

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDE

En Vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur en Génie Mécanique

Thème

***ETUDE DE L'EVOLUTION DES CHAMPS THERMIQUES
LORS D'UNE OPERATION DE SOUDAGE***

Proposé et dirigé par :

**A. BOUHDJAR
M.BELHADEF**

Présenté par :

SMARA ABDELGHANI

2005/2006

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *A mes très chers parents.*
- *A mes frères et mes soeurs.*
- *A toute ma famille.*
- *A tous ceux qui ont de près ou de loin assisté à ma formation.*
- *A tous mes camarades et collègues.*

Remerciements

Tout d'abord je remercie Allah qui m'a donné la santé, la patience, la volonté, La confiance pour terminer ce modeste travail.

J'exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur A. BOUHDJAR enseignant à L'école Nationale Polytechnique et chercheur au C.D.E.R d'avoir proposé le sujet et de m'avoir accepté de travailler sous sa direction

Je remercie également monsieur M.BELHADEF enseignant à ENP pour ces conseils judicieux, et orientations tout au long de ce travail

Je remercie monsieur M.HOUSSINE à son aide et sa patience.

Mes remerciements vont aussi aux messieurs les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je remercie mes amis ABDELHAKIM, TALHA, ABDALLAH,...

En fin, je remercie tout qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Abdelghani

ملخص :

تهدف هذه الدراسة الى تحديد السلوك الحراري لوصاية تلحيم وذلك باستعمال طريقة الاحجام المنتهية وعن طريق التجربة. هذه الدراسة سمحت لنا بتحديد كل من المنطقة المنصهرة و المنطقة المؤثر عليها حراريا. اللتان تمثلان المناطق الهشة في التركيب.

الكلمات المفتاحية:

انتشار الحرارة ، التلحيم، طريقة الاحجام المنتهية المنطقة المنصهرة، المنطقة المؤثرة عليها حراريا

Résumé :

L'objet de cette étude, est la détermination du comportement thermique du joint soudé, en utilisant la méthode des volumes finis dans le but de déterminer l'étendu des zone a risque dans une structure soudée.

L'évolution des étendus des zones à risque, zone fondue (ZF) et zone affectée thermiquement (ZAT) a été faite su la base des résultats obtenus par la simulation numérique et par l'expérimentale.

Mots clés : transfert de chaleur, soudage, méthode de volume finit, ZAT, ZF.

Abstract :

The aime of this work, is the ditermination of the thermal behavior of a welding joint, byusing finite volumes methode.

The évaluation of risky zone, fusion zone (FZ) and heat affected zone (HAZ) haz been made on the baze of the results obtained for numerical simulation and the experimental .

Key works : Heat transfer, welding, finite volume methode , HAZ , MZ

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I:

Résumé bibliographique

I.1.Introduction.....	01
I.2.Classification des procédés de soudage.....	01
I.2.1. Classification par type de source d'énergie et Eléments de protection du joint soudé	01
I.2.2. Deuxième méthode de classification.....	02
I.2.2.1. Energie électrique.....	02
I.2.2.2. Energie focalisé.....	04
I.2.2.3. Energie thermochimique.....	05
I.2.2.4. Energie électrothermique.....	05
I.3.Soudage TIG.....	07
I.3.1Principe	07
I.3.2. Générateurs et méthodes d'amorçage.....	07
I.3.3. description de procède.....	08
I.3.2. caractéristique de couple électrode.....	09
I.3.3. condition de soudage.....	11
I.4. Propriété énergétique de l'arc	13
I.4.1. flux énergétique dans la colonne d'arc.....	13
I.4.2. température dans la colonne d'arc	14
I.4.3. effet de la variation de la pression sur la colonne d'arc.....	14
I.5. Phénomène de transfert de métal.....	15
I.5.1.transfert en vol libre	15
I.5.2. transfert par court circuit	15
I.6.Phénomène énergétique de soudage.....	16
I.6.1. énergie de l'arc électrique	16
I.7. les cycles thermiques du soudage.....	17
I.7.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition Thermique.....	18
I.8. Présentation des différentes formes de transfert de chaleur	20
I.8.1Transfert de chaleur par conduction	20
I.8.2 Transfert de chaleur par convection.....	21
I.8.3 Transfert de chaleur par Rayonnement.....	23
I.9 Les aciers inoxydables.....	24
I.9 .1 Système Fer Chrome et ses dérivés.....	24
I.9.2 Classification des aciers inoxydables.....	27
I.9.3 Les propriétés générales des aciers inoxydables.....	28
I.9.4 Les aciers inoxydables austénitiques.....	29

CHAPITRE II

Modélisation et formulation mathématique

II.1. Introduction.....	32
II.2. L'étude thermique de phénomènes de soudage.....	32
II.3. Modélisation du problème du soudage	34
II.3.1 Assemblage de deux plaques métallique minces.....	34
II.3 Configuration géométrique de la source de chaleur	36
II.3.1 Simulation ponctuelle	36
II.4.2 Simulation gaussienne.....	37

CHAPITRE III

Résolution Numérique

III.1 Présentation du problème.....	38
III.2.Principe de la méthode des volumes finis	38
III.3 Présentation du problème bidimensionnel (cas des plaques métalliques minces)...	41
III.3.1 Traitement de terme source	41
III.3.2 Discrétisation de l'équation de la chaleur	42
III.3.3 Condition aux limites	44
III.4 Méthode de résolution	46

CHAPITRE IV

Essai Expérimentaux

IV.1.Introduction	47
IV.2. Procédé de soudage.....	47
IV.3.Réglage des différents paramètres de soudage.....	47
IV.4 dispositif de prise de thermocouple	47
IV.5 Dispositif de soudage.....	49
IV.6 L'examen métallographique de la soudure.....	51

CHAPITRE V

Résultats et interprétations

V. 1 Résultats obtenus par la simulation numérique	54
V.1.1 Choix de maillage	54

V.1.2 Les isothermes.....	55
V.2 Les Résultats obtenus expérimentalement.....	59
V.3. Exploitation des résultats théoriques et empiriques.....	61
V.3.1- Détermination de la taille de la zone affectée thermiquement	61
Conclusion générale.....	62

Nomenclature

Cp : chaleur massique à pression constant.	J /kg.K
En : énergie nominale.	J/m
Ed : énergie dissipée dans le joint soudé.	J/m
Eq : énergie équivalente.	J /m
f : facteur de pondération.	
h : coefficient de convection.	W /m ² K
K : conductivité thermique.	W /mK
I : intensité de courant.	Ampère
U : tension de soudage.	Volt
Sp : coefficient de Tp dans l'expression de terme source.	W/m ³ K
Sc : partie constante de la linéarisation du terme source.	W/m ³
T : température	Kou °C
T : temps	s
V : vitesse.	m/s
ρ : masse volumique	Kg/m ³
σ : constant de stephan- boltzman.	
ε : Emissivité	W/m ² K ⁴
δx : distance entre deux nœuds voisins dans la direction x	m
δy : distance entre deux nœuds voisins dans la direction y	m

Introduction générale

Malgré le développement remarquable de la construction soudée, on observe toujours une méfiance chez le grand public et même chez certains ingénieurs, vis à vis de la technique de soudage, car l'histoire de la soudure a enregistré un certain nombre d'accidents, mais quelque soit le nombre d'accidents produits, il reste extrêmement faible devant les constructions qui se sont bien comportés.

Vu la particularité des caractéristique locale de fusion, l'assemblage soudé est soumis à des traitements mécaniques a des température élevée, subit des retraits est le siège de contraintes résiduelles. La connaissance de ces sollicitations qui sont engendrées par l'opération de soudage, nous permet de déterminer les caractéristiques finales de cordon de soudure au point de vue métallurgique et mécanique. Par conséquent, la première étape d'une carte thermique qui détermine le champs de température dans l'assemblage soudé, et de prédire ainsi les zones à risques à savoir la zone fondu et la zone affectée thermiquement.

La modélisation numérique de l'opération de soudage est une alternative intéressante.

En effet, en permet une meilleure compréhension des mécanismes de formation du cordon de soudure, la simulation numérique permet d'établir les liens de cause à effet entre le mode opératoire et les caractéristiques résultantes du joint soudé. De plus le modèle numérique permet de capitaliser les connaissances acquises par le soudeur ou l'expert scientifique, à travers l'établissement de relations empiriques et de lois physiques ..

Notre travail consiste à définir la ZF et la ZAT, en étudiant la répartition de température lors d'une opération de soudage TIG de deux plaques minces, en tenant compte des variations des propriétés physiques en fonction de température et d matériaux.

Le problème posé est un problème bidimensionnel instationnaire, dont la formulation mathématique donne des équations assez complexes. Donc la résolution du problème nécessite l'utilisation d'une méthode numérique nous avons choisis la méthode des volumes finis.

Un essai de validation de résultats à été effectuée par l'expérimental.

Ce présent mémoire est structuré de la manière suivante :

- le chapitre (I) comporte des généralités sur le soudage, et l'acier inox.
- On a consacré le chapitre (II) à l'étude thermique et la modélisation mathématique du problème de soudage.
- Dans le chapitre (III) On à présenté le méthode numérique utilisée
- le chapitre (IV) a été consacré pour l'expérimental.
- A travers le chapitre (V) on à présenté les résultats obtenus et leurs interprétations .

CHAPITRE I

I.1. INTRODUCTION

Souder est un moyen moderne d'assemblage, Avec la vulgarisation du soudage et l'apparition sur le marché du bricolage de produits performants directement issus du matériel professionnel, souder n'est plus réservé à l'homme de l'art mais accessible à tous pourvu que l'on soit averti et guidé.

Une soudure idéale est celle qui assure une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgique et physiques entre les pièces assemblées, de telle sorte qu'on ne puisse distinguer le joint du métal de ce qui l'entoure[1].

I.2. Classification des procédés de soudage :

Chaque procédé de soudage est défini en ordre principalement par sa source d'énergie et doit satisfaire à un certain nombre de conditions :

La première de ces conditions est de permettre l'élimination de la contamination superficielle des éléments à souder, En effet les procédés de soudage doivent permettre de dissoudre ou de disperser les pellicules superficielles, soit par action chimique d'un flux, soit par action directe de l'arc, soit encore par des moyens mécaniques appropriés.

La seconde condition est de permettre d'éliminer la contamination atmosphérique et ses effets.

la dernière condition est de permettre l'obtention de joints présentant des propriétés désirées [1].

I.2.1. Classification par type de source d'énergie et Eléments de protection du joint soudé

Dans cette méthode de classification les procédés de soudage sont classés par leurs sources d'énergie plus le type d'élément de protection de joint soudé (voir Tableau.1).

Source d'énergie	Eléments de protection du joint soudé				
	Flux solide	Gaz inerte	Gaz actif	Sous vide	Sans protection
Arc électrique	Electrodes enrobées Automatique sous flux solide MAG avec fil fourré	TIG MIG avec fil électrode fusible Electrogaz Plasma	MAG avec fil électrode fusible		Soudage des goujons Avec électrode en carbone Par décharge de condensateur
Résistance électrique					Par point Par bossage Par étincelage En bout, résistance pure
Optique		Laser		Bombardement électronique	Laser
Thermochimique	Aluminothermie	Plasma-arc non transféré	Oxyacétylénique Oxypropane Oxydrique		
Mécanique				Par pression à froid	Par friction Par pression à froid Par ultra sons Par explosion A la forge

Tableau 1 -Classification des principaux procédés de soudage. [2]

I.2.2. Deuxième méthode de classification.

Dans cette méthode les procédés de soudage sont classés à partir du type d'énergie utilisée, ensuite ils sont classés plus particulièrement suivant la forme de l'énergie directement utilisable pour le soudage, par exemple, soudage à l'arc, à la flamme et finalement suivant les modalités de réalisation, par exemple, soudage électrique avec électrodes enrobées, soudage par résistance à la molette.

I.2.2.1. ENERGIE ELECTRIQUE

Les différents procédés de soudage électrique par résistance se basent sur la loi de joule.

❖ Soudage par résistance.

L'apport de la chaleur utilisée pour former le bain de métal fondu est assuré ici par l'effet thermique d'un courant électrique (effet Joule).

❖ Procédés dans lesquels le courant électrique traverse l'assemblage.

Le métal fondu apparaît à l'interface entre les deux pièces à assembler, par fusion locale de ces dernières, au droit du passage des lignes de courant. Ici, suivant l'évolution du métal fondu, il faut distinguer les procédés qui confinent celui-ci entre les deux pièces à assembler et les procédés qui, au contraire, l'expulsent :

❖ Soudage par résistance avec confinement du métal fondu

Ce sont les procédés qui associent à l'effet Joule une pression mécanique appliquée de l'extérieur de l'assemblage, perpendiculairement à celui-ci et au droit de la zone où doit apparaître le métal fondu. Cet effort permet notamment d'écraser celui-ci après sa solidification afin d'améliorer sa compacité. Le confinement du métal fondu au sein du joint évite tout contact avec l'air ; le problème de sa protection ne se pose donc pas.

On peut distinguer :

- Le soudage par résistance par points ;
- Le soudage à la molette ;
- Le soudage par bossages.

❖ Soudage par résistance avec expulsion du métal fondu

Ces procédés associent à l'effet Joule une pression mécanique appliquée, de l'extérieur de l'assemblage, perpendiculairement à celui-ci et sur toute sa surface, après la fusion. Cet effort a pour objet d'éjecter le métal fondu et de permettre la création de la liaison par mise en contact intime des surfaces portées à la température du solidus ; un bourrelet se forme aux extrémités de l'assemblage, il doit être ensuite éliminé. Le métal fondu étant éjecté, le problème de sa protection ne se pose pas.

❖ Procédés dans lesquels le courant électrique circule entre une électrode et l'assemblage

L'effet Joule se développe en partie dans l'électrode mais surtout dans un bain de sels fondus qui surnage au-dessus du métal liquide (sur 40 à 60 mm) et assure aussi la protection du métal

fondu. Les deux liquides sont contenus entre, d'une part, les deux surfaces des pièces à assembler placées verticalement et, d'autre part, des patins en cuivre refroidis par circulation d'eau. Le soudage progresse verticalement de bas en haut, ce procédé est connu sous l'appellation *soudage vertical sous laitier*.

Le fil électrode est fusible et constitue le métal d'apport ; selon l'épaisseur des pièces à assembler plusieurs fils peuvent être utilisés simultanément. Pour réaliser des soudures de grande hauteur on peut utiliser un guide-fil fusible plongeant dans le laitier et fondant en même temps que le ou les fils électrodes ; ce guide-fil fusible apporte sa contribution à l'élaboration du métal fondu ; on parle alors de soudage vertical sous laitier avec guide-fil fusible.

I.2.2.2. ENERGIE FOCALISEE.

❖ Soudage par faisceau laser

L'énergie nécessaire à la fusion locale des pièces à assembler est fournie par un faisceau de lumière monochromatique et cohérente émise par un laser. La focalisation du faisceau permet d'obtenir une grande densité d'énergie sur une très petite surface.

Un apport de gaz neutre (argon) assure la protection du métal fondu mais le faible volume de ce dernier limite les exigences en ce domaine.

❖ Soudage par faisceau d'électrons :

La chaleur nécessaire pour fondre localement les pièces à assembler est dégagée par l'impact d'un faisceau d'électrons dans la zone de contact de ces dernières. Le faisceau crée un trou sur toute la hauteur des pièces en rejetant le métal fondu en arrière (par rapport au déplacement du faisceau) pour constituer le joint.

L'énergie des électrons pouvant être absorbée par des chocs avec des molécules gazeuses, le soudage par faisceau d'électrons est réalisé sous vide ; deux techniques peuvent être utilisées :

- soudage sous vide élevé dans une enceinte qui contient à la fois le canon à électrons et les pièces à souder ;
- soudage sous vide partiel dans une chambre connectée avec une enceinte à vide plus poussée qui contient le canon à électrons ; la chambre de soudage peut être réalisée à l'aide de ventouses lors du soudage de pièces de grandes dimensions.

La protection du métal fondu est ici acquise grâce au vide mais il est nécessaire de faire en sorte que le métal, en fondant, ne libère pas des produits volatils susceptibles de créer

Des porosités dans le métal fondu et de polluer la chambre de soudage.

I.2.2.3. ENERGIE THERMO-CHIMIQUE

❖ Soudage aux gaz.

La fusion des métaux de base et du métal d'apport est obtenue par chauffage avec un chalumeau qui permet, par combustion d'un gaz (acétylène le plus souvent, hydrogène, propane...) avec un comburant (qui est généralement de l'oxygène), de disposer d'une flamme efficace (densité de flux thermique de l'ordre de 100 à 300 W/cm² sur un *tache de chauffe* (surface d'impact de la flamme) dont le diamètre est de l'ordre de quelques centimètres). Cette flamme comporte deux zones ayant chacune un rôle spécifique :

- un **dard** à la sortie immédiate de la buse du chalumeau dont la surface constitue le front de la combustion primaire (celle-ci, si on utilise de l'acétylène, libère de l'hydrogène et du monoxyde de carbone) ; à l'extrémité du dard, la température est très élevée (si on utilise de l'acétylène elle dépasse 3 000 °C) et l'atmosphère est réductrice) ;
- un **panache** où la combustion s'achève.
Ainsi le chalumeau, par les températures atteintes, permet la fusion des métaux et, par son atmosphère, assure la protection du métal liquide contre toute réaction chimique avec les gaz de l'air.

❖ Soudage aluminothermique

Dans ce procédé, la soudure est réalisée par coulée d'un métal en fusion (le métal d'apport) dans un moule constitué entre les deux faces des pièces à assembler placées bout à bout et, éventuellement, préchauffées. Le métal liquide est élaboré sur place par aluminothermie, c'est-à-dire par réaction exothermique entre des oxydes (du métal qui doit constituer le métal d'apport) et de l'aluminium en poudre. Lors de la coulée du métal d'apport, la surface des pièces à assembler est fondue avant que la solidification ne constitue l'assemblage.

La protection du métal fondu est assurée par le laitier qui se forme au cours de la réaction aluminothermique.

I.2.2.4. ENERGIE ELECTRO –THERMIQUE

❖ Soudage à l'arc

Pour amorcer un arc électrique, il faut disposer d'un circuit électrique et d'une source d'énergie. L'alimentation de l'arc se fait à partir d'un transformateur de soudage si l'on soude

en courant alternatif, ou bien avec l'utilisation d'un convertisseur de soudage, d'un groupe électrogène à combustion interne ou d'un redresseur de soudage si l'on met en œuvre le courant continu. A partir de la source d'énergie, le courant est amené par les câbles de soudage, par le porte-électrode à l'électrode et à la pièce à souder entre lesquelles se produit un arc. [3]

❖ **Protection du joint soudé contre l'action de l'air en présence de l'arc**

Durant le soudage à l'arc, le bain de fusion alimenté par le métal de base et le métal d'apport doit être protégé des gaz de l'air (Oxygène, Azote, Hydrogène) afin que ceux-ci ne pénètrent pas dans le métal fondu ce qui pourrait affecter les propriétés mécaniques du joint de soudure. C'est pour cela qu'on prévoit la protection de la zone d'arc (l'électrode mise à chaud, l'arc proprement dit et le bain de fusion), on distingue les procédés suivants de soudage à l'arc:

- Le soudage avec l'électrode enrobée;
- Le soudage au fil fourré;
- Le soudage sous gaz protecteur;
- Le soudage sous flux;
- Le soudage au fil auto protégé;
- Le soudage à la protection mixte.

Une électrode enrobée est constituée d'une âme en acier revêtu d'un mélange de substances pulvérulentes tenues en place par un liant. Le soudage avec électrodes enrobées assure une meilleure qualité du métal constituant fondu. La protection du métal contre l'action de l'air est obtenue grâce à la formation d'un laitier et des gaz qui se dégagent lors de la fusion de l'enrobage. Les électrodes enrobées sont destinées au soudage manuel où deux opérations sont obligatoirement effectuées par le soudeur à la main: l'amenée continue de l'électrode dans la zone de soudage et le déplacement de l'arc le long de la ligne de soudure. Le soudage manuel avec électrodes enrobées permet de réaliser des soudures dans n'importe quelle position et dans des endroits d'accès difficiles.

S'il s'agit du soudage sous flux, l'arc est maintenu sous le flux pulvérulent qui recouvre l'arc et la zone de soudage.. Le flux protège le métal fondu contre les gaz extérieurs, assurant ainsi une bonne qualité du joint soudé. Le soudage à l'arc sous flux est utilisé sur des machines automatiques et semi-automatiques.

Le soudage sous gaz protecteur est caractérisé par l'amenée d'un jet de gaz de protection, à travers le porte-électrode, dans la zone d'arc. Le soudage peut s'effectuer aussi bien avec une

électrode fusible qu'avec une électrode réfractaire, à la main, en semi-automatique ou en automatique. En qualité de gaz de protection on utilise le gaz carbonique, l'argon, l'hélium ou un mélange de gaz. Les gaz inertes sont surtout utilisés pour le soudage des aciers alliés, des métaux réactifs (aluminium, titane, etc.) et de leurs alliages.

I.3 Soudage TIG (Tungsten Inert Gas):

I.3.1 Principe

Le terme TIG est l'acronyme de Tungstène Inerte Gaz où le terme Tungstène désigne le métal constitutif de l'électrode et le terme de gaz inerte est le type de protection utilisé. Ce procédé de soudage rentre dans la catégorie des procédés de soudage à l'arc avec une électrode non fusible. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire et la pièce sous un flux gazeux, de façon générale, il s'agit d'un gaz ou d'un mélange de gaz rares. L'amorçage se fait grâce au gaz circulant dans la buse qui entoure une grande partie de l'électrode. Le soudage s'effectue en polarité directe (pole - du générateur relié à l'électrode) pour la majorité des métaux et alliages (Aciers, Inox, Cuivreux, Titane, Nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un laps de temps, l'électrode est reliée au pole + du générateur). Il est important de noter que souder de façon continue en polarité directe (pole + relié à l'électrode) détruit cette électrode en la faisant fondre.

I.3.2 Générateurs et méthodes d'amorçage

Les générateurs utilisés sont des générateurs dont la courbe tension intensité est de type plongeante, c'est-à-dire que pour une variation de tension dans une plage donnée, l'intensité va peu varier. Ces générateurs peuvent également s'employer pour le soudage à l'électrode enrobée. Il existe 2 façons d'amorcer l'arc par le soudeur :

- Au toucher : le soudeur va faire entrer en contact l'électrode avec la pièce à souder puis relever sa torche afin de "tirer" un arc électrique. Cette méthode peut être utilisée avec tous les générateurs de soudage mais peut créer une inclusion de [Tungstène](#) pour les soudeurs peu expérimentés. Cette méthode ne s'emploie pas pour les machines de soudage automatiques TIG.
- Par hautes fréquences : pendant un laps de temps très court, le générateur va émettre un courant de haute fréquence entre l'électrode et la pièce et ce, afin d'amorcer l'arc.

I.3.3. Description du procédé.

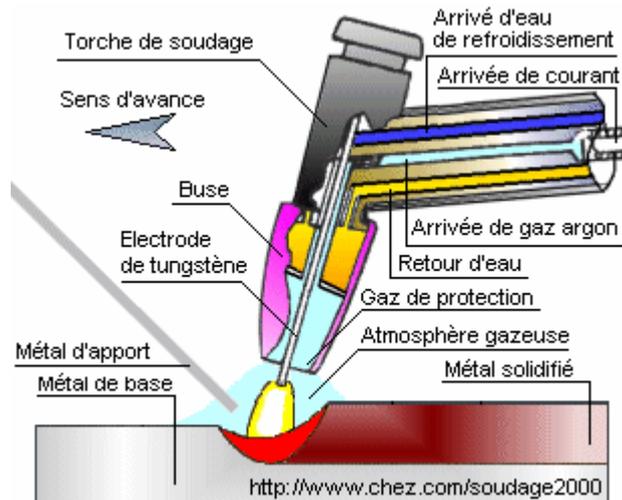


Figure I.1- Principe du soudage TIG. [4]

Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé TIG qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.

De même que les procédés à fils fusibles, le procédé TIG peut s'automatiser facilement.

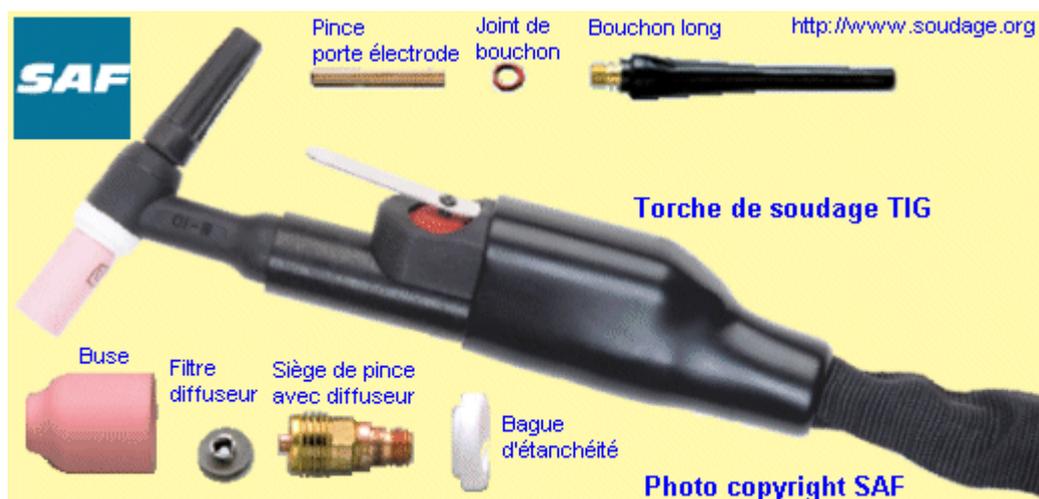


Figure I.2- Description de la torche TIG. [5]

Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables. Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 A environ en courant continu (par exemple: Pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée à une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le réserve aux applications requérant qualité et précision comme pour les aciers inoxydables où on cherche la meilleure efficacité contre la corrosion des joints soudés.

I.3.4. Caractéristiques du couple électrode/protection gazeuse

Electrode: Le tungstène, pur ou additionné de thorium (1 à 2%) et/ou de zirconium (0,5 %), est l'unique matériau susceptible de constituer l'électrode réfractaire du procédé TIG (tableau 2)

Compte tenu des densités de courant admissibles, les électrodes de tungstène ont des diamètres de quelques millimètres. Les longueurs, de quelques décimètres, sont déterminées par les dimensions des torches.

L'addition de thorium fournit à l'électrode une meilleure émissivité, une meilleure densité de courant, une meilleure résistance à la contamination et par suite une plus longue durée d'emploi.

Le tableau 2 donne les intensités recommandées selon le diamètre, le type d'électrode et la nature du courant. Ces conditions permettent de maintenir chaque électrode dans le domaine thermique optimal de fonctionnement et d'obtenir une bonne stabilité et un bon amorçage.

En service, l'électrode se pollue plus ou moins vite selon les impuretés existant sous forme de traces dans le gaz de protection ou du fait d'une protection défectueuse provenant d'un mauvais réglage du débit de gaz, ou de fuites dans le circuit ou la torche.

Diamètre de l'électrode (mm)	Courant continu		Courant alternatif	
	Polarité directe tungstène pur ou thorié (A)	Polarité inverse tungstène pur ou thorié (A)	Tungstène pur (A)	Tungstène pur (A)
0,5	5 à 20	-	10 à 20	5 à 20
1,0	15 à 18	-	20 à 30	20 à 60
1,6	70 à 150	10 à 20	30 à 80	60 à 120
2,4	150 à 250	15 à 30	60 à 130	100 à 180
3,2	250 à 400	25 à 40	100 à 180	160 à 250
4,0	400 à 500	40 à 55	160 à 240	200 à 320
4,8	-	-	190 à 300	290 à 390
6,4	-	-	250 à 400	340 à 525

Tableau 2 –Emploi des électrodes en tungstène en soudage TIG. [3]

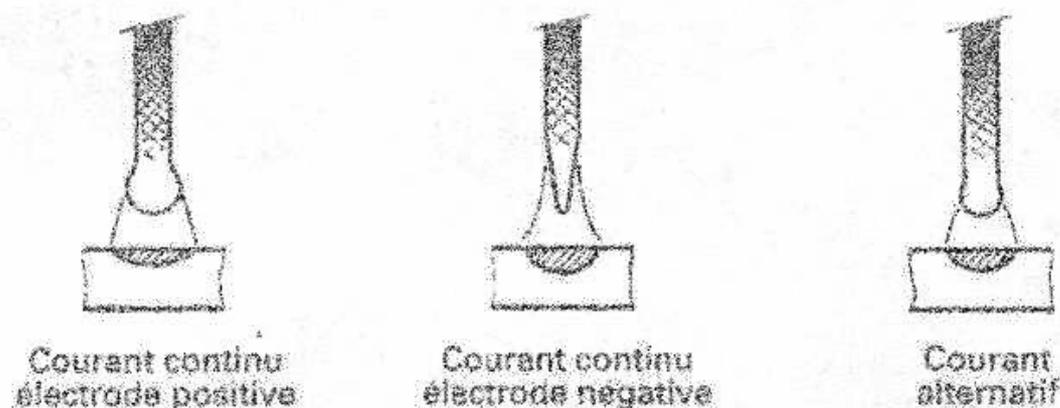


Figure I. 3 Formes des électrodes pour soudage TIG. [3]

Tout contact fortuit de l'électrode avec le métal, pendant le soudage, est également une cause de pollution.

La qualité et la pureté de l'électrode sont des éléments essentiels dans l'obtention et le maintien des conditions de soudage. Tout incident ou encrassement doit donner lieu à un réaffûtage.

Protection gazeuse: Les seuls gaz inertes utilisables du fait de leurs caractéristiques dans le procédé TIG sont l'argon et l'hélium (tableau 3). On peut également employer un mélange des deux et obtenir un compromis entre leurs effets respectifs, ou les additionner d'un réducteur.

L'argon et l'hélium utilisés ont une pureté de 99,95 %. L'hélium existant sous forme naturelle aux États-Unis, son emploi s'y trouve généralisé. Ailleurs, ces gaz sont obtenus par distillation et de ce fait l'argon, moins cher, y est préféré.

La pression de gaz peut avoir un effet sur la pénétration en creusant davantage le bain fondu.

Dans la majorité des applications, les débits de gaz ramenés à la pression atmosphérique sont de l'ordre de 10 à 20 L/min ou 40 à 70 m³ /h. Les vitesses de soudage étant généralement de 0,3 m/min.

Par rapport à l'hélium, l'argon a les avantages suivants: arc plus calme, meilleure action décapante du soudage alternatif des alliages d'aluminium, nécessité d'un débit moindre pour une protection identique et amorçage plus facile.

En revanche, l'hélium fournit une puissance plus élevée et donne une meilleure pénétration.

Gaz	Qualité du gaz	Applications en soudage
Argon	Inerte	Toutes les applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon – hélium (20-80% ou 50-50%)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que le cas précédent
Argon – azote (75-25%)	Réducteur	Cuivre essentiellement
Argon – hydrogène (1%)	Réducteur	Aciers inoxydables

Tableau 3 –Emploi des gaz en soudage TIG

Métal d'apport: Les soudures en chanfrein nécessitent un apport de métal. Celui-ci est introduit directement à l'avant du bain, soit à partir de baguettes nues, en soudage manuel, soit par un dispositif mécanisé semblable à celui du soudage MIG.

I.3.5. Conditions de soudage.

Le Courant d'arc: on peut employer en soudage TIG l'un des trois arrangements suivants (figure 3):

- *courant continu-électrode négatif*, le plus employé, appelé également soudage en polarité directe (*DCSP, direct current straight polarity*) ;
- *courant continu-électrode positif*, rarement utilisé, appelé également soudage en polarité inverse (*DCRP, direct current reverse polarity*) ;

- *courant alternatif*, utilisé pour les alliages d'aluminium et de magnésium.

Du fait de l'absence de transfert de métal, il n'y a pas d'interaction entre le phénomène et la source, et la stabilité de l'arc est remarquable.

Courant continu, polarité directe

Le courant peut être continu ou pulsé.

➤ **Continu**: c'est en réalité un courant constant affecté d'une ondulation caractérisée par son taux T, qui résulte de la technologie du générateur, surtout lorsqu'il est un redresseur polyphasé. C'est alors une fonction périodique alternative à la fréquence du réseau ou à l'un de ses multiples. La présence d'une ondulation de courant se traduit par l'apparition d'ondulation de fusion à la surface du cordon; elle n'est pas gênante lorsqu'elle est limitée. Dans le cas contraire, elle peut correspondre à un élargissement inutile en surface de la zone thermiquement affectée;

➤ **pulsé**: l'intensité prend la forme de créneaux successifs ou pulsations dont on règle la durée, l'intensité et la fréquence. La soudure s'effectue par fusions successives superposées et parfaitement contrôlées grâce à un gradient de température plus élevé. On maîtrise mieux la fusion, car elle est moins sensible à l'environnement thermique des montages

La modulation est utilisée avec bénéfice dans les cas suivants soudage d'épaisseurs inégales, en position, d'alliages d'aluminium ou en accostage difficile.

Les générateurs modernes à transistors sont dotés de la fonction courante pulsée. De plus, il est également possible de pulser l'arrivée de d'apport à la même fréquence et cela apporte de nouveaux paramètres dans l'emploi de ce procédé.

➤ **Courant continu, polarité inverse** La pièce deviant cathode. Son pouvoir émissif est essentiel dans la conduite de ce type de soudage. Dans le cas des alliages d'aluminium, la polarité inverse à un effet décapant par destruction des oxydes, libération d'oxygène et d'électrons de liaison. et cela permet de diminuer ses effets, si besoin, (métaux tendres, microsoudage).

➤ **Courant alternative** II allie les deux effets précédents et se justifie essentiellement dans le soudage des alliages d'aluminium et de magnésium. En fait, jusqu'à ces derniers temps, cette situation a été facilement obtenue par l'emploi de générateurs alternatifs à 50 Hz et pouvant fournir, grâce à des concepts électrotechniques, des ondes

carrées. Actuellement, l'électronique de puissance permet de réaliser des générateurs délivrant une polarité variable plus appropriée. La séquence la plus efficace consiste à diminuer le temps inverse autour 3 ms, d'augmenter le courant correspondant à 1,3 fois l'intensité directe, réglée elle pour une durée de 20 ms. L'effet décapant est tenu sans affecter l'effet thermique principal.

Tension d'arc: si l'on peut gouverner le courant avec beaucoup de précision et de souplesse, il faut se rappeler que l'effet thermique résultant est également fonction de la longueur d'arc; celle-ci doit donc être maintenue constante et/ou réglée avec précision. Cela est possible et nécessaire en utilisation automatique. Les machines sont pour cela équipées d'un système de régulation de tension d'arc qui est un système motorisé agissant sur la position de torche par rapport à la pièce et par suite sur la longueur d'arc, en vue de maintenir la tension constante pour un courant donné.

Amorçage: la nécessité d'un amorçage particulier à distance est une des caractéristiques du soudage TIG. Des dispositifs à éclateurs produisant à l'électrode des décharges sont généralisés car ils sont peu coûteux.

Dans les installations spéciales, ils sont remplacés par des circuits à impulsions, plus puissants, plus efficaces et ne perturbant pas, par rayonnement électromagnétique, l'espace avoisinant.

I.4. Propriétés énergétiques de l'arc.

I.4.1. Flux énergétique dans la colonne d'arc.

La colonne d'arc est caractérisée par deux éléments :

- Une température élevée (le gaz est suffisamment ionisé pour qu'il soit bon conducteur)
- Un champ de vitesse élevé, qui pour des conditions de soudage, est dirigé de l'électrode vers la pièce à souder.

L'importance relative de la conduction et de la convection, peut être évaluée par le nombre de Pecklet (Pe) dont l'expression :

$$Pe = \frac{\rho V L C_p}{k}$$

ρ : Masse volumique du gaz $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

V : vitesse $\left(\frac{m}{s}\right)$

L : longueur d'arc (m)

C_p : Chaleur spécifique à pression constante $\left(\frac{J}{kg.K}\right)$

k : conductivité thermique $\left(\frac{W}{m.K}\right)$

A basse pression P_e peut chuter au dessus de la valeur de 1, ou le transfert de chaleur s'effectue par conduction.

1.4.2. Température dans la colonne d'arc.

La majorité des mesures de température dans la colonne d'arc, ont été faites par spectroscopie. Ces mesures montrent que l'augmentation du courant de soudage, engendrent un élargissement du champ des isothermes au niveau de la surface de l'anode (d'après OLSEN 1957).

La température au voisinage de la cathode est d'environ 2.10^4 K et ne varie pas beaucoup même avec un courant de soudage allant jusqu'à 400 A .

1.4.3. Effet de la variation de pression sur la colonne d'arc.

Les variations de pression influent d'une manière significative sur la forme géométrique de l'arc.

- Pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, il se produit un arc plus concentré au point d'interface arc-pièce.
- Pour des pressions inférieures, il en résulte un arc de grande diffusion et une colonne ronde.

1.5. Phénomène de transfert de métal

Cependant des études scientifiques fondées sur l'emploi de moyens d'investigation tel que la cinématographie à grande vitesse ou la radio cinématographie au rayon X ont permis d'apporter à ce problème un certain nombre d'éclaircissement, que nous résumerons ainsi : L'étude et la visualisation du phénomène de transfert de métal on permis de distinguer deux modes de transfert principaux.

- ❖ Le transfert en vol libre

❖ Le transfert par court circuit

I.5.1.transfert en vol libre

Le transfert en vol libre peut être subdivisé en trois types :

a- Transfert par la gravité (ou globulaire)

Se produit à faible intensité de courant et se forme de grosse gouttes qui se détachent Lorsque leur poids l'emporte sur la force de tension superficielle.

a- Transfert par projection axiale

Se produit à des intensités de courant plus élevées. Les gouttes se détachent avant de devenir trop grosses. Elles transitent à grande vitesse dans la colonne d'arc, elles ont toutes sensiblement les mêmes dimensions.

b-Transfert par pulvérisation

Se produit à des intensités plus élevées à partir de 400 A, et une tension supérieure à 25V il s'agit également d'un mode de transfert par projection axial, mais le rythme de transfert des gouttelettes est rapides que le métal semble s'écouler sous la forme d'une veine fluide à partir de l'extrémité de l'électrode

I.5.2. transfert par court circuit

Durant ce mode, la goutte de métal devient relativement grosse et touche le bain de fusion, ce qui crée un court circuit avant de se détacher de l'électrode , le nombre de gouttes transférées est de l'ordre de 50 à 100 par seconde.

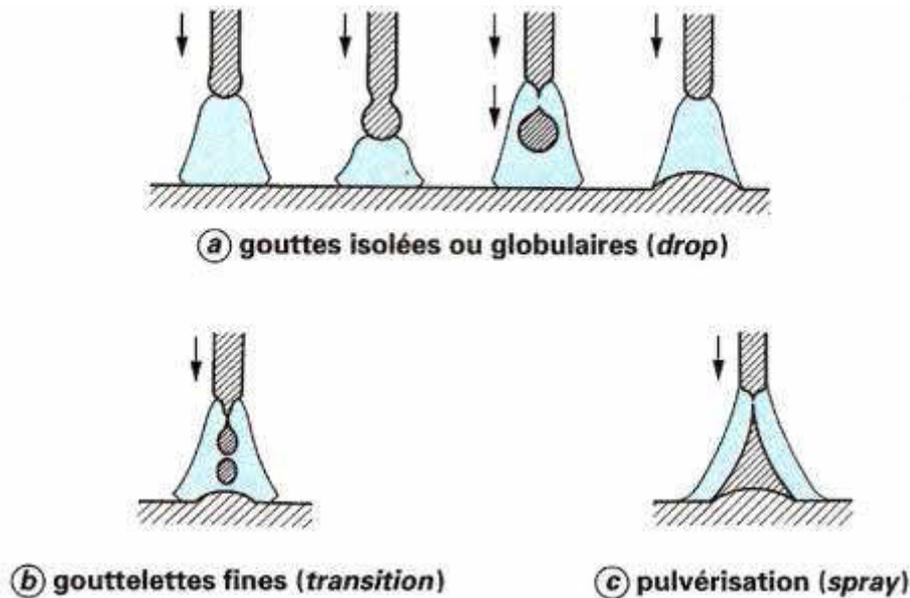


Figure I.4 - Différents modes de transfert de métal

I.6. Phénomène énergétique de soudage

I.6.1. énergie de l'arc électrique

❖ énergie nominale (E_n)

C'est l'énergie fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure, elle est exprimée en J/m , dépend de la tension entre les électrodes (U) et l'intensité de courant (I) et de la vitesse de soudage (V).

$$E_n = \frac{UI}{V}$$

E_n : L'énergie nominale (j/m)

U : la tension (V)

I : Le courant (A)

V : La vitesse d'avance (m/s)

❖ Energie dissipée dans le joint soudé (E_d)

L'énergie fournie au niveau de l'arc n'est pas entièrement transmise au niveau de la pièce à souder en raison des pertes par rayonnement et par convection de la colonne d'arc, elle

Est exprimée en J/cm et donnée par la relation

$$\rho = E_d / E_n$$

ρ : rendement

I.7. les cycles thermiques du soudage.

Au cours de l'opération de soudage, la pièce est soumise à un certain cycle thermique, la zone qui se trouve aux environs de la soudure subit un échauffement jusqu'à une température maximale, suivi par un refroidissement rapide après le passage de la source chaude. En chaque point de cette région la température varie en fonction de temps suivant une certaine loi qui dépend du :

- Procédé de chauffage.
- Nature de métal
- Forme de la pièce

I.7.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.

Notion d'état quasi-stationnaire

Si nous relevons au moyen de thermocouples, les courbes $\theta=f(t)$ en des points A_1 , A_2 ...etc, situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en pleine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par la figure (5) qui conduit aux remarques suivantes:

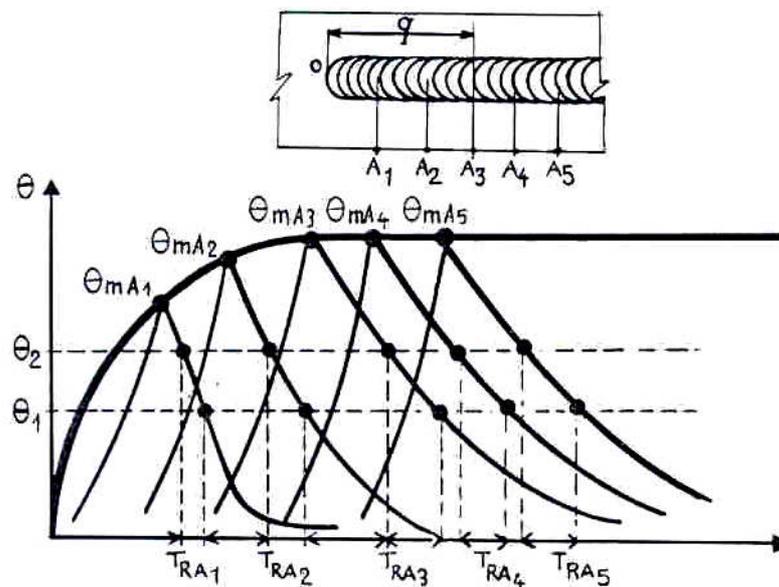


Figure I.5- cycles thermiques le long du cordon de soudure

- La température maximale atteinte θ_m croit avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme (l'énergie demeurant uniforme).
- En même temps, les lois de refroidissement mesurées par le temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques (comme le sont les temps de séjour non illustrés sur la figure (5)). Autrement dit, les courbes $\theta=f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q).

b- Facteurs influençant la répartition thermique

Le métal de base: la nature des pièces à souder influe sur le processus thermique du soudage par leurs propriétés, leurs caractéristiques thermiques (conductivité et donc de résistivité), par leurs masses, leurs formes, leur disposition, et enfin par la température initiale de ces pièces.

Les conditions de soudage: L'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu durant l'opération; d'autres part, l'environnement et ses paramètres ont un important impact sur la répartition thermique (la pression et la composition de l'entourage direct de l'arc électrique). Par exemple, si on augmente la pression, une constriction de l'arc aura lieu, et par suite la température augmentera.

c- Différentes zones dans une soudure :

On distingue la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone fondue (ZF) et le métal de base. La figure (4) montre ces trois zones.

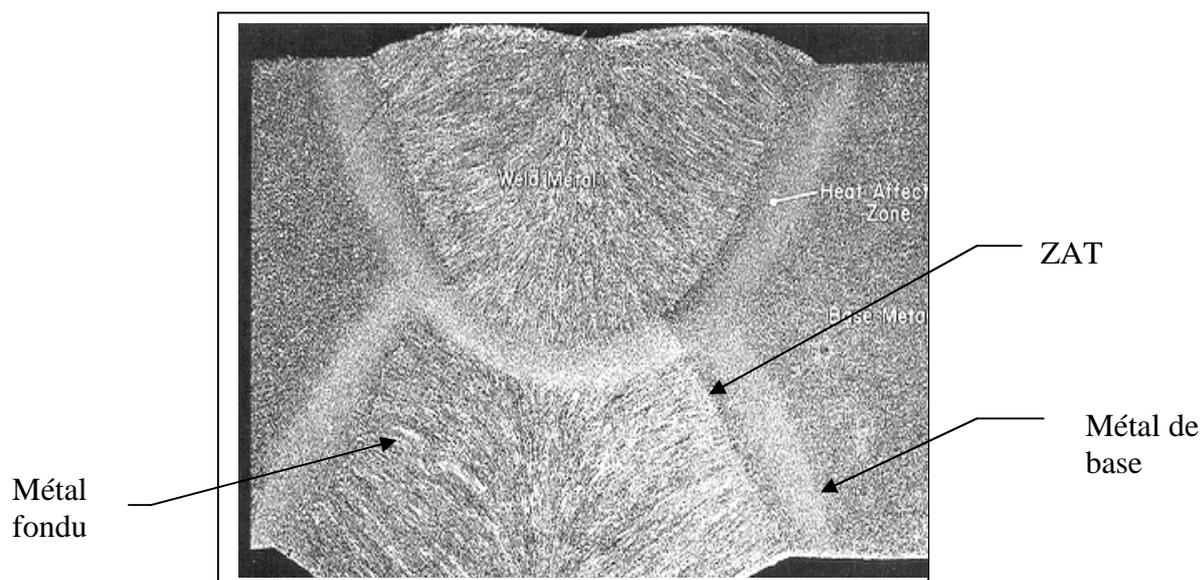


Figure I.6 Les différentes zones dans une soudure

- **Zone fondue :**

Elle est principalement composée de métal d'apport fondu, auquel s'ajoute les parties (régions) qui fusionnent du métal de base . Autrement définie , la zone fondu n'est autre que le cordon de soudure . Cette région , au passage de l'arc , atteint des températures très élevées qui sont supérieures à la température de fusion du métal de base . la zone fondu est caractérisée par une structure à grains fins .

- **Zone affectée thermiquement :**

Dans laquelle, la température est restée inférieure à la température de la fusion, mais suffisante pour modifier la constitution ou la structure métallographique.

Une troisième zone peut exister, souvent très réduite, de fusion partielle où la température a atteint l'intervalle de solidification de l'alliage .

Contraintes :

Le caractère local et transitoire du chauffage, se traduit par une hétérogénéité de température dans la pièce pendant le cycle de soudage. Il en résulte des contraintes internes qui peuvent dépasser la limite de rupture du métal, et produire une déformation permanente de la pièce.

I.8. Présentation des différentes formes de transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est un processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux aux températures différentes. La chaleur peut être transmise par conduction figure(I.7), convection figure(I.8) et (I.9) ou par rayonnement figure(I.10). bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément. [7].

I.8.1 Transfert de chaleur par conduction

Une barre figure (I.7) d'une certaine longueur est chauffée à l'une de ses extrémités. À l'autre extrémité, un thermomètre est implanté au cœur de la barre. Au bout d'un certain temps, le thermomètre manifeste un échauffement dont l'importance et la rapidité dépendent de la nature et de la longueur de la barre. L'échauffement, imposé à l'origine de la barre, s'est transmis par **conduction** à son extrémité.

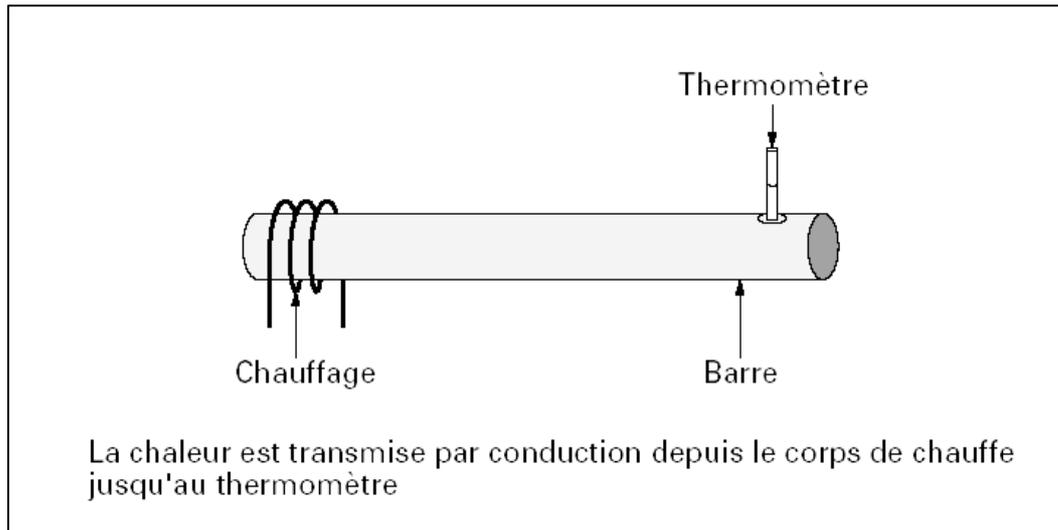


Figure I.7 Mise en évidence de la conduction d'un matériau. [8]

La conduction est définie comme le mode de transmission de chaleur (ou l'échange d'énergie interne) provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide ,liquide, gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique , il n'y a pas de déplacement appréciable de molécule . La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact[9]

La conduction est régie par l'équation

$$\vec{q} = -k.grad T$$

\vec{q} : densité de flux de chaleur (puissance par unité de surface) $[W/m^2]$

T : Température. $[^{\circ}C$ ou K]

K : conductivité thermique dépendent de la nature de matériaux et de sa température.

I.8.2 Transfert de chaleur par convection

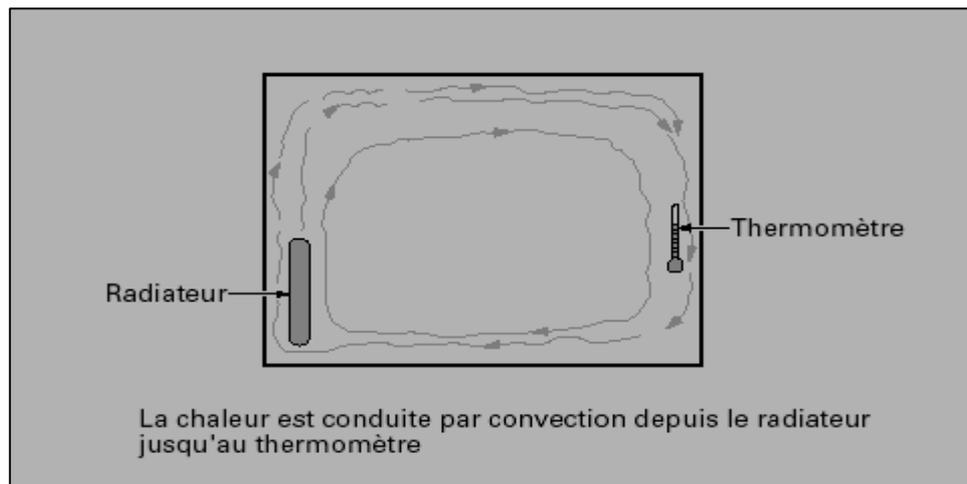


Figure I.8 Mise en évidence du transfert de chaleur par convection. [10]

Dans un local fermé (figure 8), un radiateur dissipe à partir de l'instant t_0 un certain flux de chaleur. Un thermomètre est placé à l'opposé du radiateur. Un écran dissimule au thermomètre la vue du radiateur. Le thermomètre s'échauffe. Le radiateur a chauffé localement l'air à son contact, la variation de masse volumique qui en a résultée a entraîné une circulation de l'air échauffé qui a contribué par son mouvement à élever la température du thermomètre, mettant ainsi en évidence le phénomène de **convection naturelle ou libre**.

Si l'on avait utilisé un ventilateur pour souffler sur le radiateur, le phénomène aurait été accéléré par la **convection forcée**.

La convection est un mode de transfert qui se produit uniquement au sein des milieux fluide, elle apparaît lorsqu'un fluide liquide ou gaz et en mouvement est présente des inhomogénéités spatiales de température la convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une parois et un liquide en mouvement voir figure 7

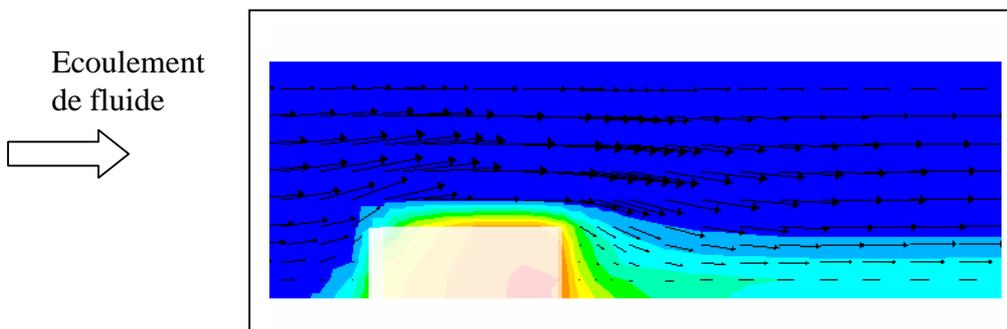


Figure I.9 Convection forcée

On distingue deux modes de transfert par convection :

- **La convection libre :**

Le mouvement résulte simplement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide.

- **La convection forcée :**

Le mouvement du fluide est produit par une action extérieure (pompe, ventilateur ...). La figure (9) illustre l'échange de chaleur par la convection forcée à travers une paroi solide.

La quantité de chaleur transmise par convection entre la paroi solide et le fluide est donnée par la loi de NEWTON.

$$q_{cv} = h.A.(T_p - T_\infty)$$

avec :

h : coefficient d'échange thermique par convection

T_p : température de la paroi .

T_∞ : Température ambiante.

I.8.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Une source de chaleur de faibles dimensions (figure 10) est placée au foyer d'un miroir parabolique. Vis-à-vis, on dispose un autre miroir parabolique et un thermomètre en son foyer image. La température du thermomètre s'élève dès que la source de chaleur est activée, même si aucun rayonnement visible n'est perceptible, que l'on soit dans l'air ou dans le vide pour éliminer les effets de convection.

La chaleur s'est propagée par **rayonnement**.

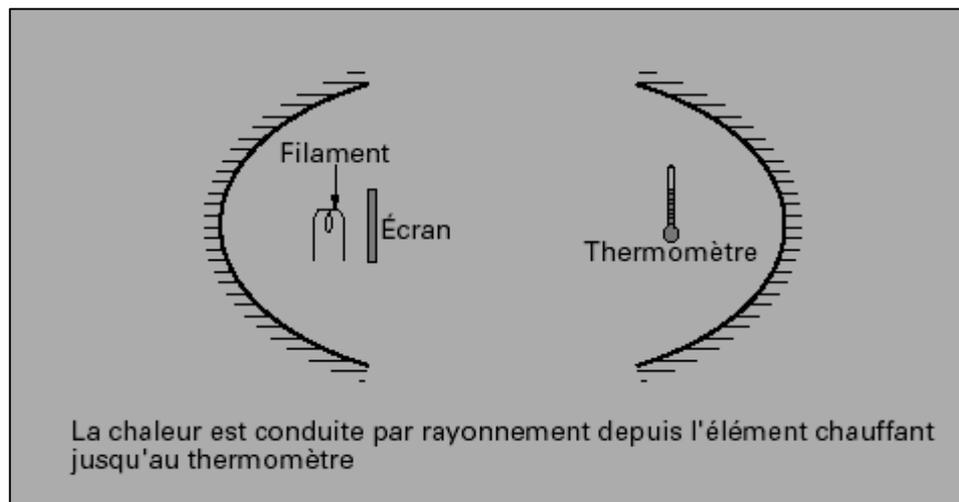


Figure I.10 Mise en évidence du transfert de chaleur par rayonnement. [8]

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé, il est fondamentalement différents des deux autres types de transfert de chaleur. Les substances n'ont pas besoin d'être en contact pour échanger de la chaleur, elle peuvent même être séparées par le vide selon la loi de Stéphane- Boltzmann (1879).

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

q : densité de flux [W / m²]

ε : emissivité

σ : constante de Stéphane-Boltzmann égale à $5.66 \cdot 10^{-8}$ [W / m² . K⁴]

T : température absolue [K] .

I.9 Les aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Développés industriellement à partir du début du vingtième siècle, la croissance de leur production se poursuit régulièrement vu leur large domaine d'utilisation.

Par définition les aciers inoxydables sont des alliages fer – chrome dont la teneur en chrome est au minimum de 10.5% et qui peuvent contenir :

- Des éléments d'addition nécessaires à leur fabrication : Mn, Si
- Des impuretés S, P et pour certains C, N
- Des éléments d'alliage tels Ni, Mo, Ti, Cu, W, Al et pour certains Mn, Si, C et N. ces éléments d'alliage sont ajoutés en quantités variables pour modifier en les améliorant certaines propriétés des aciers inoxydables .

I.9 .1 Système Fer Chrome et ses dérivés :

a- Systèmes fer chrome :

Le diagramme binaire complet à l'équilibre fer - chrome (figure 3) montre que l'existence de la phase γ est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « boucle γ » ; cette situation étant due au chrome qui, compte tenu de sa structure cristallographique (ayant une structure CC), favorise le développement du domaine α .

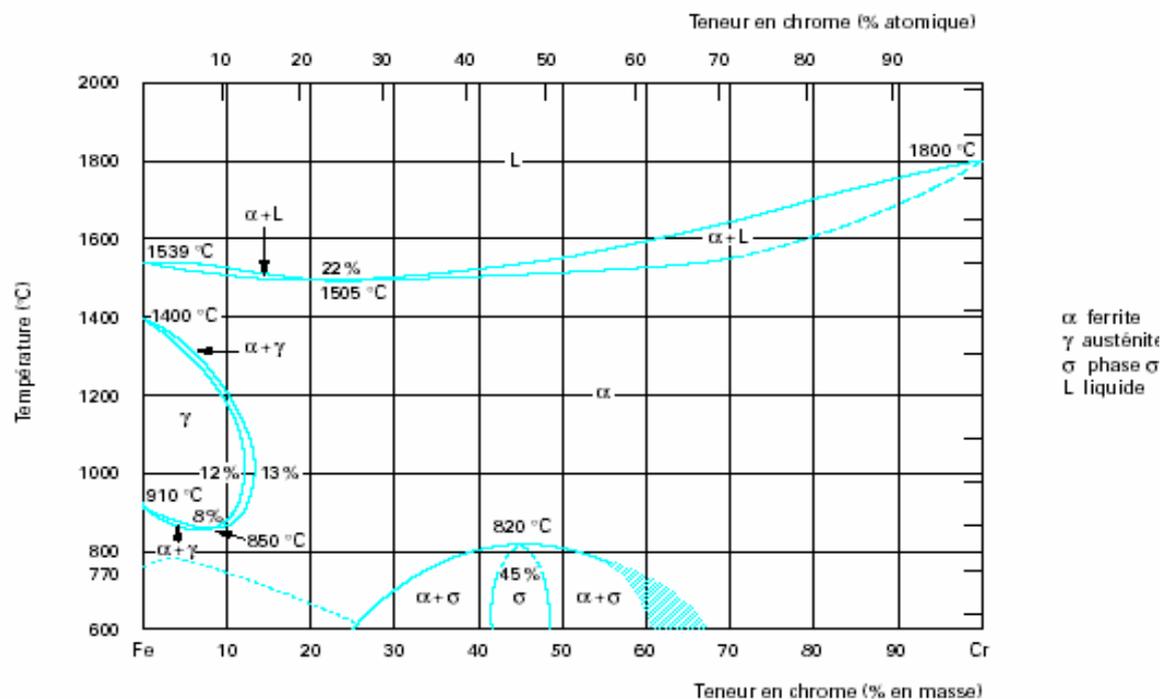


Fig.1-11: diagramme Fe- Cr[4]

Le détail de la boucle γ (figure 12), montre que, pour des teneurs en chrome inférieures à 10,5 %, l'alliage Fe - Cr subit au chauffage une transformation $\alpha \longrightarrow \gamma$ et inversement au refroidissement. Pour des teneurs en chrome supérieures à 11,5 %, seul le domaine α existe. L'alliage métallique ne subit aucun changement de phase et reste

donc ferritique (phase α). Entre une teneur en chrome comprise entre 10,5 et 11,5 %, les deux phases γ et α coexistent sous la forme d'une structure mixte ou biphasée $\gamma + \alpha$.

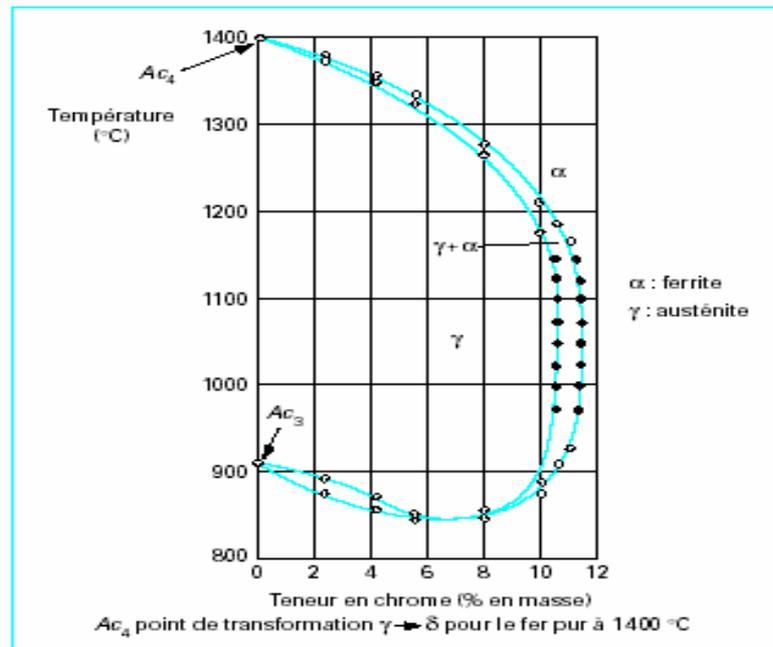


Fig.1-12 : le détail de la boucle gamma

b- Système fer chrome nickel :

Le nickel, élément gammagène, élargit le domaine d'existence de la phase austénitique. La figure 15 qui est une coupe du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni montre le déplacement de la boucle γ vers les teneurs élevées en chrome lorsqu'on augmente la teneur en nickel.

Mais généralement, il est remarquable qu'il faille une teneur beaucoup plus importante en Ni pour élargir la boucle γ qu'il n'en faut avec l'addition de carbone ceci démontre que le carbone a un pouvoir gammagène beaucoup plus prononcé que le nickel.

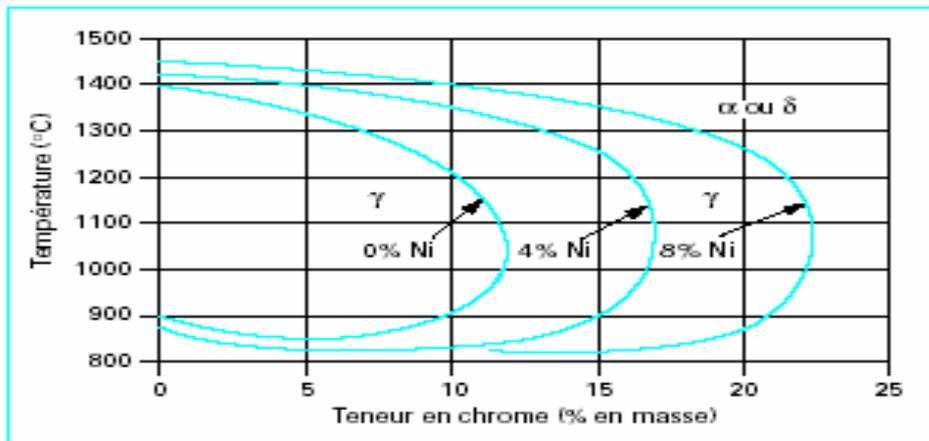


Fig.1-13 : l'influence du Ni sur la boucle γ . [4]

c- Système Fe-Cr-Ni-M :

On note par M, les principaux éléments d'alliages fréquemment rencontrés dans les alliages Fe-Cr-Ni, dans ce paragraphe on va présenter brièvement l'influence de ces éléments sur le système Fe-Cr-Ni :

Le manganèse étant un élément gammagène, stabilise l'austénite formée à haute température mais ne contribue pas à sa formation.

La figure 14 montre, en fonction des teneurs respectives en chrome et en nickel, les limites entre les aciers inoxydables monophasés et biphasés austénitiques suivant la teneur en manganèse.

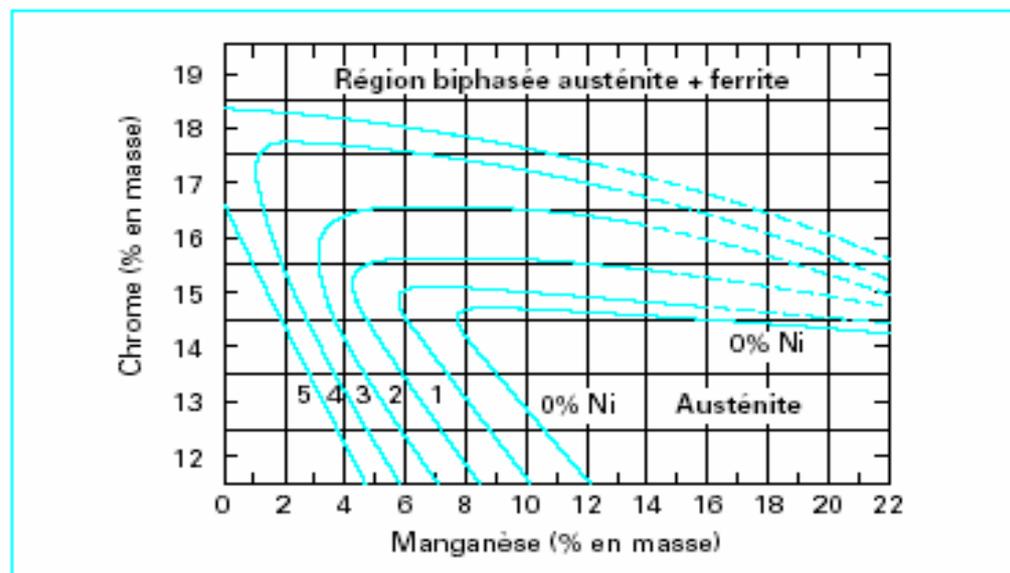


Fig.1-14 : structure des alliages Fe Cr Mn en fonction de la teneur en Ni[4].

Le carbone et l'azote : Le carbone et l'azote, deux éléments fortement gammagènes, contribuent à stabiliser l'austénite.

La solubilité de carbone diminue lorsque la température décroît et une certaine proportion de carbone précipite lentement sous forme de carbures riches en chrome $Cr_{23}C_6$ qui sensibilisent l'acier à la corrosion intergranulaire.

L'azote associé à une basse teneur en carbone permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire.

Le silicium : autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

Le vanadium : élément alphagène, il élève la résistance mécanique à chaud.

Le molybdène : élément alphagène, est fréquemment utilisé à hauteur de 2 à 5 % pour améliorer la corrosion dans presque tous les milieux. Il favorise en outre la formation des phases intermétalliques, notamment la phase sigma σ fragilisante à l'ambiante [5].

Titane et niobium : ce sont deux éléments alphagènes. Ils fixent les éléments gammagènes C et N à l'état de carbures et de nitrures.

Le cuivre : il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid.

En fin, Le **soufre** (qui est une impureté), à des teneurs de l'ordre de 0,2 %, améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.).

I.9.2 Classification des aciers inoxydables :

D'après ce qu'on vu précédemment, l'étendue du domaine γ est très fortement influencée par les autres éléments d'addition et alliages. Certains auront tendance à favoriser l'existence de

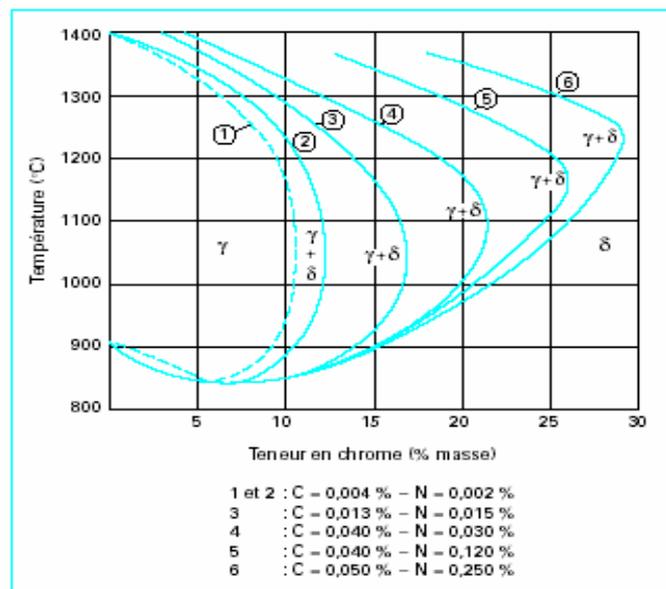


Fig.1-15 : l'influence du C et du N sur la

la phase α (structure ferritique) ; ce sont des éléments dits alphagènes. D'autres, à l'opposé, auront tendance à favoriser l'existence de la phase γ (structure austénitique) ; ce sont les éléments dits gamagènes. Suivant l'équilibre entre ces différents éléments, les aciers inoxydables peuvent avoir les structures suivantes :

- **Martensitique**, dans lesquels la transformation ferrite (α) \rightleftharpoons austénite (γ) se produit comme dans les aciers de construction pour traitement thermique. La présence de chrome confère à ces aciers une forte trempabilité et, de ce fait au refroidissement après austénitisation, la transformation austénite (γ) \Rightarrow ferrite (α') les amènent aisément à l'état martensitique ;
- **Ferritiques**, qui, à la température ambiante ont une structure cubique centrée (α ou δ). dans cette catégorie on trouve des aciers dont l'état ferritique est stable à toute température, et d'autres aciers (dits parfois **semi ferritiques**) qui, à haute température subissent des transformations plus ou moins totales :



- **Austénitiques**, qui à la température ambiante ont une structure cubique à faces centrées (γ). cet état est obtenu par addition d'éléments gamagènes (Ni, C, Mn) ;
- **Auténoferritiques**, dont la structure à la température ambiante est mixte ; c'est-à-dire constituée par un mélange de grains de ferrite et de grains d'austénite.

I.9.3 Propriétés générales des aciers inoxydables :

Les propriétés générales des aciers inoxydables dépendent fortement de leurs structures. Nous avons récapitulé les principales propriétés dans le tableau suivant :

	Ferritiques	Martensitiques	Austénitiques	Austénoferritiques
Masse volumique (g/cm ³)	7,8	7,8	7,9 à 8	7,87
Coefficient de dilatation à 300°C (10 ⁻⁵ K)	10 à 11,5	10,8 à 11,5	16,5	15
Conductivité thermique à 20°C (Ω.m ⁻¹ .K ⁻¹)	20,98	25,1	14,6	16,7
Capacité thermique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	460	460	500	500
Résistivité (μ.Ω.cm)	55	55 à 60	72 à 74	70
Magnétisme	Ferromagnétique	Ferromagnétique	Amagnétique	Ferromagnétique
Limite d'élasticité Rp 0.2(N/mm ²)	370	590 (AISI 420)	270	620
Résistance à la rupture Rm(N/mm ²)	500	730-930 (AISI 420)	620	840
Allongement à la rupture A%	26	> 13 (AISI 420)	56	30
Module d'élasticité en traction 10 ³ N/mm ²	220	200 à 220	200	210

Tableau récapitulatif d'après la référence [4]

I.9.4 Les aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers austénitiques au chrome nickel se caractérisent par leur haute résistance à la corrosion chimique, tant à l'ambiante qu'aux températures élevées. Ces sont les alliages de base pour l'élaboration d'un grand nombre d'aciers réfractaires et d'aciers inoxydables [5].

Leur relative facilité de fabrication et de mise en œuvre, leur aptitude à la déformation et une grande résistance à la corrosion expliquent leur utilisation dans des domaines d'application très variés. La grande stabilité structurale des aciers inoxydables austénitiques dans un large

domaine de température permet de les utiliser à la fois à basse température pour le stockage de gaz liquides et à haute température dans les échangeurs de chaleur.

a-Principaux types d'aciers inoxydables austénitiques :

La classification générale suivante des aciers inoxydables austénitiques peut être proposée :[5]

- Les nuances de base du type 18-10 contenant 0,02 à 0,15% de carbone, plus ou moins sujettes à la sensibilisation à la corrosion intergranulaire selon leur teneur en carbone ;
- Les nuances dites stabilisées vis-à-vis de la sensibilité à la corrosion intergranulaire par des additions de titane ou de niobium ;
- Les nuances à basse teneur en nickel pour favoriser le durcissement par écrouissage ;
- Les nuances à haute teneur en nickel pour accroître l'aptitude à l'emboutissage profond et pour les applications cryogéniques ;
- Les nuances à résistance mécanique accrue par addition de l'azote ;
- Les nuances où le manganèse est substitué en partie au nickel ;
- Les nuances à résistance à la corrosion générale améliorée par addition de molybdène et par fois de cuivre ;
- Les nuances plus résistantes à l'oxydation à chaud grâce à une addition de N, Mo, W, V, Ti, Nb et B ;
- Les nuances pour électrodes de soudage ;
- Les nuances à usinabilité améliorée par addition de soufre, de sélénium, de cuivre,.....

b- Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers austénitiques et austénoferritiques ne présentent pas de zone fragile de soudage. Il n'y a donc pas de risques de fissuration à froid. Ces nuances sont dans l'ensemble considérées comme facilement soudable . Le risque principal, lors du soudage de ces nuances est le risque de *fissuration à chaud*.

Une soudure d'acier inoxydable austénitique peut être le siège d'une fissuration à haute température engendrée par le retrait (car les aciers inoxydables austénitiques ont un

coefficient de dilation thermique élevé) et se développant à haute température (probablement au dessus de 1200 °C) dans les espaces interdendritiques du métal fondu.

La cause en serait l'existence d'un film liquide continu enrichi par le processus de solidification en certains éléments abaissant sa température de solidification tels que : S, Si, Nb, P, B ; et qui restent dans les espaces interdendritiques. Et donc aux joints de la structure de solidification.

La fissuration se développerait par suite du manque de cohésion dû à la présence du film liquide et / ou par suite de la fragilité à haute température des produits solidifiés à partir de ce film liquide [5].

Le remède le plus efficace contre ce risque de fissuration consiste à faire de sorte que le métal fondu contienne une certaine proportion de ferrite (δ) (de 3% à 8%) [5].

Cette fissuration à chaud peut également s'étendre, pour les mêmes raisons, dans les joints de grains de la ZAT au voisinage immédiat du métal fondu. Les remèdes applicables restent les mêmes.

c- Propriétés mécaniques d'une soudure d'acier inoxydable austénitique :

Les propriétés mécaniques d'une soudure d'acier inoxydable austénitique ne posent généralement pas de problème [2]. En effet :

- La résistance et la limite d'élasticité du métal fondu sont au moins égales à celles du métal de base (par suite de la présence de la ferrite et de l'effet du retrait qui écrouit le métal) ; la résilience est corrélativement abaissée mais reste à un niveau largement acceptable ;
- La résistance et la limite d'élasticité du métal à gros grains dans la Z.A.T sont légèrement abaissées mais retrouvent très rapidement le niveau convenable dès qu'une sollicitation provoque un léger écrouissage.

CHAPITRE II

II.1.INTRODUCTION :

Ce chapitre sera consacré à l'étude du transfert thermique lors d'une opération de soudage (TIG), en considérant le cas bidimensionnel instationnaire, pour cela nous étudierons le cas de l'assemblage de deux plaques minces, pour le cas de l'acier inoxydable 304L.

II.2.L'étude thermique du phénomènes de soudage

Le phénomène de soudage est régit par l'équation de la conduction .cette équation peut être obtenue a partir de l'équation de l'énergie donnée sous la forme suivante :

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = -\text{div}\vec{q} + S - p\text{div}\vec{v} + \mu\Phi \quad (\text{II.1})$$

$\rho \frac{dE}{dt}$: Variation de l'énergie interne.

$\text{div}\vec{q}$: Flux de chaleur

S : Source de chaleur interne.

Φ : Dissipation visqueuse

Soit :

$$h = e + \frac{P}{\rho} \quad (\text{II.2})$$

h enthalpie massique

En dérivant l'équation II.2., on obtient :

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \rho \frac{\partial H}{\partial t} - \rho \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{p}{\rho} \right] \quad (\text{II.3})$$

En remplaçons l'équation (II.3) dans(II.1), on obtient :

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = -\text{div}\vec{q} + \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div}\vec{q} \right] + S + \mu\Phi \quad (\text{II.4})$$

$\frac{dP}{dt}$ Représente la compression de fluide

D'après l'équation de la continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0$$

L'équation (II.4) devient

$$\rho \frac{dH}{dt} = -\operatorname{div} \vec{q} + \frac{dP}{dt} + S + \varphi \quad (\text{II.5})$$

L'enthalpie étant fonction de la pression et de la température, on a

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dt} \quad (\text{II.6})$$

la thermodynamique fournit les relations :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho} (1 - T\beta)$$

Avec

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

β : Coefficient d'expansion thermique, ou de dilatation cubique à pression constante :

Finalement on peut écrire l'équation (II.6) sous la forme :

$$\rho C_P \frac{dT}{dt} = -\operatorname{div} \vec{q} + T\beta \frac{dP}{dt} + S + \varphi \quad (\text{II.7})$$

Pour simplifier l'étude de problème de soudage, nous allons considérer quelques hypothèses simplificatrices à l'équation)

- Milieu solide $\vec{v} = 0$ d'où $\phi = 0$: ne considère pas l'écoulement on néglige le transfert par convection

- $\frac{dP}{dt} = 0$ pas de compression du fluide. (on néglige le bain de fusion)

- Transfert de chaleur dans la direction Z négligeable (problème bidimensionnel : plaque minces)

L'équation II.7 devient

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \vec{q} + S$$

Avec :

$$\vec{q} = -K \overline{\text{grad} T}$$

On aura :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (K \nabla T) + S$$

D'où :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (\text{II.8})$$

La résolution de cette équation est d'une difficulté liée à la nature non linéaire de l'expression cependant, certaines simplifications peuvent donner une solution rapide en supposant les propriétés physiques de matériaux (K, C, ρ) indépendante de la température, l'équation (II.8) devient :

$$\rho C \frac{dT}{dt} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + S$$

S : est une source ponctuelle (on va traiter le terme source dans un endroit ultérieur)

On aura ainsi une solution analytique à notre problème.

II.3. Modélisation du problème du soudage

II.3.1. Assemblage de deux plaques métallique minces

Dans cette application nous allons étudier la conduction de la chaleur en régime transitoire.

L'arc électrique ou la source de chaleur se déplace a une vitesse constant l'axe Y est l'axe central au milieu de l'assemblage, schématisé par la figure II.1.

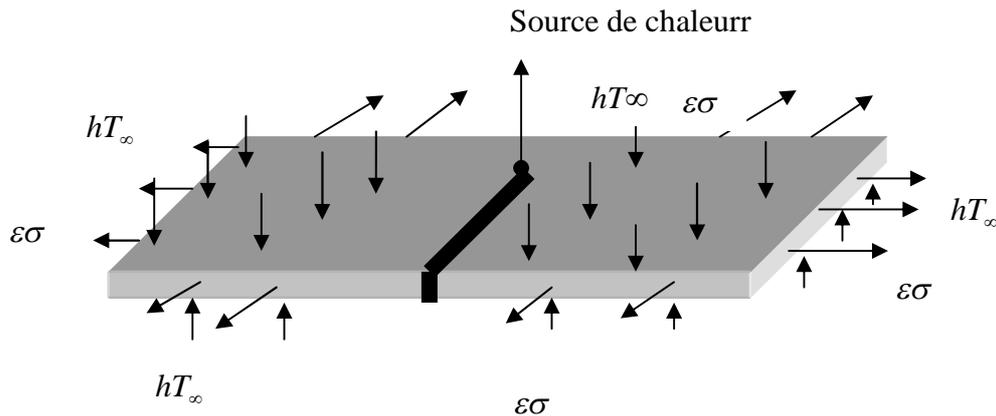


Figure (II.1) Assemblage de deux plaques métalliques minces.

Dans cette étude le métal utilisé est un acier INOX. Dont les propriétés dont les corrélations de leurs propriétés sont : [10]

Pour $T < 1700$ K

$$K(T) = 8.116 + 0.01618 \cdot T \quad \text{W/m.K}$$

$$\rho C_p(T) = 3561240.8 + 010022.3072 \cdot T \quad \text{J/m}^3 \text{K}$$

Pour $T > 1700$ K

$$K(T) = 12.29 + 0.003248 \cdot T \quad \text{W/m.K}$$

$$\rho C_p(T) = 5407942.2 \quad \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$$

La connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites est nécessaire pour décrire le phénomène physique et la résolution mathématique du problème.

- **Condition initiale :**

Initialement les plaques à souder sont à une température T_0 égale à la température ambiante ($T_0 = 300\text{K}$)

- **Conditions aux limites :**

Les frontières de l'assemblage sont le siège de déperditions calorifique par convection et rayonnement.

La densité de flux de chaleur est donc donnée par la relation : [11]

$$q_P = h(T_\infty - T_P) + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T_P^4)$$

Avec :

h = coefficient d'échange par convection. $h = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

T_P température de bord de l'assemblage.

T_∞ : température ambiante.

ε : Émissivité thermique = 0.82

σ : Constante de STEPHAN-BOLTZMAN ($\sigma = 5.66 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

$$\text{Pour } x=0 \text{ et } \forall y \Rightarrow -K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_P - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_P^4 - T_\infty^4)$$

$$\text{Pour } x=L \text{ et } \forall y \Rightarrow -K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h(T_P - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_P^4 - T_\infty^4)$$

$$\text{Pour } y=0 \text{ et } \forall x \Rightarrow -K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=0} = h(T_P - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_P^4 - T_\infty^4)$$

$$\text{Pour } y=L \text{ et } \forall x \Rightarrow -K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=L} = h(T_P - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_P^4 - T_\infty^4)$$

[11]

II.4 Configuration géométrique de la source de chaleur :

II.4.1 Simulation ponctuelle

L'arc électrique est assimilé à une source de chaleur ponctuelle et mobile, qui peut être remplacée par une série de sources ponctuelles instantanées placées les unes à la suite des autres, le long de la trajectoire de la source mobile (cordon de soudure). [12]

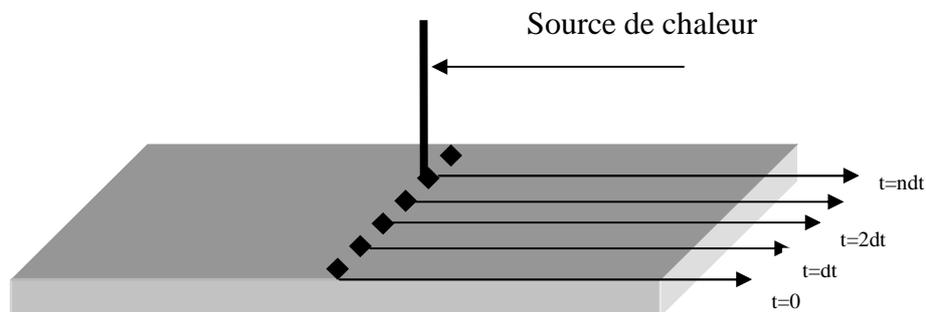


Figure.II.2 Simulation ponctuelle de la source

II.4.2 Simulation gaussienne :

Dans ce cas la source de chaleur est loin d'être ponctuelle mais plutôt gaussienne (sa forme est ellipsoïdale). La littérature propose l'expression suivante pour ce modèle de source [13]

$$q = q_0 \text{EXP} \left(-3 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right)$$

CHAPITRE III

III.1 Présentation du problème

L'équation qui régit le phénomène de conduction de la chaleur est une équation différentielle aux dérivées partielles non linéaire et elliptique.

Vu sa complexité mathématique, on fait appel aux méthodes numériques pour la résoudre.

Plusieurs méthodes numériques ont été développées pour la résolution des équations aux dérivées partielles rencontrées dans le domaine de la mécanique de fluides et des transferts thermiques dont on peut citer :

- La méthode de différences finies.
- La méthode des volumes finis.
- La méthode des éléments finis.

Pour notre cas nous avons choisi la méthode des volumes finis qui a été développée par Patankar et Spalding en 1980 [15], Compte tenu de son sens physique et son adaptation dans la résolution des problèmes de mécanique des fluides et transfert thermique.

III.2.Principe de la méthode des volumes finis :

Dans son ensemble, la méthode de volumes finis consiste à définir à l'intérieur du domaine de calcul une grille de points appelés nœuds. Chaque nœud se trouve entouré par un Volume élémentaire (volume de contrôle ou volume fini) sur lequel on va intégrer l'équation Différentielle en considérant un profil de température linéaire. Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectif doivent posséder un côté commun, ce qui va permettre la mise en évidence des propriétés de conservation des flux locaux et globaux

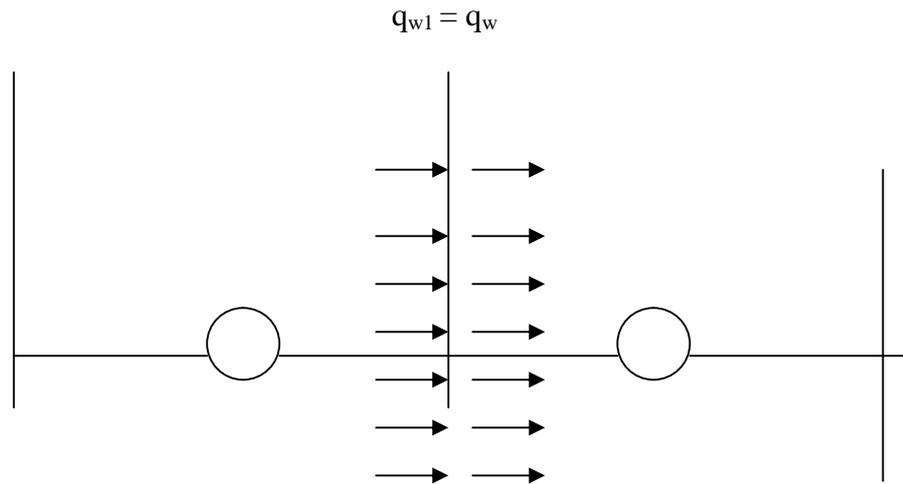


Figure III.1 Propriété de conservation des flux aux niveaux des interfaces

Dans la méthode des volumes finis, il faut d'abord discrétiser le domaine, c'est à dire Mettre en place les réseaux de points ou maillage, et leurs volumes de contrôle associés, pour Cela il existe deux choix :

Le premier choix ou pratique (A) : consiste à définir d'abord la grille de points, et de Placer ensuite les faces des volumes de contrôles à mi-distance de deux nœuds consécutifs. Ceci donne des volumes de contrôles réguliers autour de points internes du maillage, et des demi volumes près des frontières. Pour un maillage non uniforme tandis que chaque face d'un Volume de contrôle est toujours placée au milieu de deux points du maillage, chaque point du maillage n'est pas nécessairement au centre du volume de contrôle qui l'entoure.

(Voir figures III. 2et III.3)

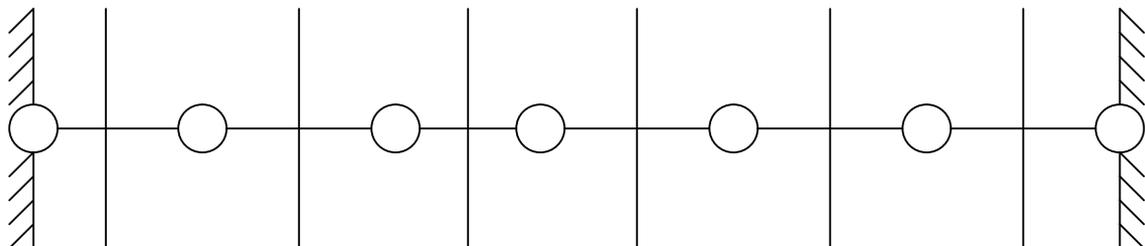


Figure III.2 Emplacement des nœuds et des faces des volumes de contrôles pour la pratique A

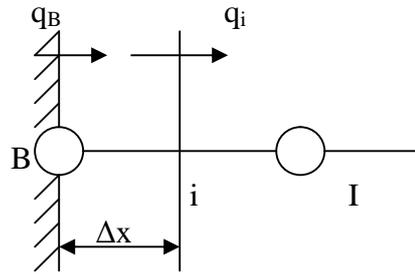


Figure .III.3.Demi-volume de contrôle pour la pratique A .

Le deuxième choix ou pratique (B) : tient compte des discontinuités pouvant toucher Différents paramètres, telle que la conductivité thermique (K), dans une ou plusieurs parties ou régions du domaine. Dans notre méthode de calcul, on considère que ces quantités sont Uniformes à travers le volume de contrôle et on admet les discontinuités au frontières de celui-ci .

Par conséquent, il est très important que l'emplacement des faces des volumes de Contrôle coïncident avec les discontinuités, d'ailleurs c'est pour cela que dans cette pratique on commence d'abord par définir les volumes de contrôles de façon adéquate (faire en sorte que les faces des volumes de contrôles coïncident avec les discontinuités) et placer ensuite les nœuds associés aux centre des volumes, dans ce cas on aura aux frontières des demi volumes avec Δx nul , (figures III.4 et III.5)

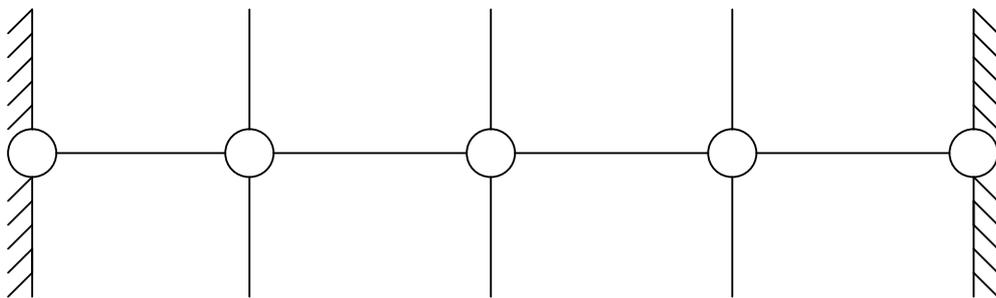


FIG .III.4 .Emplacement des nœuds et des faces des volumes de contrôles pour la pratique B

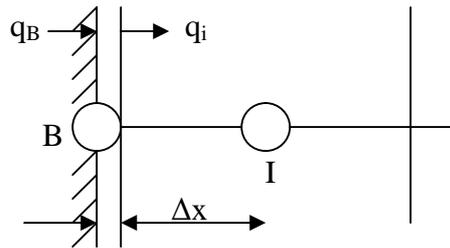


Figure III.5. Demi volume de contrôle avec une épaisseur Nulle pour la pratique B

Notons que pour un maillage uniforme les deux pratiques sont identiques.

III.3 : Présentation du problème bidimensionnel (cas des plaques métalliques minces)

III.3.1 Traitement de terme source (S) :

L'équation discrétisée est une équation algébrique linéaire. Pour la résoudre, on fait appel aux méthodes de résolution des systèmes algébriques.

Cependant on se heurte souvent à des cas de non linéarité dus parfois à l'expression Terme source. On procède alors à la linéarisation de ce dernier de la forme :

$$\bar{S} = S_C + S_P T_P \quad (\text{III.1})$$

Pour ce faire on va utiliser la méthode de la tangente recommandée par Patankar [15]

$$\bar{S} = \bar{S}^* + \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* (T_P - T_P^*) \quad (\text{III.2})$$

avec :

$$S_C = \bar{S}^* - \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* T_P^* \quad (\text{III.3})$$

$$S_P = \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* \quad (\text{III.4})$$

On aura :

$$\diamond \text{ Au niveau du métal de base : } S_C = h_\infty T_\infty + 2\varepsilon\sigma T_\infty^4 + 6\varepsilon\sigma T_P^{*4} \quad (\text{III.5})$$

$$SP = -(h_{\infty} + 8\varepsilon\sigma T_p^{*3}) \quad (\text{III.6})$$

❖ Au niveau du cordon de soudure :

$$SC = h_{\infty}T_{\infty} + 2\varepsilon\sigma T_{\infty}^4 + 6\varepsilon\sigma T_p^{*4} + \eta UI / \Delta x \Delta y \quad (\text{III.7})$$

$$SP = -(h_{\infty} + 8\varepsilon\sigma T_p^{*3}) \quad (\text{III.8})$$

Avec * symbole de la dernière itération

III.3.2 Discrétisation de l'équation de la chaleur :

Soit un maillage bidimensionnel. a chaque nœud P du maillage correspondent deux voisins, e et w, suivant l'axe des abscisses et deux voisins, n et s, suivant l'axe des ordonnées. la partie hachurée représente le volume de contrôle dont la troisième dimension ou épaisseur est prise égale à l'unité

Considérant l'équation régissant le transfert de chaleur écrite dans un système de coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (\text{III.9})$$

La discrétisation de l'équation (III.9) permet de passer d'une équation aux dérivées partielles à un système d'équations algébriques. On doit intégrer l'équation ci-dessus à travers un volume de contrôle délimité par les interfaces w et e suivant l'axe des abscisse et par s et n suivant l'axe des ordonnées. L'intégration se fait dans un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$. On pose à $t=0$, T_P^0 , T_E^0 , T_W^0 , T_N^0 et T_S^0 Les valeurs au temps $t + \Delta t$ sont T_P , T_E , T_W , T_S et T_N . L'équation intégrée s'écrit alors :

$$\int_s^e \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt dx dy + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^e \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int_w^e S dx dy dt \quad (\text{III.10})$$

Le membre de gauche de l'équation (III.10), devient alors :

$$\int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) dt \cdot dx \cdot dy = (H_p - H_p^0) \Delta x \Delta y \quad (\text{III.11})$$

Avec :

H_p^0 : Enthalpie du nœud considéré à l'instant t

H_p : Enthalpie du nœud à l'instant $t + \Delta t$

Et :

$$H_p^0 = \rho^0 C_p T_p^0 \text{ et } H_p = \rho C_p T_p$$

❖ Le premier terme du membre droit de l'équation III.10 s'écrit

$$\iiint \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \Delta t \Delta y \left[\frac{(K_e T_E - K_e T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{(K_w T_P - K_w T_W)}{(\delta x)_w} \right] \quad (\text{III.12})$$

❖ Le deuxième terme du membre droite de l'équation III.10 s'écrit :

$$\iiint \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \Delta t \Delta x \left[\frac{(K_n T_N - K_n T_P)}{(\delta y)_n} - \frac{(K_s T_P - K_s T_S)}{(\delta y)_s} \right] \quad (\text{III.13})$$

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p \delta t = [f T_p + (1-f) T_{p0}] \Delta t$$

Après simplification des termes, nous aurons :

$$a_p T = a_e (f T_e + (1-f) T_E^0) + a_w (T_w + (1-f) T_w^0) + a_N (f T_N + (1-f) T_N^0) + a_s (f T_s + (1-f) T_s^0)$$

On pose $f=1$ (nous avons choisi un schéma totalement implicite, parce qu'il assure une stabilité inconditionnelle).

On aura:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_S T_S + a_N T_N + b$$

Avec:

$$a_E = \frac{K_e \Delta y}{(\delta x)_e}; \quad a_W = \frac{K_w \Delta y}{(\delta x)_w}; \quad a_N = \frac{K_n \Delta x}{(\delta y)_n}; \quad a_S = \frac{K_s \Delta x}{(\delta y)_s}; \quad a_P^0 = \frac{\rho C_P \Delta x \Delta y}{\Delta t};$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y + \rho^0 C_P^0 \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} T_P^0 \quad \text{et} \quad a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y$$

III.3.3 Condition aux limites :

A présent, nous allons discrétiser les conditions aux limites cités aux chapitre précédent données par la relation :

$$q_p = h(T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_\infty^4).$$

Cette équation est du 4^{ème} degré, elle nécessite donc une linéarisation.

$$q_p = h(T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

T_p^* : est la valeur de T_p à l'itération précédente.

L'équation , peut se mettre sous la forme :

$$q_p = f_c + f_p T_p.$$

Avec

$$f_c = h(T_p^* - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

$$f_p = 0$$

Ainsi, les équations aux limites se présentent comme suite :

• **Face supérieure :**

$$-k_s \frac{dT}{dy}_{y=1} = h(T_p^* - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

$$-k_s \left[\frac{T_p - T_s}{\Delta y} \right] = h(T_p^* - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

$$\frac{k_s}{\Delta y} T_p = \frac{k_s}{\Delta y} T_s + h(T_p^* - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

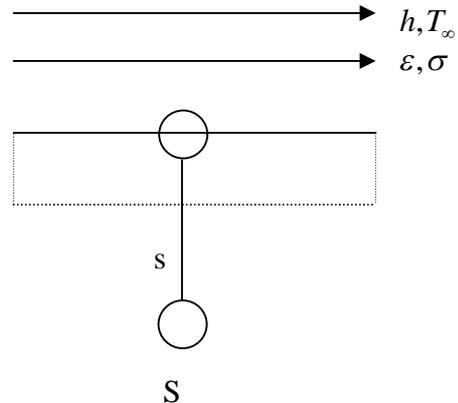
$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

$$a_p = \frac{k_s}{\Delta y}$$

$$a_s = \frac{k_s}{\Delta y}$$

$$b = h(T_\infty - T_p^*) + \varepsilon\sigma(T_\infty - T_p^{*4})$$

$$a_E = a_N = a_W = 0$$



• **Face inférieure :**

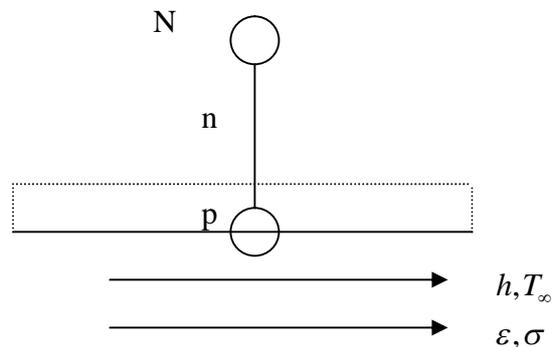
$$a_p T_p = a_n T_n + b$$

$$a_p = \frac{k_n}{\Delta y}$$

$$a_n = \frac{k_n}{\Delta y}$$

$$b = h(T_\infty - T_p^*) + \varepsilon\sigma(T_\infty - T_p^{*4})$$

$$a_E = a_s = a_W = 0$$



- **Face gauche :** puisque les deux plaques sont identiques en terme des matériaux et de dimension on va travailler par symétrie :

On pour cette paroi flux de chaleur nul d'ou $T_p = T_E$

• **Face droite:**

$$a_p T_p = a_w T_w + b$$

$$a_p = a_w = K_w \frac{K_w}{(\delta x)_w}$$

$$b = h(T_\infty - T_p) + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T_p^4)$$

Méthode de résolution

Cette méthode est proposée par Pathankar pour la résolution des équations de type

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b$$

Elle comporte les étapes suivantes :

1. Choisir des valeurs initiales de la variable T pour tout le domaine
2. Choisir une direction du domaine et considérer l'autre direction constante.
Résoudre les matrices diagonales obtenues à l'aide de l'algorithme **TDMA** Pour chaque du domaine des études.
3. répéter partir de 2 la même opération pour l'autre direction.
- 4 Poser les valeurs obtenues comme choix de départ.
5. retourner en 2 jusqu'à convergence.

CHAPITRE IV

IV.1.Introduction

Le but de ce chapitre est l'enregistrer la variation de la température en fonction du temps (les cycles thermiques) et voir la structure de métal après la soudure.

IV.2. Procédé de soudage

Le procédé de soudage que nous utilisé est le soudage TIG qui à été détaillé au premier chapitre, le soudage a été fait.

IV.3.réglage des différents paramètres de soudage

Type de matériau	Vitesse cm/mn	Gaz de protection	Tension V	Intensité A
Acier Inox	7.07	Argon	30	167

IV.4 dispositif de prise de thermocouple

Nous avons placé les thermocouples à l'aide d'un arc électrique puis on les a renforcé par une colle (Araldite)qui peut supporter des températures très élevées.

La position de ces thermocouples est illustrée sur la **figure IV.1**, ces positions sont choisies selon le maillage que nous avons choisi dans la partie simulation pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec ce qu'on a eu dans notre programme informatique.

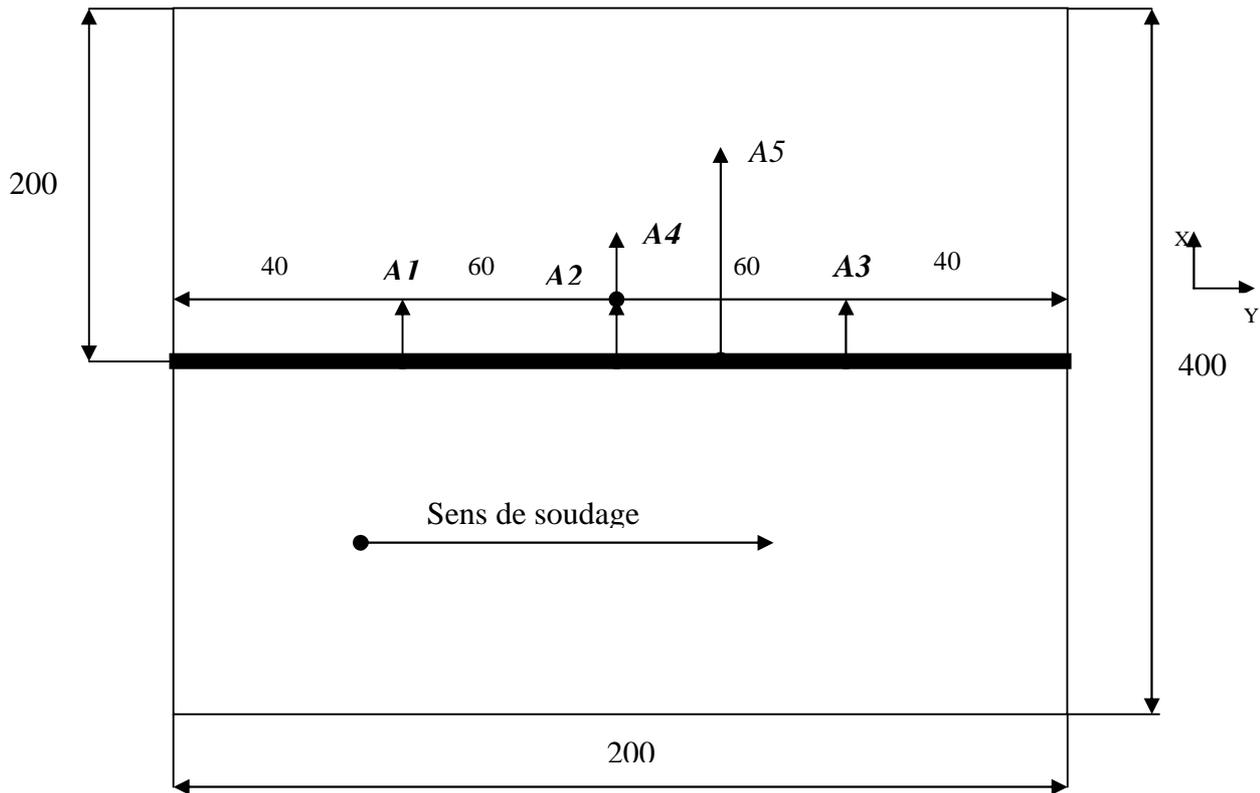


Figure IV.1 Position des thermocouples sur la plaque (l'échelle n'est pas respectée)

Les dimensions de plaques sont :

- Largeur 200mm
- Longueur 400mm
- Epaisseur 1.5mm

Les coordonnées des points de positionnement des thermocouples :

- **A1 (5,40)**
- **A2 (5,100)**
- **A3 (5,160)**
- **A4 (15,100)**
- **A5 (35,130)**



Figure IV.2. Thermocouples collés sur la pièce

Les thermocouples sont reliés à un enregistreur qui donne l'évolution de la température de chaque thermocouple au cours de temps de soudage.



Figure VI.3 enregistreur des cycles thermiques

IV.5 Dispositif de soudage :

Les plaques sont placées bout à bout, et reposent sur un support linéaire pour annuler le contact avec la table métallique où on va souder, sinon la chaleur va se disperser dans cette table et on aura un autre phénomène qu'on n'a pas pris en considération dans notre modèle numérique.

Notre dispositif expérimental est illustré dans la **figure IV.4**



figureIV.4 Dispositif de soudage

IV.6 L'examen métallographique de la soudure :

L'examen métallographique (examen avec un optique comme une binoculaire ou un microscope optique) permet de révéler les 3 zones de soudage (macrographie) ainsi que la structure métallographique (micrographie) de l'échantillon examiné et les inclusions non métalliques

a. Préparation des échantillons pour la métallographie :

Après la réalisation des soudures, nous avons prélevé un échantillon exempt des défauts afin de réaliser notre étude micrographique.

Afin de faciliter la manipulation de cet échantillon prélevé, nous avons procédé à un enrobage à froid.

b. Polissage de l'échantillon :

L'échantillon prélevé a subi une préparation mécanique soignée avec une polisseuse fonctionnant sous eau pour réduire les frottements et éviter les échauffements. Les étapes de cette préparation sont les suivantes :

- un polissage grossier jusqu'au papier abrasif 600 pour éliminer les couches d'attaque.
- Un polissage fin (P 800 - P 1000 – P1200).
- Une finition à l'alumine (0.03 μ m ou 0.5 μ m).

La vitesse de rotation est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. L'échantillon subit une rotation de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est d'environ 2 minutes par granulométrie.

c. Rinçage et séchage :

En passant d'un papier à un autre l'échantillon est rincé soigneusement en utilisant le bac à ultrasons pour assurer un nettoyage en profondeur puis séché.

d. Attaque chimique :

Deux solutions d'attaque ont été choisies :

- Solution 1: 10 ml d'acide nitrique (HNO₃)
100 ml acide chlorhydrique (HCl)
100 ml H₂O

Solution 2 (attaque électrolytique) : 30ml HNO₃ .
70ml H₂O.
Tension =5V

La première solution est utilisée pour révéler les 3 zones de la soudure, tandis que la 2^{ème} pour la mise en évidence de la structure austénite ferrite dans la zone fondue.

e. Observation micrographies :

- *Macrographie* : la 1^{ère} solution a permis de mettre en relief les 3 fameuse zones de soudage zone fondue, zone affectée thermiquement et le métal de bases.

- *Micrographie* : après l'attaque électrolytique nous avons observé au niveau de la ZF une structure biphasée constituée par la ferrite dendritique et l'austénite, en effet la phase ferrite se présente en noir et la phase austénite en blanc (voir les figures ci-dessous).



Figure IV.5 métal de base G= 400

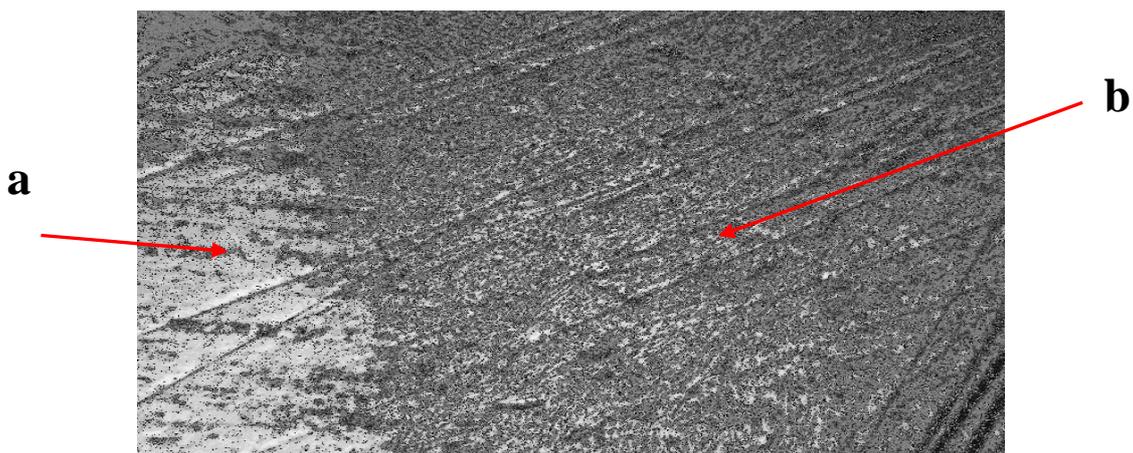


Figure IV.6 (a): Zone affectée thermiquement

(b): zone fondue G= 400

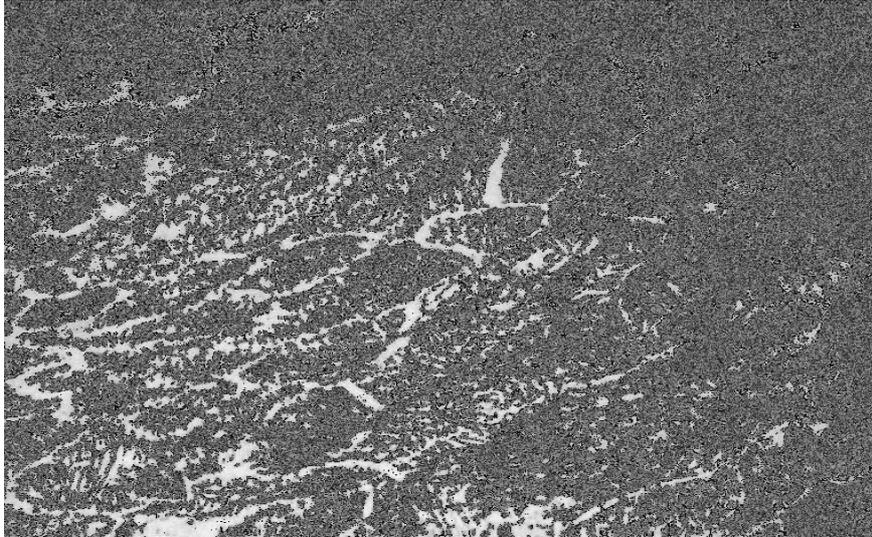


Figure IV.7 Zone fondue G= 400

CHAPITRE V

L'objectif de ce chapitre est de donner la distribution de température dans la plaque. On va discuter en premier lieu les résultats obtenus par la simulation numérique, en suite on va discuter les résultats obtenus expérimentalement.

V. 1 Résultats obtenus par la simulation numérique

V.1.1 Choix de maillage

Le choix pour lequel nous avons opté, consiste à partager l'assemblage soudé en deux zones dans la direction de la longueur de la pièce (suivant l'axe des x), la première zone qui englobe la moitié de cordon de soudure et une partie de l'assemblage.

Pour la zone centrale, un maillage fin est utilisé vu l'importance du gradient de température au niveau du cordon de soudure. Alors que pour le reste de l'assemblage, un maillage plus grossier est employé.

Dans la direction de déplacement de l'arc (suivant l'axe des y), un maillage fin et régulière.

Le choix du maillage auquel nous avons opté est :

80*50 vc

On a suivant l'axe des x :

80 volumes de contrôle

Suivant l'axe des y :

50 volumes de contrôle

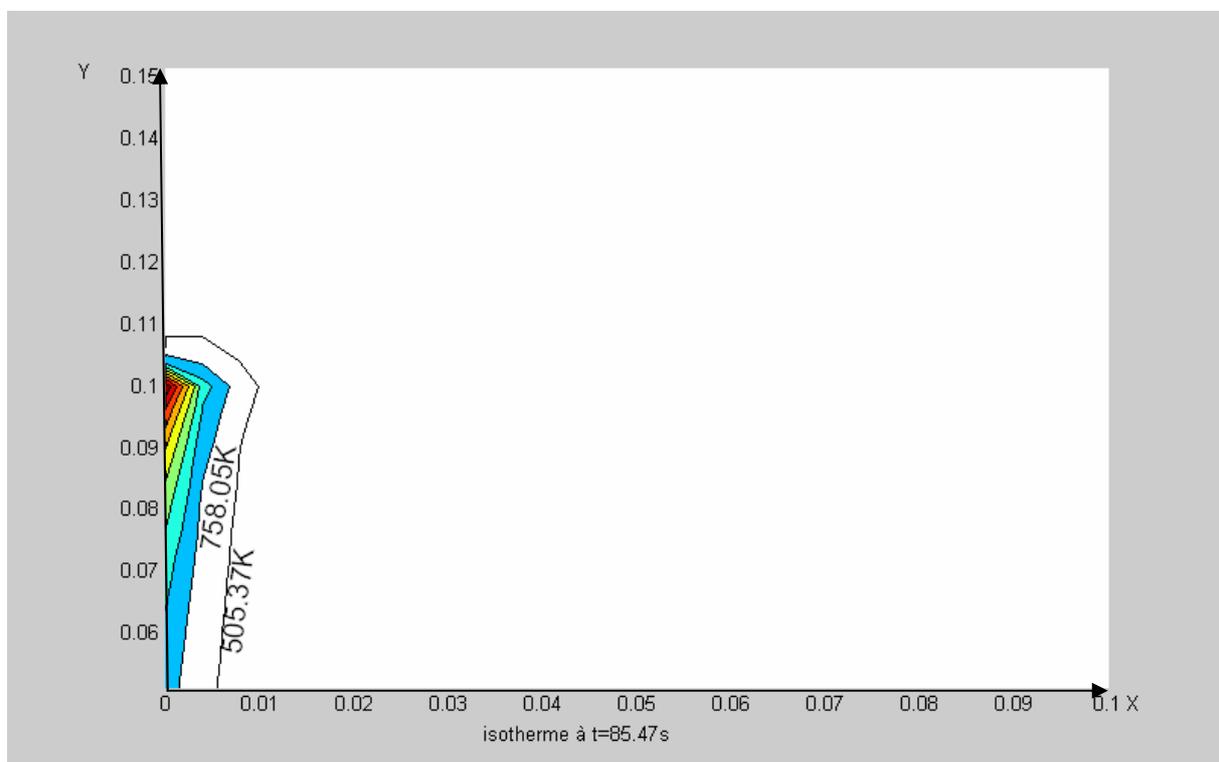
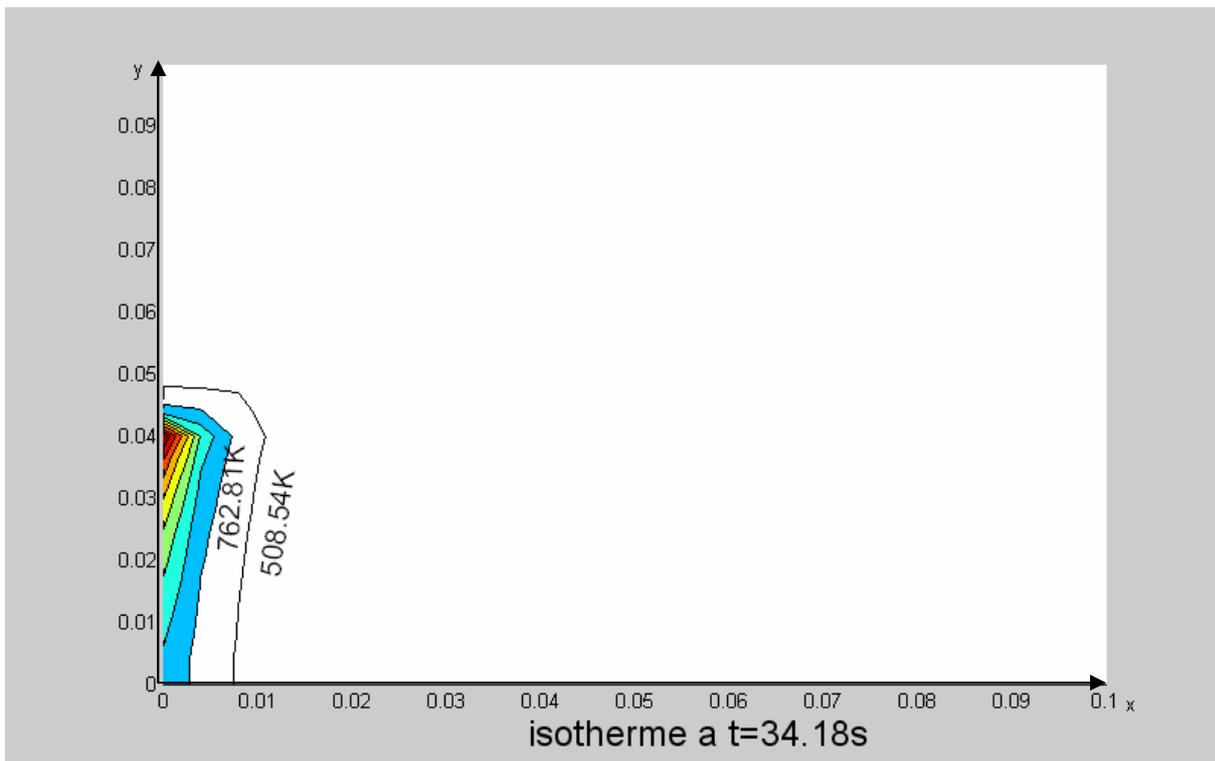
Vs volume de contrôle :

V.1.2. Discussion des résultats :

La figure V.1 représentent le répartition de la température aux différents instants, les isothermes sont resserré sous forme de cercle autour d'une surface d'impact de la source, cela est du à l'important apport de chaleur ce niveau.

Les isothermes s'étale dans les deux direction (x, y) lors de déplacement de la source, cet élargissement caractérise le transfert de chaleur par conduction.

Ces résultats sont obtenus pour l'acier INOX304L



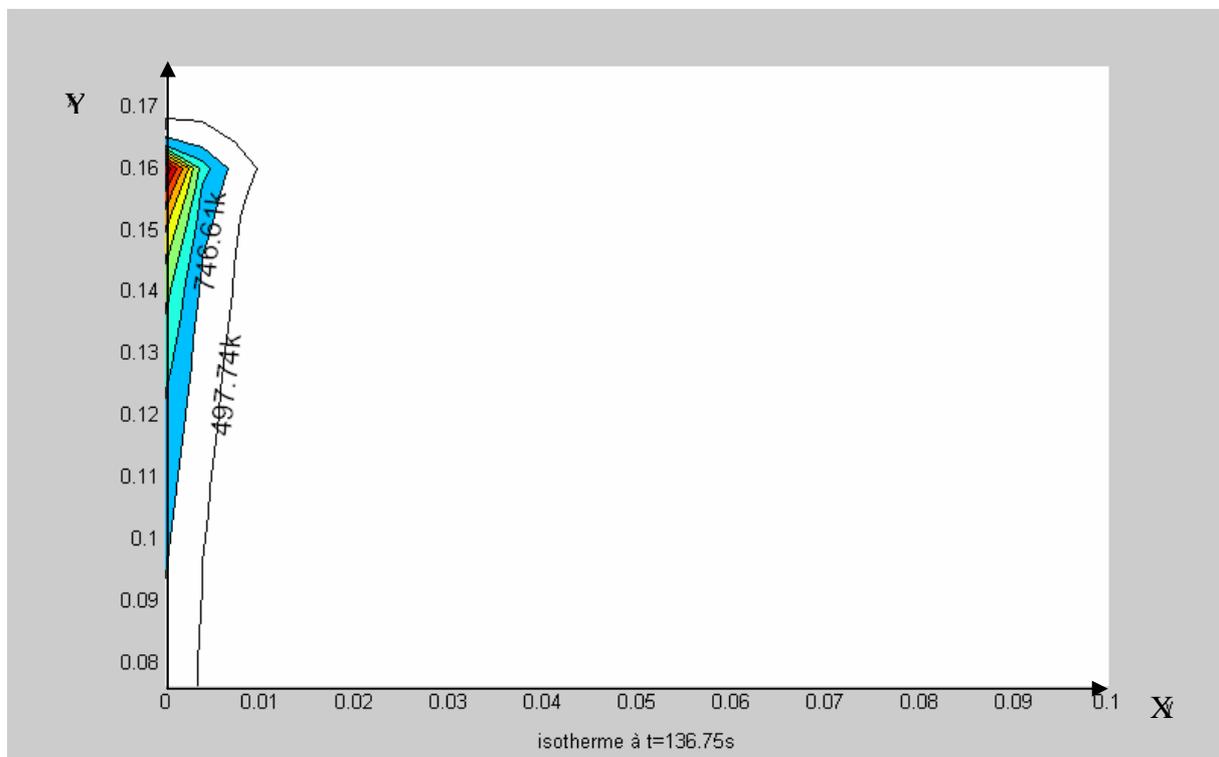
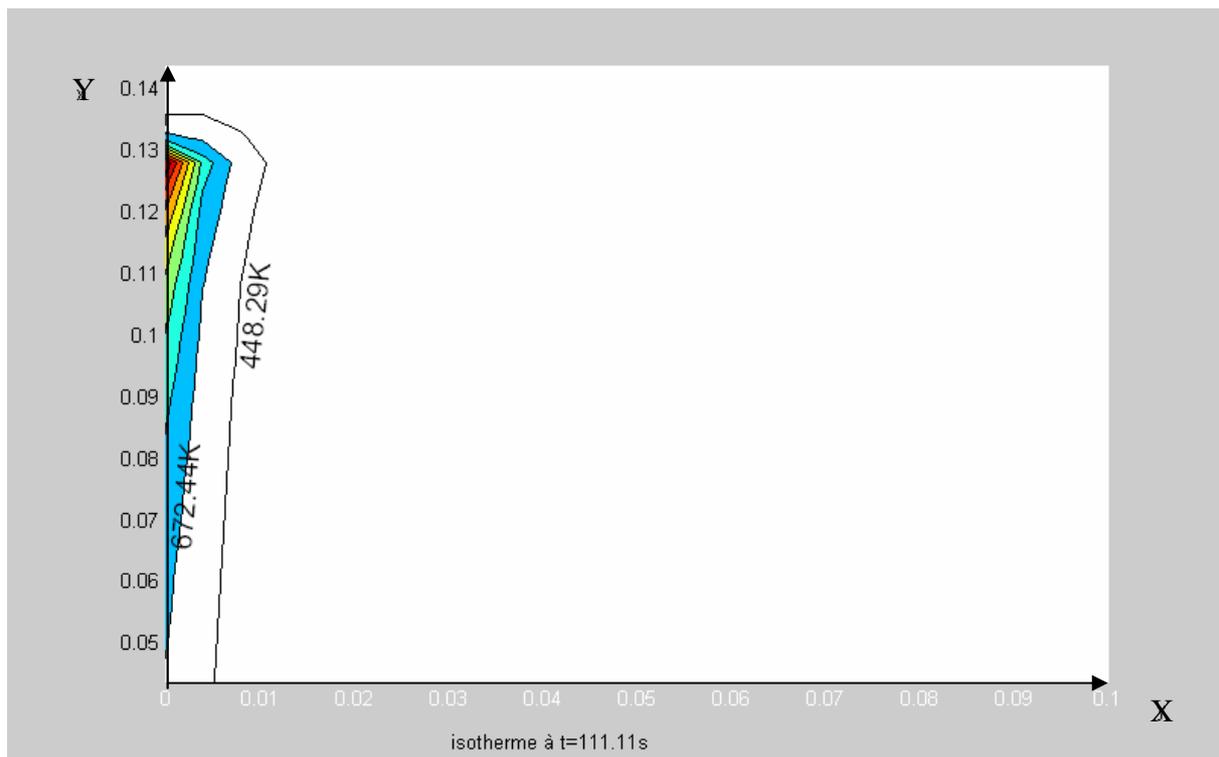
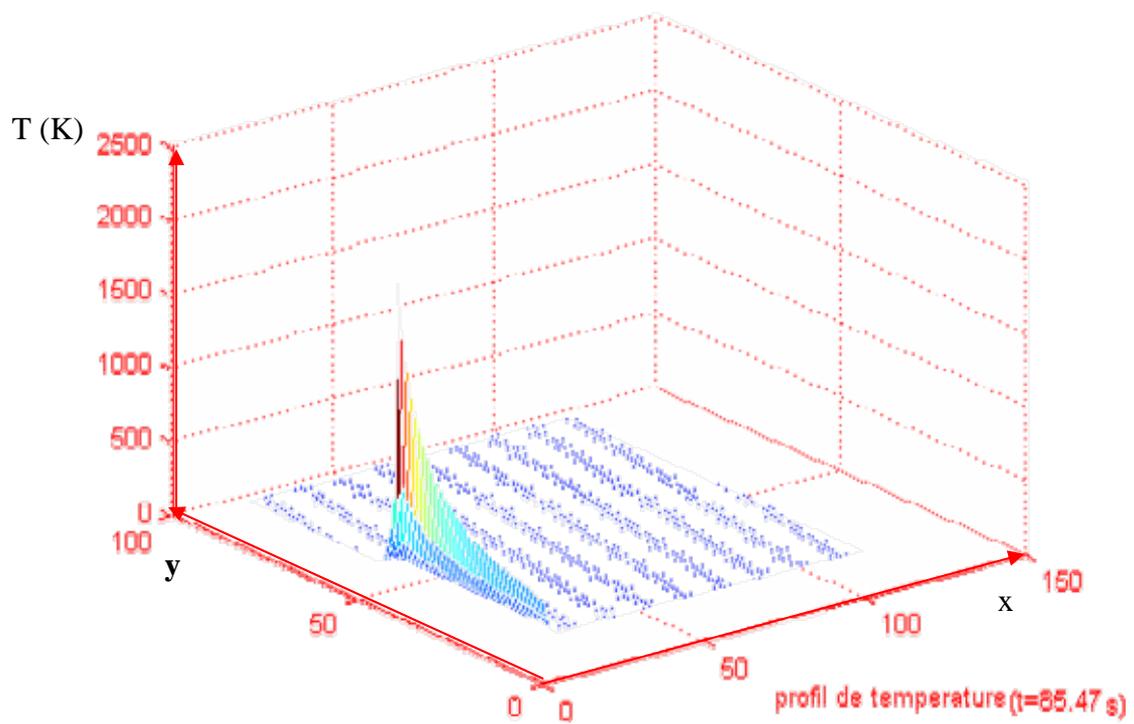
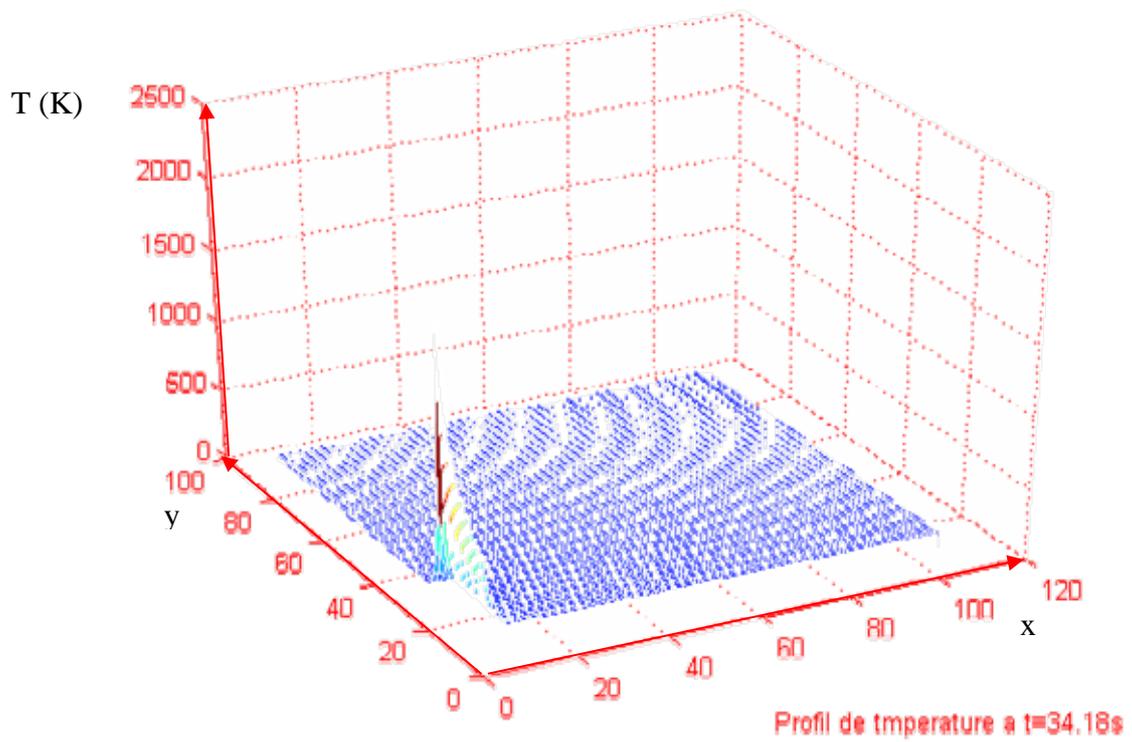


Figure V.1 répartition de température aux différents instants



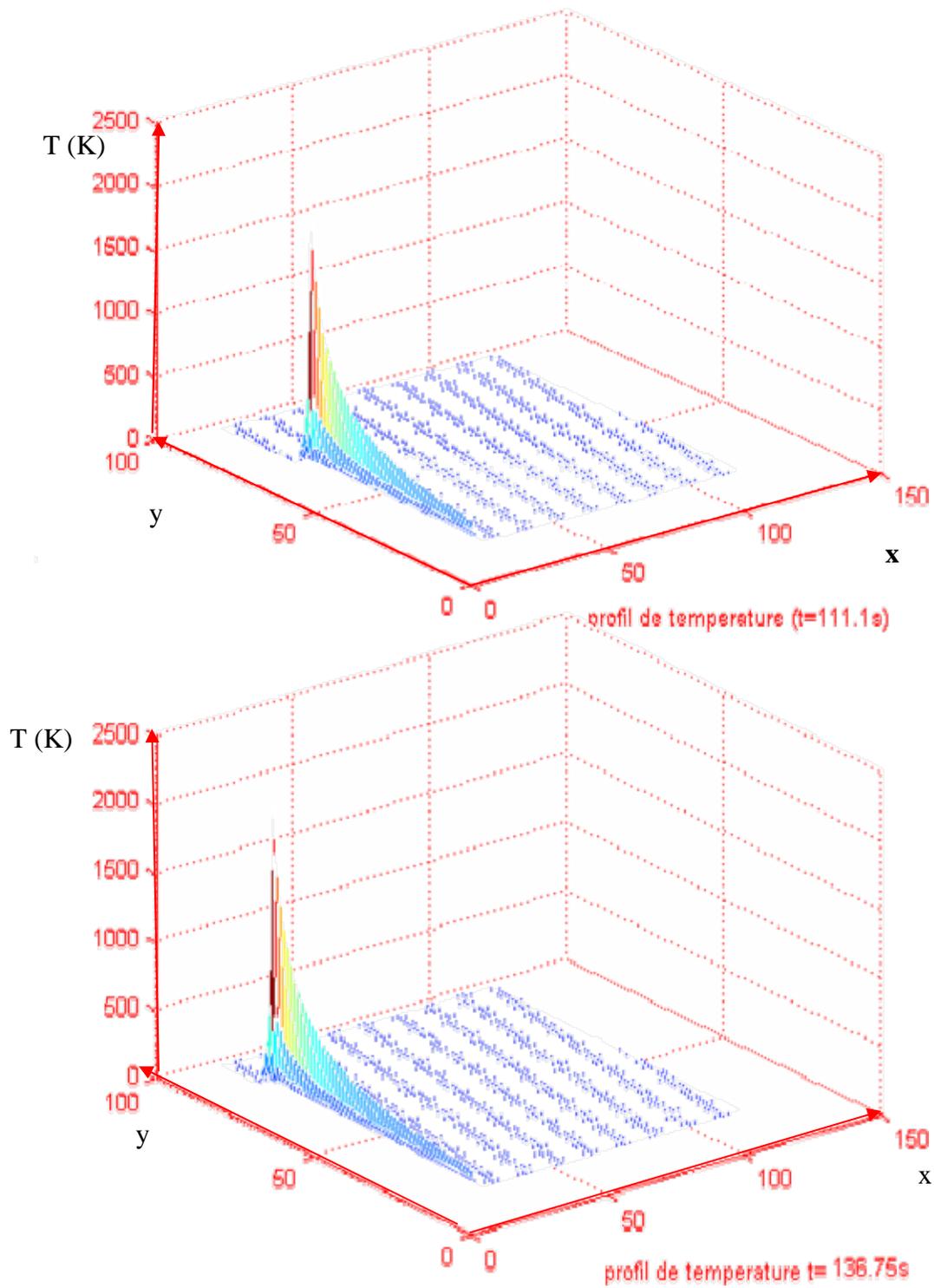
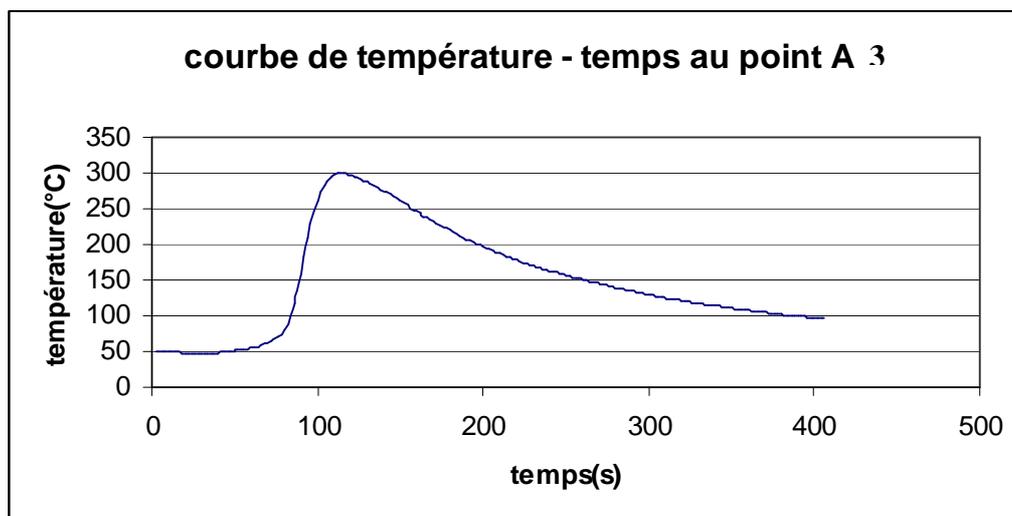
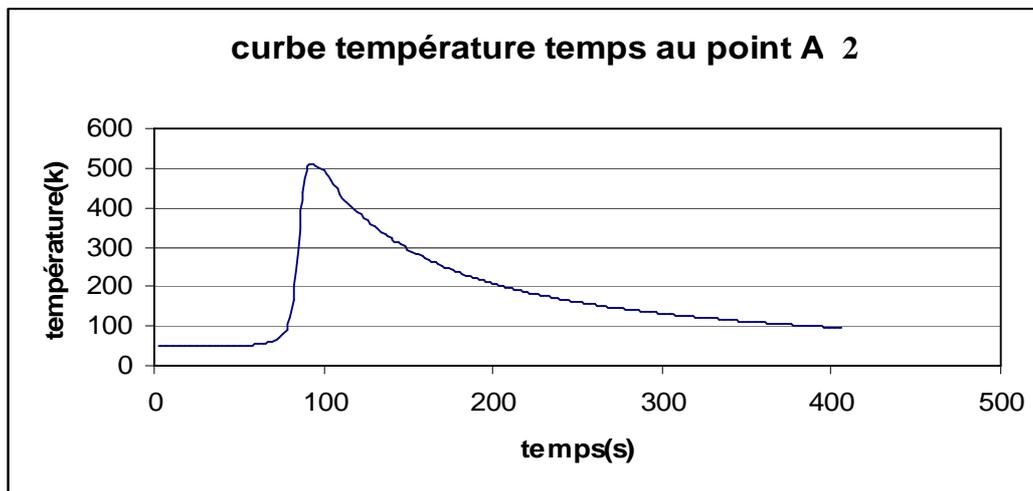
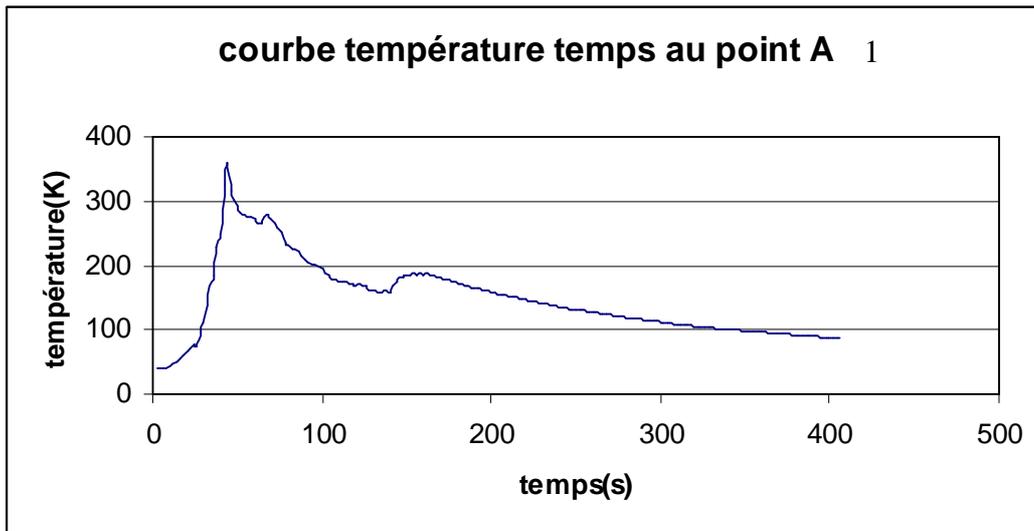


Figure V.2 Profil de température aux différents instants

V.2 Les Résultats expérimentaux :



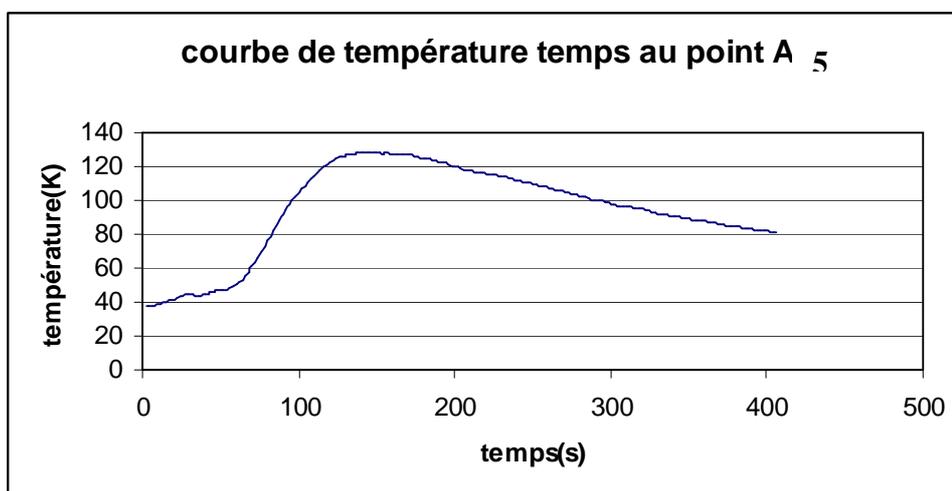
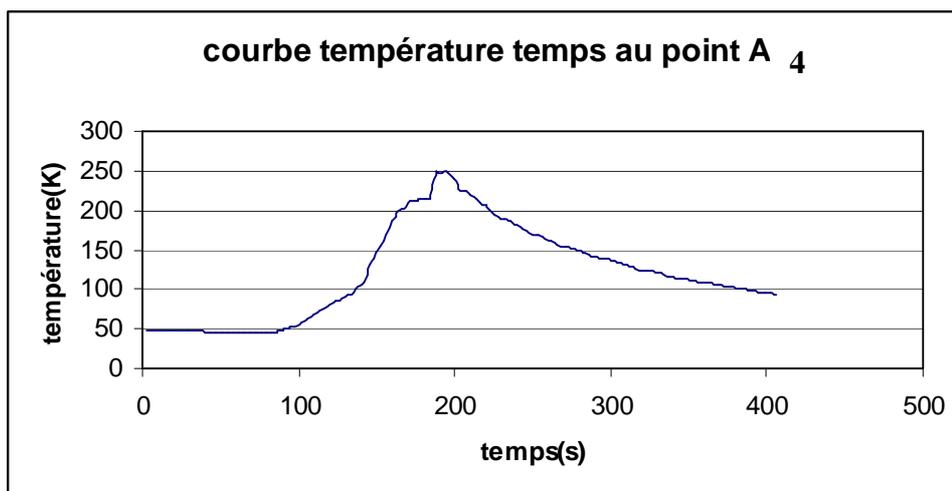


Figure V.3 Les courbes de l'évolution de température en fonction de temps

V.3. Exploitation des résultats théoriques et empiriques

V.3.1- Détermination de la taille de la zone affectée thermiquement :

a- En utilisant le modèle numérique :

Etant donné que la ZAT est constituée par trois zones caractéristiques [17] :

- au voisinage du métal fondu, une partie dont la température a dépassé 1100°C:
- une partie qui suit la précédente et dont la température atteinte au cours du cycle se situe entre 1100°C et 850°C environ.
- une partie enfin dont la température maximale a été comprise entre 500 et 850°C .

D'après ce qui précède nous pouvons considérer que la limite de la température maximale atteinte dans cette zone est de l'ordre de 500°C.

Soit :

$$E_{ZAT} = 3 \text{ mm.}$$

b- En se basant sur les résultats expérimentaux :

En se basant sur le même critère cité ci-dessus pour limiter la zone affectée par la température (voir les **figures V.3**).

Au niveau de point A2 la température atteindra la valeur 510°C donc la ZAT elle vaut 3mm.

Au niveau des autres points on ne peut rien dire, mais elle est bien entendu inférieure à 3mm.

c- Comparaison :

Dans ce contexte nous pouvons noter les constats suivants :

- 1- la taille de la ZAT en pratique dans les points considérés n'est pas constante; alors que celle estimée par la simulation est absolument constante le long de la plaque soudée donc la notation d'état quasi- stationnaire est vérifiée ;
- 2- la taille de cette zone au niveau du point A2 est égale à celle établie par le modèle.

Conclusion générale

La connaissance des cycles thermiques de soudage permet de prévoir les propriétés microstructurales et mécaniques des structures soudées, d'où l'intérêt de simuler le transfert thermique lors du soudage.

Dans ce travail nous avons tenté d'élaborer un modèle mathématique permettant une telle simulation, qui nous a conduit à établir :

- La distribution de la température dans une la plaque soudée à un instant donné;
- Les courbes isothermes;
- La taille de la zone affectée thermiquement.

Dans le but de conforter nos résultats théoriques par des résultats expérimentaux, nous avons soudé une plaque mince en acier inoxydable austénitique (304L) en plaçant des thermocouples à des endroits bien déterminés. Nous avons constaté qu'il y a un écartement entre la théorie et l'expérimentation.

Ce décalage peut être justifié par les hypothèses simplificatrices adoptées dans le modèle d'un coté, et d'un autre coté les conditions opératoires lors du soudage.

Au terme de ce travail des perspectives restent ouvertes, nous proposons alors :

- ❖ De Suivre la distribution de la température moyennant d'un pyromètre;
- ❖ De faire une étude micrographique pour évaluer la taille de la ZAT.

Bibliographie

- [1] W. CHAPEAU, R. BAUS, « Application du soudage aux constructions », Editions Sciences et Lettres, 1977.
- [2] B. LE BOURGEOIS, « Soudage à l'arc, tome 3 », édition Eyrolles, 1989.
- [3] R. CAZES, « Soudage à l'arc », Technique de l'ingénieur, M 7730.
- [4] : Technique de l'ingénieur : Les aciers inoxydables : critère et choix M 4540
- [5] : P.LACOMBE, B.BAROUX, G.BERANGER : les aciers inoxydables / les éditions de physique
- [6] J.F. LANCASTER, « The physics of welding », international institute of welding, Pergman international library of science, technology engineering and social study, August 1983.
- [7] F. KREITH, « Transmission de la chaleur et thermodynamique », Masson et Cie, 1967.
- [8] P. THUREAU, « Introduction au transfert thermique », technique de l'ingénieur, R 2831.
- [9] J.F. SACADARA. « Initiation aux transferts thermiques », Techniques Documentations, France, 1980.
- [10] M.CHOI, R. GREIF and M. SALCUDEAN, “A study of the heat transfer during arc welding which applications to pure metals or alloys and low or high boiling temperature materials”, Numerical heat transfer, vol. 11, PP.477-489, 1987.
- [11] R. ULE, YO GENDRA JOSHI and E.B. SEDY, “A new technique for a three dimensional transients heat transfer computation for autogenous arc welding”, Metallurgical transactions B, volume 21b, PP. 1033-047, December 1990.
- [12] B. LE BOURGEOIS, “ Soudage à l'arc tome 1: Généralité”, Publication de la Soudure Autogène, édition Eyrolles, 1986.
- [13] Modelling of the heat transfer during the submerged arc welding of large welded pipes
J.C Coiffier, J.Claeys, F.Roger (Sollac Dunkerque) J.P.Jansen (Europipe France)
- [14] P. TEKRIWAL, H. STITT, “Finite element modelling of heat transfer for gas tungsten arc welding” P.Tekeriwal , H Stitt
- [15] A. JARDY, H. COMBEAU, « Simulation numérique des phénomènes de transport », Publication universitaire, Nancy 2003.
- [16] S.V. PATANKAR, « Numerical heat transfer and fluid flow », Mac Graw Hill Book Company, 1980.
- [17]: collection ATS OTUA : conseils pour le soudage des aciers inoxydables.