un hydrocarbure gazeux, incolore avec un pouvoir calorifique de 14000 calorie/m³ et dont l'odeur est désagréable (odeur d'œil). Il est dangereux au point de vue de déflagration il explose en présence d'une décharge électrique ou du feu.

Un mélange d'oxygène et d'acétylène peut exploser à la pression atmosphérique s'il ne contient que très peu d'acétylène. Industriellement l'acétylène utilisé pour le soudage et l'oxycoupage est fabriqué à partir du carbure de calcium (CaC₂), lequel est obtenu à partir d'un mélange de carbone (coke) et de chaux vive à très haute température, la réaction chimique qui s'y produit est la suivante :



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



I.9.2 Soudage Aluminothermique :

Nous utilisons dans ce cas la chaleur dégagée par la réaction suivante :



Il faut amorcer la réaction soit avec de la poudre, soit avec une résistance électrique. Ce procédé est surtout utilisé pour le soudage de rail de chemin de fer

I.10 Détails sur les procédés de soudage de l'énergie Electrique:

Deux familles dans cette branche d'énergie existent :

- ✓ Soudage a l arc électrique
- ✓ Soudage par résistance électrique

I.10.1 Soudage a l'arc électrique:

La source d'énergie est l'arc électrique qui jaillit entre le métal à souder et le métal d'apport qui est électrode. Et dans ce procédé nous pouvons citer

I.10.2 Soudage en atmosphère inerte (T.I.G) :

L'électrode est réfractaire (non fusible) et le bain de fusion est protégé par un gaz inerte, Argon ou autre .Ce procédé se substitue de plus en plus au chalumeau pour le soudage des aciers alliés , de l'Aluminium , du Cuivre et de ses alliages et des alliages de Nickel .

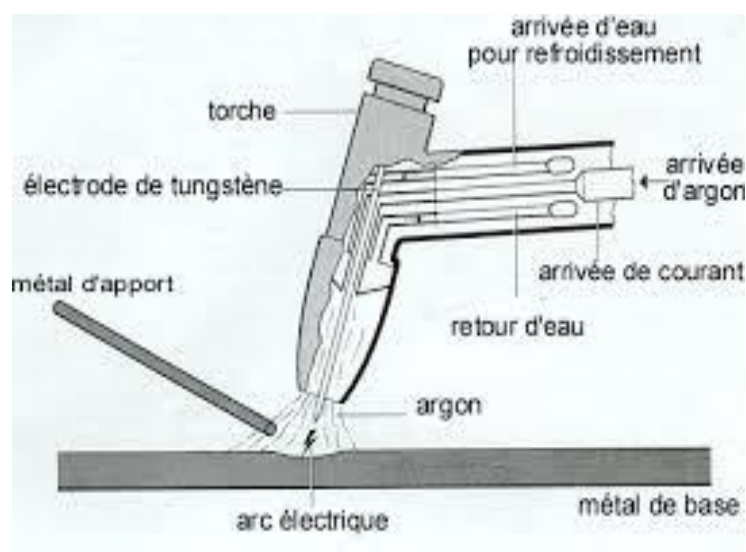


Figure I.5 : schéma de soudage tig

I.10.3 Soudage avec électrode enrobée :

L'enrobage de l'électrode dépose sur le métal en fusion un laitier protecteur, dans ce procédé a fait de très gros progrès depuis une trentaine d'années, grâce surtout aux nouvelles techniques de fabrication des électrodes. La rapidité d'exécutions des soudures est importante et est liée au fait que l'apport de chaleur est très localisé.

I.10.4 Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G et M.A.G) :

Dans ce procédé le métal d'apport est constitué par un fil qui arrive en continu au niveau de l'arc. Le bain de fusion est protégé par un gaz inerte. Nous pouvons souder avec ce procédé pratiquement tous les métaux avec une grande vitesse de soudage.

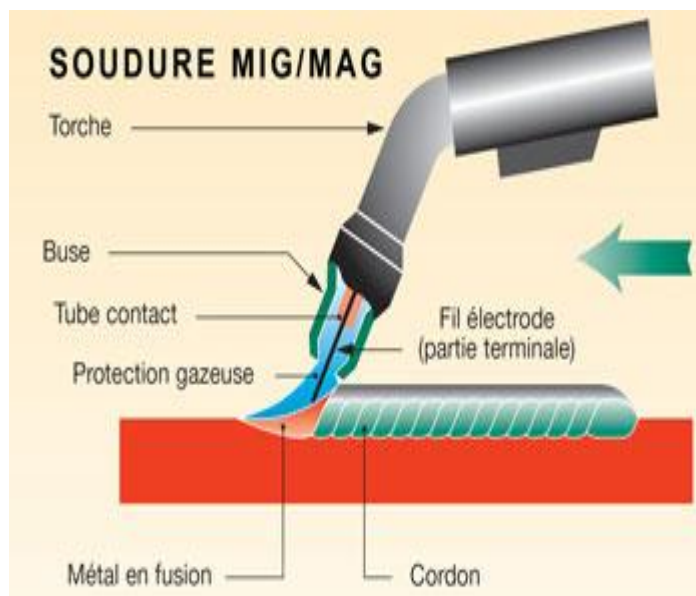


Figure I.6 : schéma de soudage mig/mag

I.10.5 Soudage automatique sous flux solide (arc submergé) :

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint. L'électrode est constituée d'un fil nu dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, sous forme de particules, est déposé à la surface du joint.

L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement, le flux non fondu est récupéré et peut

être réutilisé pour la soudure suivante. Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite généralement des intensités comprises entre (400 et 1000) Ampère.

La machine de soudage (ou les pièces à souder) se déplace, assurant la vitesse de soudage, l'amenée du fil de l'électrode se fait automatiquement.

Dans certains cas nous utilisons deux fils d'électrode alimentés soit par le même générateur (arcs jumèles), soit par des générateurs différents. Il s'en suit, pour une même énergie de soudage un dépôt de métal plus important et une vitesse de soudage plus grande.

Les principaux avantages de ce procédé c'est :

- ✓ une énergie très élevée de soudage qui permet une pénétration importante
- ✓ une vitesse d'exécution supérieure à 2 m /min.
- ✓ Une qualité du cordon déposé qui est de grande qualité et qui ne nécessite pas d'usinage.
- ✓ très bonnes caractéristiques (chimique et mécanique) du joint de souder, le confort d'utilisation pour l'opérateur et l'entourage du fait que l'arc soit caché.
- ✓ Enfin le prix de revient du mètre de soudure est bas, comparativement à d'autres procédés.

Les inconvénients de ce procédé sont :

- ✓ L'importance du bain de fusion
- ✓ Risque de fissuration à chaud, exige un respect du rapport largeur/profondeur u bain noté (1/p) est de valeur (1/p<1.5).
- ✓ Le procédé ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontale (sauf un dispositif particulier), le procédé s'applique pour les aciers exclusivement.
- ✓ Le procédé ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontal (sauf un dispositif particulier), le procédé s'applique pour les aciers exclusivement.
- ✓ Le coût de l'Equipment est assez élevé, d'où la nécessité de travaux en série pour assurer l'amortissement des matériels.

I.10.6 Soudage par résistance électrique :

Le chauffage nécessaire à l'endroit du soudage est assuré par effet de joule : $Q=I^2R \cdot T$

L'intensité de soudage et le temps de passage jouent donc un grand rôle dans ce procédé. Il est utilisé essentiellement pour assembler des pièces par recouvrement. Et dans ce procédé nous distinguons.

I.10.6.a Soudage par points :

L'appareil de soudage sont constitués en principe de deux bras portant chacune une électrode, l'un de ces bras est mobile et vient pincer les pièces à souder

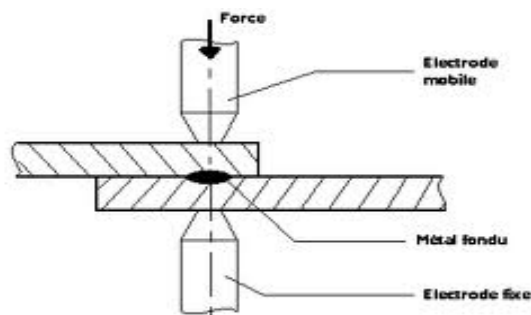


Figure I.7 : schéma de soudage par points

I.10.6.b Soudage à la molette :

Utilise le même principe que le soudage par point, les électrodes se présentant sous forme de disques rotatifs

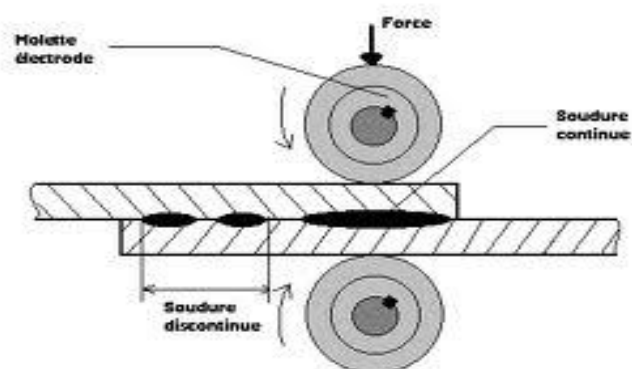


Figure I.8 : schéma de soudage à la molette

I.10.6.c Soudage en bout par étincelage :

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

I.10.7 Soudage par induction :

La source d'énergie est ici le courant électrique induit dans les pièces à souder par l'application d'un champ magnétique intense des hautes fréquences.

I.10.8 Soudage par friction :

Le principe est le suivant : une pièce est fixe, l'autre animée d'un mouvement de rotation et est appliquée contre la première

L'énergie thermique dégagée par le frottement permet d'atteindre la température de forgeage.

I.10.9 Soudage par ultrasons :

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

I.11 Facteurs influençant dans le choix d'un procédé de soudage

Plusieurs facteurs influencent le choix du procédé de soudage notamment:

- ✓ La composition du métal de base.
- ✓ Les dimensions et la forme des pièces (tuyaux .tôles).
- ✓ Les propriétés requises pour l'assemblage.
- ✓ Le coût d'utilisation du procédé.

I.12 Effet des paramètres de soudage [5]

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres puissance et vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement. La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient plus rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques.

I.13 La soudabilité des métaux :

Chaque métal possède une soudabilité spécifique qui détermine la procédure de soudage à utiliser. Cette procédure doit tenir compte des principaux risques de défauts de soudage, du procédé de soudage ainsi que du métal d'apport utilisés.

I.14 Soudabilité de l'acier

L'acier est le matériau le plus utilisé en soudage. En général, nous le considérons assez facile à souder cependant, le soudage de l'acier est susceptible de causer les défauts suivants :

- Soufflures.
- Rigidité de l'assemblage.
- Fissuration à froid en raison de la présence d'hydrogène.
- Fissuration à chaud en raisons de la présence de soufre.

Les principaux facteurs qui influencent la soudabilité de l'acier sont :

- La trempabilité.

- Le carbone équivalent.
- Le préchauffage.
- Les phénomènes de fissuration.

II Paramètres techniques du procédé de soudage à l'arc électrique :

II.1 Introduction : Dans ce chapitre, nous évoquons les paramètres technologiques du soudage à l'arc électrique, les principaux paramètres retrouvés dans la littérature dans ce domaine sont:

1. Le courant de soudure (qui dépend de la nature et du circuit d'installation).
2. La baguette de soudure (dépendant de la nature de l'électrode et sa section et de sa longueur).
3. Le métal de base (qui dépend des propriétés physico-mécanique et de la composition chimique)
4. La forme dimensionnelle du joint réalisée.

II.2 La relation entre intensité du courant I , de la tension du courant U et la longueur de l'arc L :

La tension présente dans l'arc électrique dépend de l'intensité du courant et de la résistance. La résistance, à l'intérieur de l'arc, est essentiellement créée par l'air à travers lequel passe le courant. Ainsi, pour un courant donné, plus l'espace est grand (c'est-à-dire plus la longueur de l'arc est grande), plus la tension sera élevée.

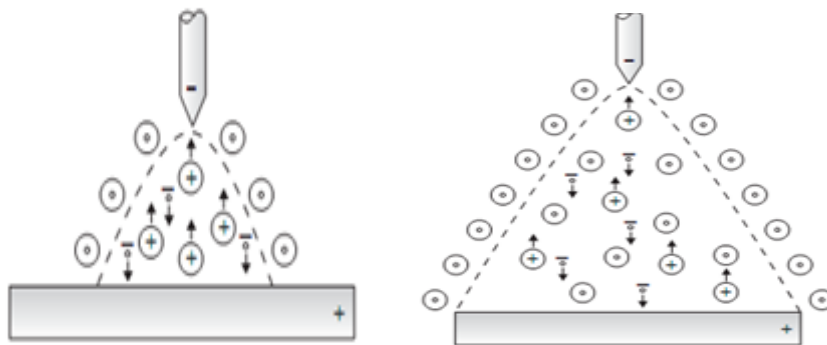


Figure II.1: La relation entre intensité du courant I , de la tension du courant U et la longueur de l'arc L .

La tension dans l'arc de droite est plus élevée, car la résistance est plus élevée et l'équation illustrant la relation entre la tension (U), l'intensité du courant (I) et la résistance (R) est la suivante :

$$U = R \times I \dots (II.1)$$

Avec cette équation, on peut aussi déduire que si la tension est constante, l'intensité du courant diminuera à mesure que la résistance augmentera.

L'énergie de l'arc dépend également de la tension. L'énergie par unité de temps (c'est-à-dire la puissance) est égale à la tension multipliée par l'intensité du courant :

$$P = U \times I \dots (II.2)$$

La chaleur atteinte dans l'arc dépend donc de ces deux paramètres. Plus l'intensité du courant et la tension seront élevés, plus la chaleur libérée sera grande.

II.2.1 Puissance d'arc:

Cette fonction empêche l'électrode de coller à la pièce pendant le soudage, elle augmente le courant durant le soudage lorsque l'arc devient trop court.

Cette caractéristique permet d'avoir un arc très régulier et d'affiner les réglages pour les travaux en position et d'utiliser une plus grande variété d'électrodes (rutile, basique, cellulosique).

La puissance d'arc peut être réglée par un bouton de commande. Au minimum, il en résulte un arc doux et sans projections et au maximum, l'arc électrique sera plus dur et plus pénétrant

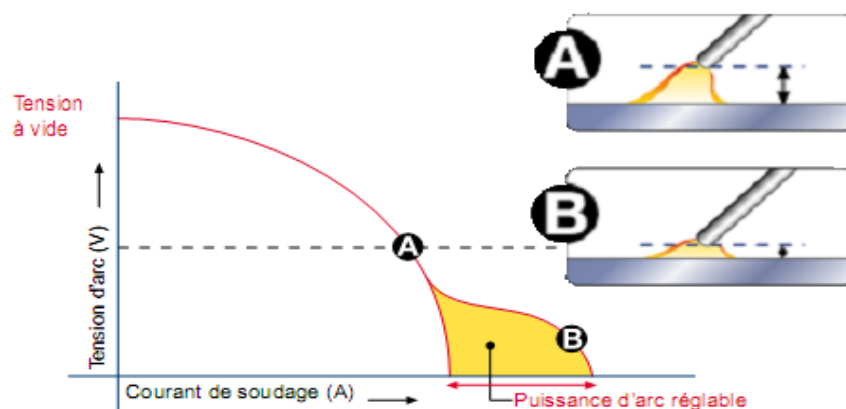


Figure II.2: Puissance de l'arc en fonction de courant de soudage

II.2.2 Caractéristiques des soudeuses à l'arc:

La majorité des soudeuses à l'arc appartiennent à l'une ou l'autre des catégories suivantes :

- ✓ Les soudeuses à courant constant (CC),
- ✓ Les soudeuses à voltage (tension ou potentiel) constant (VC).

II.2.3 Soudeuses à courant constant :

Cette première catégorie de soudeuses produit un courant constant ainsi, la variation de la longueur de l'arc influe peu sur l'intensité du courant et par conséquent celle-ci fournit une chaleur (énergie) constante.

Les procédés de soudage manuels tels que **SMAW** ou **GTAW** bénéficient du courant constant.

En général, il existe une petite variation du courant lorsque la longueur de l'arc est modifiée, ce qui permet aux soudeurs de pouvoir réagir de manière efficace (figure II.3). Cette caractéristique est utile lorsqu'on travaille avec le procédé SMAW, car cela permet à l'électrode de ne pas coller sur la plaque : si l'électrode s'approche trop de la plaque, le courant augmente un peu, de même, si l'électrode s'éloigne, le courant diminue et cela évite un surplus de projections

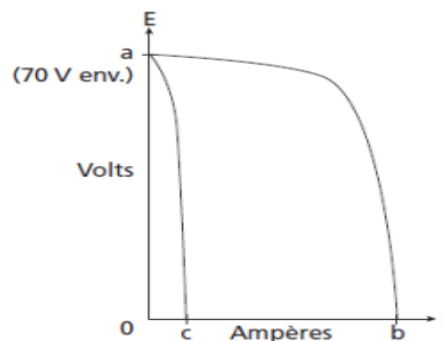
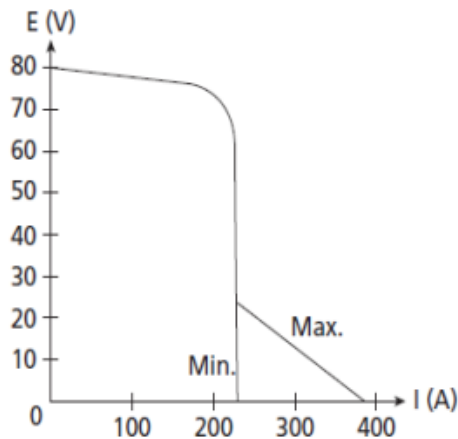


Figure II.3: Courbes caractéristiques minimales et maximales des soudeuses à courant constant (courbes tombantes).

Le point a représente la tension à vide, les points b et c représentent l'intensité du courant de court circuit, soit lorsque l'électrode touche la pièce.

La courbe (a-b) est obtenue en réglant l'intensité de la soudeuse au maximum tandis que la courbe (a-c) résulte d'un réglage à l'intensité minimale.

Les nouvelles soudeuses à commande électronique, par contre, produisent un courant parfaitement constant en tout temps (figure II.4). Cela permet le soudage de tôles de petites épaisseur appelés aussi tôles minces, notamment avec le procédé **GTAW**, en évitant le défoncement des tôles et la fonte de l'électrode de tungstène. Ces machines possèdent un contrôle (contrôle d'arc ou *arc control*) permettant de conserver le courant parfaitement constant ou légèrement variable selon le procédé utilisé.



FigureII.4: Courbe tension-intensité avec contrôle d'arc

Avec le procédé **GTAW**, si la source utilisée possède une commande de contrôle d'arc, nous devons la placer à la position la plus faible pour obtenir un courant aussi constant que possible.

Cette catégorie de soudeuses peut être à courant continu ou alternatif. Le principal avantage des soudeuses à courant alternatif est qu'elles ne provoquent pas de soufflage de l'arc.

Ce ne sont pas tous les procédés, voire même toutes les électrodes, qui sont compatibles avec le courant alternatif. Celui-ci est presque toujours utilisé pour le soudage de métaux légers, comme l'aluminium ou le magnésium avec le procédé **GTAW**.

Remarque importante: Il faut noter que l'arc créé par les soudeuses à courant continu est très stable.

II.2.4 Soudeuses à potentiel constant:

Les soudeuses à potentiel constant produisent une tension constante, cependant, l'intensité du courant varie (figure II.5). Cette variation de courant fait fondre le fil-électrode plus ou moins rapidement, pour assurer que la longueur de l'arc reste constante. Cette seconde catégorie de soudeuses s'utilise généralement avec des procédés de soudage semi-automatiques tels que le **GMAW**, le **FCAW** ou le **MCAW**.

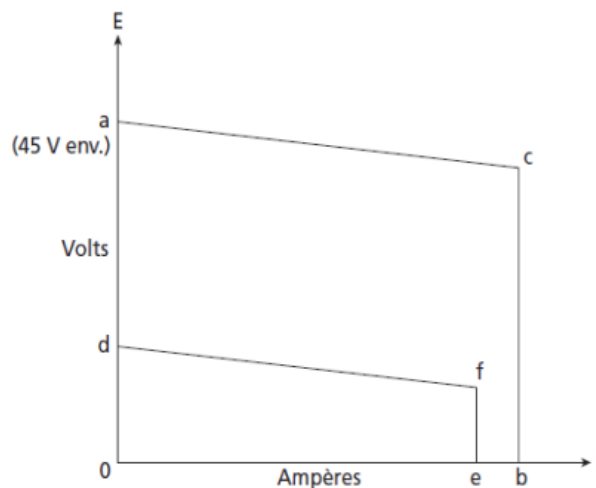


Figure II.5: Courbes caractéristiques minimale et maximale des soudeuses à potentiel constant (courbes horizontales).

La tension à vide maximale correspond au point a. nous remarquons que l'intensité du court-circuit est presque la même celle du courant à tension maximale point (b et c). Le même phénomène est illustré lorsque la tension est réglée au minimum courbe (d-f et e)

Certaines soudeuses peuvent être à courant constant et à potentiel constant, nous sélectionnons alors le mode de fonctionnement désiré.

II.2.5 Types de courant :

En soudage, on peut utiliser un courant continu ou alternatif. Le courant continu est le plus répandu, car il assure une alimentation de courant constante, donc la stabilité de

l'arc. Cela n'est pas le cas du courant alternatif, en effet, celui-ci possède un cycle durant lequel l'intensité du courant atteint la valeur de 0.

Lorsqu'une pièce est prête à être soudée, elle fait partie d'un circuit électrique incluant l'électrode. C'est ce circuit, comportant une borne négative et une borne positive, qui permet la création de l'arc électrique.

Avec le soudage en courant continu, lorsque la pièce est branchée au pôle positif et que le câble de l'électrode est branché au pôle négatif, on parle de polarité normale (**CCPN**) ou encore de courant continu à électrode négative (**CCEN**).

À l'inverse, si le câble de l'électrode est relié au pôle positif et la pièce à souder au pôle négatif, on parle de polarité inversée (**CCPI**) ou encore de courant continu à électrode positive (**CCEP**) (figure II.6).

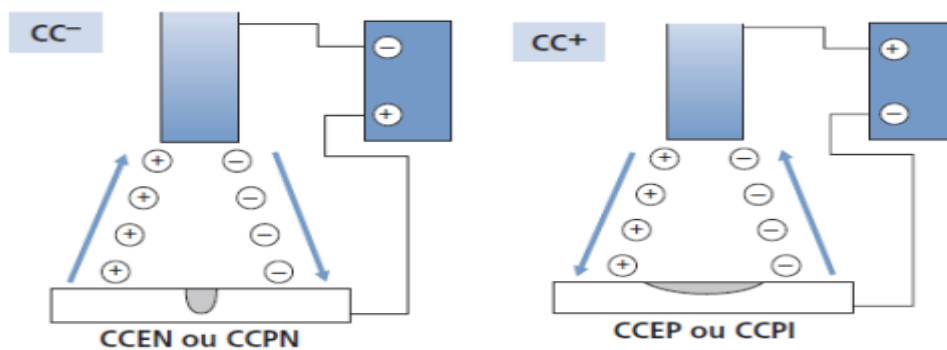


Figure II.6: Courant continu avec polarité normale et avec polarité inversée.

Lorsqu'on travaille avec du courant alternatif, le courant oscille et passe de positif à négatif dans la pièce à souder et dans l'électrode (figure II.7). La chaleur est distribuée également entre les deux pôles, donc, la pièce reçoit 50 % de la chaleur.

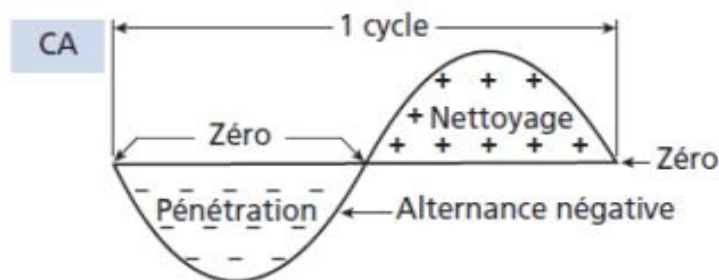


Figure II.7: Fréquence normale du courant alternatif.

Durant l'alternance négative, la chaleur est beaucoup plus concentrée dans le bain de fusion, ce qui a pour effet d'augmenter la pénétration durant l'alternance positive, il y'a un effet de nettoyage du bain de fusion.

Si le courant utilisé est continu, la chaleur ne se distribue pas également. En effet, elle se concentre surtout du côté de la borne positive (70 %), tandis que la borne négative ne reçoit que 30 % de la chaleur. C'est une particularité importante lorsqu'on travaille avec du courant continu, car la fabrication du circuit (avec polarité normale ou inversée) affecte la chaleur que reçoit la pièce, donc la qualité de la soudure comme de tableau I suivant.

	Courant alternatif (CA)	Courant Continu (CC)	
		Polarité Normale	Polarité inversée
Chaleur sur la pièce (%)	50	70	30
Chaleur de l'électrode (%)	50	30	70

Tableau II.1 : Chaleur d des électro la pièce et de l'électrode

II.3.1 La section de l'électrode enrobée (métal d'apport) :

Dans le procédé de soudage à l'arc électrique (SMAW) nous avons plusieurs section d'électrode enrobée alors que la section d'électrode varie par rapport l'épaisseur de plaque soudée comme présentée dans le tableau II suivant:

Epaisseur à souder en mm	Ø de l'électrode conseillé	Intensité moyenne du courant de soudage
(1,0 à 1,5) mm	1,6 mm	30 A
(1,5 à 2,0) mm	2,0 mm	55 A
(2,0 à 3,0) mm	2,5 mm	70 A
(3,0 à 5,0) mm	3,2 mm	110 A
(4,0 à 10,0) mm	4,0 mm	150 A

Tableau II.2 : Choix de diamètre des électrodes

La règle générale pour calculer l'intensité du courant de poste soudure par rapport au diamètre de l'électrode est :

$$I = (\varnothing - 1) \times 50 \dots \text{(II.3)}$$

II.3.2 Nature d'électrode enrobée de soudage d'arc :

L'électrode fond simultanément avec le métal de base et forme le cordon de soudure qui est recouvert d'un laitier protecteur plus léger que le métal.

Le laitier remonte à la surface et forme une couche qui retarde la solidification du métal et le protège contre l'oxydation de l'air et un refroidissement trop rapide.

La composition de l'enrobage varie en fonction des caractéristiques opératoires et des propriétés mécaniques souhaitées.

Type A (Acide): Oxydes de Fer, de Ferro Manganèse, Silicate...

Type O (Oxydant): Oxyde de Fer, Silicate de Fer, manganèse, Ferro-alliages...

Type B (Basique): Carbonate de Calcium, spath-Fluor, Ferro-alliages.

Type C (Cellulosique): matières organiques et Cellulose.

Type R (Rutile): Oxyde de Titane (95%) ou mélange d'Oxyde de Titane (50%) et d'Oxyde de Fer (50%).

Les enrobages les plus utilisés actuellement sont de type basique et rutile.

II.3.3 Role de l'enrobage de l'électrode : L'enrobage de l'électrode remplit différents rôles :

II.3.3.a Rôle électrique :

L'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air

II.3.3.b Rôle physique :

L'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique.

Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité, il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.

II.3.3.c Rôle mécanique : l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage

II.3.3.d Rôle métallurgique :

- ✓ Il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse.
- ✓ Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure.
- ✓ Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (Acide, Basique, Cellulosique ou Rutile : Oxyde de Titane TiO_2)

II.4 Le chanfrein de soudage :

La force de soudage calculée engendrée par rapport de surface de contact entre les deux plaques et le cordon de soudure

II.4.1 Règles générales de préparation des chanfreines du soudage :

Dans un contexte de pièces mécaniques soudées à l'aide des procédés de soudage à l'arc, la préparation des chanfreins en vue du soudage se doit d'être étudiée en considérant divers critères parmi les plus importants lesquels figurent :

- ✓ l'accessibilité ou non de chacune des faces,
- ✓ l'épaisseur à souder,

- ✓ le procédé de soudage,
- ✓ l'orientation du fibrage dans chacun des éléments,
- ✓ les dimensions de chaque élément,
- ✓ la position du plan de joint lors de l'assemblage (pièces volumineuses non positionnables).

Quelques règles fondamentales sont à respecter en matière de préparation des chanfreines, elles s'appuient sur les notions suivantes :

- ✓ Symétrie d'écoulement thermique à la racine du joint, afin d'éviter la création de défauts de compacité en cet endroit lors de la réalisation de la première passe (impératif en soudage sur aluminium et alliages en raison de la forte diffusivité thermique de ces matériaux) d'où symétrie de préparation par rapport au plan de joint lorsque la position de ce dernier le permet.

- ✓ Equilibrage des déformations angulaires dues au retrait, par chanfreinage à double ouverture (X ou K).

- ✓ Limitation de la section de métal à déposer en respectant toutefois une accessibilité convenable de la racine pour les premières passes de soudage.

II.4.2 Types de chanfreine utilisée en soudure :

Pour utiliser l'opération de soudage entre deux plaques soudées, nous préparons le joint de soudure et qualifier les chanfreines utilisés,

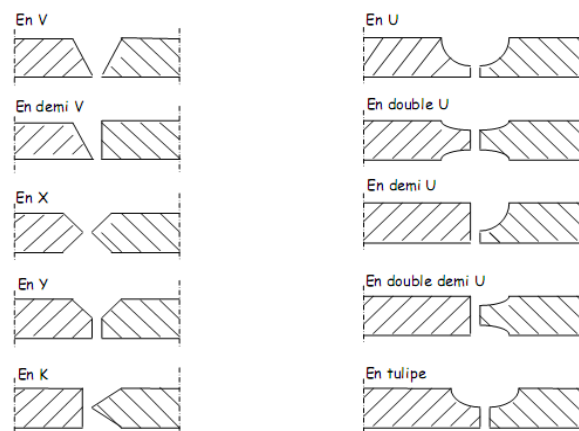


Figure II.8 : quelque exemple sur les chanfreins utilisés en soudage.

II.5 Schéma de principe

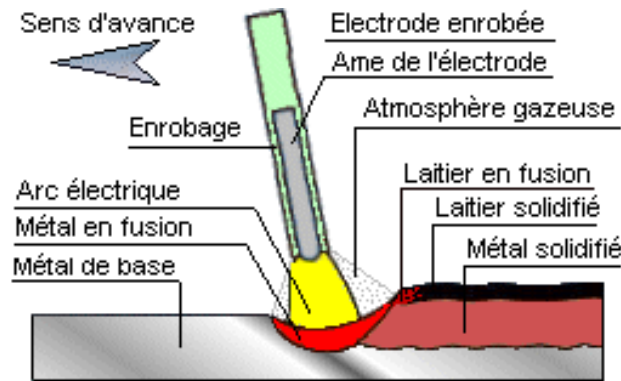


Figure II.9 : Schéma de principe du soudage à l'arc manuel.

II.5.1 Définition du procédé : Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. Après refroidissement le cordon de soudure est recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler

II.5.2 Principe du procédé : L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode reliée sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage.

Méthodes d'amorçage de l'arc :

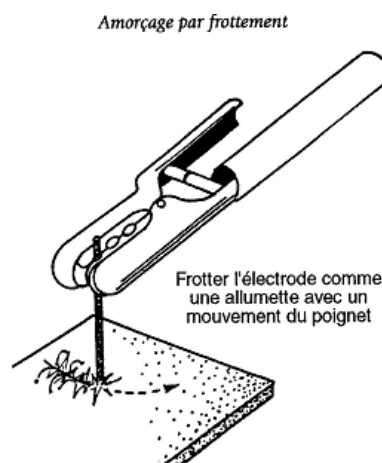


Figure II.10 : Schéma de principe de l'amorçage du soudage à l'arc manuel.

L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder. (Voir schémas).

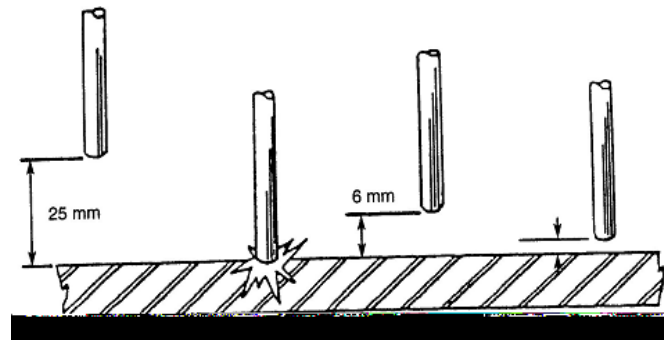


Figure II.11: Schéma du choix de distance du soudage à l'arc manuel.

II.5.3 Position de soudage

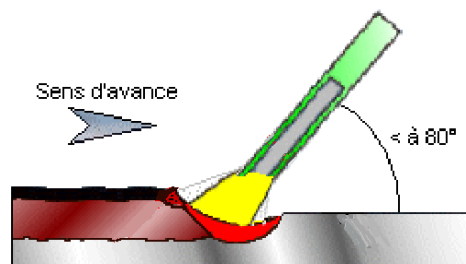


Figure II.12: Schéma de principe optimal du soudage à l'arc manuel.

II.6 Définition de l'électrode enrobée L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

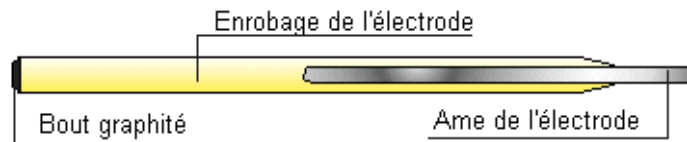
L'âme : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.

L'enrobage : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur

le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.

L'enrobage a un **rôle** :

- **Rôle électrique**, assure la stabilité et la continuité de l'arc.
- **Rôle métallurgique**, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe.
- **Rôle chimique**, protège le métal contre l'action de l'air ambiant et refroidissement du cordon par formation d'un laitier.



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

Calcul de l'intensité de soudage : $I = 50 (D - 1)$

II.6.1 Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées

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

1. du diamètre de l'électrode (voir tableau ci-dessus)
2. de la nature de l'âme de l'électrode
3. de la nuance des pièces à assembler
4. de la position de soudage
5. du type d'assemblage rencontré
6. de l'épaisseur des pièces à souder

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat

Epaisseur	Ø 1,6 mm	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
3 mm		60 A	70 A	90 A		
4 mm			80 A	100 A	120 A	
5 mm			90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm			90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm			90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm				130 A	160 A	190 A

Tableau II.3 : Intensité moyenne de soudage pour la position à plat

II.6.2 Choix d'une électrode enrobée :

- ✓ La nature et l'épaisseur des pièces à souder,
- ✓ La nature et les possibilités du courant de soudage,
- ✓ La résistance requise du cordon de soudure,
- ✓ Du profil du cordon,
- ✓ De la position de la soudure,
- ✓ Des facilités d'emploi,
- ✓ De la vitesse d'exécution,
- ✓ De l'importance du dépôt,
- ✓ Du jeu entre les pièces.

Tableau II.4: préparations de joints

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

II.7 Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée

Tableau des défauts rencontrés		
Défauts rencontrés	Origines probables	Solution à adopter
Cordon trop bombé ou cordon trop creux	Vitesse de soudage inadaptée et intensité mal réglée	Vérifier vos valeurs de soudage et faites varier les deux paramètres lors du soudage
Manque de pénétration	Diamètre de l'électrode trop grosse en première passe. Préparation des chanfreins inadaptée. Jeu d'écartement entre les deux pièces trop faible ou non constant. Entraînement du soudeur insuffisant.	Vérifier vos valeurs de soudage et faites varier les deux paramètres lors du soudage.
Projections sur les bords des pièces	Intensité trop forte. Mauvais raccordement du connecteur de pièce. Électrodes non étuvées	Adapter l'intensité du courant au diamètre de l'électrode. Étuver les électrodes basiques dans un four à

		300° C pendant au moins 1 heure. Étuver les électrodes rutilés dans un four à 100° C pendant au moins 1 heure
Rougisement important de l'électrode	Intensité trop élevée. Arc trop long lors du soudage.	Adapter l'intensité du courant au diamètre de l'électrode. Réduire la distance électrode/pièce lors du soudage

Tableau II.5 Les défauts rencontrés lors du soudage à l'arc avec électrode enrobée.

III Etude Numérique du soudage à l'arc électrique sous flux solide :

III.1 Introduction

Dans le domaine du soudage électrique à l'Arc la simulation propose une solution de raccourci aux expérimentations et tests de soudage, elle offre une prédiction des phénomènes physiques, avec prise en compte des paramètres de soudage pour aboutir à des résultats plus proches de la physique, et donc du cas industriel.

Pour être performante et fiable, la simulation numérique doit en effet intégrer les comportements thermiques, métallurgiques et mécaniques du métal, de même quelques certains aspects chimiques des procédés de soudage [21]

Plusieurs travaux de recherche traitent ce sujet en visant l'objectif de la réduction du coût, de la fiabilité et du bon rendement au cours de la production. Plusieurs travaux de recherche traitent ce sujet en visant l'objectif de la réduction du coût, de la fiabilité et du bon rendement au cours de la production. [22-23]

L'objectif de cette étude est de prédire les caractéristiques finales (taille des zones affectées thermiquement ZAT et des zones de fusion ZF) de la soudure à l'aide de la simulation numérique, et de proposer un nouveau modèle de comportement.

La validité de ce modèle est étudiée selon deux critères, l'adéquation avec le comportement observé expérimentalement des soudures, et la facilité de la détermination de leurs paramètres, de manière à proposer des améliorations ou de nouveaux modèles.

L'originalité de ce travail est de modéliser l'environnement du procédé (conditions de soudage). Dans le but est d'optimiser l'environnement afin de minimiser les contraintes résiduelles pratiquement existantes.

III.2 Travaux antérieurs dans le domaine de la simulation numérique du soudage à l'arc électrique sous flux :

III.2.1 Analyse Inverse Thermique: [19]

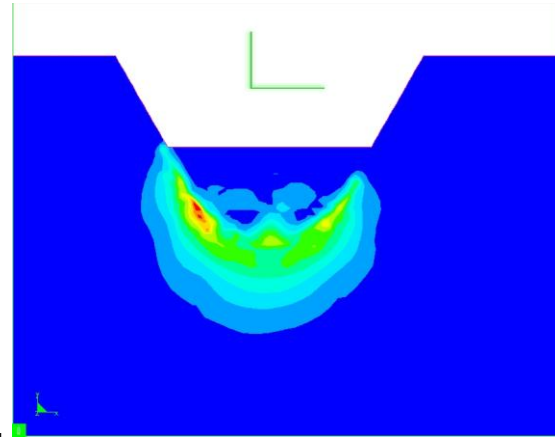


Figure III.1: Prédiction du risque de fissuration en un soudage multipasse

L'expérience de Sébastien Rouquette dans la programmation de problèmes inverses en thermique développée au cours de son activité de recherche lui permet d'envisager de poursuivre le développement de ces techniques.

Son travail est orienté vers l'identification de la source de chaleur associé au procédé (l'énergie dissipée par l'arc électrique comme une source de chaleur volumique dans le métal de base, recherche un flux de chaleur à l'interface liquide/solide) ainsi que la détermination de la géométrie du bain de fusion.

L'une des originalités de ce travail est de modéliser l'environnement du procédé (conditions de soudage). Le but est de pouvoir optimiser l'environnement afin de minimiser les contraintes résiduelles pratiquement existantes.

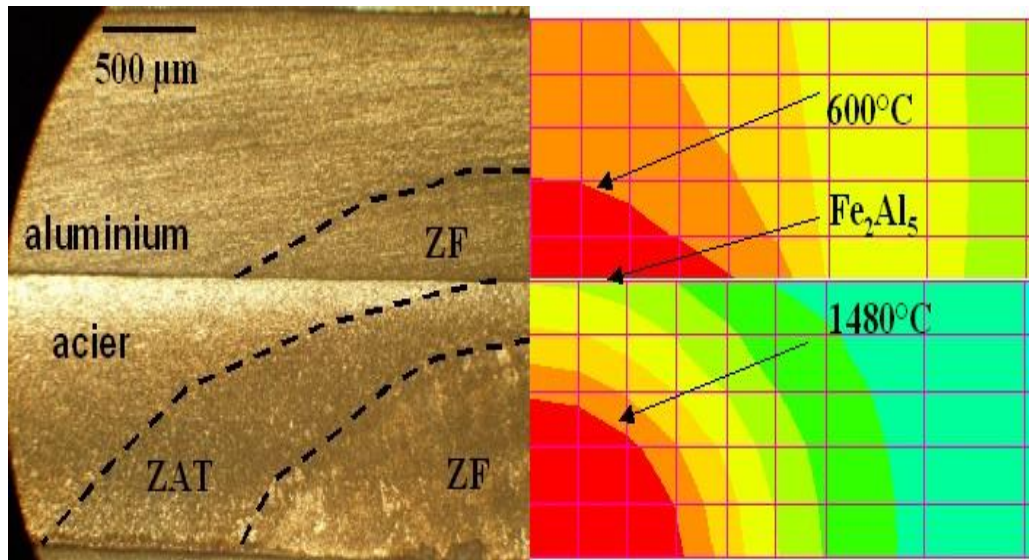


Figure III.2: Prédiction du risque de fissuration en un soudage multipasse

III.2.2 Applications: *Réparation et soudage multipasse*:

Ce travail s'inscrit dans la compréhension de l'opération de réparation d'outil de formage. Cette étude a été menée en collaboration avec le CROMEP de l'école des Mines d'Albi et a été initiée lors de la thèse **d'Arnaud Duchosal** (12/06/2006).

Le but de l'étude était de réparer des outils en acier réfractaire moulé à l'aide du soudage multipasse. Dans cette étude, la simulation a permis d'appréhender l'influence des paramètres procédés: vitesse de soudage, préchauffage, ordonnancement des passes...La difficulté de modéliser les nombreux apports de matière a été surmontée à l'aide d'un modèle permettant de s'adapter à n'importe quel type de configuration de cordons.

Dans ce travail, une étude multi-échelles a été développée afin d'étudier le risque de fissuration de ce matériau. La microstructure du matériau étant grossière et fortement hétérogène, il convient d'effectuer une étude locale de la fissuration de ce matériau, afin d'appréhender l'interaction des différents composants de la microstructure. Afin d'apprécier le rôle des paramètres de soudage sur certaines zones critiques identifiées à l'aide d'un critère macroscopique, des simulations à deux niveaux macro - micro sans couplage ont permis d'analyser la sollicitation des phases fragiles de la microstructure.

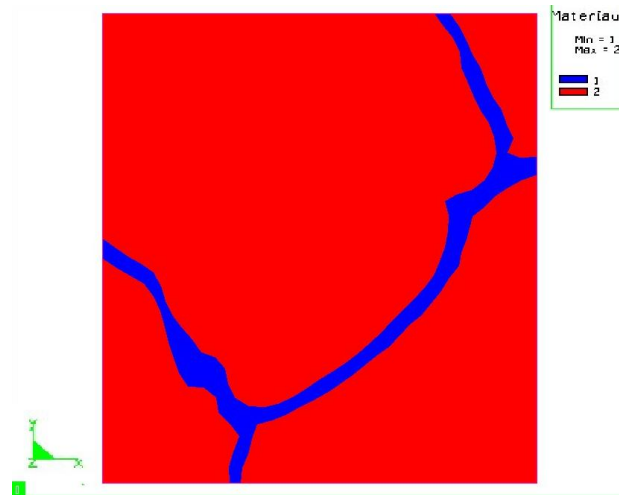


Figure III.3: Modélisation de la microstructure de l'acier réfractaire moulé

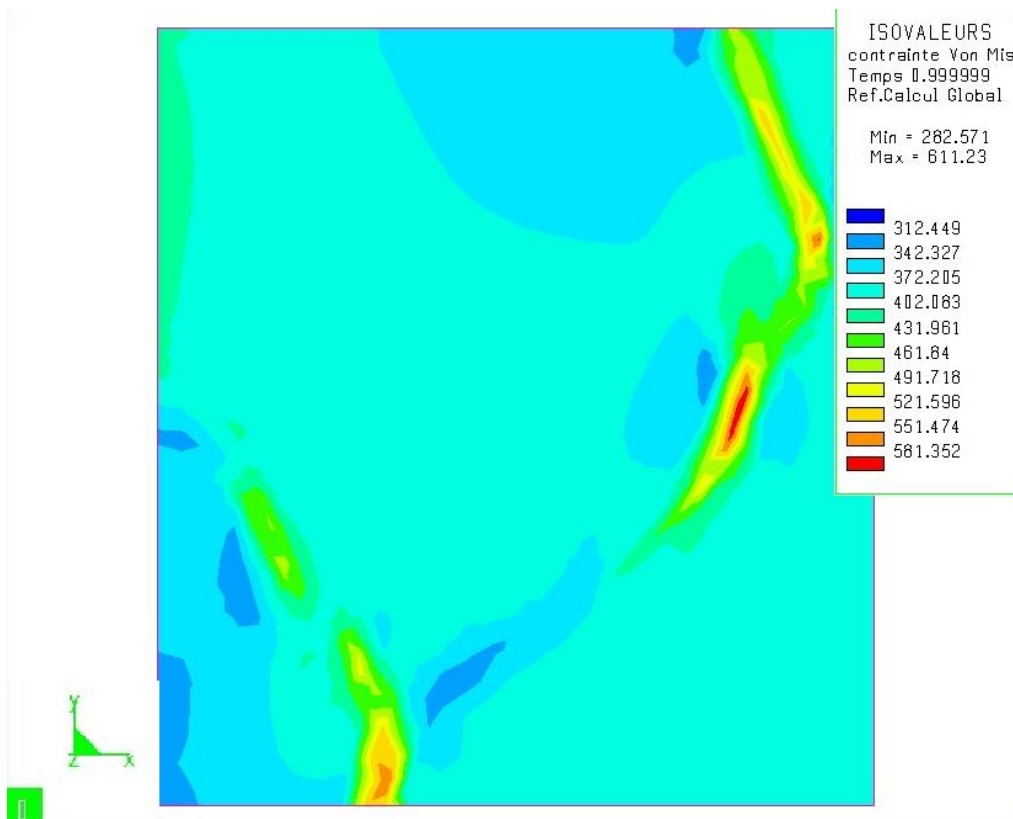


Figure III.4: Prédiction du risque de fissuration dans la microstructure

III.3 Soudage hétérogène Acier Aluminium:

L'étude des assemblages hétérogènes acier - aluminium intervient dans le cadre de l'allégement des structures en combinant les propriétés de légèreté et de résistance de l'acier et de l'aluminium. Ce travail a été initié par une collaboration entre le CEA, le

LALP et le LMGC et s'est développé sous la dynamique de **G. Sierra** (thèse 12/12/2006). L'apport de la simulation numérique doit permettre l'optimisation des conditions opératoires pour la création d'une liaison entre l'acier solide et l'alliage d'aluminium liquide. La résolution du problème est complexe puisqu'elle fait intervenir diverses interactions entre les solides (ici tôles) à assembler.

On notera une interaction de type contact entre les tôles, une interaction de type contact thermique et une interaction chimique entre l'aluminium liquide et l'acier solide. L'étude numérique permet de prédire la morphologie des couches de réaction et l'optimisation des conditions opératoires pour obtenir de la morphologie des couches de réaction entre l'aluminium et l'acier

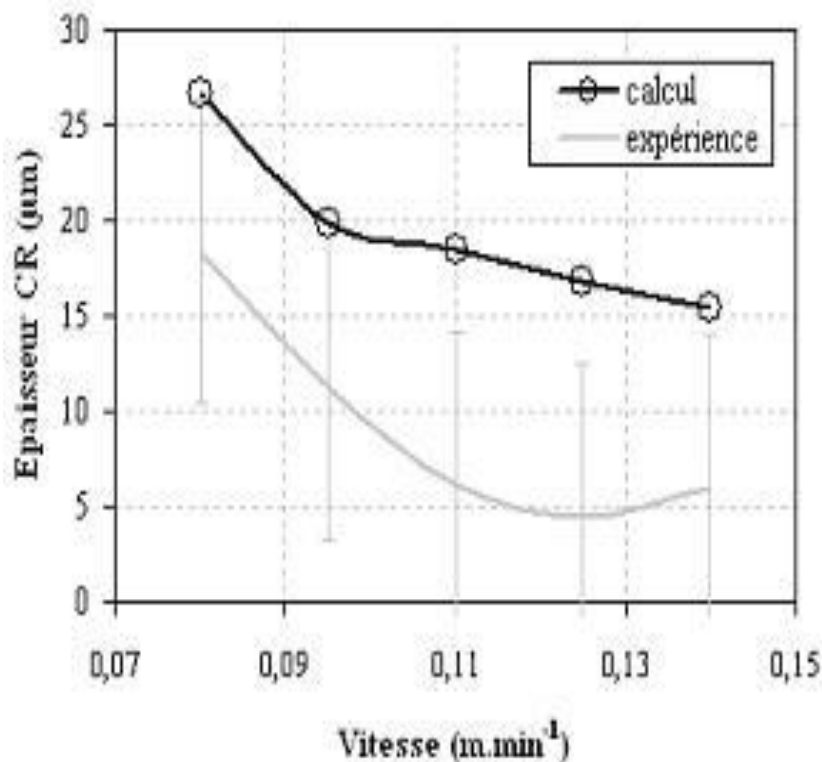


Figure III.5: Prédiction de l'épaisseur de la couche de réaction entre l'acier et l'aluminium.

III.4 Dans le domaine de la modélisation pour prédire la micro ségrégation et la résistance à la corrosion par piqûres de soudures en aciers inoxydables austénitiques : [20].

L'étude [20] est centrée sur la capacité des modèles mathématiques de prédire la micro ségrégation et la résistance à la corrosion par piqûres du métal fondu de soudures en aciers inoxydables austénitiques. L'auteur insiste plus particulièrement sur la modélisation de l'effet de **la vitesse de soudage** sur la redistribution des solutés et sur la prédiction de la résistance à la corrosion par piqûres des soudures.

Les calculs ont été vérifiés expérimentalement en utilisant les procédés de soudage TIG et laser sans métal d'apport, à des vitesses de soudage comprises entre 0,1 et 5 m/min, appliqués à plusieurs nuances d'aciers inoxydables.

Des modèles analytiques et assistés par ordinateur ont été appliqués et associés pour modéliser le comportement des soudures lors de la solidification. La modélisation macroscopique du bain de fusion a été utilisée en premier pour mettre en évidence l'effet des paramètres de soudage sur la forme du bain de fusion et les paramètres de solidification qui en résultent.

Les modèles microscopiques ont ensuite été utilisés pour étudier l'effet de la vitesse de soudage sur le phénomène de micro ségrégation et sur la résistance à la corrosion par piqûres.

Ces recherches montrent que le modèle macroscopique peut être utilisé pour prédire des paramètres de solidification qui concordent bien avec les valeurs mesurées expérimentalement. La modélisation macroscopique et microscopique associée a également permis de prédire avec précision les profils de ségrégation et les températures critiques de piqûration (TCP) obtenues expérimentalement.

Les macro- et micro-simulations ont montré clairement le rôle majeur de la composition de la soudure et de la vitesse de soudage dans la détermination de la ségrégation et de la résistance à la corrosion par piqûres, alors que l'effet des variations de la forme de la soudure restait négligeable.

Les modèles de la pointe microscopique des dendrites et les modèles interdendritiques ont été appliqués à des soudures, démontrant ainsi une bonne concordance avec les profils de ségrégation mesurés. Les simulations ont prédit que l'hétérogénéité de

la soudure pouvait être fortement réduite lorsque la vitesse de soudage augmente, renforçant ainsi la résistance à la corrosion par piqûres des soudures.

Les paramètres de solidification utilisés pour la modélisation ont été vérifiés par des mesures de la vitesse de refroidissement et des espaces inter dendritiques, ainsi que par des calculs analytiques.

Les recherches expérimentales effectuées à la microsonde, au microscope électronique balayage (simple ou à balayage-transmission équipé d'un canon à émission de champ), les examens microstructuraux et les essais de corrosion par piqûres ont été utilisés pour évaluer la micro ségrégation calculée et les températures critiques de piqûration et ont mis en évidence une assez bonne compatibilité avec les résultats de la modélisation.

Cette étude a montré que le soudage rapide permettait d'obtenir une meilleure résistance à la corrosion localisée que le soudage à vitesses moins élevées. L'effet positif de la vitesse de soudage a été confirmé par la modélisation numérique. Sur la base de ces découvertes, un diagramme de corrosion par piqûres comportant la vitesse de solidification comme paramètre d'entrée a été proposé.

III.5 Dans le domaine de la prédiction des contraintes et des déformations dans les joints soudés :

Depuis l'année 2005, EC2-MS développe des compétences ainsi qu'une expertise dans le domaine de la Simulation Numérique du Soudage (SNS). La SNS vise à prédire les contraintes et déformations dans les joints soudés.

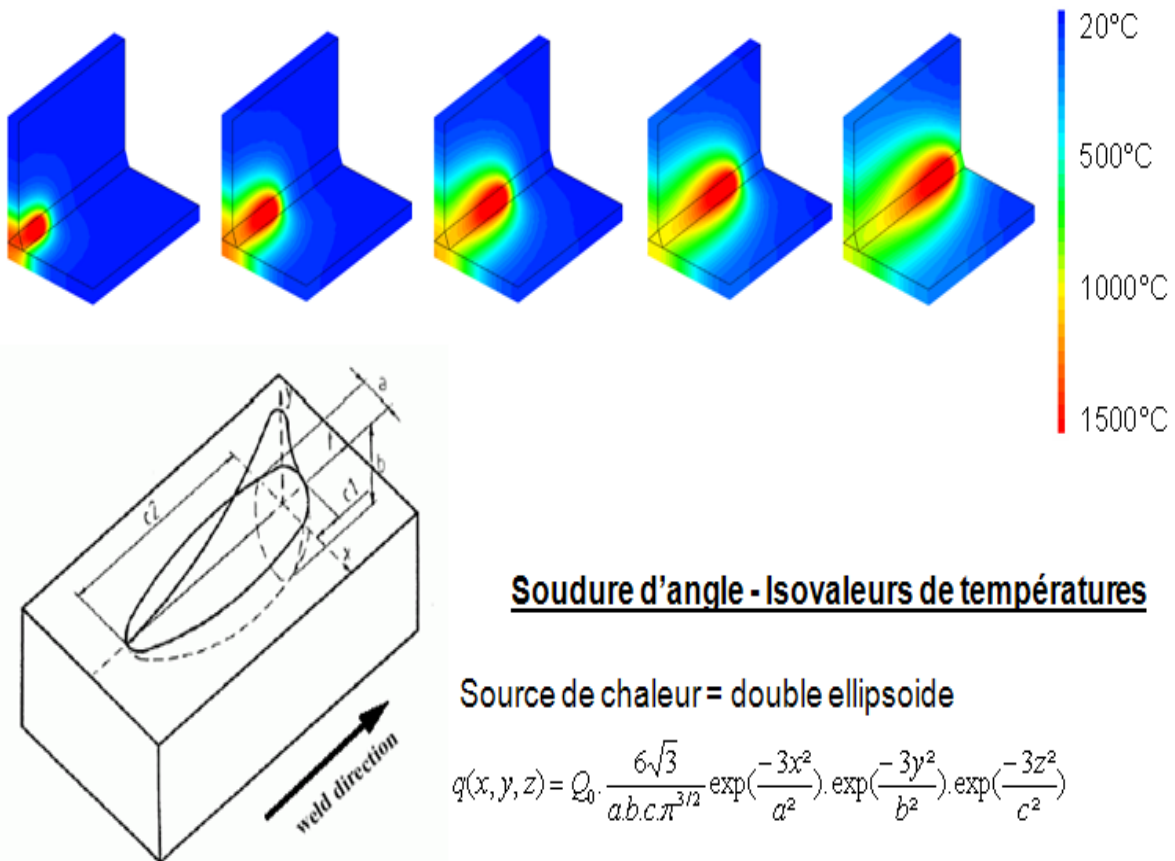


Figure III.6: la prédiction des contraintes et des déformations dans les joints soudés :

III.6 Contraintes et distorsions dans les assemblages soudés :

Les gradients thermiques localisés qui sont mis en jeu lors du soudage engendrent inévitablement des dilatations locales qui ont pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes non uniformes dans le matériau, qui subsistent après retour à température ambiante.

Les distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser des problèmes de tolérances dimensionnelles, tout particulièrement si les structures soudées sont minces.

D'autre part, les champs de contraintes résiduelles auto-équilibrés qui subsistent après soudage dans le composant peuvent contribuer à diminuer la durée de vie de celui-ci, en favorisant les ruptures de fatigue, la fissuration et la corrosion. En outre, dans le cas de structures minces, les contraintes internes liées au soudage peuvent induire un état de flambage.

Bien que contraintes résiduelles et distorsions puissent être diminuées par des traitements thermiques ou mécaniques appropriés, leur détermination apparaît comme essentielle, pour intégrer une meilleure maîtrise des marges, pour diminuer les coefficients de sécurité et donc optimiser les coûts de réalisation, ou encore en vue d'une analyse avalué de dommage.

Dans cette optique, la simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes et distorsions résiduelles résultant du soudage.

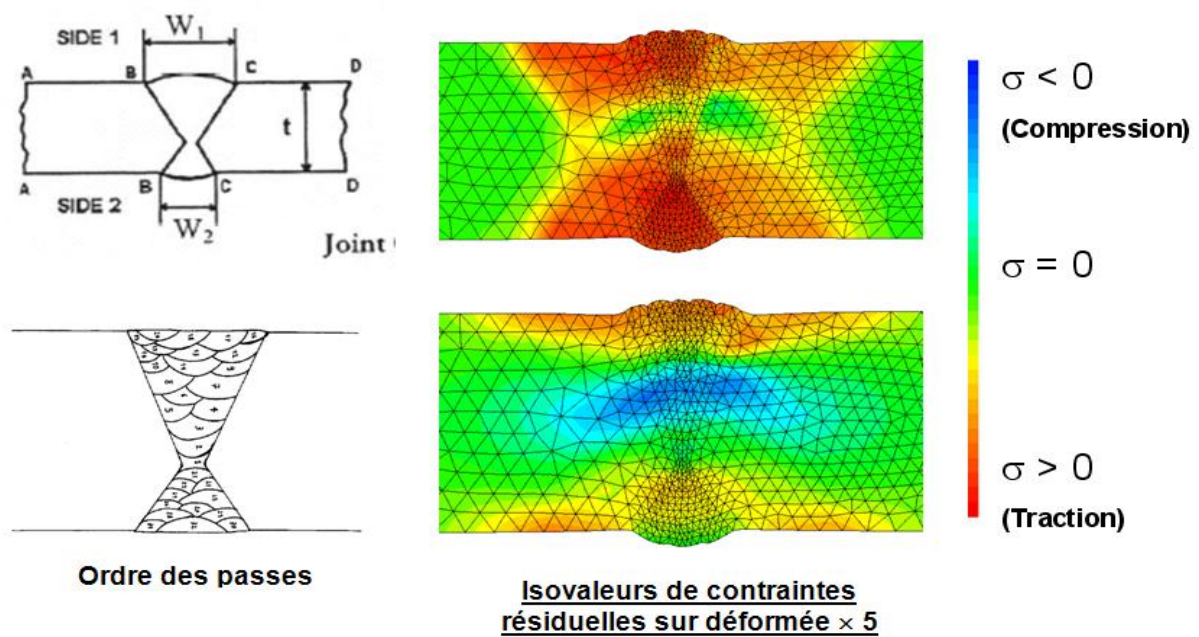


Figure III.7:simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis I

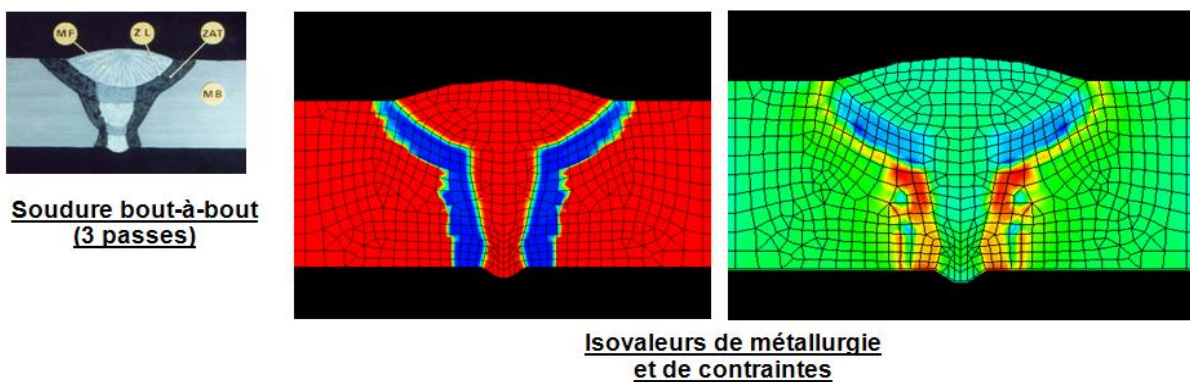


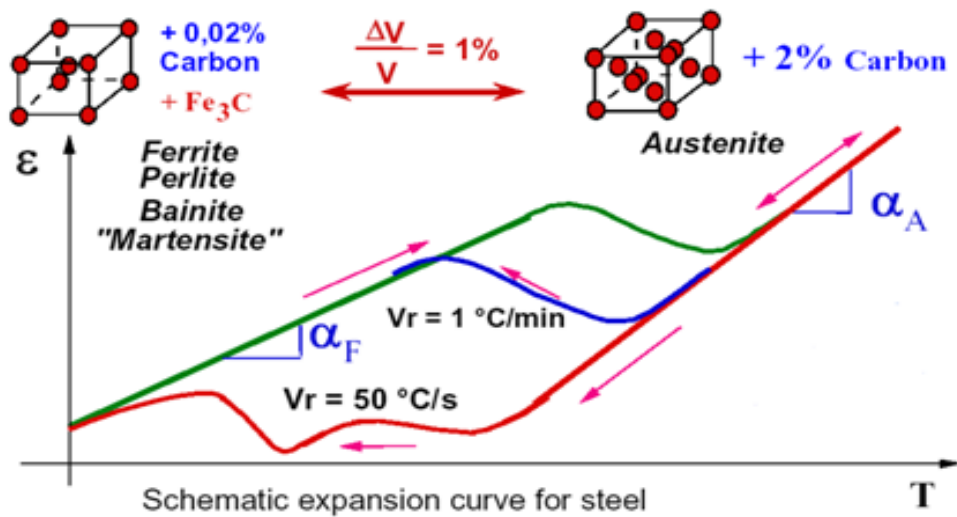
Figure III.8:simulation numérique par la Méthode des Eléments Finis II

III.7 Calcul des contraintes et distorsion par Méthode des Eléments Finis :

Le calcul des contraintes et distorsions de soudage nécessite la modélisation des phénomènes complexes thermiques, métallurgiques et mécaniques qui interviennent de façon couplée dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) lors du soudage. Ceci implique notamment :

- Le calcul de l'évolution thermique transitoire dans les pièces soudées, à partir de la définition de l'apport de chaleur d'après les paramètres de soudage, en tenant compte de toutes les non-linéarités (propriétés thermophysiques dépendantes de la température, chaleur latente de changement d'état, conditions aux limites)
- Le calcul, le cas échéant, de l'évolution des proportions de phases métallurgiques susceptibles d'apparaître lors du soudage (phases bainitique et martensitique dans le cas des aciers faiblement alliés), qui s'accompagne de conséquences mécaniques qu'il peut être indispensable de prendre en compte (déformation métallurgique s'ajoutant à la déformation thermique lors des transformations, comportement plastique multiphasé, plasticité de transformation...)
- Le calcul de l'évolution mécanique transitoire, tenant compte de l'évolution thermique et surtout métallurgique, avec une loi de comportement adaptée pour toutes les phases métallurgiques en présence (écrouissage cinématique, viscoplasticité...)

Ces calculs thermiques, métallurgiques et mécaniques doivent parfois être menés de manière simultanée, dans le cas d'un fort couplage thermique et mécanique (soudage par friction, procédé stir welding...). Néanmoins dans le cas des procédés de soudage par fusion (TIG, MIG-MAG, laser...), une simulation thermo-métallurgique, suivie d'une simulation mécanique chaînée tenant compte des effets thermiques et métallurgiques, est suffisante.



Transformations métallurgiques dans la ZAT

Figure III.9: Transformations métallurgiques dans la zat

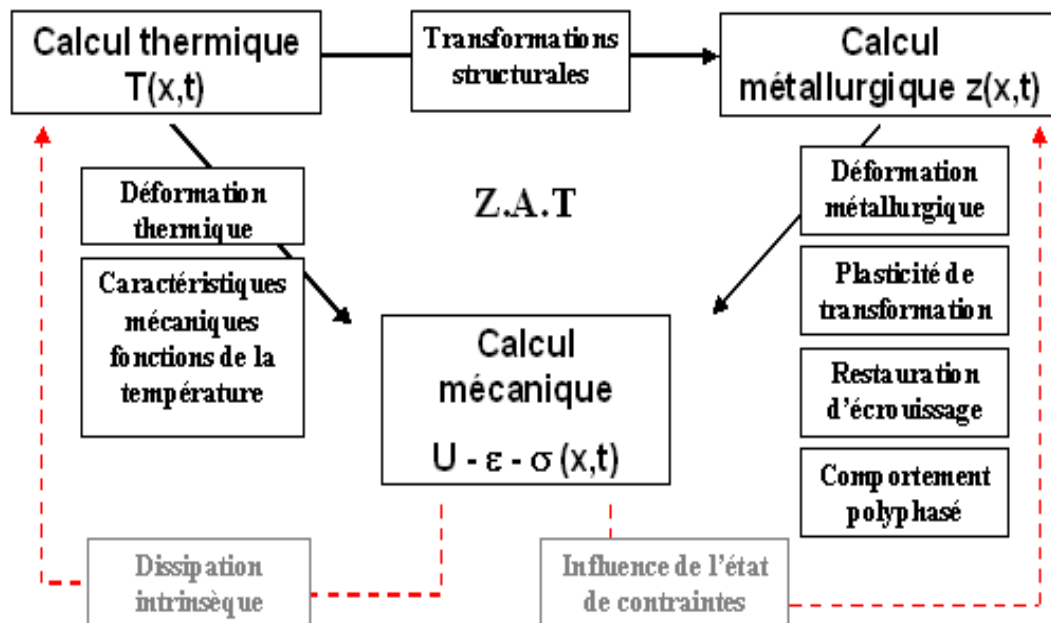


Figure III.10: Transformations structurales

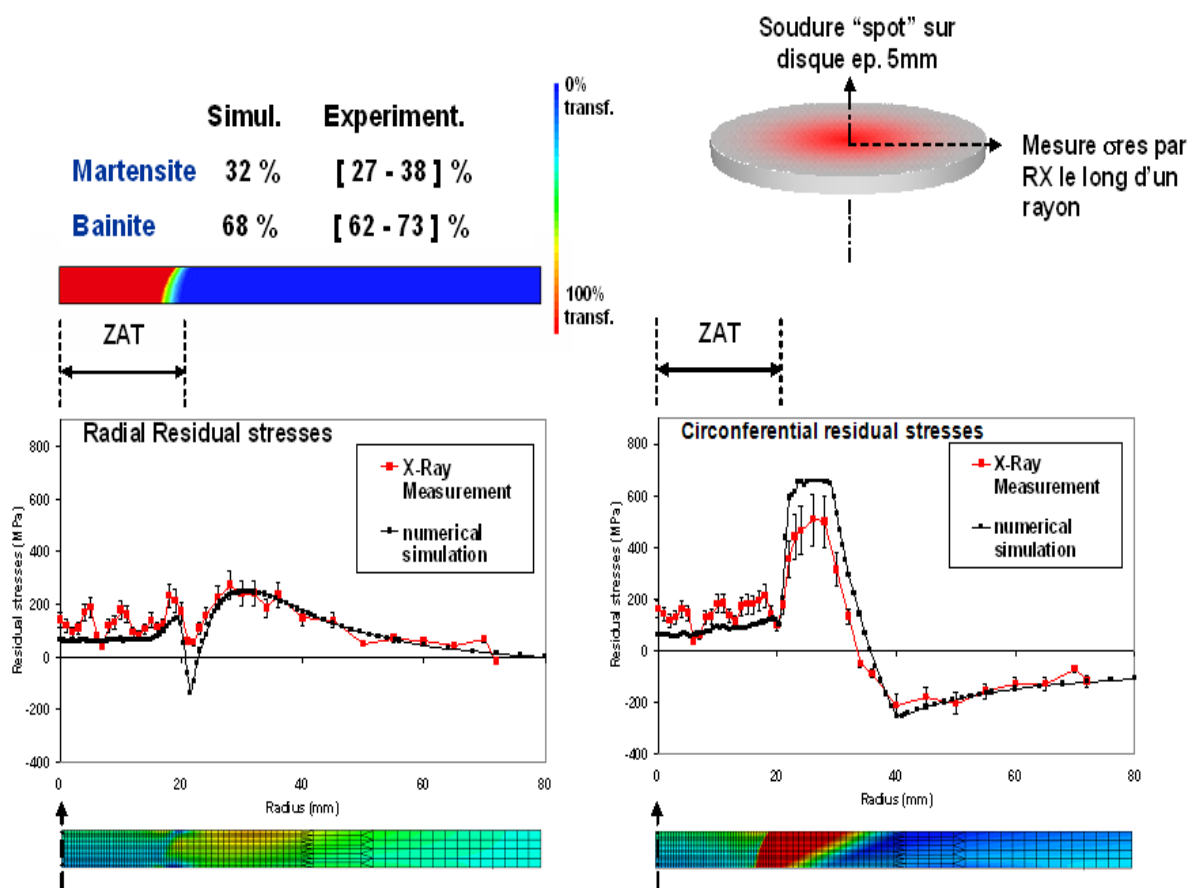
III.8 La SNS pour des études industrielles :

Grâce au développement de fortes puissances de calcul, les études en simulations numérique du soudage ont été rendues possibles ces dernières années dans le domaine industriel. La SNS est désormais un outil particulièrement intéressant en vue de la

prédiction des contraintes et des distorsions résiduelles engendrées par les procédés de soudage, ou bien en vue du contrôle ou de l'optimisation des procédés.

La société EC2-MS a acquis une large expérience dans ce domaine en réalisant plusieurs études, qui, bien que se situant le plus souvent dans un contexte R&D, répondent à des problématiques industrielles.

Tout en entretenant des liens étroits avec le laboratoire de mécanique de l'INSA (LAMCoS), qui pilote actuellement le programme de recherche « INZAT », initié en 1994 sous l'impulsion de l'industrie nucléaire, la société EC2-MS assure désormais le transfert vers l'industrie d'un savoir faire qui a longtemps été uniquement l'apanage des laboratoires ou des industries de pointes.



Comparaisons calculs-mesure dans le cas d'un disque austénitisé en partie centrale (INZAT Program) - Calculs effectués avec le Code aster®

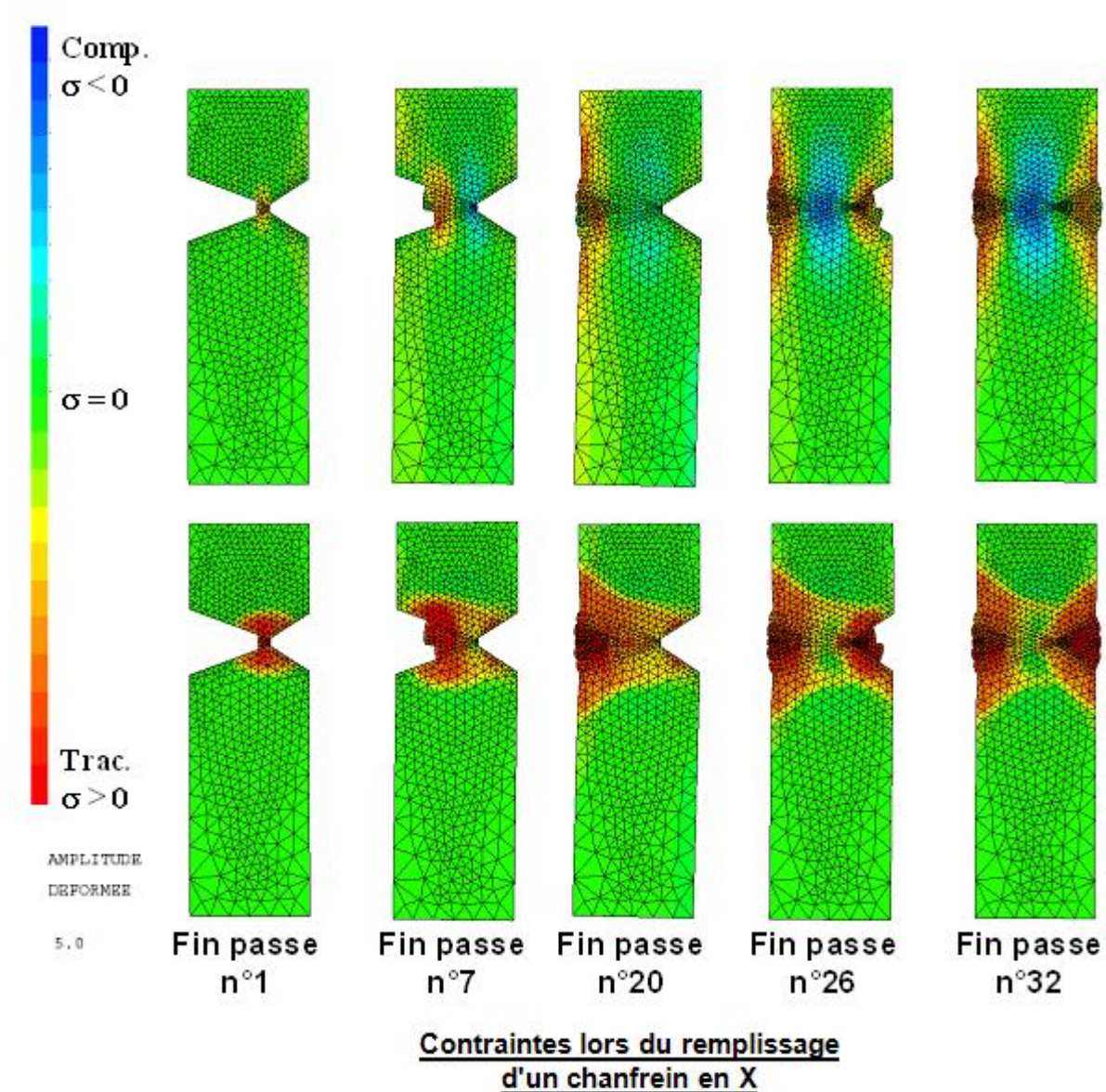


Figure III.11: contraintes lors du remplissage d'un chanfrein en x

III.9 Exemple pratique du modèle numérique proposé

Dans ce cas d'étude de la fabrication de la bouteille à gaz ménagère qui se confectionne dans l'unité SNS BAG de Batna composée de deux bouts sphérique et soudé par le procédé du soudage électrique à l'arc sous flux solide [24] dont la composition chimique de l'acier et du métal d'apport sont connus et considérés comme doux, parfaitement soudable et à faible pourcentage en carbone, sa composition chimique est proche de celle du métal d'apport.[26].



Figure III.12: bouteille à gaz ménagère qui se confectionne dans l'unité SNS BAG de Batna

L'usage d'une vitesse de soudage plus approprié provoque des défauts irréversibles durant l'opération de soudage telle que (manque de fusion ou collage, porosités, manque de pénétration du métal d'apport

III.9.1 Les paramètres de soudage sont :

Procédé de soudage	: Semi automatique
Position de soudage	: 1G
Courant et polarité	: (+) lance de soudage
Métal d'apport	: S& traité thermiquement (1,6 mm)
Ampérage	: 500 A
Voltage	: 30 V
Temps de soudage	: 58 Secondes.
Vitesse de rotation de la bouteille	: 16 mm / Seconde.

Tableau III.1: Composition Chimique de l'Acier de base

Elément	C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Nb	Ti
%	0.19	0.25	0.4	0.025	0.015	0.09	0.009	0.05	0.03

Tableau III.2: Composition Chimique du métal d'apport

	C %	Mn %	Si %	S %	P %
Min	0.06	0.40	-	-	-
Max	0.12	0.60	0.01	0.025	0.025

L'étude numérique entamée porte sur le comportement de la variation de température durant le procédé de soudage.

Cette étude nous montre la délimitation physique de la Zone Affectée Thermiquement dite (ZAT) et nous propose un suivi de valeurs de température en tout point des deux bouts soudés au cours de l'opération de soudage.

III.9.2 Modèle de l'étude numérique proposée :

Le domaine de soudage est présenté sur la figure ci-dessous ou il est à noter que pour le terme source S (source mobile de chaleur pour notre cas d'étude, se déplaçant le long de l'axe Y) selon la (figure III.13).

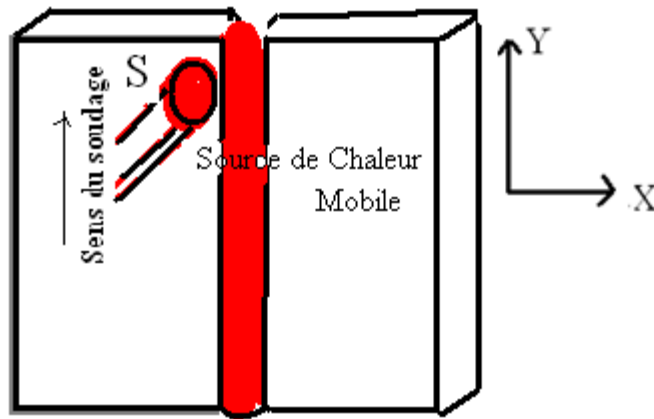


Figure III.13: Schéma du modèle de soudage étudié.

Nous nous sommes limité à la dimension de la tôle à souder pour une distance de cinq centimètres, car cette distance est suffisante à tirer les interprétations et les remarques relatives.

III.10 Formulation numérique de l'étude thermique du soudage :

Q soudage représente la somme de tous les flux agissants dans le soudage

$$Q \text{ soudage} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

Ou q_1 : flux par conduction

$$q_1 = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (III.1)$$

q_2 : flux par convection

$$q_2 = h (T - T_\infty)$$

Avec h : coefficient d'échange par convection

q_3 : flux par rayonnement

$$q_3 = \varepsilon \sigma (T_{\text{gaz}}^4 - T_{\text{surf ext}}^4)$$

Avec ε : émissivité et σ : constante de Boltzmann

q_4 : flux d'enthalpie de fusion absorbée au cours du soudage.

Les flux q_2 , q_3 et q_4 sont négligés du fait que le soudage se fait par convection.

En tenant compte de la symétrie de la bouteille au niveau du cordon de soudage et des deux embouts à souder, la distribution de la température sera calculée sur la moitié du domaine de soudage.

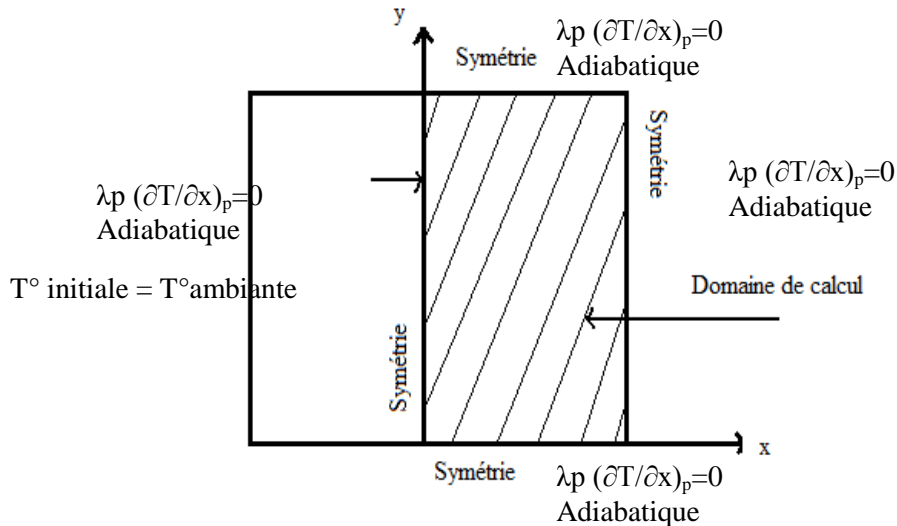


Figure III.14: Schéma du modèle discrétisé du soudage. [26]

Le domaine de soudage est présenté sur les figures ci-dessous

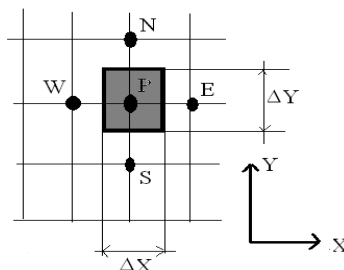


Figure III.15 : Maillage et disposition du modèle d'étude de la bouteille et disposition du volume de contrôle. [26]

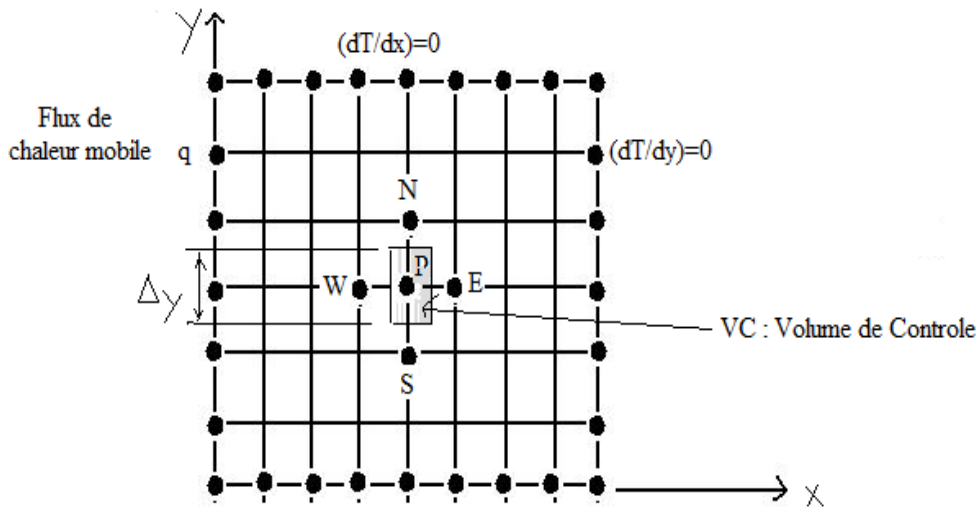


Figure III.16: Maillage et disposition du modèle d'étude de la bouteille et disposition du volume de contrôle. [26]

On considère un maillage régulier $\Delta x = \Delta y$ et $\Delta z = 1$

L'équation différentielle qui gouverne le régime transitoire de la diffusion de chaleur est la suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (III.2)$$

$$\text{Avec } \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \dots \dots \dots (III.3)$$

$$\text{Donc : } \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (III.4)$$

ρ, C_p et λ : Caractéristiques du matériau supposé constants

Sur la face correspondante du cordon est imposée la source de chaleur (qui la source de soudage de l'A.E.S.F.G. qui se déplace le long de cette face, cette source est notée q.

En utilisant la méthode de PATANKAR [25], est qui consiste à écrire l'équation différentielle (2) sous forme algébrique discrétisée pour un nœud du domaine de calcul après intégration sur le volume de contrôle (avec la supposition que $\Delta z = 1$) entourant le nœud, en utilisant le schéma totalement implicite recommandé par PATANKAR [25].

On obtient l'équation :

$$a_P T_P = a_W T_W + a_E T_E + a_S T_S + a_N T_N + b \dots \dots \dots (III.5)$$

$a_{P,W,E,S,N}$ et b : coefficients de l'équation discrétisée et le terme source étant nulle dans ce cas.

III.10.a Algorithme de résolution adoptée

Cet algorithme permet le calcul et la résolution d'un système linéaire lorsque sa matrice est tridiagonale, ce qui notre cas car les équations discrétisées s'écrivent :

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad 1 \leq i \leq N \dots \dots \dots (III.6)$$

Du maillage représenté sur la figure 3 selon une direction donnée.

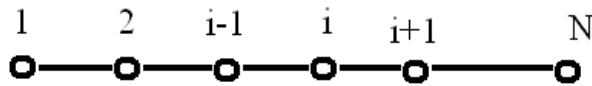


Figure III.17: schéma adopté du mode de résolution.

III.10.b Conditions aux limites :

Sur toutes les faces :

$\frac{dT}{dx}$: Par rapport à la direction x et $\frac{dT}{dy}$ par rapport à la direction y, correspondant à l'adiabatique du fait de la symétrie, seule sur la face du cordon ou est imposée une source de chaleur q mobile $q = \lambda_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p$

Sur la frontière et en tenant compte des CAL : $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ou $q = \lambda_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p$

En supposant la variation de température linéaire et en utilisant le schéma implicite pour l'intégration dans le temps (recommandé par **Patankar** [27]), on obtient la forme

générale de l'équation (5) résolue par l'application de l'algorithme de **Thomas** aux problèmes 02 dimensions, la résolution incrémentale itérative combinée entre la méthode de **Newton** et celle de **Gauss Seidel**.

VI. Résultats Numériques

La simulation des résultats numériques obtenus par le programme déjà cité dans le chapitre III, concernera les valeurs de vitesses de soudage de :

1. 10 mm/s
2. 16 mm/s
3. 20 mm/s

VI.1 Simulation 01 pour une vitesse de soudage de $V_s=10\text{mm/s}$

A t = 03secondes

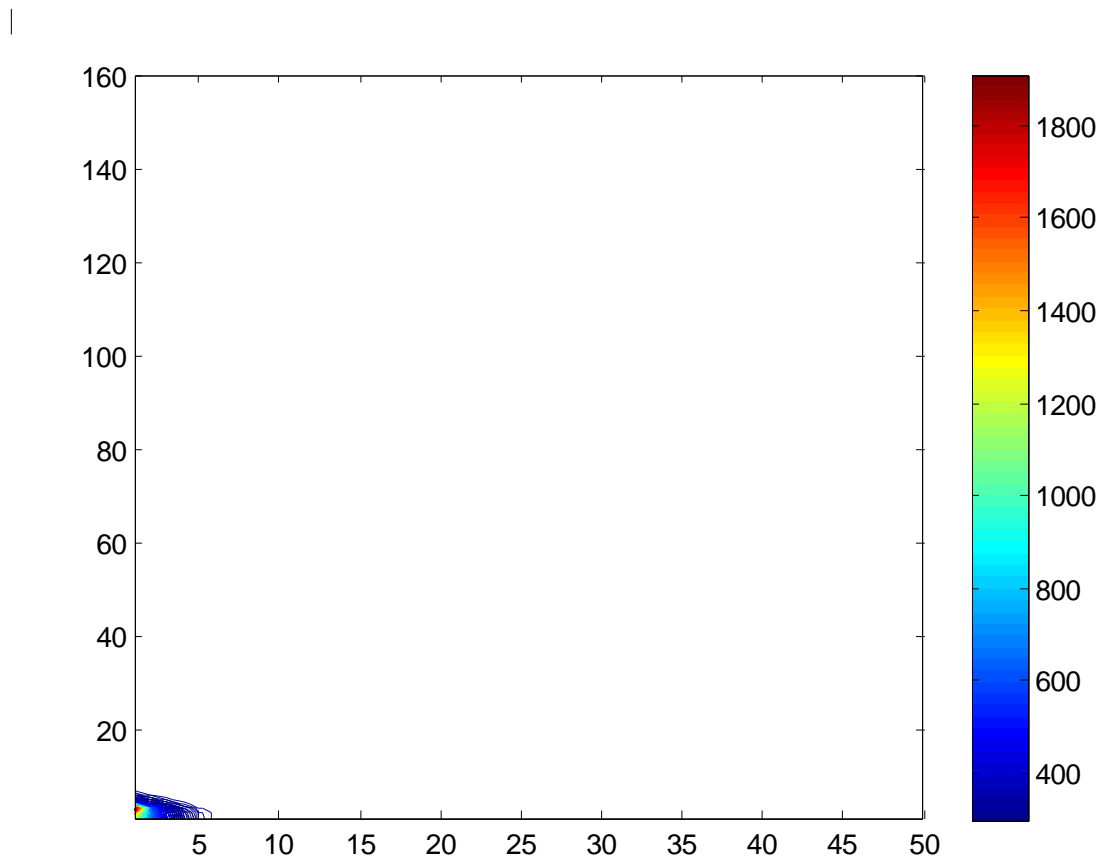
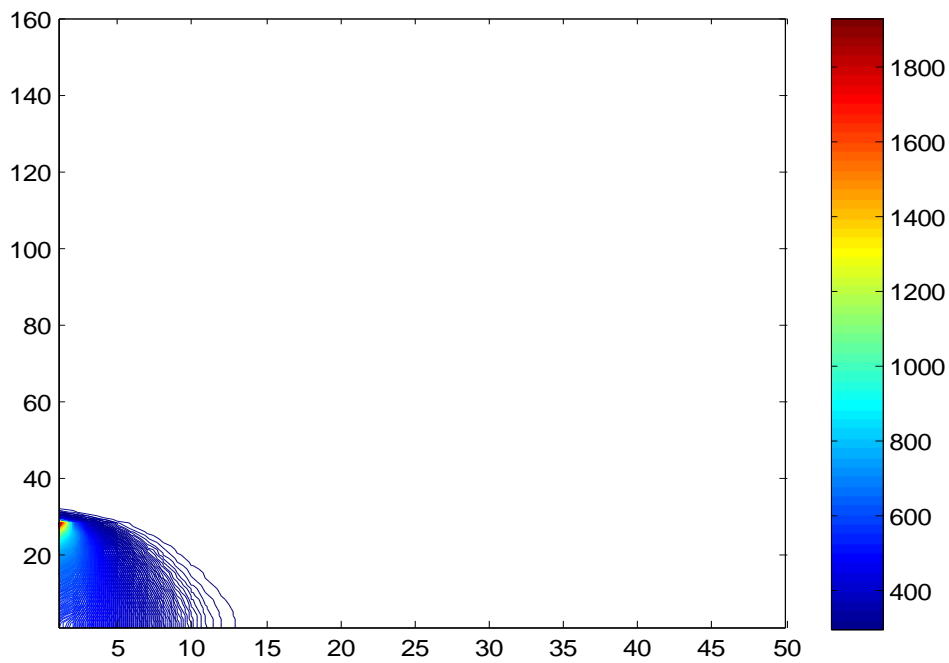
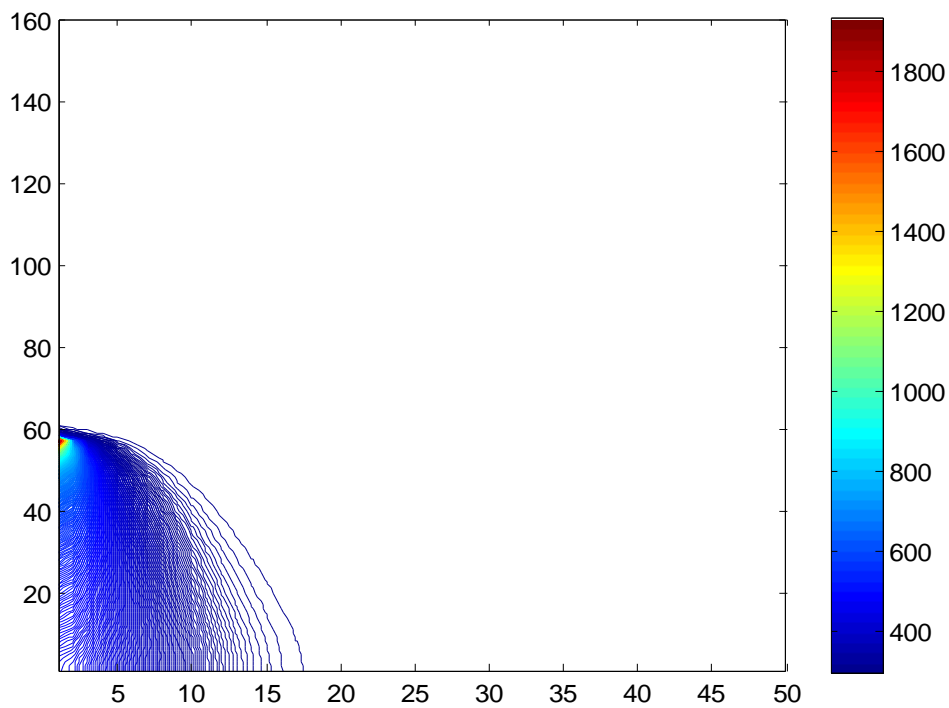


Figure VI.1: simulation visuelle du soudage pour $V_s=10\text{mm/s}$ à $t=03$ secondes

A t = 26 secondes**Figure VI.2: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 26$ secondes****A t = 60 secondes****Figure VI.3: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 60$ secondes**

A t = 80 secondes

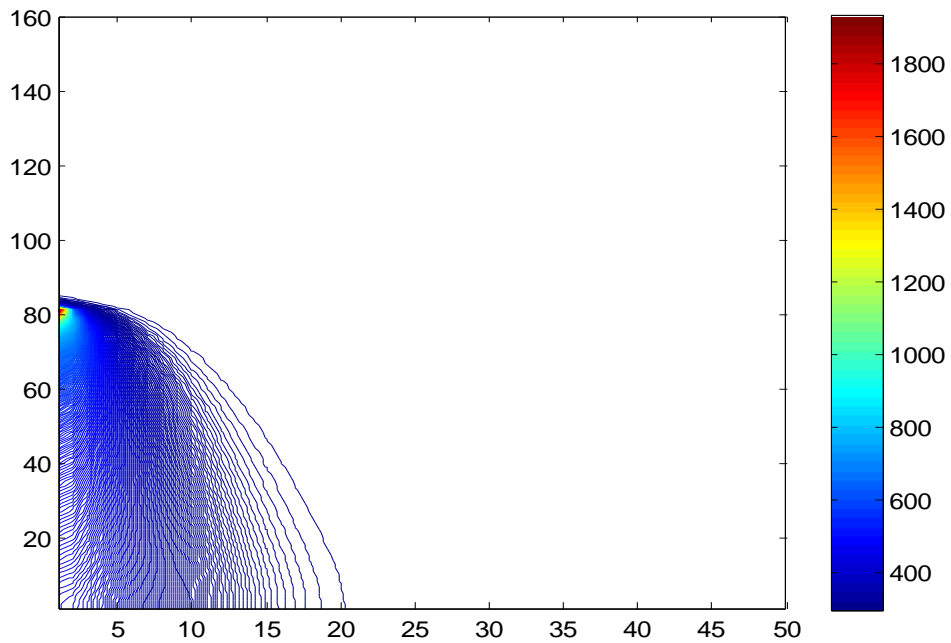


Figure VI.4: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 80$ secondes

A t = 125 secondes

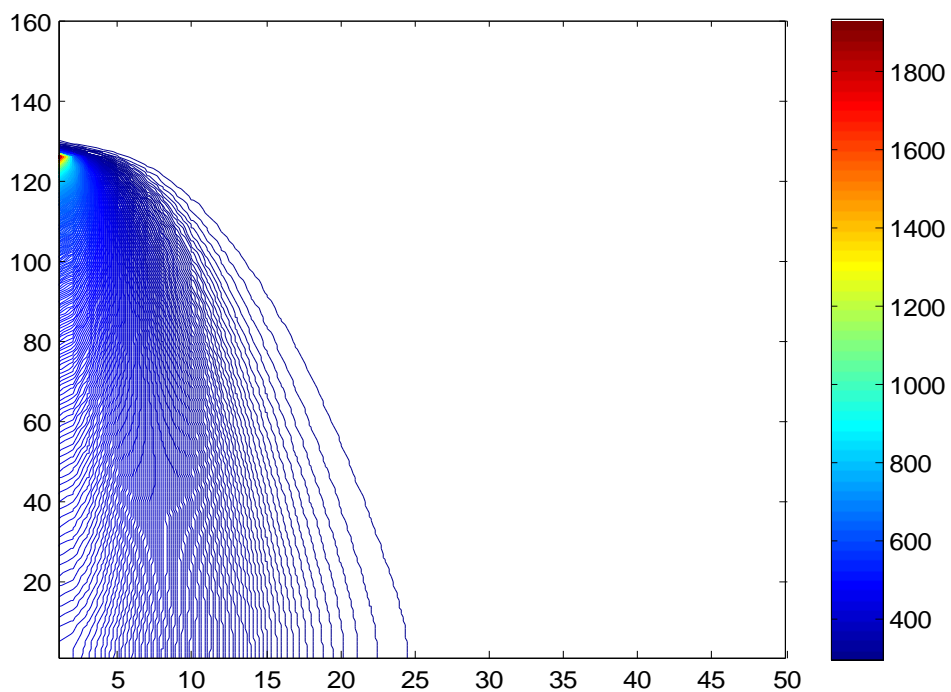


Figure VI.5: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 125$ secondes

A t = 160 secondes

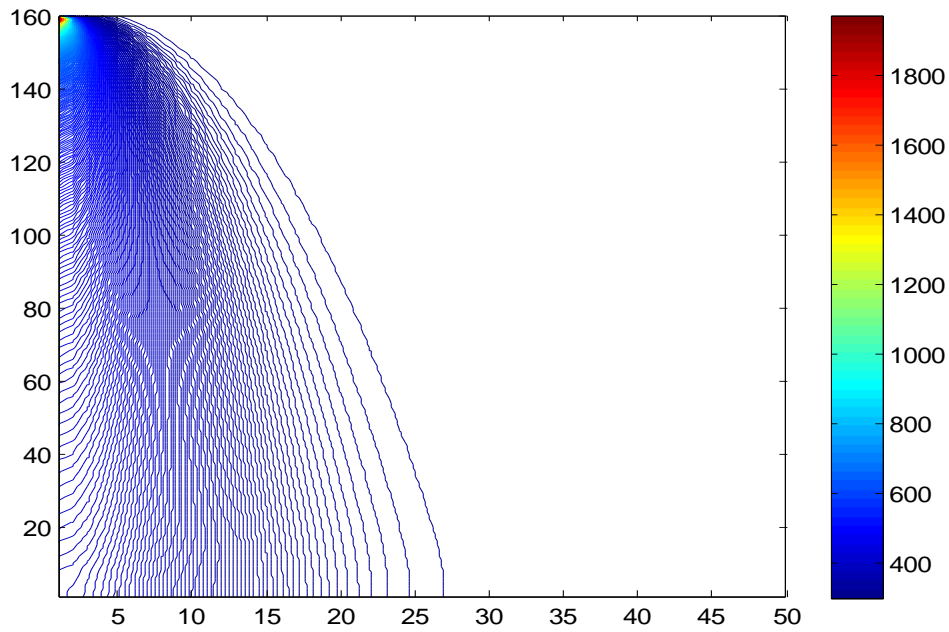


Figure VI.6 : simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10 \text{ mm/s}$ à $t = 160$ secondes

A t = 172 secondes

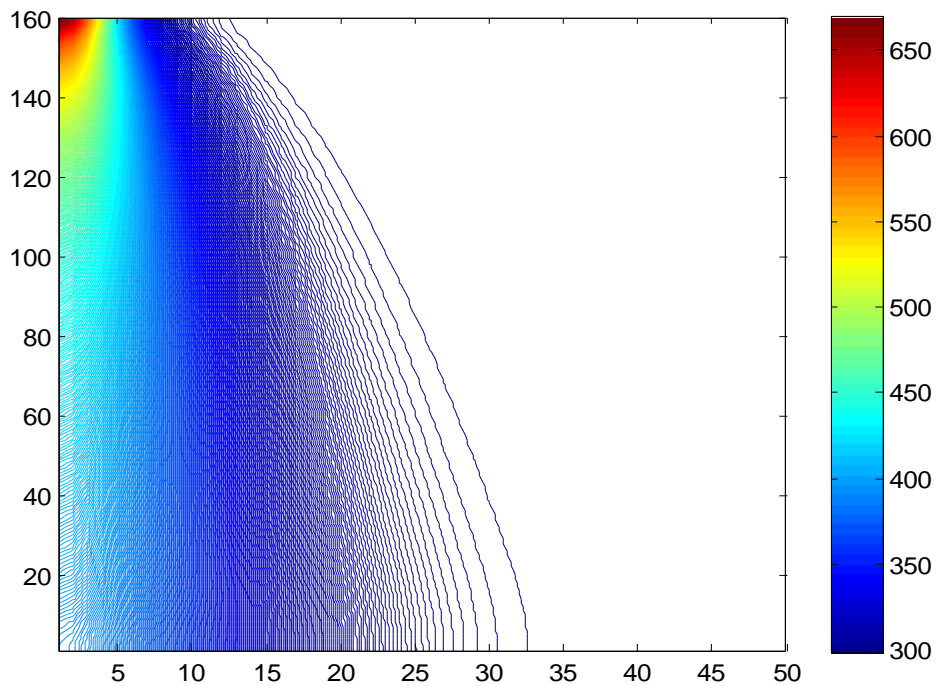


Figure VI.7 : simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10 \text{ mm/s}$ à $t = 172$ secondes

A t = 190 secondes

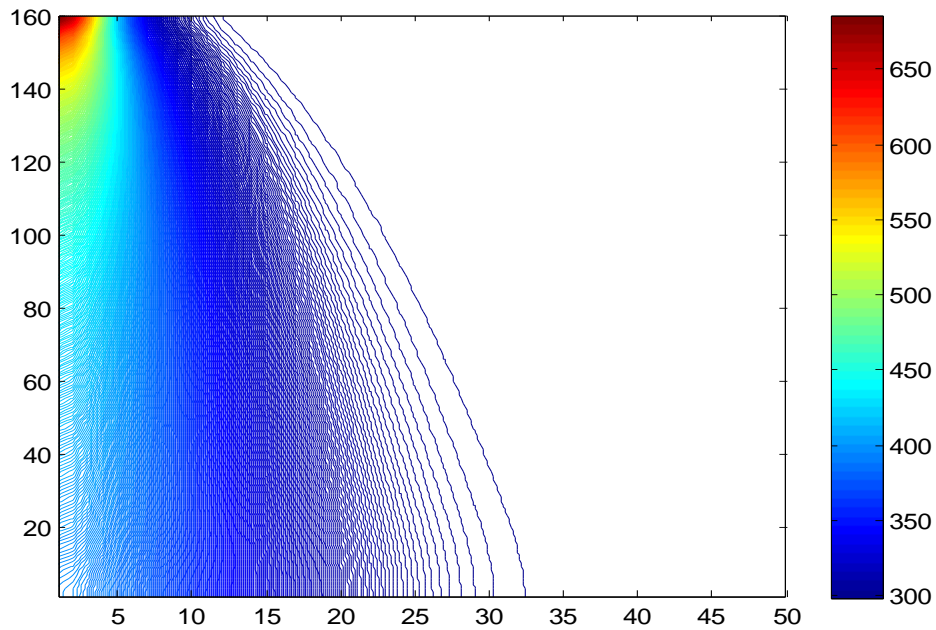


Figure VI.8 : simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 190$ secondes

A t = 230 secondes

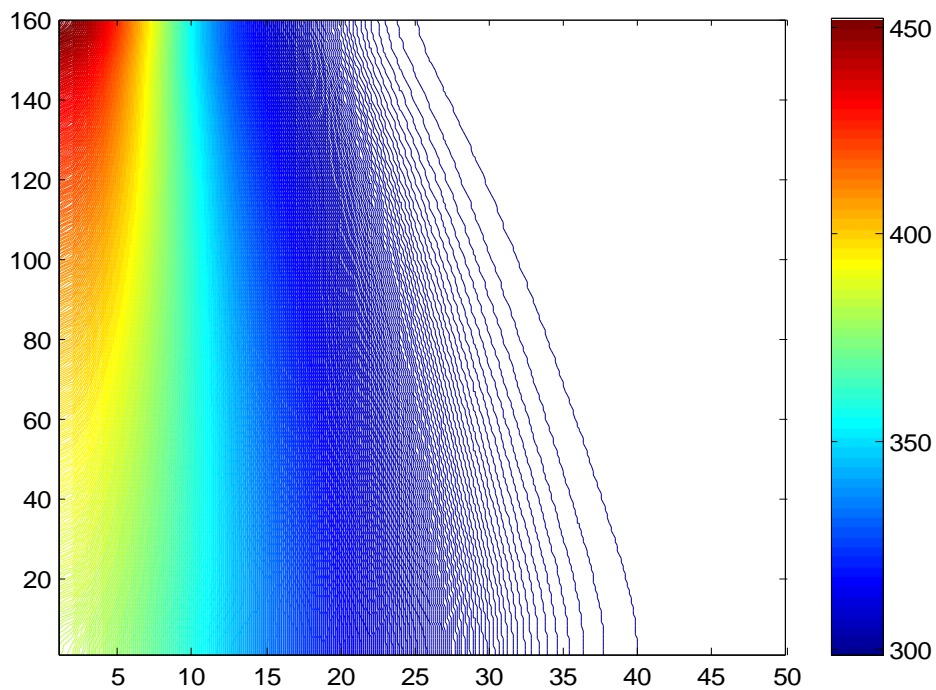


Figure VI.9 : simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 230$ secondes

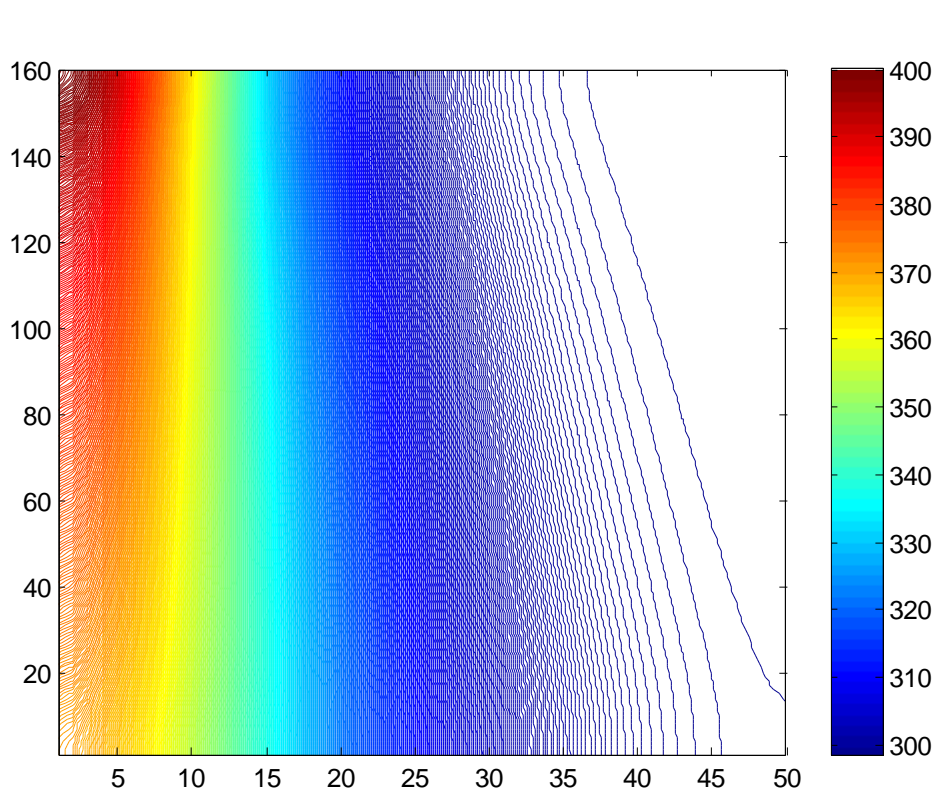
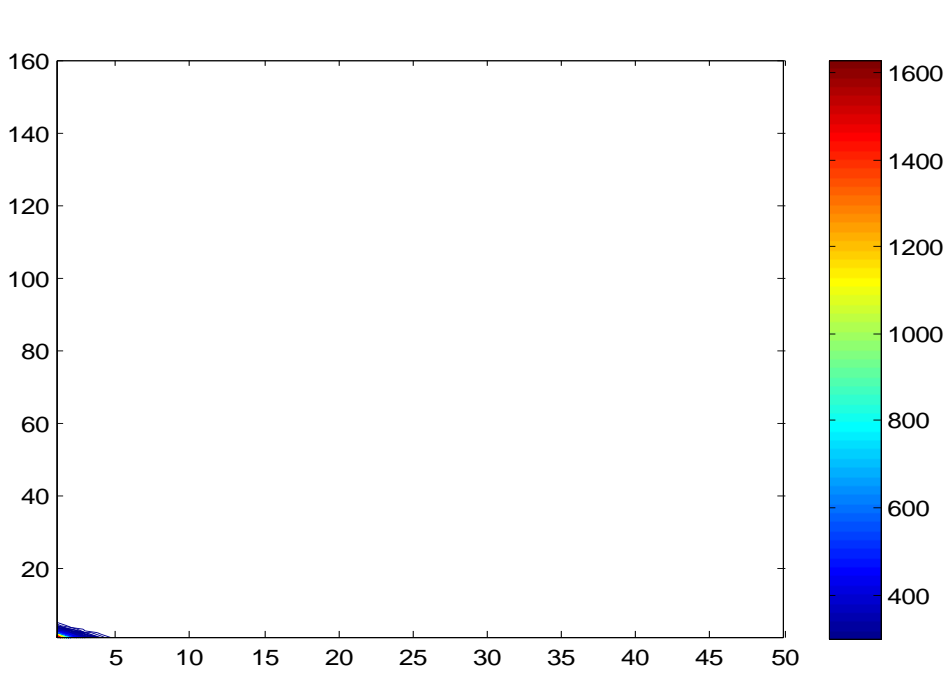
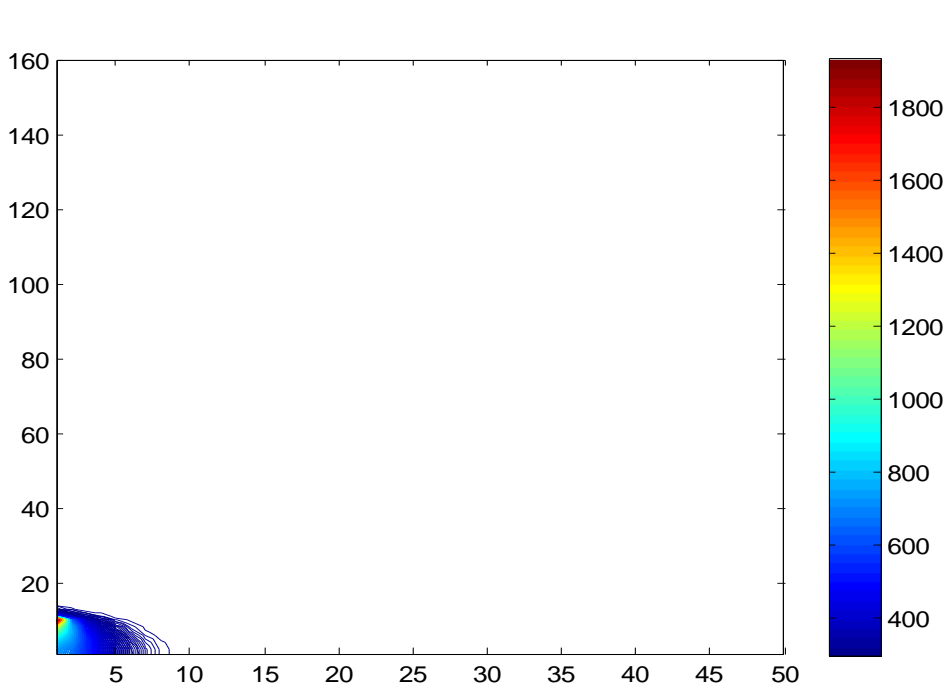
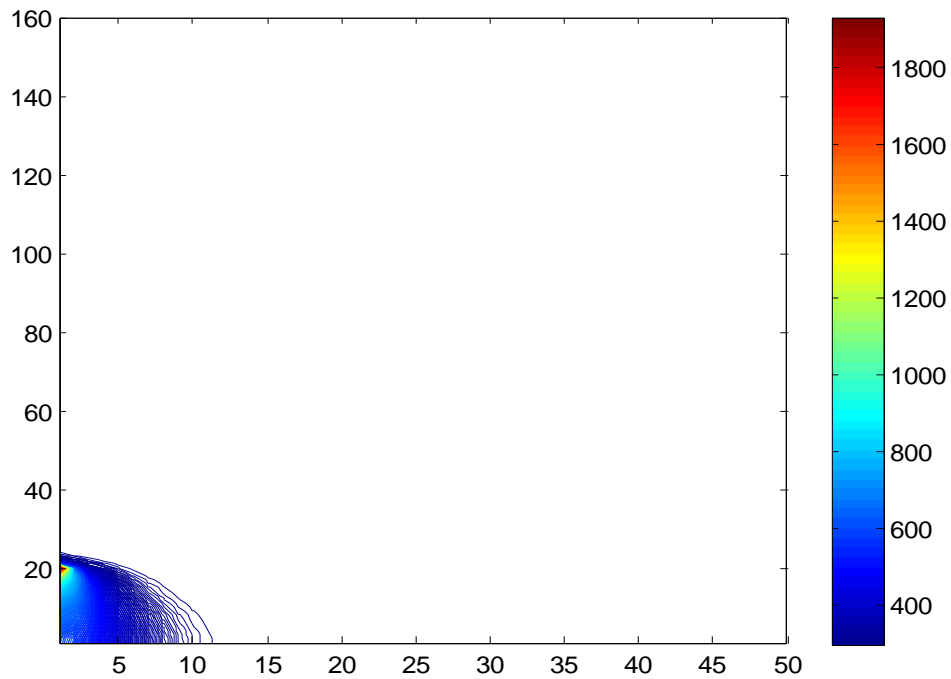
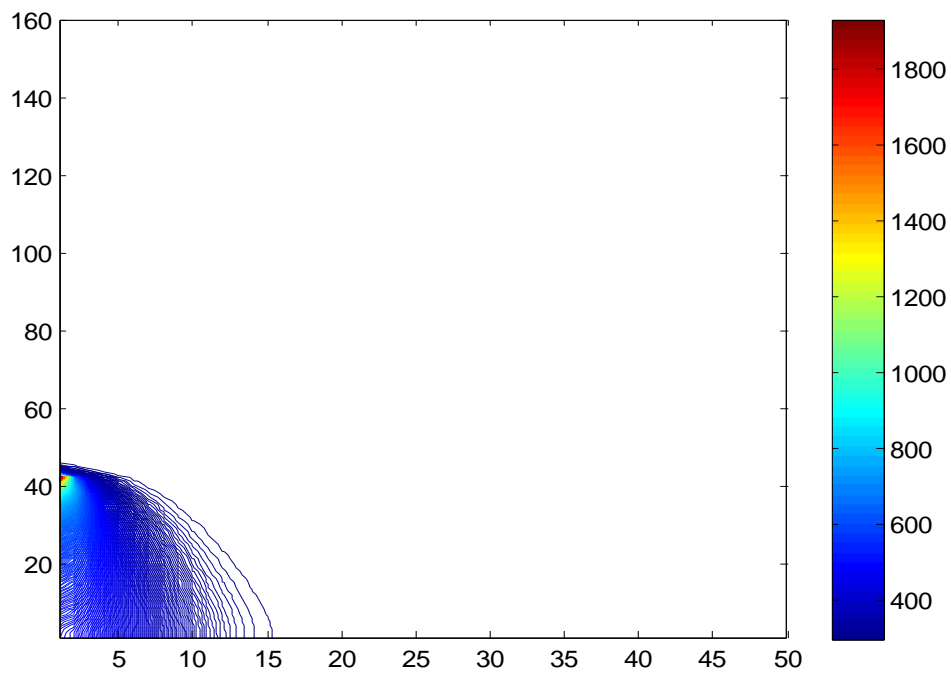
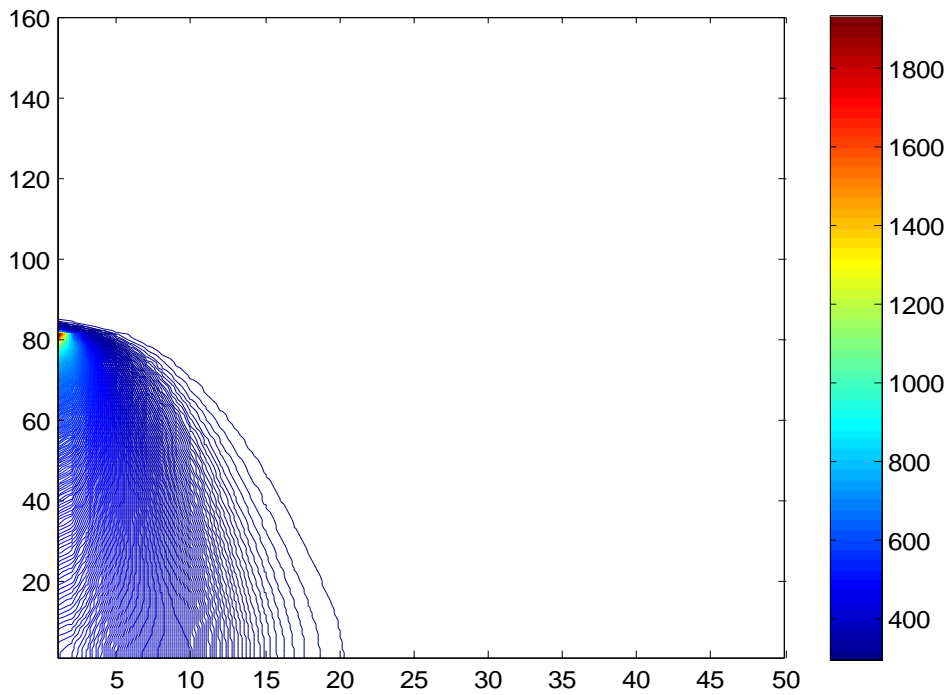
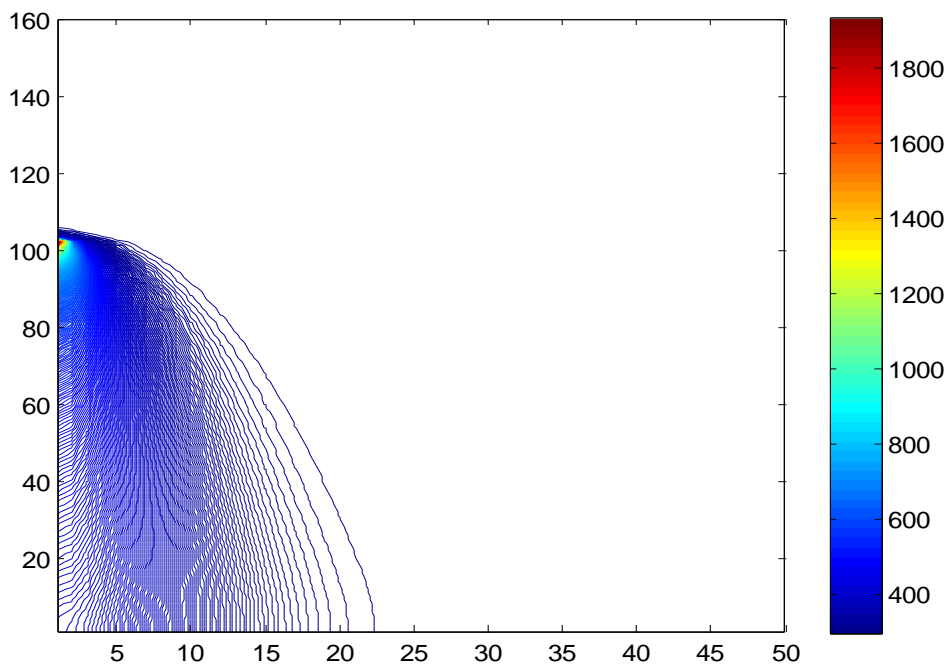
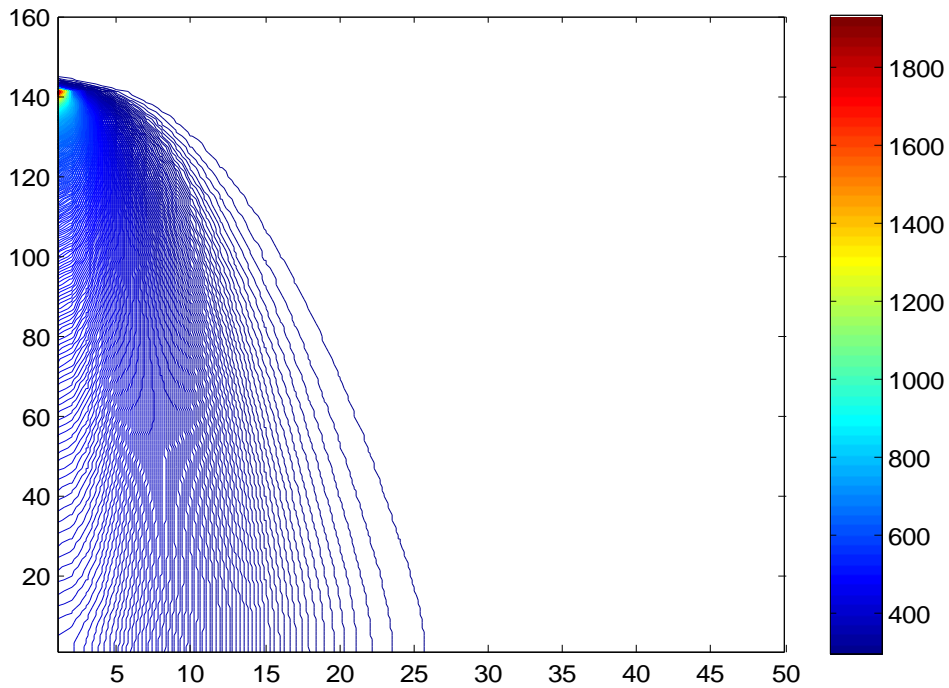
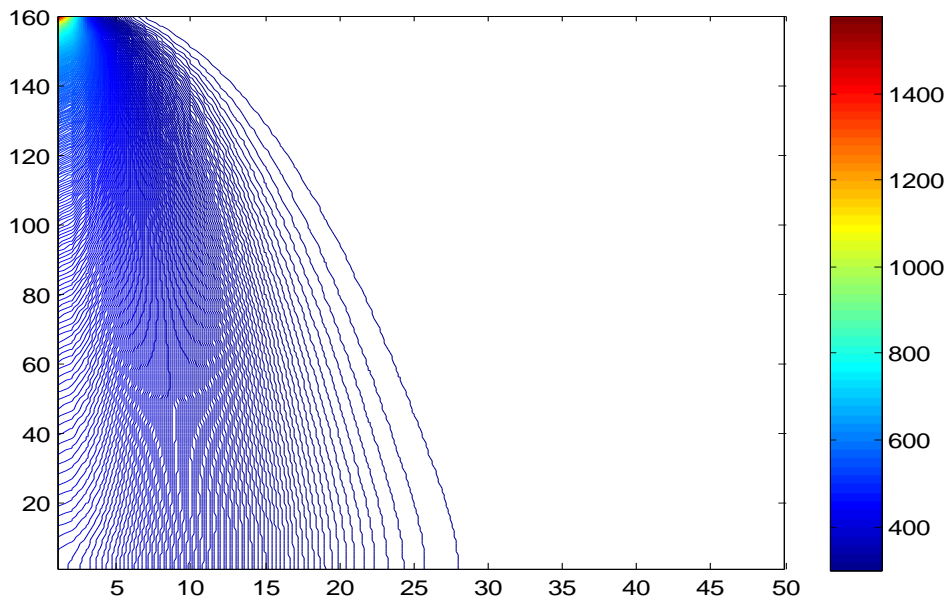
A t= 320 secondes

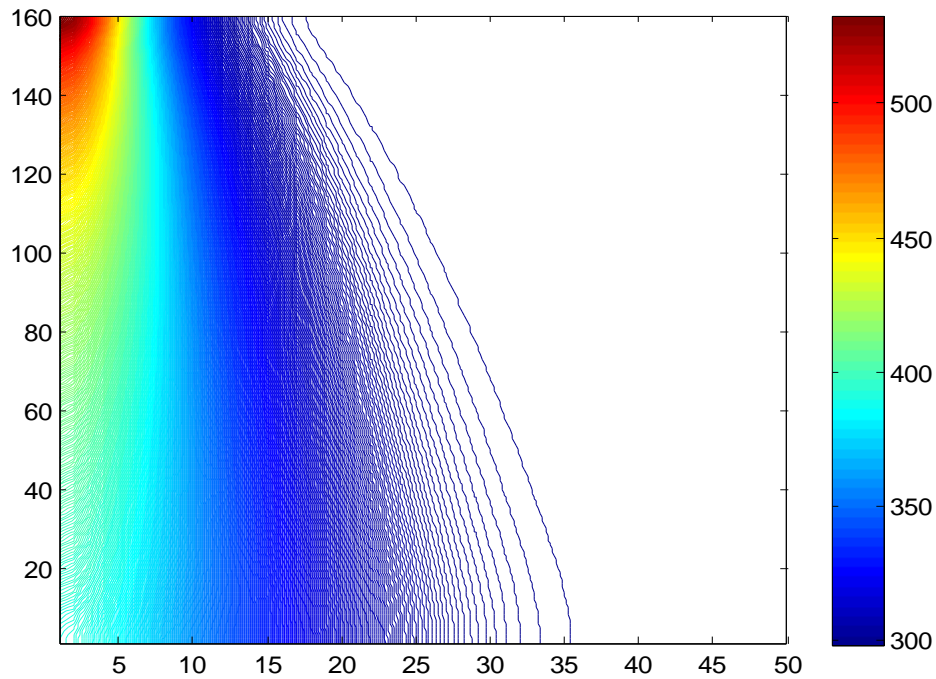
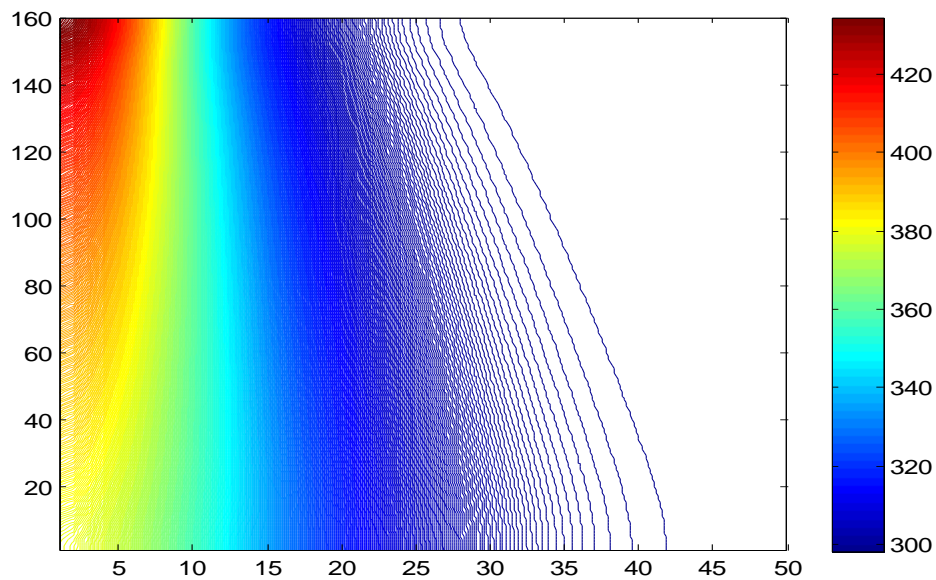
Figure VI.10 : simulation visuelle du soudage pour $V_s = 10\text{mm/s}$ à $t = 320$ secondes

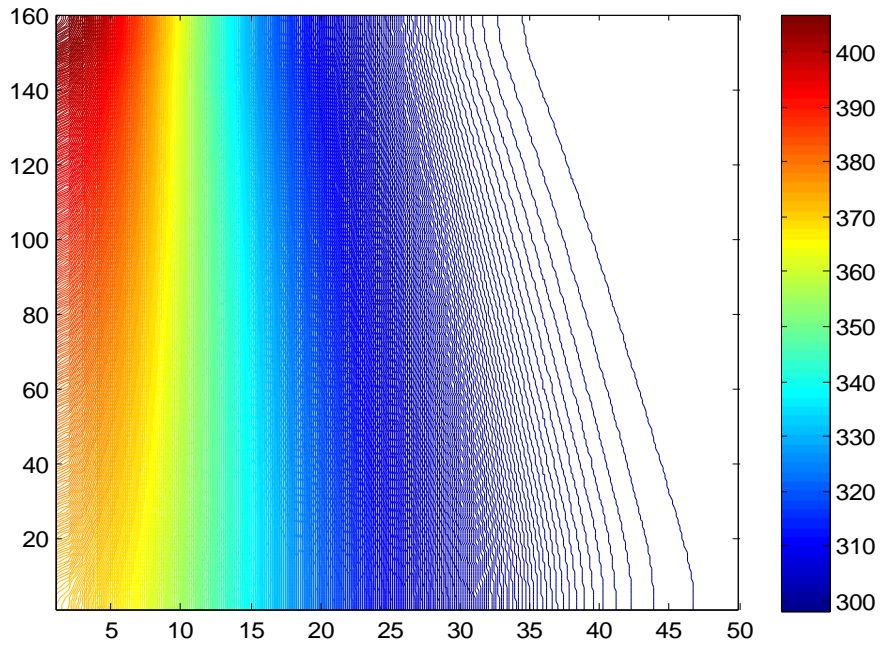
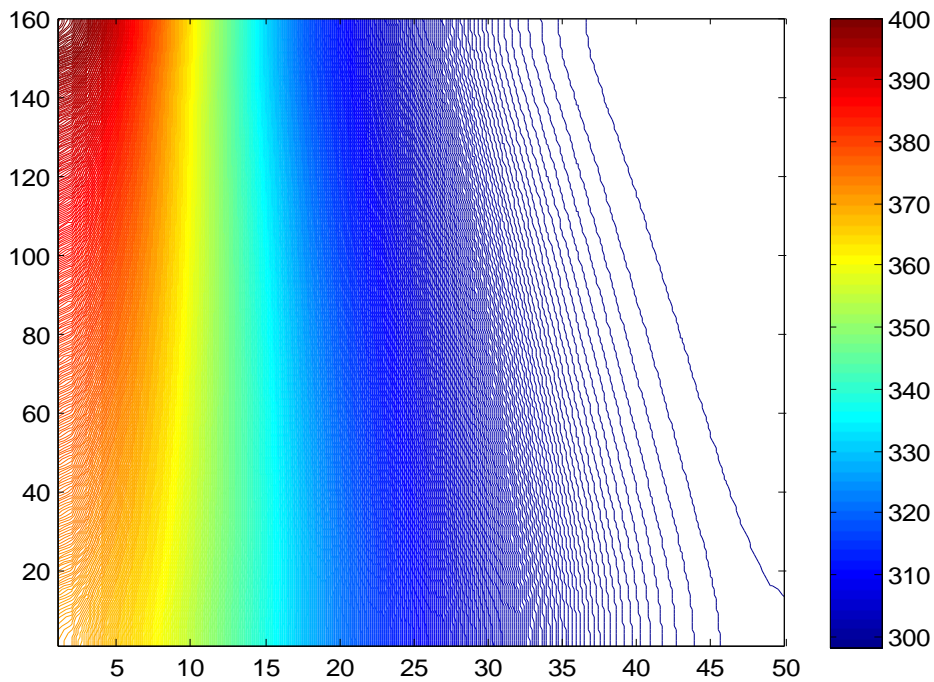
VI.2 Simulation 01 pour une vitesse de soudage $V_s=16$ mm/s**A t = 01 seconde****Figure VI.11: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 01$ seconde****A t = 10 secondes****Figure VI.12: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 10$ secondes**

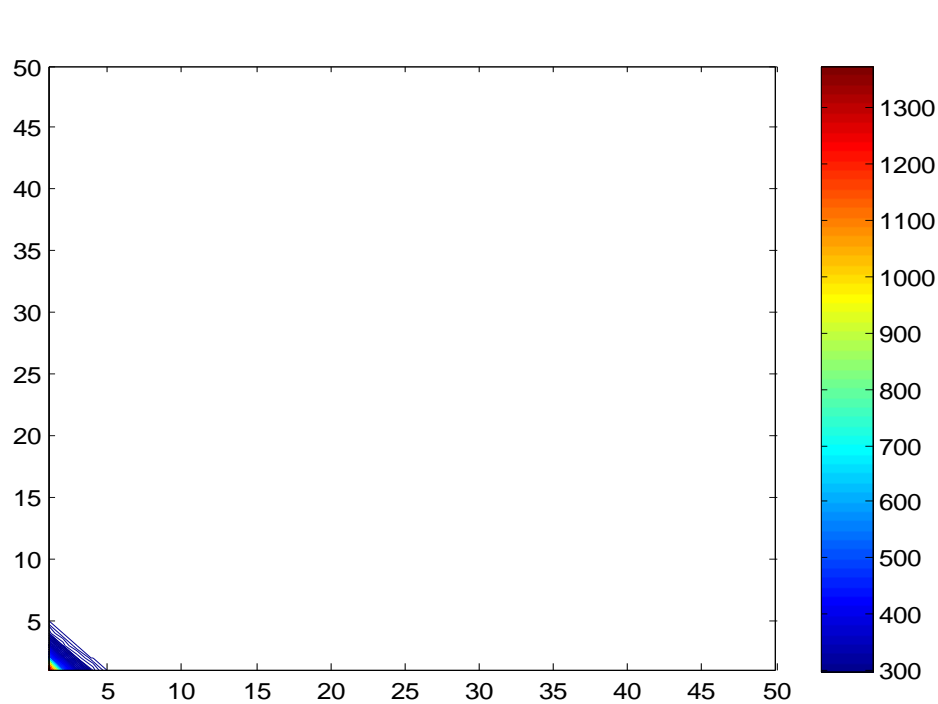
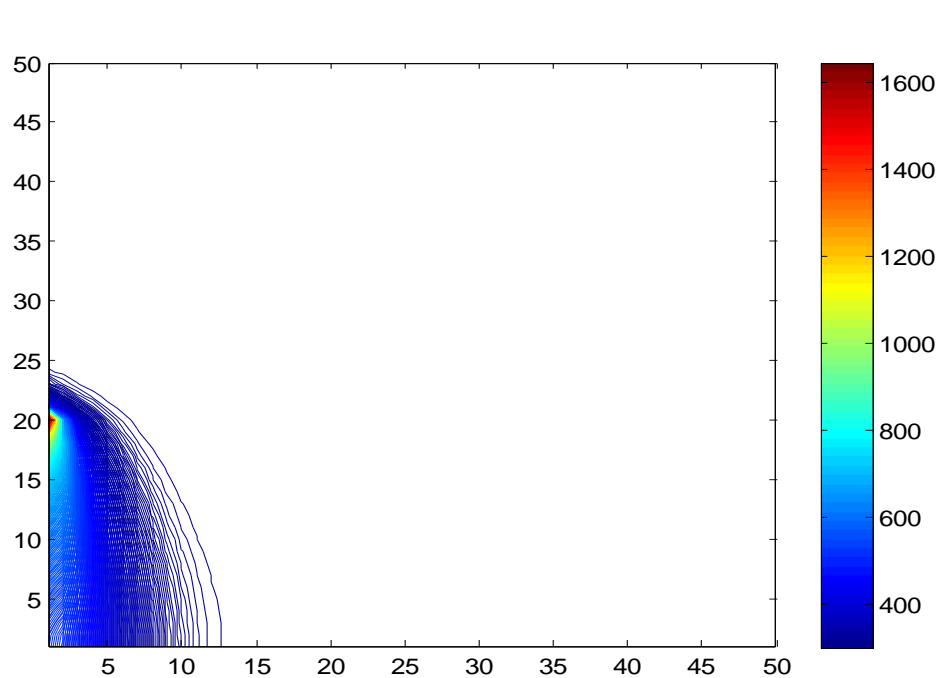
A t = 20 secondes**Figure VI.13: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 20$ secondes****A t = 40 secondes****Figure VI.14: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 40$ secondes**

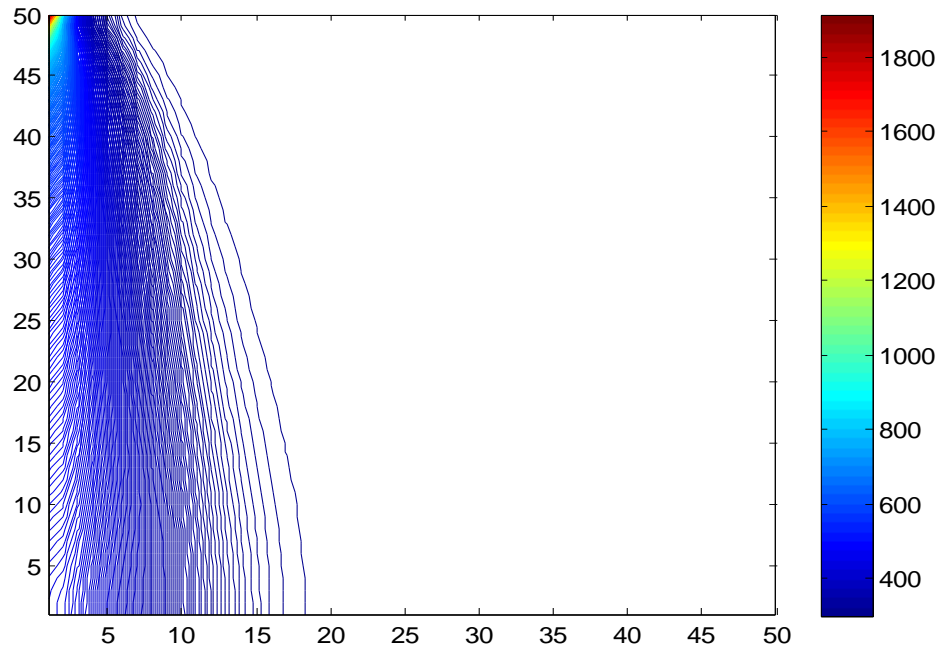
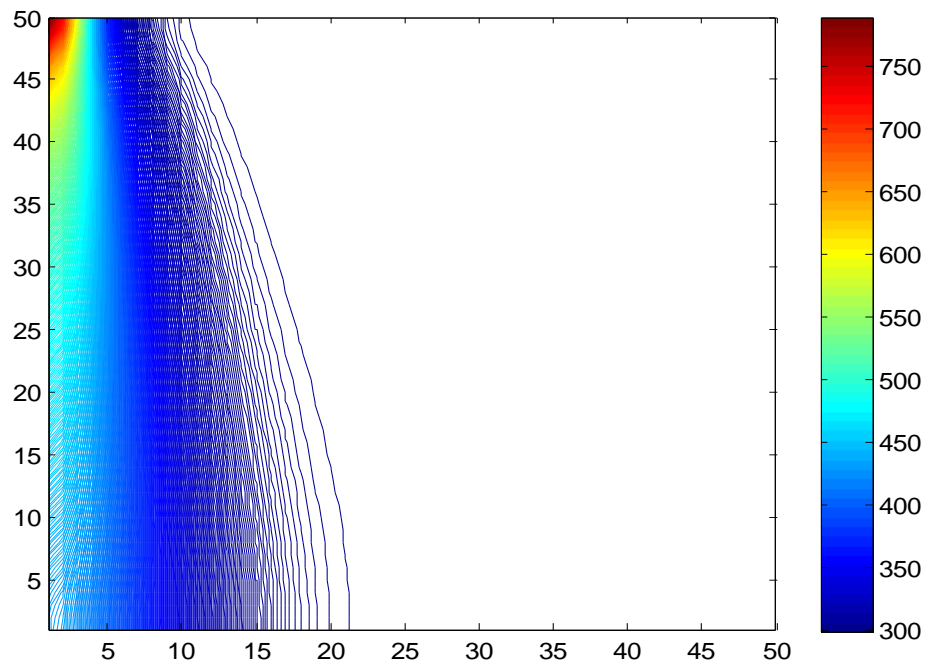
A t = 80 secondes**Figure VI.15: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 80$ secondes****A t = 100 secondes****Figure VI.16: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 100$ secondes**

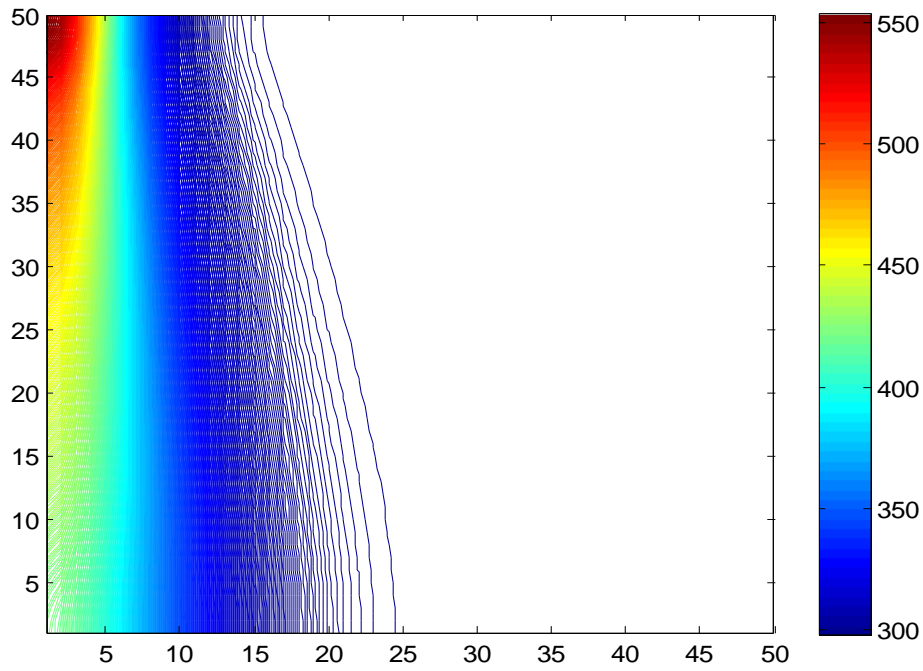
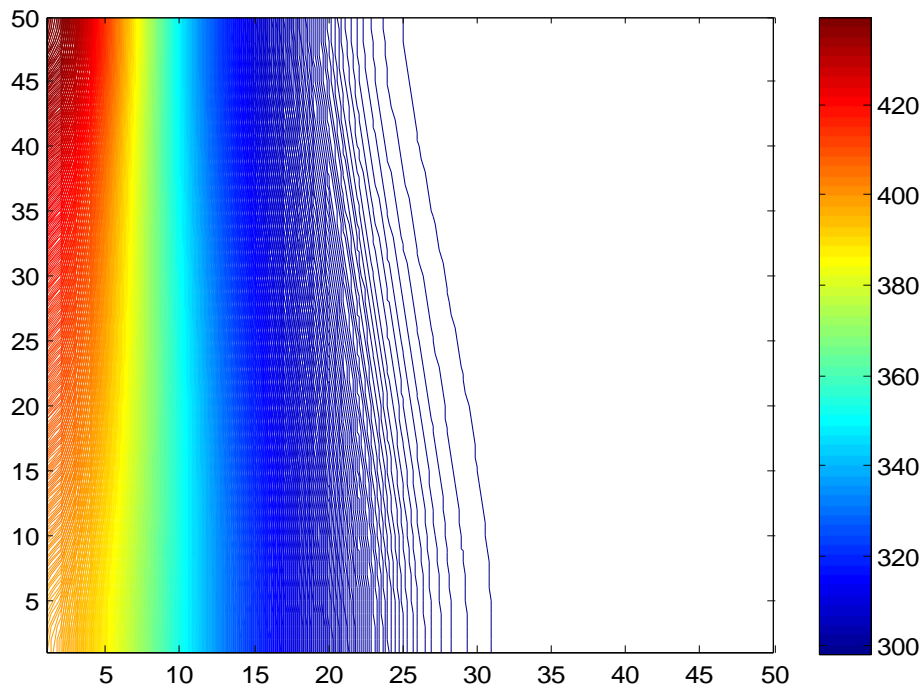
A t = 140 secondes**Figure VI.17: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 140$ secondes****A t = 160 secondes****Figure VI.18: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 160$ secondes**

A t = 190 secondes**Figure VI.19: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 190$ secondes****A t = 250 secondes****Figure VI.20: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 250$ secondes**

A t = 300 secondes**Figure VI.21: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 300$ secondes****A t = 320 secondes****Figure VI.22: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 16$ mm/s à $t = 320$ secondes**

VI.3 Simulation pour une vitesse de soudage de $V_s = 20$ mm/s**A $t = 01$ seconde****Figure VI.23: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 01$ secondes****A $t = 20$ secondes****Figure VI.24: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 20$ secondes**

A t = 50 secondes**Figure VI.25: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 50$ secondes****A t = 55 secondes****Figure VI.26: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 55$ secondes**

A t = 70 secondes**Figure VI.27: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 70$ secondes****A t = 100 secondes****Figure VI.28: simulation visuelle du soudage pour $V_s = 20$ mm/s à $t = 100$ secondes**

VI.4 : Comparaison des différents modèles de soudage à différentes vitesses et interprétations : La longueur de modèle considéré des deux bouts soudés est supposé égale 05 cm.

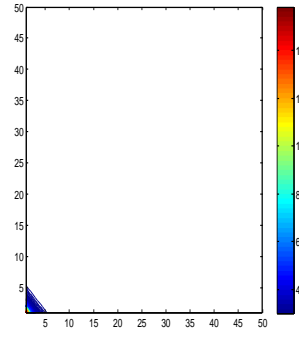
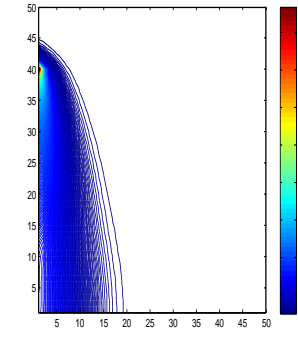
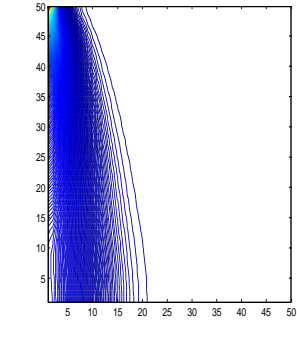
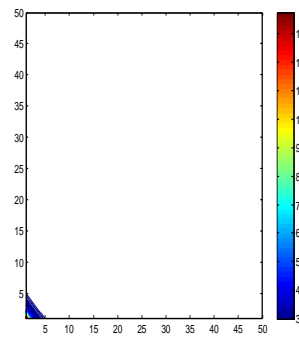
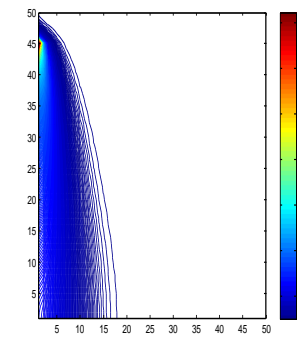
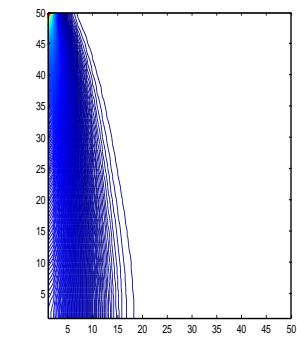
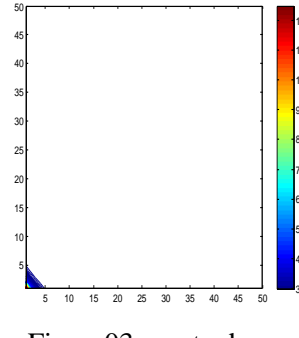
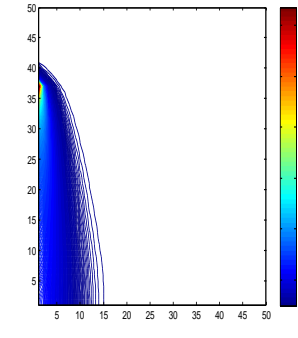
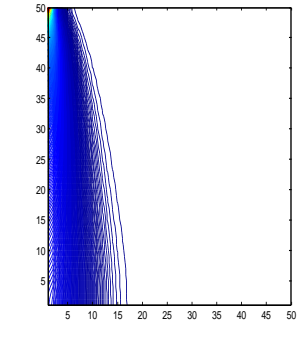
Vitesse de Soudage Vs	Début de Soudage	En cours du soudage	Après 05 cm de soudage
Modèle 01 Vs=10mm/s	 <p>Figure01 : carte des températures au début de soudage (Vs=10 mm/s)</p>	 <p>Figure04 : carte des températures après 04 cm de soudage (Vs=10 mm/s)</p>	 <p>Figure07 : carte des températures après 05 cm de soudage (Vs= 10 mm/s)</p>
Modèle 02 Vs=16 mm/s	 <p>Figure02 : carte des températures au Début de soudage (Vs=16 mm/s)</p>	 <p>Figure05 : carte des températures Après 04.5 cm de soudage (Vs=16 mm/s)</p>	 <p>Figure08 : carte des températures Après 05 cm de soudage (Vs= 16 mm/s)</p>
Modèle 03 Vs=20 mm/s	 <p>Figure03 : carte des températures au Début de soudage (Vs=20 mm/s)</p>	 <p>Figure06 : carte des températures Après 03.7 cm de soudage (Vs = 20 mm/s)</p>	 <p>Figure09 : carte des températures Après 05 cm de soudage (Vs= 20 mm/s)</p>

Tableau VI.1. Comparaison des différents modèles de soudage à différentes vitesses.

VI.5 : Interprétation :

Relativement aux figures de modélisation du Tableau I : Comparaison des différents modèles de soudage à différentes vitesses

D'après les figures (01,02 et 03) et selon l'échelle colorée du code (couleur/température), nous remarquons que la température au début de soudage du modèle 1 avec la vitesse de 10 mm/s est plus intense et atteint une valeur de plus de 1400 °C que celle du modèle 2 avec la vitesse de 16 mm/s ou modèle 3 avec la vitesse de 20 mm/s.

Au cours du soudage et d'après les figures (04, 05 et 06), le même phénomène se répète et on déduit que la température atteinte pour les vitesses de soudage moindres sont plus importantes que celles atteintes avec des vitesses plus grande soit des températures de plus de (1800 °C, 1600 °C et 1400 °C relativement aux vitesses de 10 mm/s, 16 mm/s et 20 mm/s).

Après 05 cm de soudage et avec la répétition de ce phénomène les températures cumulées atteintes sont de plus en plus conséquentes soit des températures de plus de (2200 °C, 1800 °C et 1600 °C relativement aux vitesses de 10 mm/s, 16 mm/s et 20 mm/s), cela nous ramène à dire que :

La première vitesse de soudage $V_s = 10$ mm/s est trop lente par rapport à la vitesse de soudage souhaitée optimale, car la température atteinte dépasse de loin la température de fusion du métal 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. La troisième vitesse de soudage $V_s = 21$ mm/s, s'avère trop élevé car la température de fusion du métal n'est atteinte qu'après 05 cm de soudage et cela explique le non collage des deux bouts à souder qu'après cette distance. Mais la deuxième vitesse de soudage 16 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 bouts 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 :

L'étude numérique entamée nous à permis d'avoir une idée sur :

- La valeur de la vitesse de soudage optimale en fonction des autres paramètres de soudage et de la nature des aciers soudés et leurs dimensions.
- La variation du flux de température dans les bouts soudés sa forme géométrique en fonction de la source d'énergie mobile durant le soudage.
- L'identification dimensionnelle de la ZAT en fonction de la vitesse de soudage.
- Prédiction et localisation du comportement métallurgique et mécanique des différentes zones des éléments assemblés lors du soudage.

Recommandations :

C'est dans le cadre d'une prévision d'étude et caractérisations que le thème de notre travail à été proposé, mais à défaut de non réalisation d'un stage dans l'entreprise SNS BAG de Batna qui dispose de ce genre de procédé de soudage et ceux pour des raisons particulièrement justifiables et spéciales, nous proposons la poursuite de ce travail par des caractérisations de changement de vitesses dans le soudage à l'arc électrique automatique dans sa projection, métallurgique et physique pour pouvoir déduire, interprété, à savoir validé le modèle numérique proposé ou même l'amélioré afin de clôturer ce travail.

Références

Pour les livres

[1]-Le soudage (tec 340 office de publication universitaire).université de Constantine, institut de génie mécanique.

[3] : J. G.HICKS « Conception des assemblages soudées » édition Eyrolles année 1981.

[4] : R.VARISELLAZ livre « SOUDAGE éléments de conception et de réalisation. » Edition Dunod, Année 1987.

[7] : C. FERDINAND « Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires » thèse doctorale de l'institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.

[9] : J.BARRALIS et G.MAEDER «Précis de Métallurgie (élaboration- structures- propriétés et normalisation» 5^{ème} Edition Nathan (1990).

[10]: J. H. DEVLATION, W. E. WOOD, «Principles of joining Metallurgy» Metals Handbook Ninth Edition, vol. 6 (1983), p. 21-49.

[19] : C. BORDREUIL, S. Rouquette, G. Fras A. Niel « Prédiction du risque de fissuration en un soudage multipasse »

[23] : B. Saint-Germain « Etude expérimentale et numérique des distorsions des structures mécano-soudées » Thèse de doctorat, 2006, LGMM, Université de Bretagne-Sud.

[24] : C. Derfouf « Effet de la soudure sur la structure de l'acier » thèse doctorale université de Biskra année 2011.

[27]: Suhas V. PATANKAR “Numerical heat transfert and fluid flow“, Année 1980, Hémisphère publishing corporation.

Pour les articles

[2]- Le soudage et le coupage des métaux 2eme édition, v.rybakov, traduire russe par b.pavlov, édition mir moscow

[5]: W. F. SAVAGE, E. F. NIPPES, «A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloy Steel» *Welding Journal Research Supplement* (1976), p. 260s-268s

[6]: W. F. SAVAGE, C. D LUNDIN, A. HARONSON, «Weld Metal solidification mechanics» *Welding Journal Research Supplement* 44 (1965), p.175s-181s.

[8] : R. BLONDEAU, «Métallurgie et mécanique du soudage, » Hermès Science publication, Paris (2001), p.50-67.

[11]: A. F. GIAMEI, E. H. KRAFT, F. D. LEMKEY, «New trends in Materials Processing, American Society for Metals», Metals Park, OH (1976), p 48.

[12] : R. BLONDEAU, *Procédés et applications industrielles du soudage*, Hermès Science publication, Paris (2001).

[13]: R.W. MESSLER Jr, *Principles of Welding*, John Willey & Sons Edi., New York (1999), p 50-55.

[14] : C. R. HEIPLE, J. R. ROPER, R. T. STAGNER, R. J. ADEN, *Surface Active Element Effect on the Shape of GTA, Laser, and Electron Beam Welds*, *Welding Journal Research Supplement*, March (1983), p.72s-77s.

[15] : N. PERRY, S. MARYA, *Evolution du Soudage Multi passes des Aciers Inoxydables, Procédé A-TIG*, Compte rendu de conférence : 9ièmes Journées d'Etude sur la Technologie des Appareils à Pression, Association Française des Ingénieurs en Appareils à Pression, Paris, Octobre (1998).

[16]: C. M. ADAMS Jr., *Cooling rates and peak temperatures in fusion welding*, *Welding journal* 37 (1958), p.210-215.

[17] W. F. SAVAGE, A. H. ARONSON, *Preferred Orientation in the Weld Fusion Zone*, *Welding Journal Research Supplement*, February (1966), pp. 85s-89s.

[18] K. C. YUNG, B. RALPH, *An investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds*, Journal of Materials Processing technology 63 (1997), p.759-764.

[20] : Vilpas Marti «Utilisation de la modélisation pour prédire la micro ségrégation et la résistance à la corrosion par piqûres de soudures en aciers inoxydables austénitiques » dans la revue Soudage et techniques connexes vol. 54, n°5-6, pp. 29-34 Publications du soudage et de ses applications, Villepinte, France.

[21] : T.T.CHAU « une méthode de simulation numérique du soudage a l'arc » matériaux 2006 13-17 Novembre 2006 – Dijon, France.

[22] : M. Rachik «Simulation numérique des procédés numériques de mise en forme et d'assemblage», Habilitation à diriger les recherches, 2003, UTC.

[25] : C. Derfouf, A. Aliwali et Z. Boumerzoug « étude numérique de la variation de température dans le soudage a l'arc électrique sous flux solide des aciers à faibles pourcentage de carbone », IC- WNDT-MI' 10 Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'industrie des Métaux et Alliage 27-28 Novembre 2010 Oran – Algérie-

[26] : C. Derfouf, A. Aliwali « étude numérique de la variation de température dans le soudage a l'arc électrique sous flux solide des aciers à faibles pourcentage de carbone », courrier du savoir N°11, Université de Biskra Mars2010.

ملخص :

في هذه الدراسة الخاصة بمشروع التخرج حددنا انواع الطرق الخاصة بالتلحيم و درسنا العوامل المؤثرة على هذه الطرق والعوامل المؤثرة على اختيار نوع العملية ثم حاولنا نمذجة هذه العملية و محاكاتها و دراسة النتائج المتحصل عليها و تفسيرها.

Résumé:

Dans cette étude, pour le projet de fin d'études a identifié les types de procéder de soudage et étudié les facteurs qui influent sur ces méthodes et les facteurs influençant le choix du type d'opération et puis nous avons essayé cette modélisation et simulation de procédés et d'étudier les résultats obtenus et interprétés.

Summary:

In this study, for the final project study has identified the types of conduct welding and studied the factors that influence these methods and factors influencing the choice of the type of operation and then we tried this modeling and simulation processes and to study the results obtained and interpreted.