

5/03

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'Etudes en vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingenieur d'Etat en Génie Mécanique

SUJET :

*Simulation de transfert de chaleur lors d'une
opération de soudage TIG des tôles minces
par la méthode des volumes finis et validation
expérimentale*

Proposé et dirigé par:

Mr H.MAZA
Mr A.BOUHDJAR
M^{elle} K.TAHAR CHAOUACHE

Réalisé par:

Mr AZZI Nabil

Promotion juin 2003

DEDICACES

Au fond de mon cœur reposent à jamais des âmes aux quelles je doit dédier ce modeste travail en particulier

A mes très chères parents pour tous leurs sacrifices aux quelle je m'incline , mes parents qui m'ont épaulé depuis toujours et grâce à eux j'ai devenu ce qui je suis.

A la mémoire de mes très chères défuntés : ma grande mère et Nanna .

A mes frères et sœurs

A mes grands parents

A mes oncles qui m'ont aidé durant mes études

A toute la famille AZZI d'Alger et de TIZI

A ma tante Lala FTIMA pour le bien qu'elle m'a fait

A tous ceux et celles qui ont été à mes cotés , et qui ont partagé avec moi les moments de joie et de détresse .

A tous ceux que j'ai aimé et que nous nous somme donnés la parole l'honneur de rester des amis .

A tous mes maîtres et enseignants depuis la ZAOUIA jusqu'à L'ENP passant par le primaire , le CEM , le lycée .

A ma promotion de mécanique : les SANAKIS qui m'ont appris la valeur de combattre la vie et de lutter sans baisser les bras .

Aux larmes que j'ai versé lors de l'écriture de ces lignes .

A l'Algérie qui résiste

REMERCIEMENT

Tout d'abord je remercie le grand Dieu , pour sa clémence, son aide et de nous avoir donner la foi , la confiance et le courage pour terminer le parcours des études et quel parcours !

C'est avec un grand plaisir que je tiens à exprimer mes sincères reconnaissance à mes promoteurs : Monsieur H. MAZA chercheur au centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle(CSC) d'avoir proposé le sujet et de m'avoir accepté de travailler sous sa direction.

Je remercie également Monsieur BOUHDJAR enseignant à l'Ecole National Polytechnique (ENP) et chercheur au CDTA pour avoir bien voulu diriger mon travail et pour l'attention constante qu'il a apporté à ce sujet .

Je remercie également M^{lle} TAHAR CHAOUACH pour 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 , qu'ils trouvent dans ce modeste travail le témoignage de ma sincère gratitude et l'expression de ma vive amitié .

Je voudrais dire quelque chose a vous mes frères et amis de Génie Mécanique : je vous remercie profondément pour tout que vous avez fait durant ces trois ans, vous m'avez aidé à embrasser la vie de nouveau .

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

Nabil

ملخص :

تهدف هذه الدراسة الي تحديد السلوك الحراري لوصلة تلاحيم و ذلك باستعمال طريقة الاحجام المنتهية و عن طريق التجريب + هذه الدراسة سمحت لنا بتحديد كل من المنطقة المنصهرة و المنطقة المؤثر عليها حراريا اللتان تمثلان المناطق الهشة في التركيب تمكنا ايضا من تحديد دور سرعة التلاحيم الكلمات المفتاحية : انتشار الحرارة التلاحيم طريقة الاحجام المنتهية المنطقة المنصهرة المنطقة المؤثر عليها حراريا

Résumé :

L'objet de cette étude , est la détermination du comportement thermique d'un joint soudé , en utilisant la méthode des volumes finis dans le but de déterminer l'étendu des zones à risques dans une structure soudée .

L'évaluation des étendues des zones à risque , zone fondue(ZF) et zone affectée thermiquement (ZAT) à été faite sur la base des résultats obtenus par la simulation numérique et par l'expérimentale , Ces résultats ont permis de mise en évidence l'influence de la vitesse de soudage , paramètre affectant la qualité d'une soudure , sur ces zones dites zones a risques .

Mots clés : Transfert de chaleur , soudage , méthode des volumes finis , ZAT , ZF

Abstract :

The aim of this work , is the determination of the thermal behavior of a welding joint, by using Finite Volumes method .

The evaluation of risky zones , fusion zone (FZ) and heat affected zone (HAZ) has been made on the base of the results obtained for numerical simulation and the experimental . The results have , also, permitted us to note the influence welding speed parameter affecting deeply the weldment quality on the zones called the risky zones .

Key words : Heat transfer , welding , finite volume method , HAZ , MZ

Sommaire :

Introduction générale

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction.....	01
I.2 Classification des procédés de soudage.....	01
I.2.1 Première méthode de classification.....	01
I.2.2 Deuxième méthode de classification.....	02
I.2.2.1 Energie électrique.....	03
I.2.2.2 Energie focalise.....	04
I.2.2.3 Energie thermochimique.....	05
I.2.2.4 Energie électrothermique.....	06
I.3 Soudage TIG.....	07
I.3.1 Description du procédé.....	08
I.3.2 Caractéristique du couple électrode/ protection gazeuse	10
I.3.3 Conditions de soudage.....	12
I.3.4 Domaines d'application.....	14
I.4 Propriétés énergétique de l'arc.....	14
I.4.1 Flux énergétique dans la colonne d'arc.....	14
I.4.2 Température dans la colonne d'arc.....	16
I.4.3 Effet de la variation de la pression sur la colonne d'arc.....	16
I.5. Les cycles thermique du soudage.....	16
I.5.1 Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.....	17
I.6 Etude thermique du soudage.....	20
I.6.1 Présentation des différentes formes de transfert de chaleur	20
I.6.1.1 Transfert de chaleur par conduction.....	20
I.6.1.2 Transfert de chaleur par convection	21
I.6.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	24

Chapitre II :

Modélisation et formulation mathématique.....	26
Introduction.....	26
II.1 L'étude thermique du phénomène de soudage.....	26
II.2 Modélisation du problème de soudage.....	28
II.2.1 Première application.....	28
II.2.2 Deuxième application.....	29
II.2.2.1 La chaleur spécifique.....	29
II.2.2.2 La conductivité thermique.....	30
II.2.2.3 La densité.....	30
II.2.3 Troisième application.....	30
II.3 Configuration géométrique de la source de chaleur.....	32
II.3.1 Simulation ponctuelle.....	32

III.3 Structure de l'équation discrétisée.....	36
III.4 Principe de la méthode des volumes finis.....	36
III.5 Discrétisation de l'équation de la chaleur.....	39
III.6 Traitement du terme source.....	42
III.7 Conductivité thermique variable.....	44
III.8 Conduction en régime transitoire.....	46
III.9 Méthode de résolution.....	50
III.10 Présentation du problème bidimensionnel.....	52
III.10.1 Discrétisation de l'équation de la chaleur.....	52
III.10.2 Conditions aux limites.....	54
III.10.3 résolution numérique pour le problème bidimensionnel.....	56
Chapitre IV :	
Partie expérimentale	
IV.1 Introduction	58
IV.2 procédé de soudage et dispositif expérimental	58
IV.2.1 Procédé de soudage.....	58
IV.2.2. Matériaux et techniques expérimentales.....	59
IV.2.2.1. Dispositif de prise des cycles thermiques.....	59
IV.2.2.2 Dispositif de soudage.....	63
IV.2.3 contrôle de soudage.....	64
Chapitre V	
Résultats et interprétation :	
V.1 Discussion et interprétation des résultats obtenus par la simulation numérique.....	66
V.1.1 Choix de maillage.....	66
V.1.2 Discussion des résultats	67
V.2 discussion et interprétation des résultats obtenus par l'expérimentale.....	74
V.2.1 l'évolution de la température en fonction du temps (304L).....	74
V.2.2 L'évolution de la température en fonction du temps (acier doux)	77
Conclusion générale	81

nomenclature

β : coefficient d'expansion thermique, ou de dilatation cubique à pression constante.	
C_p : chaleur massique à pression constante.	J/ kg. °C
E_n : énergie nominale.	J/ m
E_d : énergie dissipée dans le joint soudé.	J/ m
E_q : énergie équivalente.	J/ m
f : facteur de pondération.	
h : coefficient de convection	W/m ² °C
I : intensité de courant.	Ampère
K : conductivité thermique.	W / m °C
Longueur d'arc.	m
P_e : nombre de pecllet.	
q_e : chaleur transférée à l'électrode.	w / m ²
q_p : chaleur transférée par convection et rayonnement	w / m ²
q_w : chaleur transférée à la pièce.	w / m ²
s^* , s^{**} : terme source dans les équation discrétisées	w / m ³
s_c , s_c^* : partie constante de la linéarisation du terme source	w / m ³
s_p , s_p^* : coefficient de T_p dans l'expression du terme source.	W/ m ³ .k
R : abscisse curviligne.	m.
T : température	°C ou K
t : temps.	Seconde
U : tension de soudage	volts
V : vitesse .	m / s
X et y variables indépendantes	m
ρ : masse volumique.	Kg/m ³
σ : constante de Stephan-boltzman	W/m ² k ⁴
ε : emissivité .	
Δx : longueur d'un volume de contrôle .	m
Δy : largeur d'un volume de contrôle .	m
Δt : pas temporel.	S
δx : distance entre deux nœuds voisins dans la direction x	m
δy : distance entre deux nœuds voisins dans la direction y	m

indice inférieurs :

E : nœud est.

E interface du volume de contrôle entre P et E.

N : nœud nord.

N : interface du volume de contrôle entre P et E.

P : nœud P.

S : nœud sud.

s : interface du volume de contrôle entre P et S.

W : nœud ouest.

w : interface du volume de contrôle entre P et W.

Introduction general :

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, rappelons seulement les ruptures de ponts soudés qui se sont produits en Allemagne et en Belgique juste avant la deuxième guerre mondiale, suivis des ruptures produits au niveau des navires soudés aux Etats-Unis pendant la guerre, mais quelque soit le nombre d'accidents produits, il reste extrêmement faible devant les constructions qui se sont bien comportées.

Vu la particularité des caractéristiques locales de fusion, l'assemblage soudé est soumis à des traitements mécaniques à des températures élevées, un retrait 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 critique dans l'analyse précise de comportement physique de la soudure, est l'évaluation d'une carte thermique qui détermine le champ de température dans l'assemblage soudé, et de prédire ainsi les zones à risques à savoir la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT).

La modélisation numérique de l'opération de soudage est une alternative intéressante. En effet, elle 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.

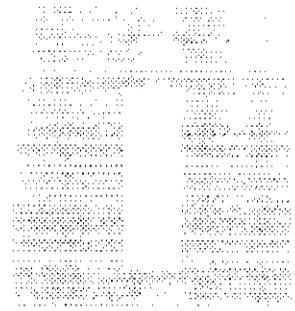
Notre travail consiste à définir la ZAT et la ZF, en étudiant la répartition de la température lors de l'opération de soudage TIG de deux plaques métalliques minces, en tenant compte de variations des propriétés physiques en fonction de température et de matériaux, et en assimilant la source de chaleur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

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 (on a choisie la méthode des volumes finis).

Un essai de validation de résultats a été effectué par l'expérimental, en faisant souder les plaques minces et enregistré l'histoire thermique de quelques points dans notre plaque.

Ce présent mémoire est structuré de la manière suivante :

- ❖ Le chapitre (I) comporte des généralités sur le soudage, et les différents modes de transfert de chaleur.
- ❖ On a consacré le chapitre (II) à l'étude thermique et la modélisation mathématique du problème de soudage.
- ❖ A travers le chapitre (III) On a présenté la méthode numérique utilisée (MVF) pour la résolution de l'équation de la conduction de chaleur pour un système de coordonnées cartésiennes.
- ❖ le chapitre (IV) a été consacré pour l'expérimental.
- ❖ dans le chapitre (V) on a présenté les résultats obtenus et leurs interprétations pour les différentes applications, pour la simulation numérique et l'expérimental.



Synthèse bibliographique

CHAPITRE I. synthèse bibliographique

I.1. INTRODUCTION

Soudage : opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

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

I.2. Classification des procédés de soudage :

"Chaque procédé de soudage est défini en ordre principale par sa source d'énergie et doit satisfaire à un certains 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 appropriées.

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

En fin la dernière condition est de permettre l'obtention de joints présentant les 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 classé par leurs source d'énergie plus le type d'élément de protection de joint soudé (voir Tableau.1).

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

Source d'énergie	Éléments 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 au 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

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, à l'endroit du passage des lignes de courant. 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 à l'endroit 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 FOCALISE.

❖ 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. Le faisceau crée un trou (sauf pour les pièces très minces) sur toute la hauteur des pièces et le métal fondu se solidifie après son passage pour constituer le joint.

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 poussé 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.

L2.2.3. 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.

L2.2.4. 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 que l'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 au fil fourré;
- Le soudage sous gaz protecteur;
- Le soudage sous flux;
- Le soudage au fil autoprotégé;
- Le soudage à la protection mixte.

Une électrode enrobée est constituée par 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 la soudure. 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 sur des machines automatiques. En qualité de gaz de protection on utilise des gaz carbonique, l'argon, l'hélium ou des mélanges 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):

Caractères principaux: *Électrode:* tige de tungstène. *Protection:* gaz inerte. *Nature du courant:* alternatif ou continu. *Apport de métal:* pas d'apport ou apport séparé.

1.3.1. Description du procédé.

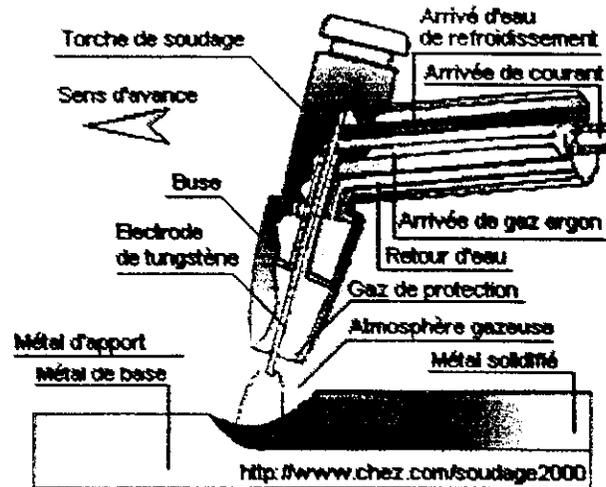


Figure 1: Principe du soudage TIG. [4]

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (*Tungsten Inert Gas*). Dans les pays anglo-saxons on le désigne également par *GTAW* (*Gas Tungsten Arc Welding*). On le désigne souvent dans les pays francophones par soudage à l'argon. Le soudage électrique à l'arc avec électrode réfractaire est un procédé de soudage à l'arc électrique dans lequel :

- l'arc jaillit entre la pièce à souder et une électrode,
- l'électrode est une électrode réfractaire, donc non fusible ; généralement en tungstène,
- la protection du bain de fusion est assurée par un gaz de protection neutre, généralement de l'argon ou un mélange à base d'argon, ou encore de l'hélium,
- La stabilisation de l'arc électrique et son déplacement le long du joint peuvent être assurés manuellement ou automatiquement.

Ainsi, en soudage à l'arc avec électrode réfractaire, l'électrode ne fond pas, donc ne participe pas à la formation de la soudure. L'arc électrique ne sert que comme source de chaleur ; s'il est nécessaire d'apporter un métal, de fusion tout comme dans le cas du soudage oxyacétylénique. On n'aura pas de transfert de métal dans l'arc.

Le principe du soudage TIG est représenté sur la figure(1). L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

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 arrivé 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.

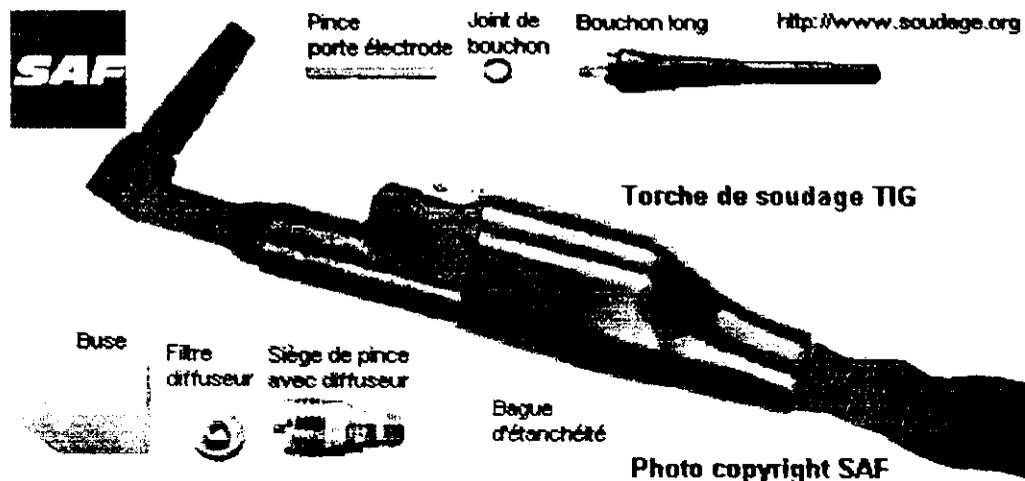


Figure 2: Description de la torche TIG. [5]

Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables. Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 G 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 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 est 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.

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 à la torche.

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

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

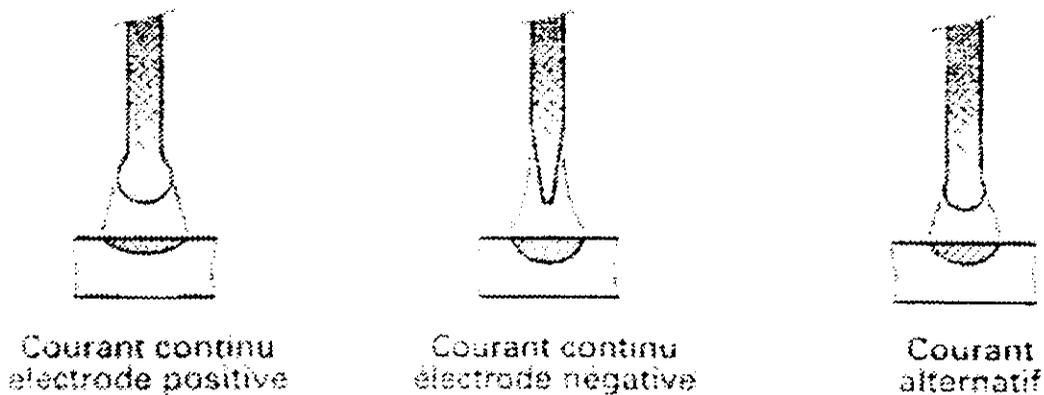


Figure 3: Formes des électrodes pour soudage TIG. [3]

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 en 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.

Tableau 3 – Emploi des gaz en soudage TIG

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

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.3.3. Conditions de soudage.

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

- *courant continu-électrode négative*, le plus employé, appelé également soudage en polarité directe (*DCSP, direct current straight polarity*) ;
- *Courant continu-électrode positive*, 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.

L'emploi de sources à caractéristiques externes verticales rend le courant indépendant de la tension d'arc ($\Delta i \sim 0$). On dispose d'un procédé particulièrement souple et très facile d'emploi, riche en possibilités.

➤ ***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 on 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 courant pulsé. 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 devient 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. La température à pièce est moindre, et cela permet de diminuer ses effets, si besoin, (métaux tendres, microsoudage).

➤ ***Courant alternatif***

Il 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 de 3 ms, d'augmenter le courant correspondant à 1,3 fois l'intensité directe, réglée 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.

1.3.4. Domaines d'applications.

Le soudage par procédé TIG doit se comparer au soudage MIG/MAG car, bien que différent dans le principe, il développe la serre puissance et devrait par suite donner lieu à des résultats comparables. Mais ses avantages et ses inconvénients font qu'il trouve des applications dans des domaines distincts.

Ses avantages technologiques sont essentiellement dus au fait que l'échauffement et l'arrivée de fil sont indépendants. Par suite ;

- une torche TIG est un chalumeau puissant et précis permettant des fusions sans métal d'apport, impossibles à traiter autrement que par plasma,
- l'apport de métal peut être réglé indépendamment de la puissance de l'arc et de l'énergie dispensée.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont **réservées aux métaux et assemblages nobles:** aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

D'exécution lente à des vitesses ne dépassant pas quelques dizaines de centimètres par minute, il autorise, par un excellent dosage thermique, les **travaux de haute qualité** et, par un contrôle facile des paramètres les travaux de grande précision. C'est le procédé de soudage à l'arc de la **construction aéronautique**.

A l'inverse, la productivité est médiocre et n'est pas un facteur qui puisse intervenir.

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 de 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 Pe peut chuter au dessus de la valeur de 1, ou le transfert de chaleur s'effectuent par conduction.

Tandis que pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, Pe peut augmenter et la convection devient dominante.[6]

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 (d'après Ko Bayashi et Suga 1979 et Jakson 1960).

L'effet de la composition des gaz de protection à base d'argon sur la température de la colonne d'arc a été étudié par Key et Al (1983). Tous ces gaz produisent la même température maximale. [6]

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. 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 de :

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

1.5.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.

a) 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 plaine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par la figure (3) qui conduit aux remarques suivantes:

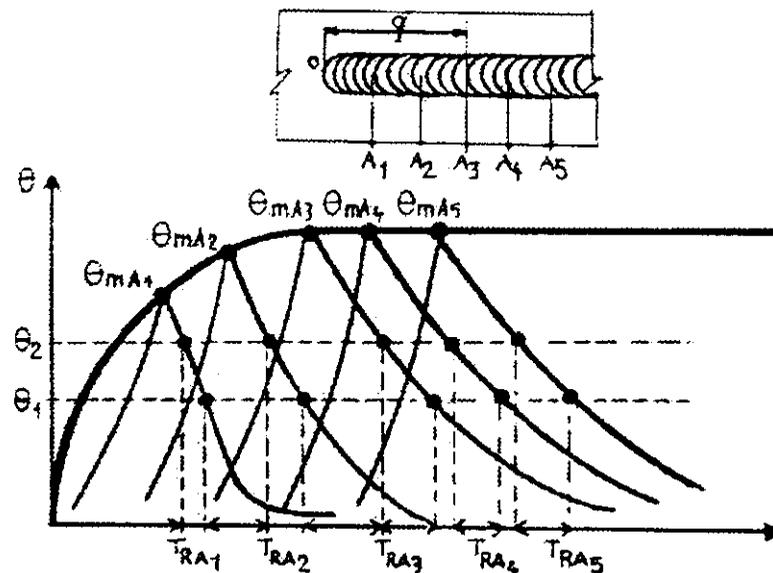


Figure 3: cycles thermiques le long du cordon de soudure

- La température maximale atteinte θ_m croît 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 3). Autrement dit, les courbes $\theta=f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q).

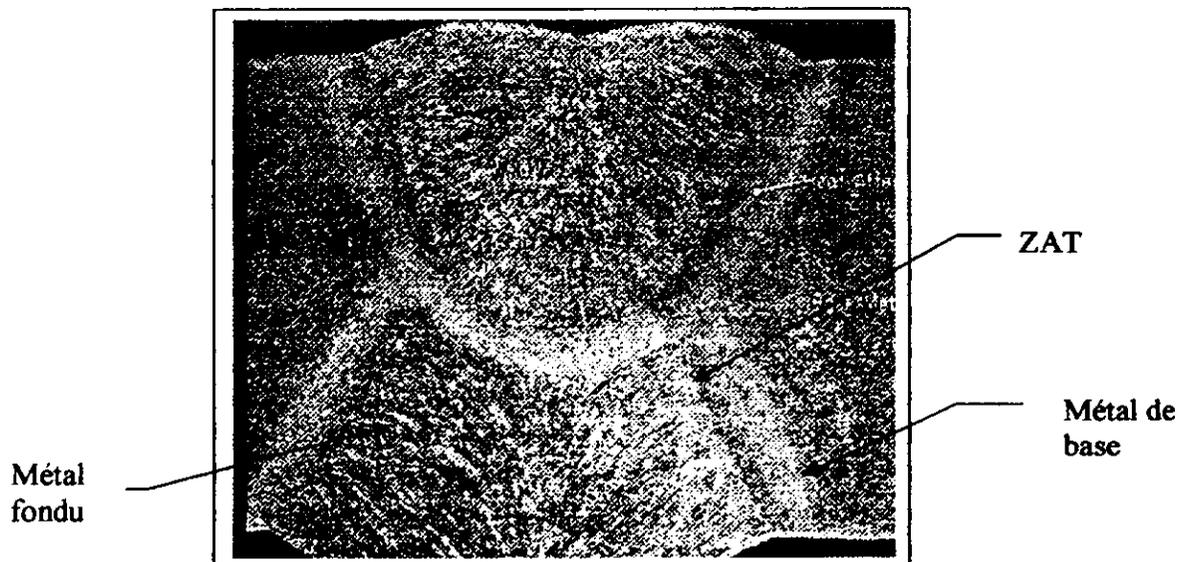
b) Facteurs influençant la répartition thermique

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).

c) Différentes zones dans une soudure :

on définit la zone affectée thermiquement (ZAT) , la zone fondue (ZF) et le métal de base la figure (4) montre ces trois zones



FIG(4) 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 fondue n'est autre que le cordon de soudure . Cette région , au passage de l'arc , atteint des températures très élevées qui sont même supérieures à la température de fusion de métal de base . la zone fondue 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 mécanographique .

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

Contraintes :

Le caractère local est 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 .

L6. Rappel sur les transferts de chaleur

L6.1. Présentation des différentes formes de transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est un processus par lequel 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(5), convection figure(6) et (7) ou par rayonnement figure(8). bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément. [7] .

I.6.1.1 Transfert de chaleur par conduction

Une barre (figure 5) 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.

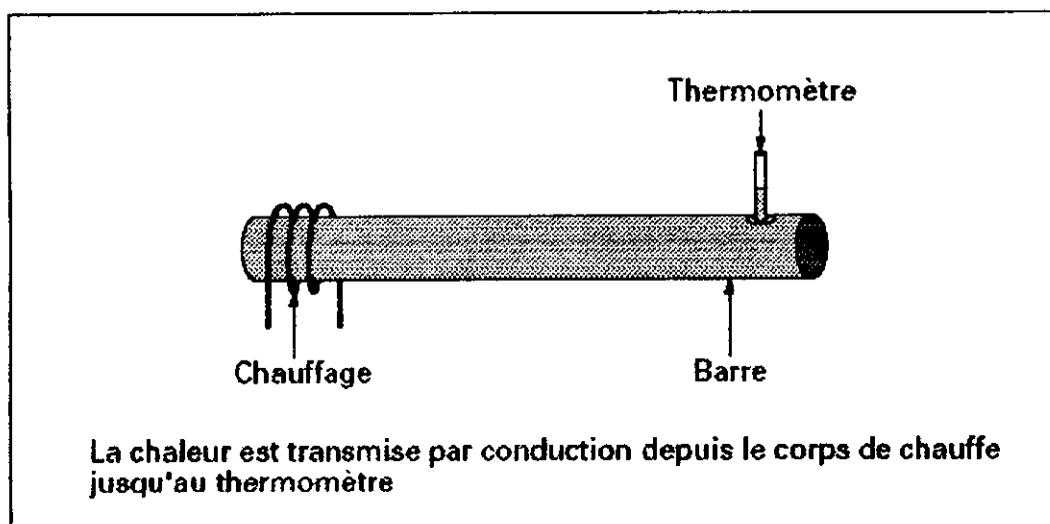


Figure 5 – Mise en évidence de la conduction d'un matériau. [8]

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'ya pas de déplacement appréciable des molécules . La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène , opaque et compact[9]

La conduction est régies par l'équation

$$\dot{q} = -k \cdot \text{grad } T$$

\dot{q} : l'intensité de flux (puissance par unité de surface) $[W/m^2]$

T : Température . $[^{\circ}C \text{ ou } K]$

K : conductivité thermique dépend de la nature de matériaux

1.6.1.2 Transfert de chaleur par convection

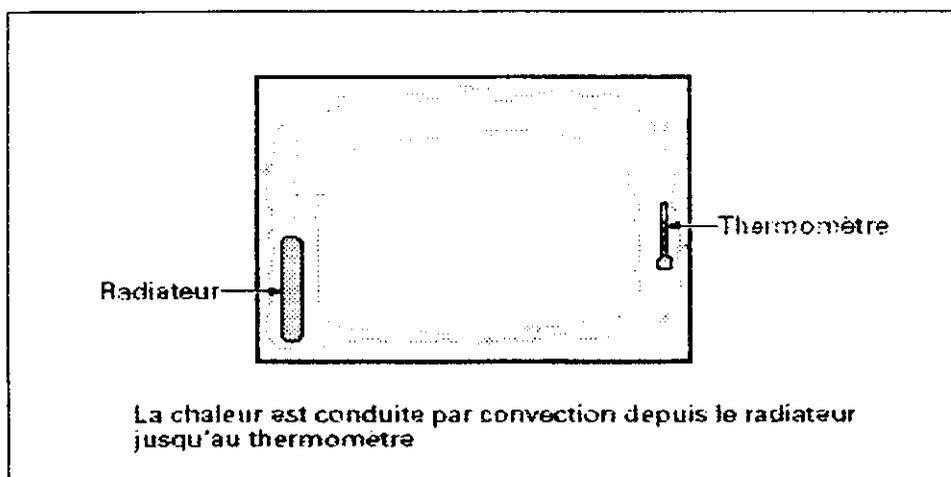


Figure 6 – Mise en évidence du transfert de chaleur par convection. [10]

Dans un local fermé (figure 6), 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 à chauffé localement l'air à son contact, la variation de masse volumique qui en est 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 gazeux est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température la convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi et un liquide en mouvement voir figure (7)

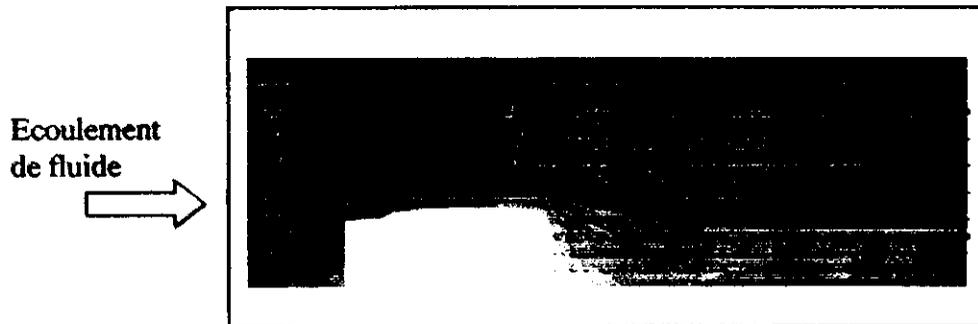


FIG (7) Convection forcée

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 de fluide est produit par une action extérieure (pompe ,ventilateur ...). La figure (7) 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.6.1.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Une source de chaleur de faibles dimensions (figure 8) 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**.

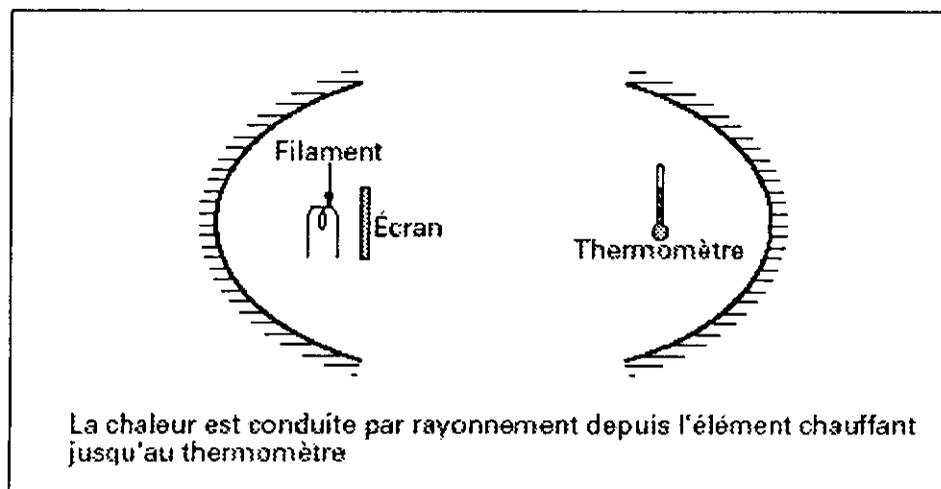


Figure8– Mise en évidence du transfert de chaleur par rayonnement. [8]

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.

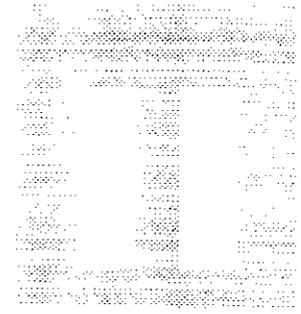
$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{\infty}^4)$$

q : densité de flux [W / m²]

ε : émissivité

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

T_{∞} : Température ambiante [K].



Modélisation et formulation mathématique

INTRODUCTION :

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

L'étude thermique de 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 :

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = -\text{div}q + S - P \text{div}V + \varphi \quad (\text{II.1})$$

$\rho \frac{\partial E}{\partial t}$: variation de l'énergie interne .

q ; densité de 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 :

$$\rho \frac{dE}{dt} = \rho \frac{dH}{dt} - \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{\rho} \right) \quad (\text{II.3})$$

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

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = -\text{div}q + \frac{dP}{dt} - \frac{P}{\rho} \left[\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}V \right] + S + \varphi \quad (\text{II.4})$$

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

D'après l'équation de la continuité :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.4) devient

$$\rho \frac{dH}{dt} = -\operatorname{div} \tilde{q} + \frac{dP}{dt} + S + \varphi \quad (\text{II.6})$$

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

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dt} \quad (\text{II.7})$$

la thermodynamique fournit les relations :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P; \quad \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{\rho} (1 - T\beta) \quad (\text{II.8})$$

Avec

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (\text{II.9})$$

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

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

$$\rho C_P \frac{\Delta T}{dt} = -\operatorname{div} q + T\beta \frac{\Delta P}{dt} + S + \varphi \quad (\text{II.10})$$

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

- Milieu solide $\vec{v} = 0$ d'où $\varphi = 0$: on ne considère pas l'écoulement et 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.10 devient :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} q + S \quad (\text{II.11})$$

avec :

$$q = -K \text{grad} T \quad K = K(T) \quad (\text{II.12})$$

On aura :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + S \quad (\text{II.13})$$

d'où :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (\text{II.14})$$

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_p , ρ) indépendante de la température , l'équation (II.11) devient :

$$\rho C \frac{dT}{dt} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + S \quad (\text{II.15})$$

II.2. Modélisation de problème de soudage :

Notre étude va porter sur l'assemblage de deux plaques métalliques minces, pour de matériaux différents : l'acier inoxydable 304L, et l'acier au carbone.

II.2.1 première application :

Dans cette application, nous allons étudier le transfert de chaleur en régime transitoire, des deux plaques de l'acier inoxydable dont les corrélations de leurs propriétés sont : [10]

Pour $T < 1700$ K

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

$$\rho C_p(T) = 3561240.8 + 0.10022 \cdot 3072 \cdot T \quad \text{J/m}^3 \cdot \text{K}$$

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 ($T_0 = 298$)

- **Conditions aux limites :**

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

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

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

avec :

h : coefficient d'échange par convection . $h = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [11]

T_p : température de bord de l'assemblage .

T_∞ : température ambiante .

ε : émissivité thermique = 0.82

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

II.2.2 : deuxième application :

Dans cette application , nous allons étudier le transfert de chaleur en régime transitoire , des deux plaques de l'acier au carbone dont les corrélations de leurs propriétés sont : [10]

II.2.2.1 : La chaleur spécifique (C_p : J/Kg.°C)

$$C_p = (3.0702 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 7.6579 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.1075) / 0.00023889 \quad \text{si } T \leq 673 \text{ K}$$

$$C_p = (1.85 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 0.1134) / 0.00023889 \quad \text{si } T > 673 \text{ et } T < 873 \text{ K}$$

avec H_L : chaleur latente de fusion ($H_L = \text{J/Kg}$)

T_S : température de solidus : $T_S = 1766 \text{ K}$

T_L : température de liquidus : $T_L = 1798 \text{ K}$

II.2.2.2 : la conductivité thermique : ($K = \text{W/m.K}$)

$$K = (-5.76 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.12533) \cdot 10^{-3} / 0.00023889 \quad \text{si } T \leq 673 \text{ K}$$

$$K = (-7.5 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 1.0 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0.118) \cdot 10^{-3} / 0.00023889$$

$$K = 0.065 \cdot 10^{-3} / 0.00023889 \quad \text{pour } T > 1073 \text{ K}$$

II.2.2.3 : La densité ($\rho = \text{Kg/m}^3$)

$$\rho = (0.7974 \cdot 10^{-4} - 0.3006 \cdot T - 0.3816 \cdot (T/100)^2) \cdot 10^6$$

$$\rho = (0.9246 \cdot T^{+4} - 4.181 \cdot T + 1.425 \cdot (T/100)^2) \cdot 10^6$$

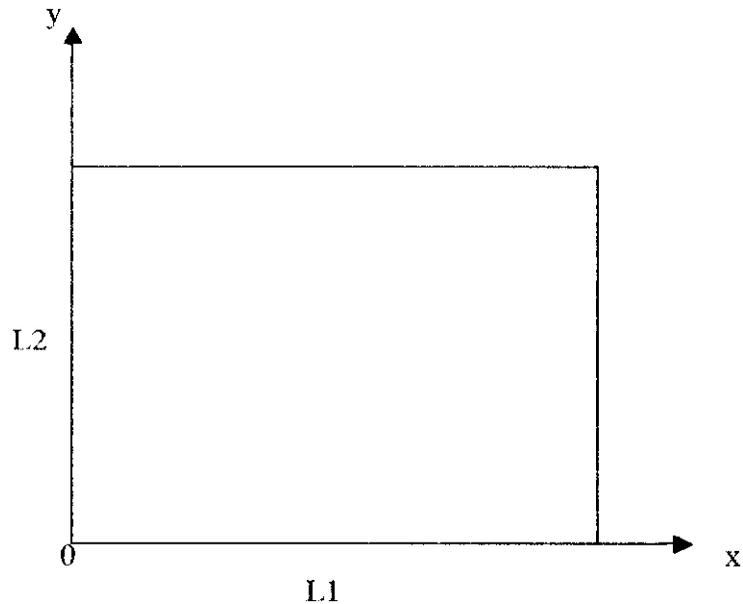
la première formule est valable pour $293 \leq T < 1798 \text{ K}$

la deuxième formule est valable pour $T > 1810 \text{ K}$

pour cette application on adopte les même conditions aux limites de la première application .

II.2.3 conditions aux limites :

Les deux plaques ont les mêmes dimensions et les mêmes propriétés physiques , on va travailler donc sur une seule plaque à cause de symétrie .



- Pour ($y = 0, 0 < x < L1$) :

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

avec :

$h =$ coefficient d'échange par convection . $h = 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [11]

T_p température de bord de l'assemblage .

T_∞ : température ambiante .

ε :emissivité thermique = 0.82

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

- Pour ($y = L2, 0 < x < L1$)

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

- Pour ($x = 0 ; 0 < y < L2$)

. $q_p = 0$

- Pour ($x = L1, 0 < y < L2$)

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

II.3 Configuration géométrique de la source de chaleur :

II.3.1 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]

II.2.3 Simulation gaussienne :

C'est le modèle de source qu'on a choisie pour notre étude car "c'est le modèle le plus proche à la réalité physique" [13]. 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 :

$$q = q_0 \text{EXP} \left(-3 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right) \quad [13]$$

certaines proposent une autre formule :

$$q(x, y, t) = q_0 \text{EXP} \left(-\frac{3}{r_b^2} \left(x^2 + (y - vt)^2 \right) \right) \quad \text{c'est la formule donnée par P. Tekriwal et M. Stitt} \quad [14]$$

avec : $q_0 = \frac{3\eta u I}{\pi r_b^2}$

U : la tension

I : le courant

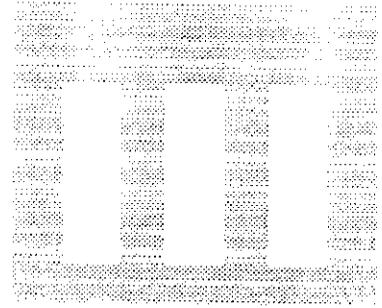
V : la vitesse de soudage .

η rendement de soudage

r_b : rayon de la gaussienne : varie entre 2-4 mm [6]

ainsi en assimile notre source de chaleur a un disque de rayon r_b c'est la projection de volume gaussien sur le plan avec une approximation .

Vu la complexité de notre phénomène et vu la dépendance des propriétés physiques de la température , le recours vers une résolution numérique serais une alternative obligatoire . Pour cela nous allons utiliser la méthode des volumes finis .



Présentation de la méthode des volumes finis et résolution numérique

III.1.Introduction :

Le résultat obtenu à partir d'une discrétisation d'une équation aux dérivée partielle est un ensemble de valeurs qui permettent de reconstruire la forme de la solution. Dans ce cas, une méthode numérique peut être considérée comme un laboratoire expérimentale, à l'intérieur de lequel des instruments de mesure sont placés. Ces derniers doivent permettre de remonter à la grandeur que l'on veut étudier dans le domaine considéré .

La méthode des volumes finis, que nous utilisons dans notre travail, permet d'obtenir un système d'équations algébriques, ou système discrétisé, dont les inconnus sont les valeurs de la grandeur recherchée en un nombre fini de points du domaine de l'étude. Cet ensemble de points constitue le maillage du domaine, il s'agira ensuite de savoir résoudre ce système d'équation algébrique. [15]

III.2. Le concept de discrétisation :

Le système d'équations algébriques est obtenu à partir de l'équation aux dérivées partielles de départ, dont nous appellerons Φ l'inconnu(pour notre cas c'est la température) Pour ce faire ,il est nécessaire de faire des hypothèses sur la façon dont Φ varie entre deux points du système discret, c'est-à-dire de choisir une loi de **variation local** .

Nous somme donc amenés, pour obtenir un système discrétisé, à subdiviser le domaine d'étude. C'est cette discrétisation de l'espace et du temps, associée à la façon de prendre en compte les variations de Φ entre deux points de maillage, qui permet de passer d'une équation aux dérivées partielles à un système d'équation algébriques.

La méthode consiste à déterminer alors la grandeur recherchée pour un nombre fini de points de l'espace étudié noté : T_{i-1}, T_i, T_{i+1}

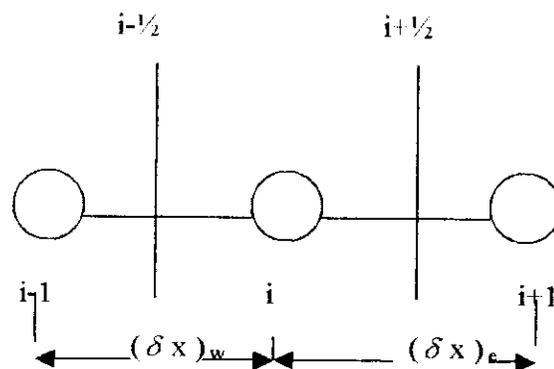


FIG III.1 Maillage unidimensionnel

III.3. Structure de l'équation discrétisée :

Une équation discrétisée est une équation algébrique reliant les valeurs de températures en certains points de maillage. Si le nombre de points de ce dernier devient plus grand, la solution discrète devrait correspondre à la solution exacte de l'équation différentielle à résoudre, mais pour un grand nombre de problèmes, un nombre limité de points nous permet d'avoir des résultats satisfaisants.

La nature du problème à traiter conduit au choix de la méthode numérique à adopter. La Méthode des éléments finis (M.E.F) est recommandée pour la résolution des problèmes de géométrie complexe, alors que la méthode des différences finies (M.D.D.F) s'adapte mieux aux cas des problèmes simples, vu la facilité de sa mise en œuvre.

La méthode décrite dans ce chapitre ressemble à celle des différences finies, mais bien des idées typiques à la méthode des éléments finis, c'est celle de volumes finis.

Le choix de cette méthode pour résoudre l'équation présentée précédemment a été motivé parce que les équations discrétisées obtenues par cette méthode reflètent une signification physique claire et la solution obtenue donne toujours un parfait équilibre (de l'énergie, de masse...), ce n'est pas toujours le cas pour les autres méthodes. [15]

III.4. 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 respectifs doivent posséder un côté commun, ce qui va permettre la mise en évidence des propriétés de conservation des flux locaux et globaux.

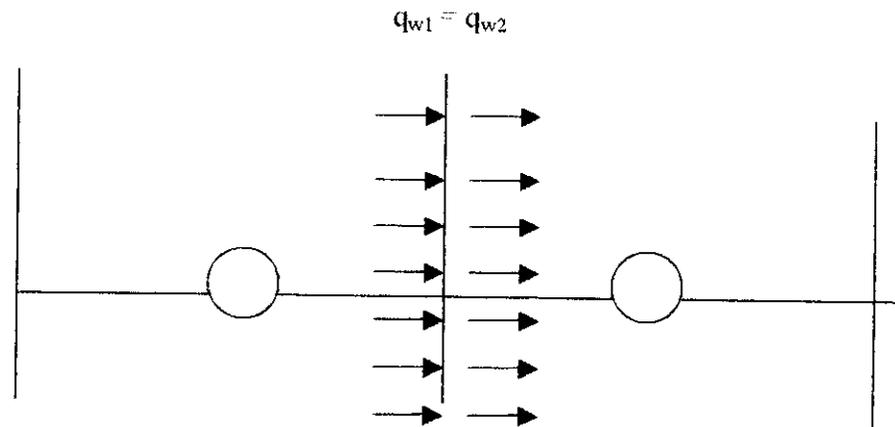


FIG III.2 Propriété de conservation des flux aux niveaux des interfaces

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.3 et III.4)

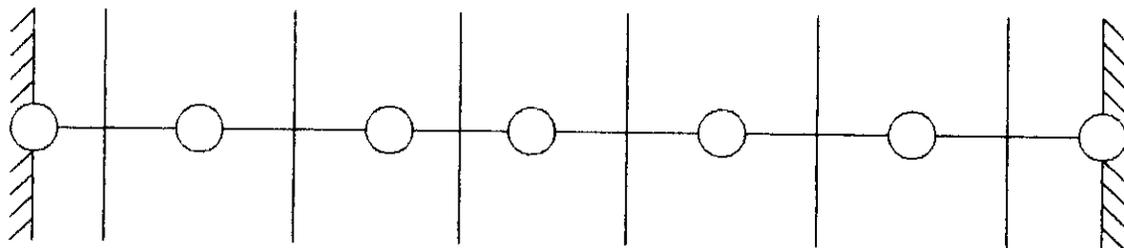


FIG III.3 Emplacement des nœuds et des faces des volumes de contrôles pour la pratique A

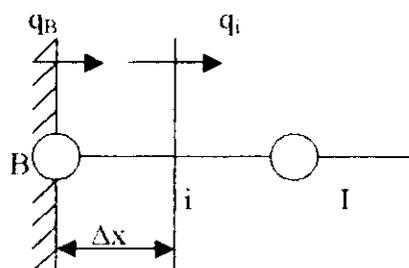


FIG .III.4.Demi-volume de contrôle pour la pratique A .

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 de domaine. Dans notre méthode de calcul, on considère que ces quantités sont uniformes à travers le volume de contrôle et on admet les discontinuités aux frontières de celui-ci (voir paragraphe III.8)

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 faces des volumes de contrôles coïncident avec les discontinuités) et placer ensuite les nœuds associés au centre des volumes, dans ce cas on aura aux frontières des demi volumes avec Δx nul , (figures III.5 et III.6)

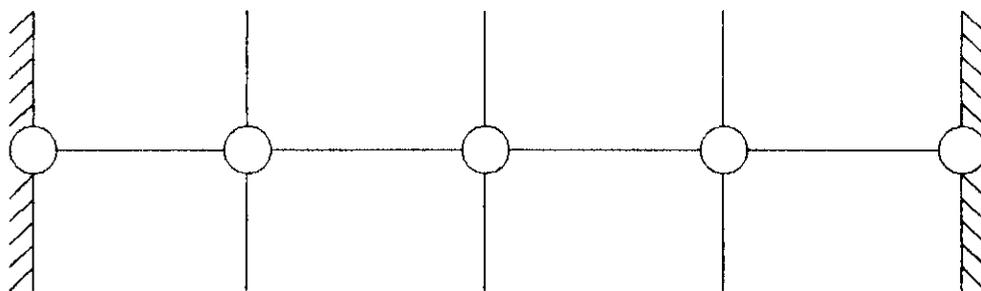


FIG .III.5 .Emplacement des nœuds et des faces des volumes de contrôles pour la pratique B

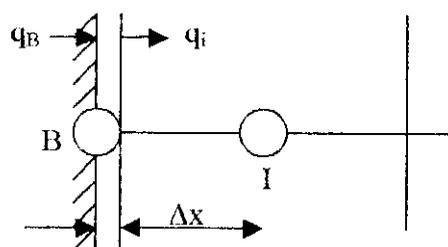


FIG III.6. Demi volume de contrôle avec une épaisseur Nulle pour la pratique B

Notons que pour un maillage uniforme les deux pratiques sont identiques

III.5. Discrétisation de l'équation de la chaleur :

Avant de commencer la formulation de la méthode numérique pour le cas bidimensionnelle et transitoire, il serait plus simple d'étudier d'abord le cas de la conduction unidimensionnelle en régime permanent où la représentation physique est plus facile, on pourra par la suite étendre cette technique aux problèmes bidimensionnelle et transitoires .

Dans ce cas l'équation de la conduction s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{dq}{dx} + S = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où le flux q est donné par :

$$q = -K \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.2})$$

K est la conductivité thermique , T la température et S le taux de génération de chaleur par unité de volume

Le but de la méthode des volumes finis est de remplacer cette équation différentielle par un système d'équations algébriques relativement simples à résoudre. Pour ce faire on doit donc intégrer cette équation à travers le volume de contrôle délimité par les interfaces e et w qui renvoient respectivement aux frontières Est et Ouest du volume de contrôle (voir fig III.7

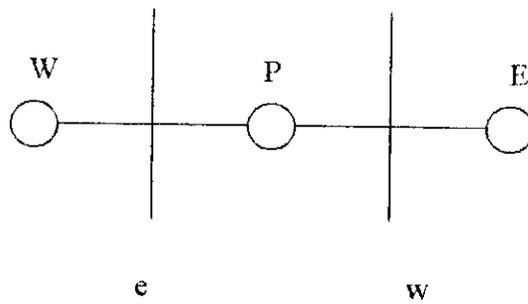


FIG III.7 : Frontières du volume de contrôle

En intégrant entre w et e

$$\int_w^e \left(-\frac{dq}{dx}\right) dx + \int_w^e S dx = 0 \quad (\text{III.3})$$

On obtient :

$$q_w - q_e + \int_w^e S dx = 0 \quad (\text{III.4})$$

Ou encore

$$K \left(\frac{dT}{dx}\right)_e - \left(K \frac{dT}{dX}\right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (\text{III.5})$$

Puisque $\left(-K \frac{dT}{dx}\right)$ représente le flux de chaleur local, l'équation (III.5) montre l'équilibre entre l'écoulement de chaleur à travers les deux faces du volume de contrôle et la génération de chaleur à l'intérieur de ce même volume .

Pour l'évaluation des flux de chaleur q_w et q_e en termes de températures des nœuds du maillage, on doit supposer un profil qui donne la variation de T en fonction de x entre les points de maillage .

La figure III.8. montre un profil linéaire simple dans lequel T prend un comportement linéaire en fonction de x, entre deux points voisins de maillage .

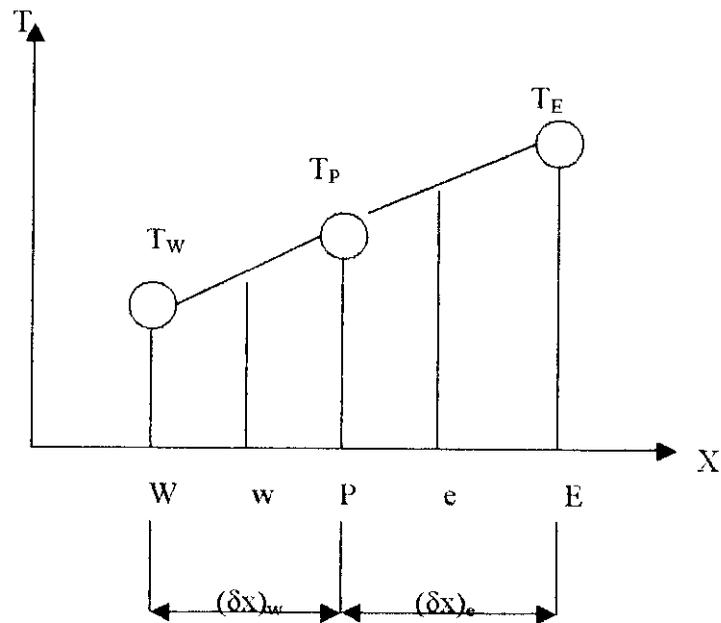


FIG III.8. Profil linéaire de température

En utilisant ce profil on peut exprimer le gradient de température aux faces du volume De contrôle de la manière suivante :

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_w = \frac{T_E - T_W}{(\delta x)_w} \quad (\text{III.6})$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_e = \frac{T_E - T_P}{(\delta X)_e} \quad (\text{III.7})$$

Ainsi les flux aux interfaces s'écrivent :

$$q_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w} (T_W - T_P) \quad (\text{III.8})$$

$$q_e = \frac{K_e}{(\delta x)_e} (T_P - T_E) \quad (\text{III.9})$$

K_w et K_e renvoient respectivement aux conductivités aux niveaux des interfaces w et e .

Pour intégrer le terme source, notons le taux moyen de la génération de chaleur \bar{S} nous aurons :

$$\int_w^p S dx = \bar{S} \Delta x \tag{III.10}$$

posons $\bar{S} = S_C + S_P T_P$ (voir traitement de terme source paragraphe)

S_C = partie constante de la linéarisation de terme source .

S_P = coefficient de T_P dans l'expression linéarisée de terme source .

Si nous remplaçons l'équation (III.8) , (III.9) et (III.10) dans l'équation (III.4) nous obtenons l'équation algébrique suivante :

$$a_P T_P = a_E T_E + a_P T_P + b \tag{III.11}$$

Avec :

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e} \quad a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w} \quad ; \quad a_P = a_E + a_w - S_P \Delta x \quad \text{et} \quad b = S_C \Delta x$$

Pour un problème unidimensionnel, le nœud considéré P a deux voisins. Il en aura quatre pour le problème bidimensionnel et six pour un problème tridimensionnel .

De manière générale l'équation discrétisée doit avoir la forme suivante :

$$a_P T_P = \sum a_{nb} T_{nb} + b \tag{III.12}$$

Où T_P : Température du point considéré .

T_{nb} : Températures des points avoisinants.

III.6. Traitement de terme source :

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 par linéarisation de ce dernier sous la forme :

$$\bar{S} = S_C + S_P T_P \tag{III.13}$$

Où S_C et S_P sont des constantes.

Pour notre application le terme source s'écrit comme suit :

- pour le métal de base le terme source est égal à l'énergie interne générée :

$$S_M = h_{\infty} (T_{\infty} - T_P) + 2\sigma\varepsilon(T_{\infty}^4 - T_P^4) \quad (\text{III.14})$$

- Au niveau de cordon : $S_{CO} = h_{\infty} (T_{\infty} - T_P) + 2\sigma\varepsilon(T_{\infty}^4 - T_P^4) + q_0 e^{-A(x^2+(y-w)^2)}$ (III.15)

Ce terme doit être représenté sous la forme linéaire : $\bar{S} = S_C + S_P T_P$ (III.16)
pour ce faire on va utiliser la méthode de la tangente recommandée par PathanCARD [15]

$$\bar{S} = \bar{S}^* + \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* (T_P - T_P^*) \quad (\text{III.17})$$

avec :

$$S_C = \bar{S}^* - \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* T_P^* \quad (\text{III.18})$$

$$S_P = \left(\frac{dS}{dT_P} \right)^* \quad (\text{III.19})$$

On aura :

❖ Au niveau du métal de base : $S_C = 2.0(h_{\infty} T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T_P^{*4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^{*4})$ (III.20)

$$S_P = -2.0(h_{\infty} + 4\sigma T_P^{*3}) \quad (\text{III.21})$$

❖ Au niveau de cordon de soudure :

$$S_C = 2.0(h_{\infty} T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T_P^{*4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^{*4}) + q_0 e^{-A(x^2+(y-w)^2)} \quad (\text{III.22})$$

$$S_P = -2.0(h_{\infty} T_{\infty} + 4\sigma T_P^{*3}) \quad (\text{III.23})$$

Avec * symbole de la dernière itération

III.7. Conductivité thermique variable :

Jusque là nous avons considéré la conductivité thermique (K) constante sur tout le domaine de calcul. Cependant il arrive souvent que K varie avec les coordonnées spatiales en raison notamment de la variation de la température .

Comme il est pratiquement impossible d'avoir une relation mathématique $K=K(x,y,z)$, on doit donc déterminer les coefficients a_E et a_W en termes de conductivités thermiques prises au niveau des noeuds W , P et E du réseau, lesquels sont uniformes sur le volume de contrôle. C'est à dire que chaque volume de contrôle a une conductivité propre à lui .

Considérant l'interface e , les distances la séparant des points P et E à savoir respectivement $(\delta x)_e^-$ et $(\delta x)_e^+$, ne sont pas forcément égales (maillage non uniforme) .Le coefficient a_E représente la conductance de P et E , et donné par la relation :

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e} = \left[\frac{(\delta x)_e^-}{K_P} + \frac{(\delta x)_e^+}{K_E} \right]^{-1} \quad (III.24)$$

Où $\frac{(\delta x)_e^-}{K_P}$ et $\frac{(\delta x)_e^+}{K_E}$ sont respectivement les résistances thermiques entre P et e et entre e et E .

Une relation identique peut être obtenue pour a_W .

L'équation (III.24) implique que pour chaque volume de contrôle nous aurons un profil de température linéaire avec des pentes différentes .

Le flux de la chaleur s'exprime alors par :

$$q_e = \frac{K_P}{(\delta x)_e^-} (T_P - T_e) = \frac{K_E}{(\delta x)_e^+} (T_e - T_E) \quad (III.25)$$

En éliminant T_e on aura :

$$q_e = \left[\frac{(\delta x)_e}{K_p} + \frac{(\delta x)_e}{K_e} \right]^{-1} (T_p - T_e) \quad (\text{III.26})$$

En effet, nous avons besoin des conductivités sur les deux volumes de contrôles K_e et K_w , mais c'est aux points du maillage que nous les connaissons, nous exprimons alors K_e de la manière suivante :

$$\frac{K_e}{(\delta x)_e} = \left[\frac{(\delta x)_e}{K_p} + \frac{(\delta x)_e}{K_e} \right]^{-1} \quad (\text{III.27})$$

De même que pour K_w

$$\frac{K_w}{(\delta x)_w} = \left[\frac{(\delta x)_w}{K_w} + \frac{(\delta x)_w}{K_e} \right]^{-1} \quad (\text{III.28})$$

Si le maillage est uniforme $((\delta x)_p = (\delta x)_e, \text{ ou } (\delta x)_e = 2(\delta x)_p = 2(\delta x)_e)$ nous aurons alors :

$$K_e = \frac{2K_p K_e}{K_p + K_e} \quad (\text{III.29})$$

Remarquons que la valeur de K_e évaluée par la relation ci dessus est une moyenne harmonique des valeurs aux noeuds plutôt qu'une moyenne arithmétique. Pour discuter des Mérites de la première voyons deux exemples :

1) Si $K_E \rightarrow 0$, alors K_e tend vers 0, cela donne bien un flux nul, alors que la Formulation arithmétique n'aurait pas donné un flux nul.

2) Si $K_p \rightarrow \infty$ alors K_e tend vers $2K_E$ donc la conductivité à l'interface ne dépend pas de K_p ce qui est normal car la grande conductivité du matériau autour de point p offre peu de résistance par rapport à celle autour de E, cette formulation peut être établie pour d'autres dimensions.

Lorsque K_p dépend de T comme c'est le cas dans notre problème, les étapes à suivre sont les suivantes :

- a) donner les valeurs estimées de T en chaque point du maillage (choix initiale).

- b) De ces valeurs, seront déduits les différents coefficients des équations discrétisées
- c) Résoudre les équations discrétisées pour avoir T.
- d) Avec ces nouvelles valeurs, reprendre l'étape b et recommencer jusqu'à ce que les valeurs de T ne varient plus. On dit alors qu'on a atteint la convergence.

III.9. Conduction en régime transitoire

Après avoir terminé l'étude de la conduction unidimensionnelle en régime permanent. Nous allons maintenant étendre la méthode des volumes finis aux problèmes transitoires ou instationnaires comme c'est le cas dans notre étude.

Considérons un système unidimensionnel, nous abandonnons temporairement le terme Source pour ne pas alourdir les démonstrations, l'équation de la chaleur s'écrit dans ce cas :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{ III.30 })$$

Où H l'enthalpie volumétrique ($H = \rho C_p dT$) .

Le temps est une coordonnée unidirectionnelle, nous cherchons à partir des températures à l'instant $t=0$, T_E° et T_W° T_E° et T_W° les nouvelles valeurs du temps $t+\Delta t$, soient T_P , T_E et T_W

Soit un nœud P du maillage. L'équation aux variables discrètes sera déduite en intégrant l'équation 0 sur le volume de contrôle entourant le nœud P et pour l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$.

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial H}{\partial t} dt dx = \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (\text{ III.31 })$$

Pour pouvoir intégrer cette équation, on doit faire certaines suppositions.

- A un instant donnée, la température, la masse volumique, la chaleur spécifique, représentées respectivement par T, ρ et C_p sont uniforme à travers le volume de contrôle

Pour une abscisse donnée x (valable pour une ordonnée y) le flux est uniforme sur chaque face de volume de contrôle.

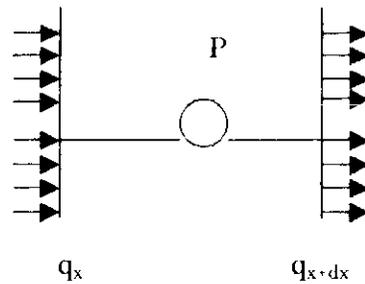


FIG III.9. uniformité de flux au niveau des interfaces

Pour le nœud p , et vu que tous les paramètres physiques sont uniformes sur le volume de contrôle, le premier membre de la relation (III.31) devient :

$$(H_p - H_p^0) \Delta x$$

Avec :

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

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

Sachant que :

$$H_p^0 = \rho^0 C_p^0 T_p^0 \text{ et } H_p = \rho C_p T_p \quad (\text{III.32})$$

tel que : ρ^0, C_p^0 , et T_p^0 sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique et la température du nœud considéré à l'instant t .

ρ, C_p et T_p sont ceux du même nœud à l'instant $t + \Delta t$.

Pour exprimer la variation de la température T à $t + \Delta t$; On pose :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_i dt = [f T_p + (1-f) T_p^0] \Delta t \quad (\text{III.33})$$

Où f représente un facteur de pondération compris entre 0 et 1.

Sachant que :

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) - \left(K \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(K \frac{dT}{dx} \right)_w = \frac{K_e T_E - K_e T_P}{(\delta x)_e} - \frac{K_w T_P - K_w T_W}{(\delta x)_w} \quad (\text{III.34})$$

L'équation (III.31) devient alors après intégration

$$\begin{aligned} (\rho C_p T_P - \rho^0 C_p^0 T_P^0) \Delta x = f \left[\frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta t \\ + (1-f) \left[\frac{K_e (T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P^0 - T_W^0)}{(\delta x)_w} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (\text{III.35})$$

En l'arrangeant cette équation devient :

$$\left[\rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} + f \frac{K_e}{(\delta x)_e} + f \frac{K_w}{(\delta x)_w} \right] T_P = \frac{K_e}{(\delta x)_e} [f T_E + (1-f) T_E^0] + \frac{K_w}{(\delta x)_w} [f T_W + (1-f) T_W^0] +$$

$$\left[\rho^0 C_p^0 \frac{\Delta x}{\Delta t} - (1-f) \frac{K_e}{(\delta x)_e} - (1-f) \frac{K_w}{(\delta x)_w} \right] T_P^0$$

Ou encore :

$$\mathbf{a}_p T_P = \mathbf{a}_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + \mathbf{a}_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + b \quad (\text{III.36})$$

Avec :

$$\mathbf{a}_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e}; \quad \mathbf{a}_W = \frac{K_w}{(\delta x)_w}; \quad \mathbf{a}_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}; \quad \mathbf{a}_p = f \mathbf{a}_E + f \mathbf{a}_W + \mathbf{a}_p^0$$

$$\mathbf{b} = \left[\frac{\rho^0 C_p^0 \Delta x}{\Delta t} - (1-f) \mathbf{a}_E - (1-f) \mathbf{a}_W \right] T_P^0$$

En présence du terme source l'équation (III.36) s'écrira sous la forme :

$$a_p T_p = a_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + a_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + b \quad (\text{III.37})$$

avec :

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e}; \quad a_W = \frac{K_w}{(\delta x)_w}; \quad a_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}; \quad a_p = f a_E + f a_W + a_p^0 - S_p \Delta x$$

$$b = + S_c \Delta x + \left[\frac{\rho^0 C_p^0 \Delta x}{\Delta t} - (1-f) a_E - (1-f) a_W \right] T_p^0$$

Selon la valeur du facteur f , le développement d'un schéma numérique peut se faire de trois manières .

- $f=0$; le schéma est dit complètement explicite, c'est à dire que la solution numérique recherchée est exprimé de manière non itérative ; elle est fonction des termes précédents connu, des conditions aux limites et initiales .
- $f \neq 0$, le schéma est dit implicite, c'est à dire que la solution n'est obtenu qu'avec la résolution simultanée d'une série d'équations .
- $f=1$, le schéma est totalement implicite .
- $f=0.5$, le schéma est dit schéma de Crank-nicolson.

Le schéma totalement implicite est recommandé pour sa grande stabilité, et aussi parce qu'il tient des valeurs calculées , et traduit une réalité physique.

En choisissant ce type de schéma (complètement implicite) l'équation sera écrite de la manière suivante :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (\text{III.38})$$

avec

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e}; \quad a_W = \frac{K_w}{(\delta x)_w}; \quad a_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}; \quad a_p = f a_E + f a_W + a_p^0 - S_p \Delta x$$

$$\mathbf{b} = S_c \Delta x + \left[\frac{\rho^0 C_F \Delta x}{\Delta t} \right] T_P^0$$

III.9. Méthode de résolution

La méthode de résolution adoptée dans notre cas est celle qui utilise l'algorithme de Thomas qu'on appelle aussi la méthode de TDMA (par extension algorithme de la matrice Tridiagonal)

Soit un problème unidimensionnelle :

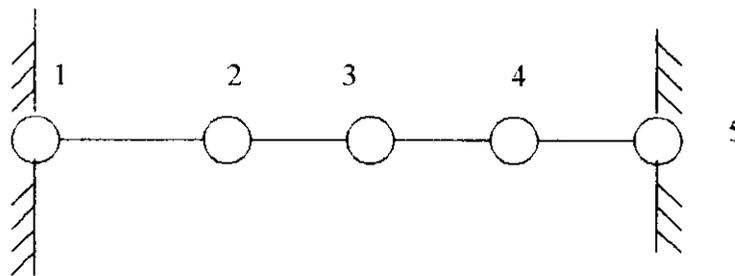


FIG. III.10. Numérotation des nœuds de réseaux

L'équation discrétisé caractérisant ce problème s'écrit de la manière suivante :

$$a_i T_i - b_i T_{i+1} + c_{i-1} T_{i-1} + d_i \quad (\text{III.39})$$

Où les coefficients a_i , b_i , c_i et d_i correspondent respectivement aux coefficients :

a_P , a_E , a_W et b .

Pour les nœuds externes 1 et N nous aurons :

$$a_1 T_1 - b_1 T_2 + d_1 \quad (\text{III.40})$$

$$a_N T_N - c_N T_{N-1} + d_N \quad (\text{III.41})$$

Posons $c_1 = 0$ et $b_N = 0$

Les équations III.40 et III.41 ont été obtenues pour le cas d'un flux de chaleur pris comme condition aux limites .Lorsque c (est la température qui est connue, ces équations restent toujours valables en faisant un choix approprié des coefficients :

Par exemple, si on connaît la température sur la frontière gauche du domaine, on aura : $a_i = 0$; $b_i = 0$ et $d_i =$ la valeur numérique de T_i

Mettons l'équation sous la forme :

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$$P_i = b_i / a_i \quad \text{et} \quad Q_i = d_i / a_i \quad (\text{III.43})$$

Si on injecte cette dernière équation dans l'équation III.43 pour $i=2$ on obtiendra :

$$T_2 = P_2 T_3 + Q_2 \quad (\text{III.44})$$

En continuant le processus de substitutions nous aurons pour la $i^{\text{ème}}$ point

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (\text{III.45})$$

En remplaçant l'équation :

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1} \quad (\text{III.46})$$

Dans l'équation (III.39) on obtient

$$a_i T_i - b_i T_{i+1} + c_i (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + d_i \quad (\text{III.47})$$

La relation ainsi obtenue sera arrangé pour devenir :

$$T_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \text{ et } \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}$$

on remarque que l'équation ci-dessus ressemble à l'équation (III.43) avec :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \text{ et } Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}$$

Notons aussi que P_i et q_i ont le même dénominateur et qu'il dépendent des valeurs P_{i-1} et q_{i-1}

ce processus récursif nécessite la connaissance d'un point de départ. celui-ci à été précédemment déterminé par la relation

Au point N nous aurons :

$P_N = 0$ car $b_N = 0$ ce qui implique que $Q_N = T_N$

La valeur de T_N étant désormais connue nous pourrions alors calculer les autres valeurs de la température par un processus de substitutions inverse :

III.10 : Présentation du problème bidimensionnel (le problème à étudier)

III.10.1 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 la transfert de chaleur écrite dans un système de coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \tag{ III.48 }$$

la discrétisation de l'équation (III.48) permet de passer d'une équation aux dérivées partielle à un système d'équation algébriques .on à donc appliquer la même procédure exposée dans le paragraphe 3534 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 :

$$\int_s^e \int_t^{t+\Delta t} \int \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) dt . dx . dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt . dx . dy + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx . dy . dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int S . dx . dy . dt \tag{ III.49 }$$

Le membre de gauche de l'équation (III.31) appliqué au bidimensionnel , devient alors :

$$\int_s^e \int_t^{t+\Delta t} \int \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) dt . dx . dy = (H_P - H_P^0) \Delta x \Delta y \tag{ III.50 }$$

Avec :

H_P^0 : enthalpie du nœud considéré à l'instant t

H_P ; enthalpie du nœud à l'instant $t + \Delta t$

Et :

$$H_P^0 = \rho^0 C_P^0 T_P^0 \text{ et } H_P = \rho C_P T_P$$

❖ Le premier terme du membre droit de l'équation III.49 s'écrit

$$\iiint \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \Delta t \Delta y \left[\frac{(K_e T_E - K_e T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{(K_w T_P - K_w T_W)}{(\delta x)_w} \right] \quad (\text{III.51})$$

❖ Le deuxième terme du membre droite de l'équation III.49 s'écrit :

$$\iiint \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \Delta t \Delta x \left[\frac{(K_n T_N - K_n T_P)}{(\delta y)_n} - \frac{(K_s T_P - K_s T_S)}{(\delta y)_s} \right] \quad (\text{III.52})$$

On aura :

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

avec :

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

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

III.10.2 Condition aux limites :

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

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

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

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

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

L'équation précédente peut se mettre sous la forme :

$$q_p = f_c + f_p T_p.$$

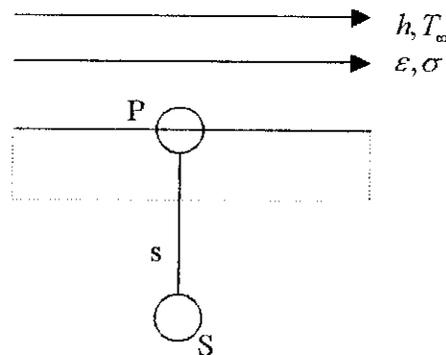
Avec

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

$$f_p = 0$$

ainsi, les équations aux limites se présentent comme suite :

face supérieure : voir figure ci-dessous



Face supérieure

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

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

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

$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

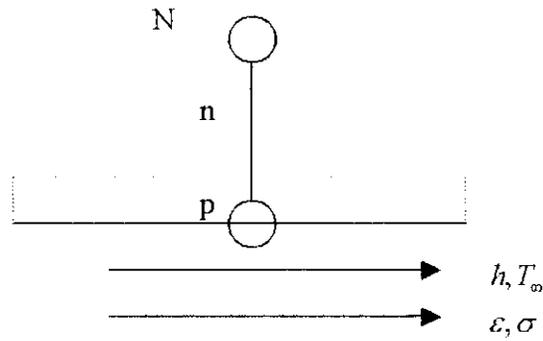
$$a_p = \frac{k_s}{\Delta y}$$

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

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

$$a_E = a_N = a_W = 0$$

face inférieure :



Face inférieure

$$a_p T_p = a_N T_N + b$$

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

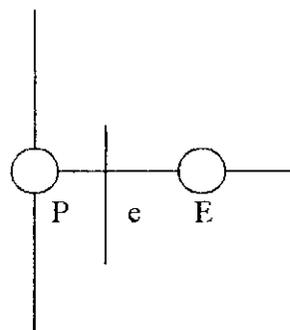
$$a_n = \frac{k_n}{\Delta y}$$

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

$$a_E = a_S = a_W = 0$$

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

On a pour cette paroi flux de chaleur nul d'où $T_P = T_E$ voir figure



Face gauche

- **Face droite :**

$$a_p T_p = a_w T_w + b$$

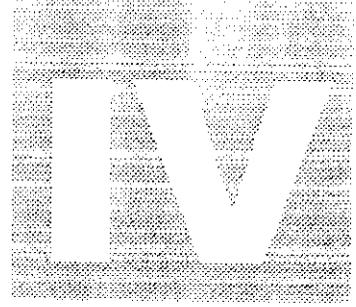
$$a_p = a_w = \frac{K_w}{(\delta x)_w} \quad \text{et} \quad b = h(T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T_p^4) \frac{K_w}{(\delta x)_w} \quad \text{et} \quad b = h(T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T_p^4)$$

III.10.3 : résolution numérique pour le problème bidimensionnel

Pour notre problème le schéma ADI est recommandé : (Alternating direction implicit) ou schéma aux directions alternées, est surtout utilisé dans le cas d'une résolution en régime transitoire, pour un problème 2D ou 3D. La méthode est basée sur la division de pas de temps sur 2, dans un premier demi pas, le schéma est totalement implicite dans une direction et totalement explicite dans l'autre direction, dans le deuxième demi pas la direction implicite est changée, cette alternance rend le schéma ADI, comme le schéma implicite, inconditionnellement stable pour un système d'équation linéaire, le schéma ADI, permet d'utiliser la TDMA 2 fois par pas de temps.

PATHANKAR [16] propose pour la résolution de notre problème une autre méthode c'est la méthode de résolution, **ligne par ligne** elle comporte les étapes suivantes :

1. Choisir les conditions initiales de la variable T pour tout le domaine d'étude.
2. Choisir une direction du domaine (par exemple y) et considérer l'autre direction comme constante.
3. résoudre les matrices tridiagonales obtenues à l'aide de l'algorithme TDMA pour chaque ligne du domaine d'étude.
4. répéter à partir de 2 les mêmes opérations pour l'autre direction (direction x).
5. poser les valeurs obtenues comme choix de départ.
6. retourner à 2 jusqu'à la convergence.



Partie expérimentale

IV.1.Introduction :

Le but de cette partie est d' enregistrer la variation de la température en fonction du temps (les cycles thermiques) pour pouvoir estimer les étendues de la ZAT et de la ZF ,cette partie nous a permis de voir l'influence des paramètres de soudage sur la qualité de cordon de soudure ; à la fin les essais qu' on a effectué nous ont aidé à déterminer la faisabilité d'une soudure des matériaux quelconques par un procédé de soudage précis et de pouvoir contrôler sa qualité avec la radiographie .

IV.2 Procédé de soudage et dispositif expérimental

IV.2.1.Procédé de soudage :

Le procédé de soudage qu'on a utilisé est le soudage TIG qui à été illustré précédemment , le soudage a été effectué à l'atelier du CSC par un soudeur homologué .

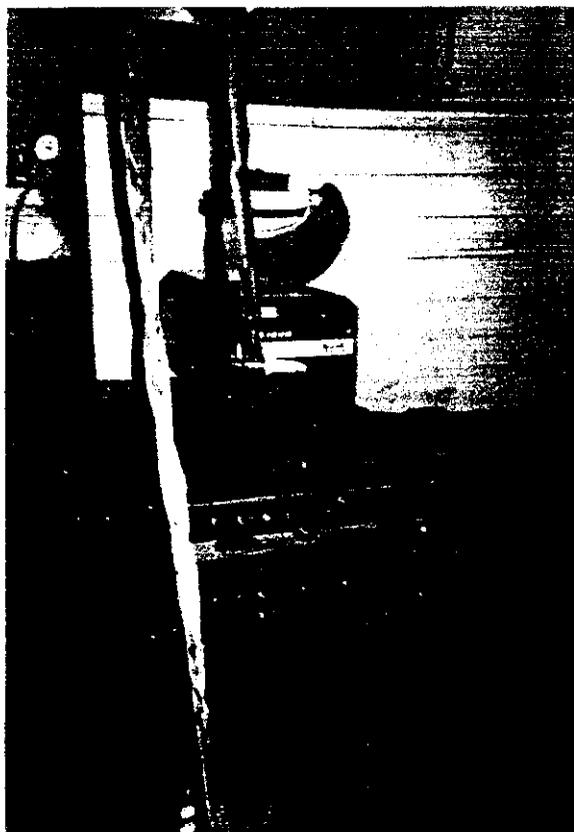


FIG IV.1 Poste de soudage Tig (atelier de CSC)

IV.2.2. Matériaux et techniques expérimentations

Trois essais ont été effectués, dans chaque essai on a soudé deux plaques minces, avec paramètres spécifiques pour chacun, afin d'obtenir les cycles thermique.

Le premier essai de soudage avait comme but de déterminer la faisabilité de soudage de nos pièces par le procédé TIG un contrôle par radiographie a été effectué pour dé

Les paramètres sont illustré dans le tableau ci dessous

Tableaux IV.1 Réglage des différents paramètre de soudage

Type de matériaux	Vitesse <i>cm/mn</i>	polarité	Gaz de protection	Débit du gaz <i>l/mn l/mn</i>	Tension (V)	Intensité (A)
304L	6.42	inverse	Argon	10	10	35
304L	8,14	inverse	Argon	8.5	9	36
Acier au carbone	5.79	inverse	Argon	8	10	33

IV.2.2.1. Dispositif de prise de l'évolution de la température en fonction du temps :

On a collé les thermocouple en chromel-alumel pouvant supporter des températures allant jusqu'à 1200°C, après soudage on les a couvert avec une patte isolante thermiquement pour éviter le contact avec l'atmosphère extérieure.

Le positionnement de ces thermocouples est illustré sur les figures IV.2 et IV.3, ces positions de thermocouples ont été choisit de telle sorte qu'ils coïncide avec le maillage qu'on choisit pour pouvoir comparer les résultats obtenus (cycle thermiques) avec ce qu'on a eu dans notre code de calcul.

La figure IV.4 illustre notre dispositif.

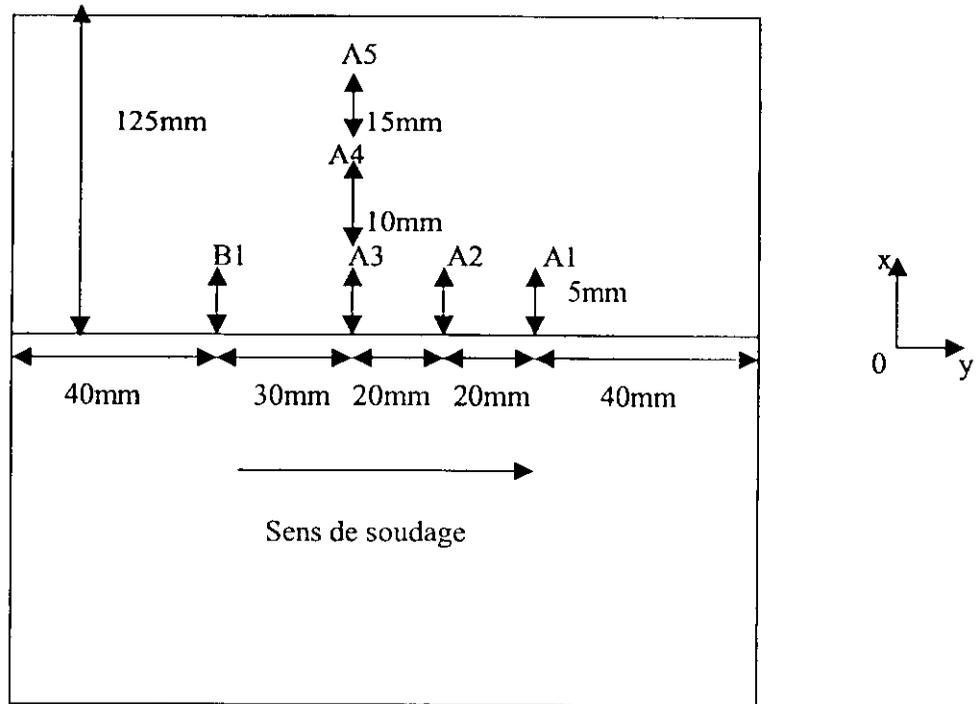


FIG.IV.2 Position de thermocouple sur la plaque 2 (304L)
L'échelle n'est pas respecté

Il est à noter que les dimensions de chaque plaque 304 L sont :

- Longueur : 150mm
- Largeur : 125 mm
- Epaisseur : 1.47mm

Les coordonnées des points :

B1(5,40)
 A3(5,70)
 A2(5,90)
 A1(5,110)
 A4(15,70)
 A5(30,70)

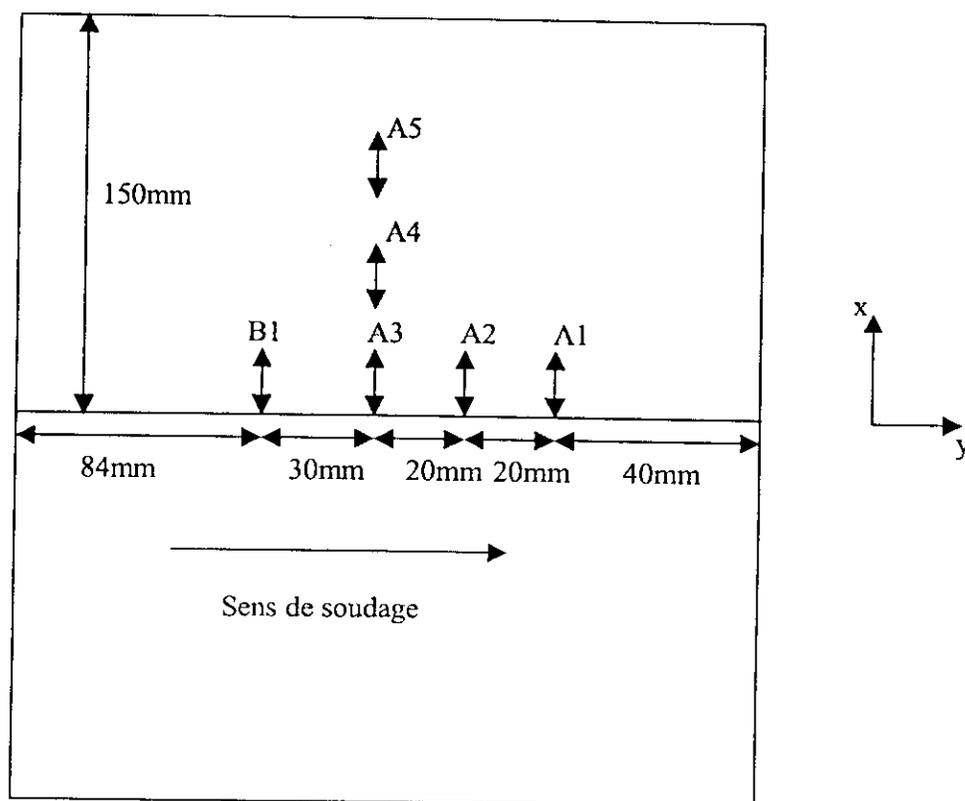


FIG IV.3. Positions de thermocouples sur la plaque 3 (acier au carbone)

On note que les dimensions de la plaque en acier au carbone sont :

- Longueur : 194mm .
- Largeur : 150mm .
- Epaisseur : 1.37 mm .

Les coordonnées des points :

B1(5,84)

A3(5,114)

A2(5,134)

A1(5,154)

A4(15,114)

A5(30,114)

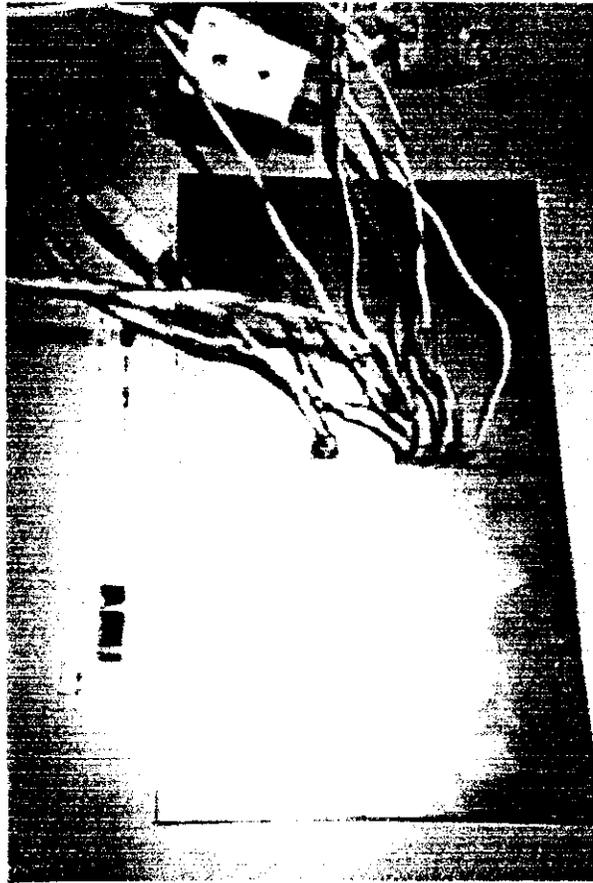


FIG IV.5. Thermocouple soudés sur la pièce

Les thermocouples sont reliés à un enregistreur qui donne l'évolution de la température (l'histoire thermique) de chaque thermocouple au cours du temps, l'évolution de température de tous les points sont donnés dans le même graphe. on a récupéré les valeurs correspondantes à chaque thermocouple, pour les tracer séparément ..

la figure IV.6 illustre Le branchement de thermocouples sur l'enregistreur

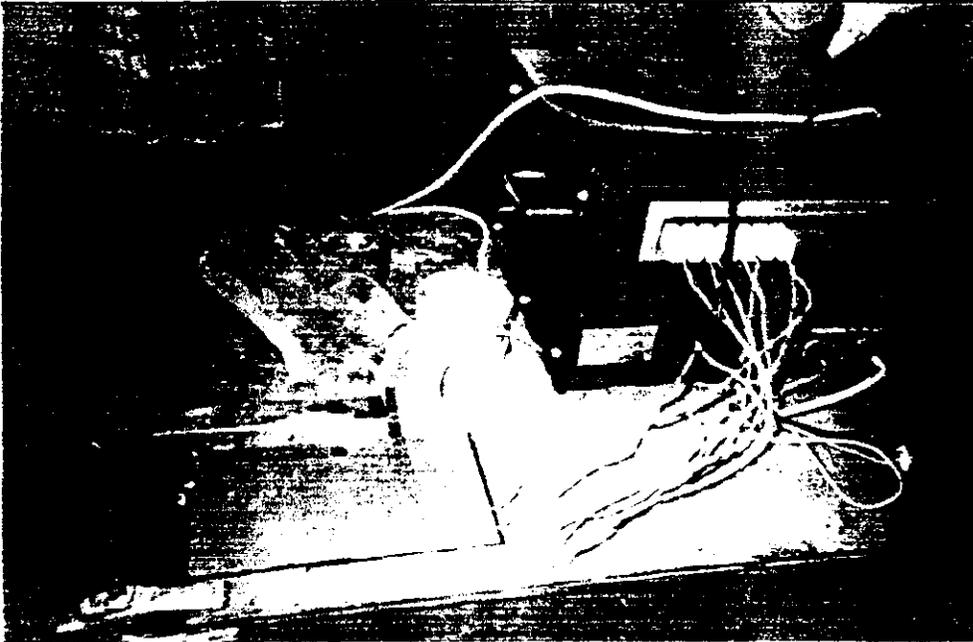


Fig IV.6 Dispositif d'enregistrement des cycles thermiques

IV.2.2.2. Dispositif de soudage :

Les plaques sont placées bout à bout, et reposent sur un support linéaire pour minimiser 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.7, on voit bien le support qu'on a mis, en principe on devait faire la protection gazeuse en dessous et en dessus de notre plaque. Pour éviter toute sorte d'oxydation afin de réaliser une soudure de pénétration de qualité, mais comme la préparation de ce dispositif prend du temps, on a effectué le soudage sans protection gazeuse en dessous de la pièce.

Comme on l'a mentionné avant, on a soudé avec le procédé de soudage TIG sans un apport de métal, pour prendre les mêmes conditions qu'on a supposé dans notre modèle numérique, mais au début on a rencontré un problème de maintenir les deux pièces dans leurs positions durant l'opération de soudage, au début on était obligé de souder les extrémités avec un apport de métal après on a laissé les pièces se refroidir pour les souder à nouveau sans apport de métal c'est le choix qu'on a effectué pour le premier essai.

Pour le deuxième et le troisième essai on a soudé les bouts des deux pièces sans apport de métal ,après on les a laissé se refroidires pour les souder à nouveaux .

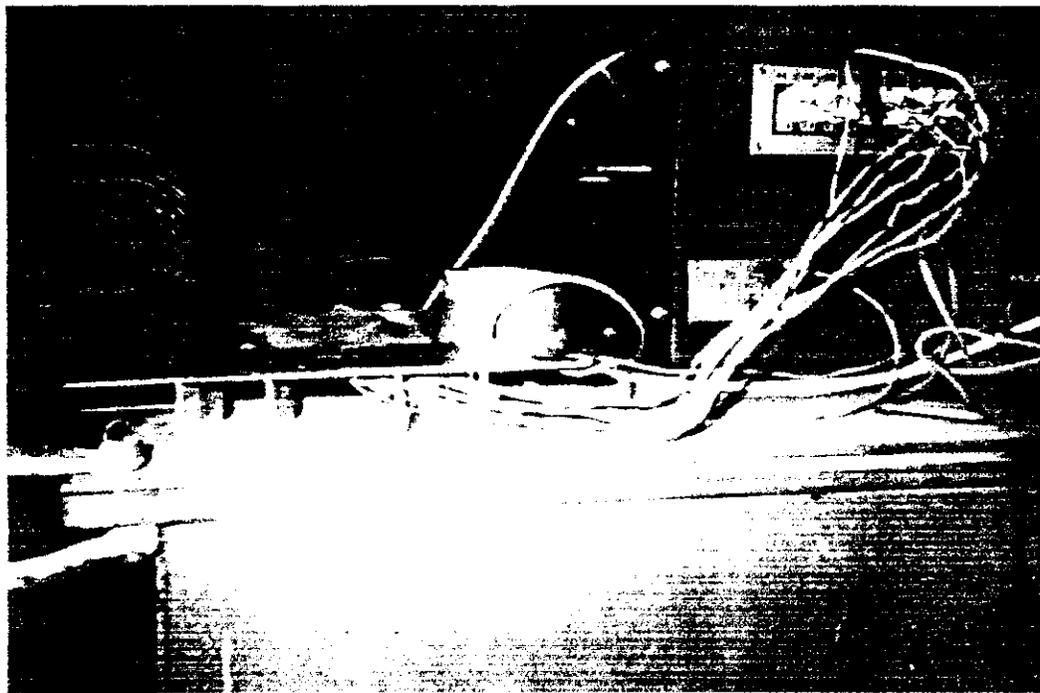
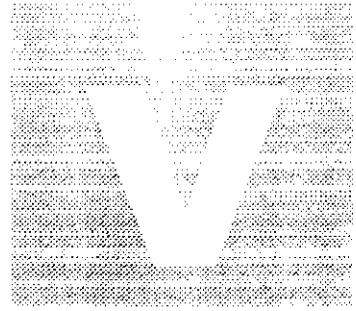


FIG IV.7 dispositif de soudage

IV.2.3. Contrôle de la soudure

Des radiographies de la soudure préliminaire ont été effectuées pour avoir une idée sur la faisabilité de notre soudure.

Cette radiographie représente un moyen de contrôler notre soudure les résultats seront illustrés et discutés dans le prochain chapitre .



Résultats et Interprétations

Introduction :

Ce chapitre sera consacré aux résultats et à leurs interprétations ,Les résultats obtenus pour les différentes applications, vont nous permettre la détermination des étendues des zones à risques à savoir la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT).

On va discuter dans un premier lieu les résultats obtenus par la simulation numérique, ensuite on va discuter et interpréter les résultats obtenus par l'expérimentale

V.1 Discussion et interprétation des résultats obtenus par la simulation numérique

V.1.1.choix du 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 cette zone, 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 grossière est employé.

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

Afin de définir un maillage optimal, nous avons étudié l'influence de la finesse selon les deux directions. Nous avons varié dans un premier lieu le pas Δx , en gardant constant le pas Δy ainsi que la vitesse du soudage on a constaté qu'au delà d'un certain seuil, les courbes de la température deviennent superposées, ce qui explique qu'on a atteint le maximum de finesse. Donc, il ne sera plus utile de diminuer le pas Δx .

Nous passons ensuite à l'optimisation du pas temporel Δt par le bais du pas spatial Δy liés par la relation :

$$\Delta y = V * \Delta t$$

avec

Δy : pas spatial suivant l'axe y (correspond au déplacement de l'arc).

V :vitesse de soudage.

On a constaté aussi qu'au delà d'un maillage bien défini, les courbes désignant la variation de la température en fonction du temps (cycle thermique du soudage), prennent la même allure . donc, il ne sera plus nécessaire de diminuer le pas Δy .

Le choix du maillage auquel nous avons opté est :

(10*20)*30 vc

on a suivant l'axe des x :

10 volume de contrôle pour la première zone

20 volume de contrôle pour la deuxième zone.

Suivant l'axe des y :

30 volume de contrôle

vc volume de contrôle

V.1.2 discussion des résultats :

Les figures V.1 à V.3 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 a 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 .

Les figures V.4 à V .6 illustre l'influence d la vitesse sur la répartition d champs de température , on voit que les isotherme retercés au fur et à mesure que la vitesse augmente .

Ces résultats sont obtenus pour l'acier INOX 304 L .

On voit d'après la figure v.7 que l'étendue de la ZAT est de l'ordre de 4 mm .

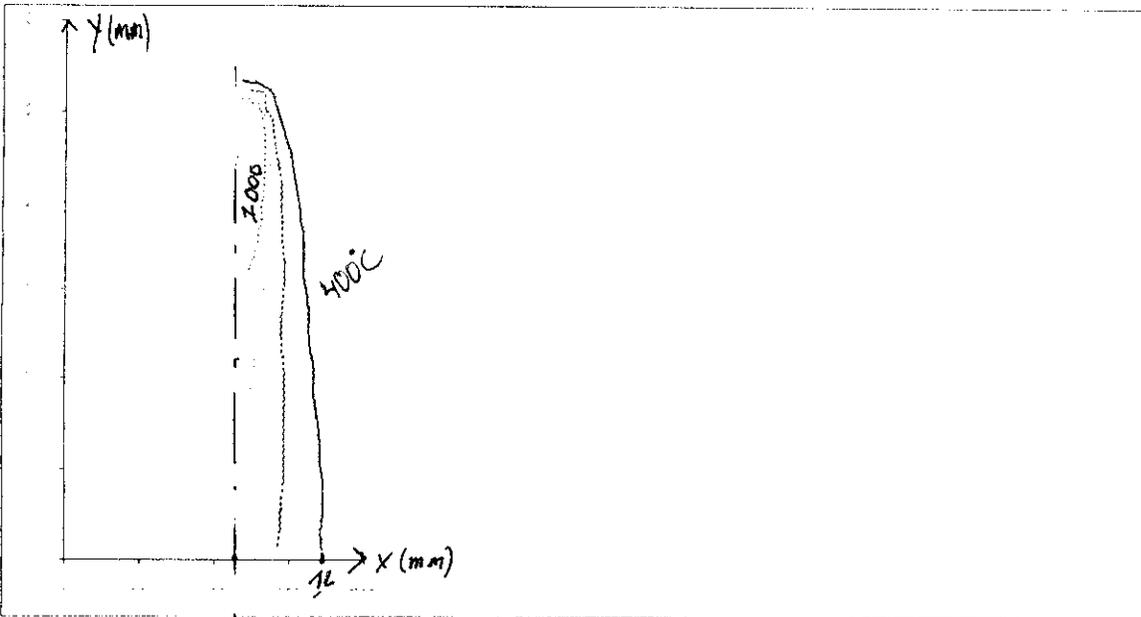


FIG V.1 isothermes à l'instant $t = 20$ s

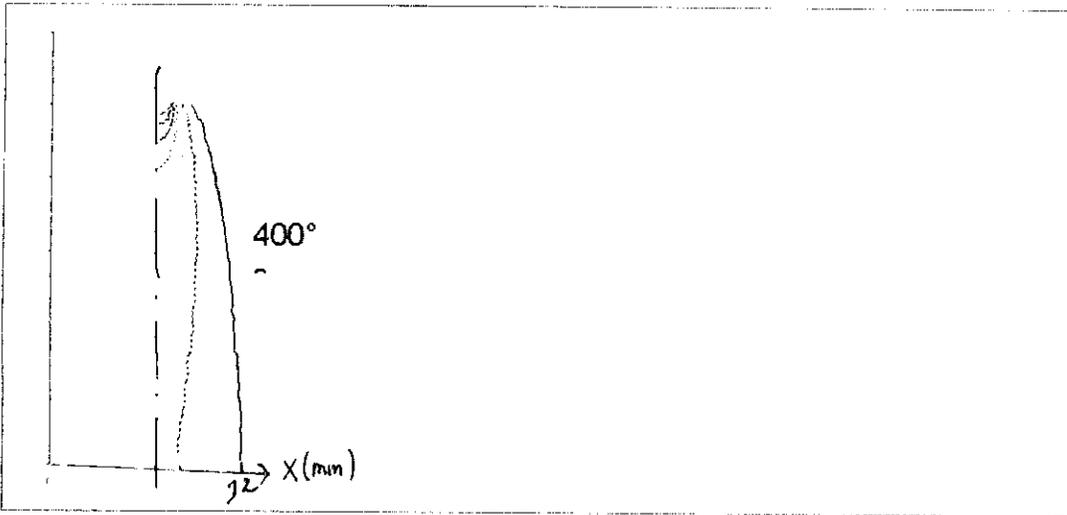


FIG V.2 : isotherme à l'instant $t = 12s$

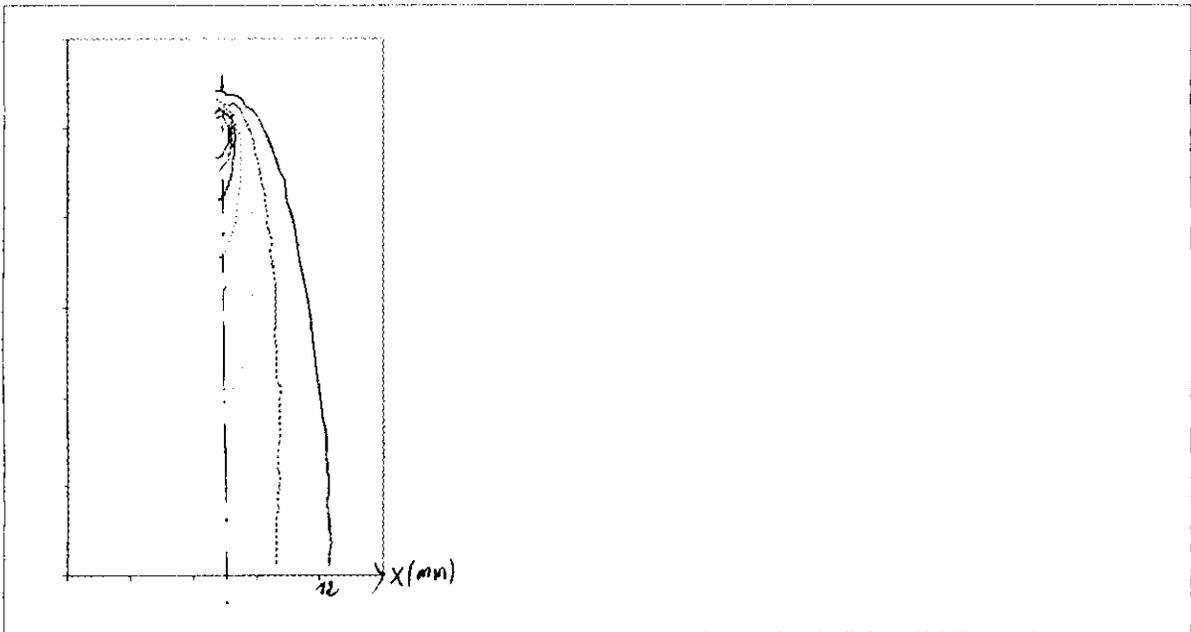


FIG V.3 : isotherme à $t = 40$ s

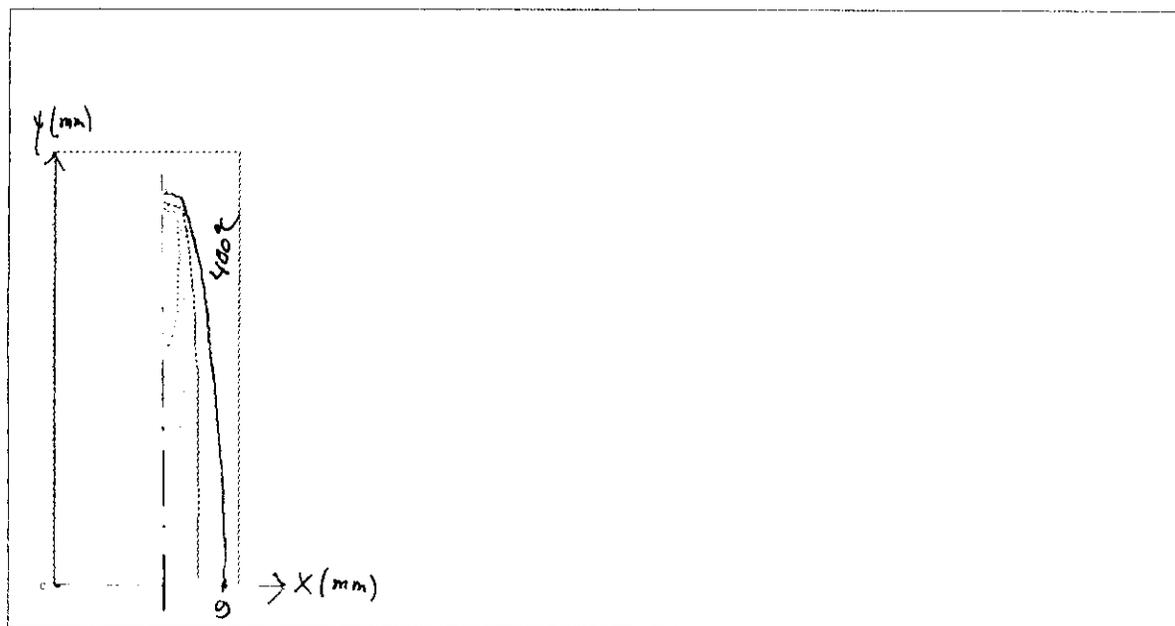


FIG V.4 L'influence de la vitesse sur la répartition de la température

$V = 0.5 \text{ cm/s}$

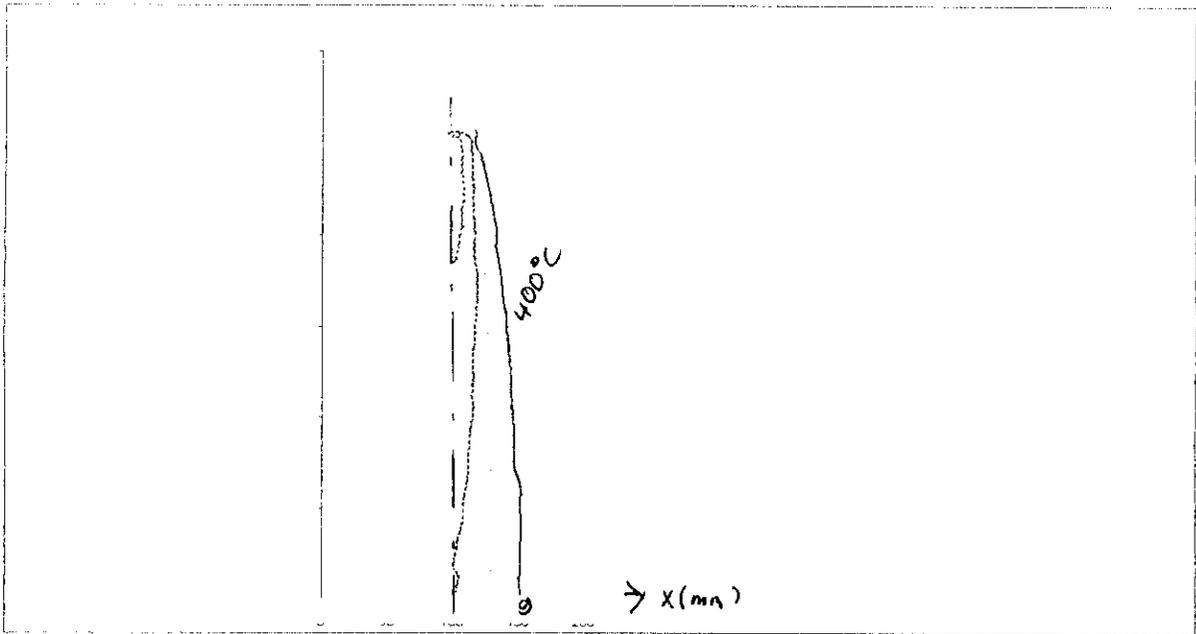


FIG V.5 L'influence de la vitesse sur la répartition de la température

$V = 0.75 \text{ cm/s}$

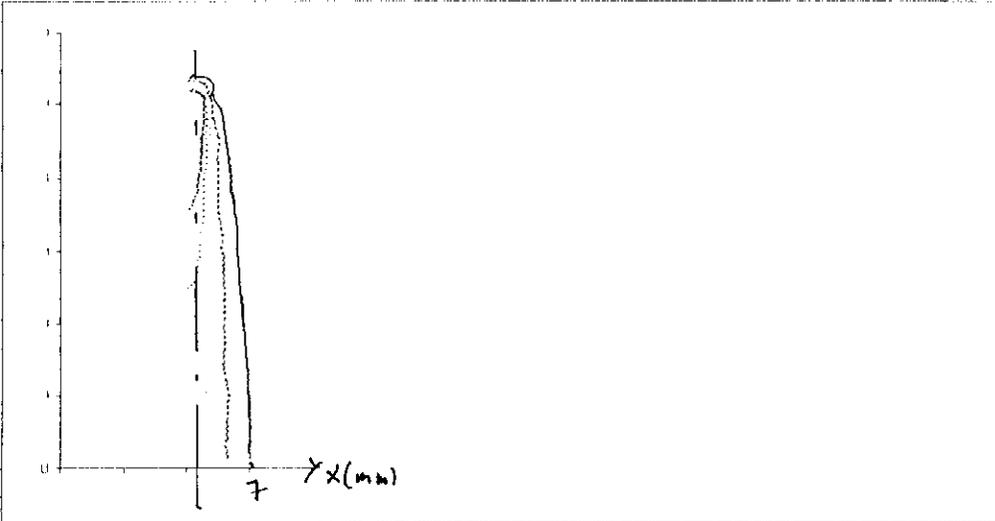


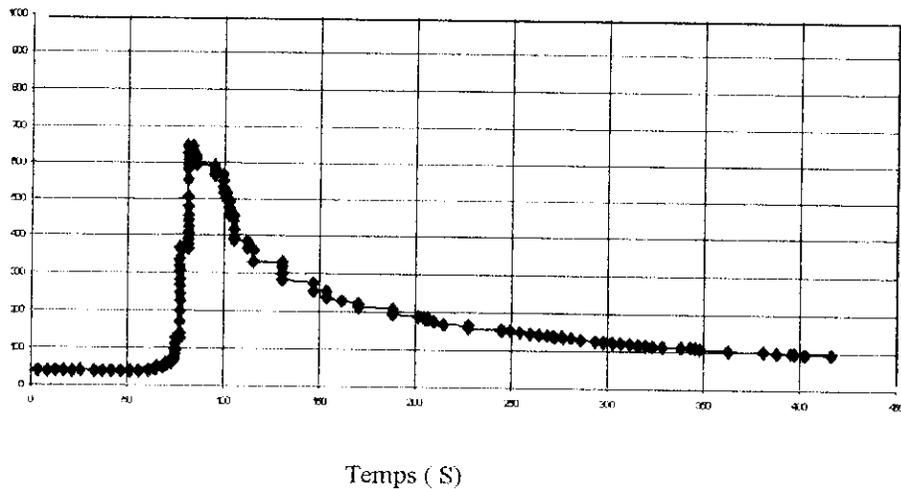
FIG V.6 L'influence de la vitesse sur la répartition de la température

$V = 1 \text{ cm/s}$

V.2. Discussion et interprétation des résultats obtenus par l'expérimentale :

Après obtention des courbes température-temps enregistré sur les plaques 2 et 3 (Le premier essai était juste pour voir le faisabilité de la soudure , le résultats obtenu par l'enregistreur étaient sous forme de graphes superposés , on les a séparé chacun dans un graphe , les graphes sont illustrés ci-dessous .

V.2.1 : L'évolution de la température en fonction du temps (acier inoxydable 304L) :



FIGV.9 courbe température-temps au point B1

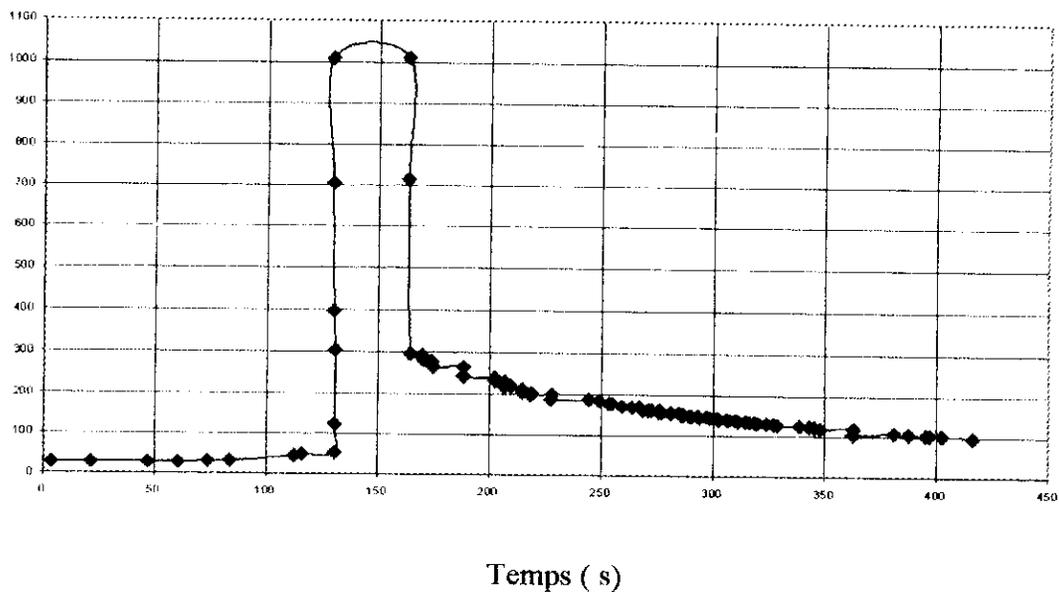


FIG.V.10 Courbe de température-temps au point A1

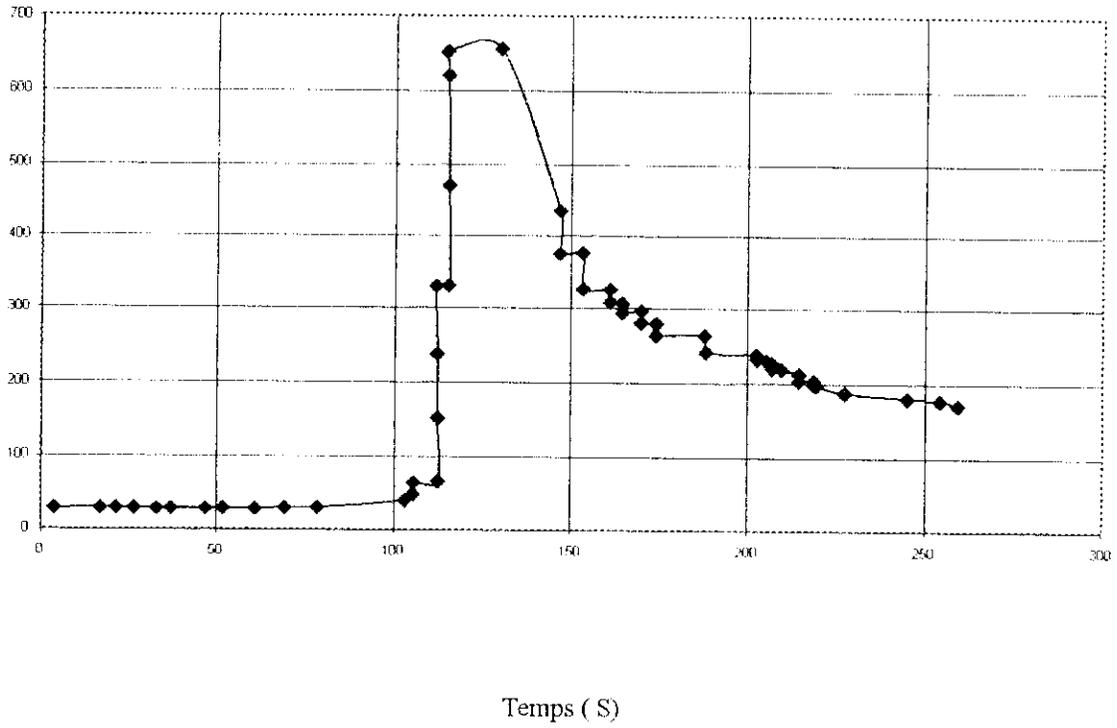


FIG V.11 Courbe de température-temps au point A2

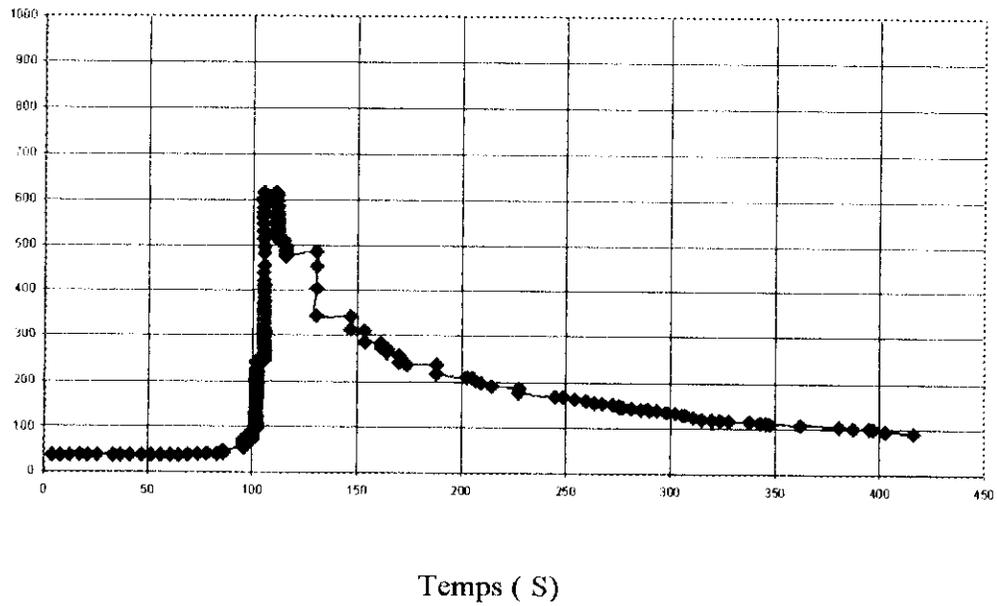


FIG V.12 Courbe de température-temps au point A3

D'après ces courbes on peut remarquer que la notion d'état quasi-stationnaire est vérifiée pour les points B1 , A2, A3 , c'est pas le cas pour A1, l'explication la plus correcte c'est que la source de chaleur s'est rapprochée à ce point puisque la température a dépassée les 1000°C

Le procédé étant manuel , le contrôle parfait du déplacement de source de chaleur étant impossible .

La ZAT est située entre les points de 4.5 à 6 mm car les thermocouples placés à distance de 5mm ont registrés des valeurs entre 700 et 800°C (la ZAT est délimitée par la première transformation 723°C et la température de fusion)

Cycles thermiques enregistrés sur la plaque 3 (Acier au carbone) :

Les résultats obtenus dans le cas de l'acier au carbone sont similaires à ceux du 304L, mais il est très important de noter que la soudure a été interrompue une vingtaine de secondes. Donc la source de chaleur s'est arrêtée vingt secondes, puis elle a repris à produire de la chaleur. Comme le soudeur s'est arrêté probablement entre le point A3 et A2, ce qui a provoqué une déperdition de la chaleur pourrait expliquer les courbes de température- temps sur les figures ci- dessous :

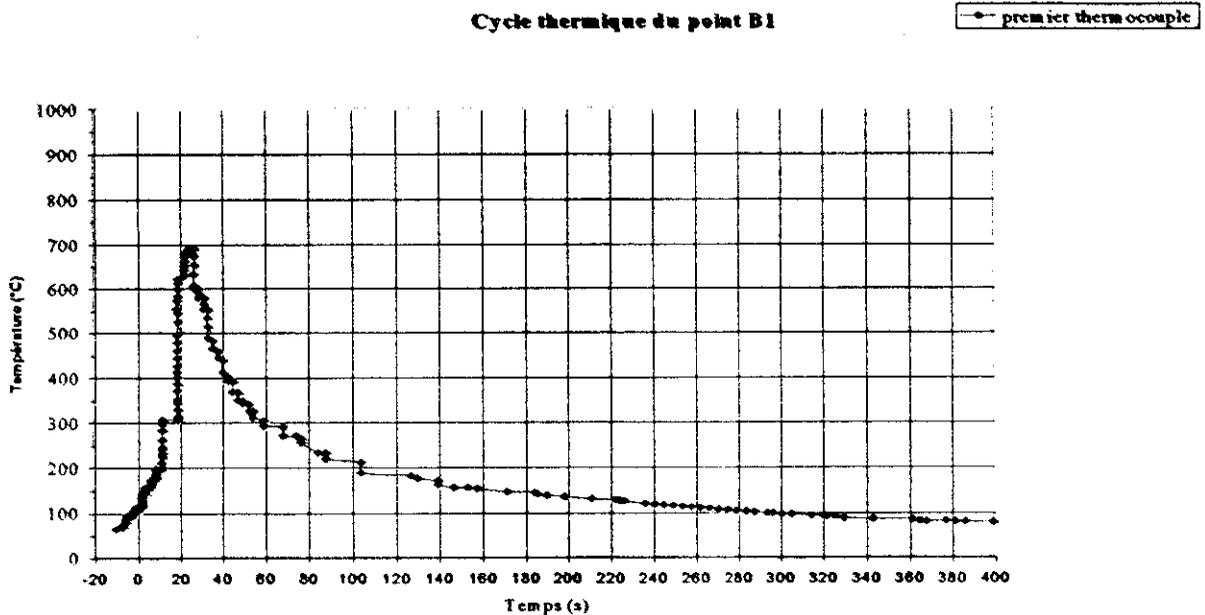


Figure Courbe de température- temps au point B1

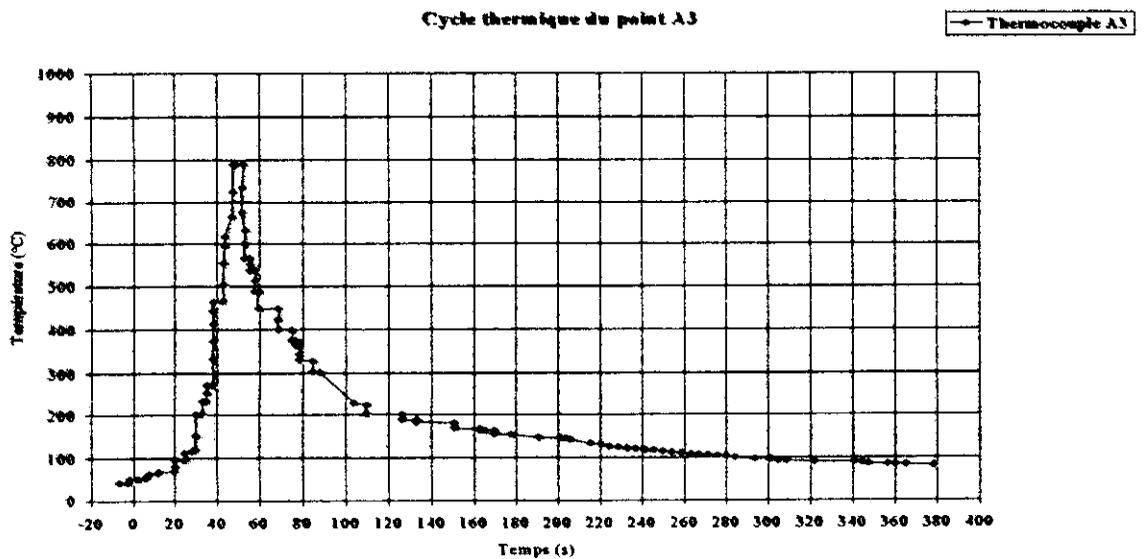


Figure V.14 Courbe de température- temps au point A3

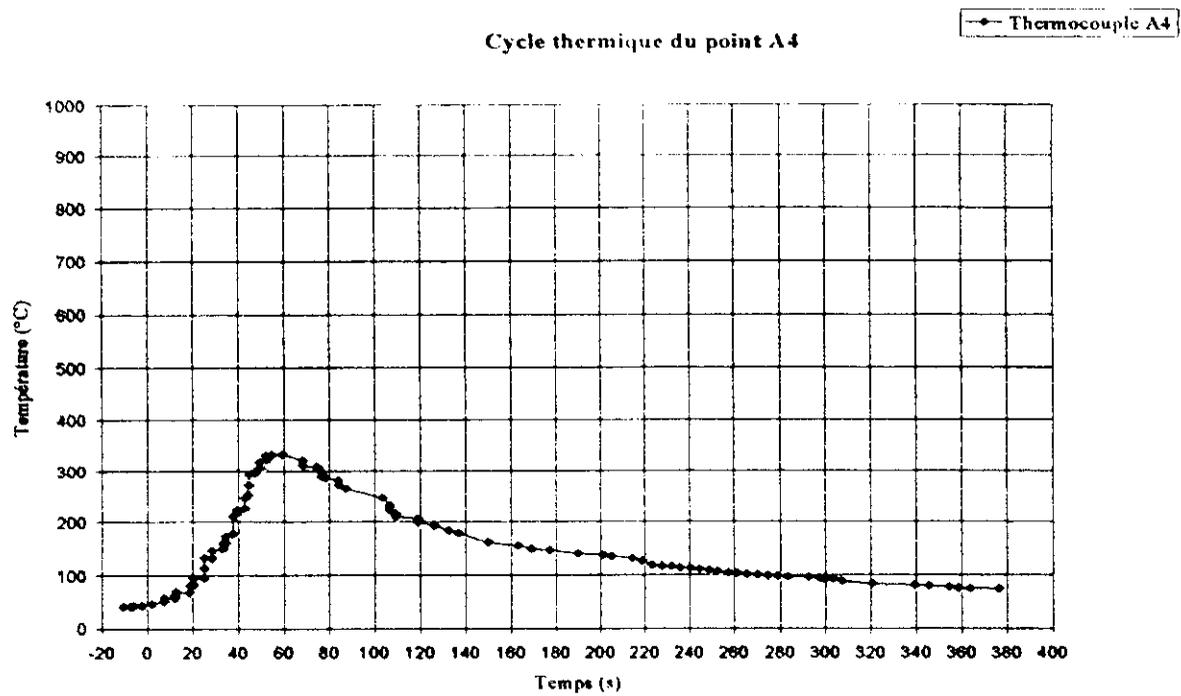


FIG V.15 Courbe de température- temps au point A4

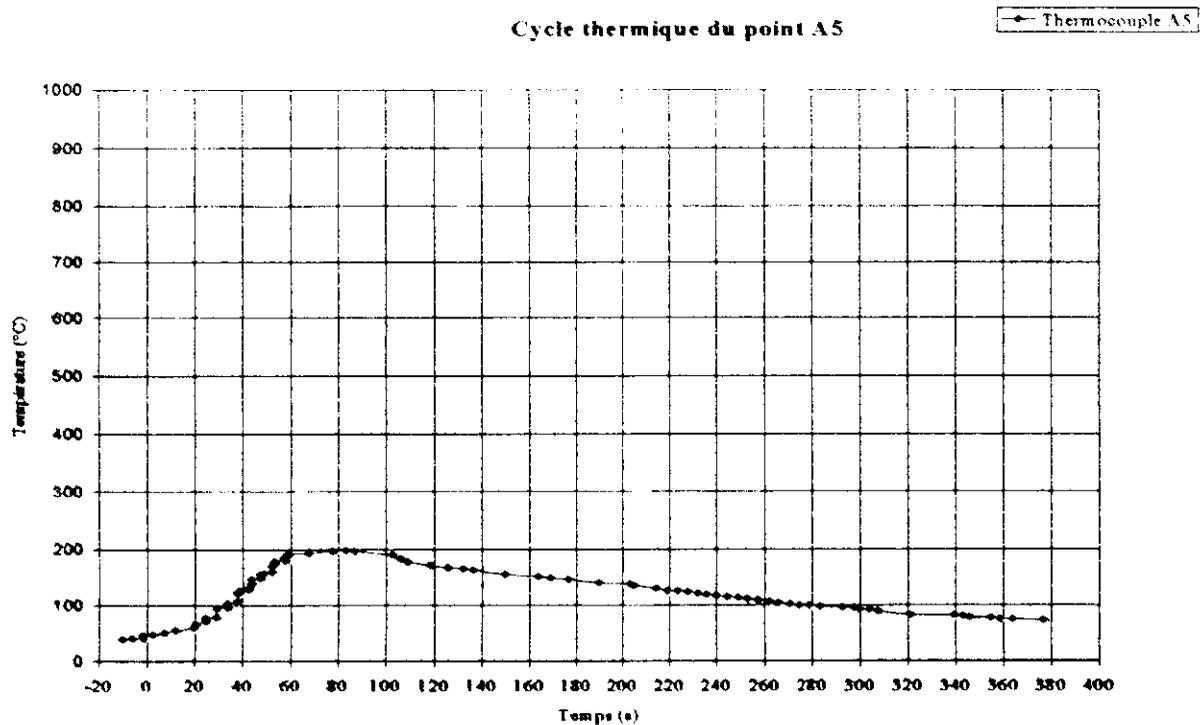


Fig V.16 Courbe de température- temps au point A5

Cycle thermique du point A6

Thermocouple A6

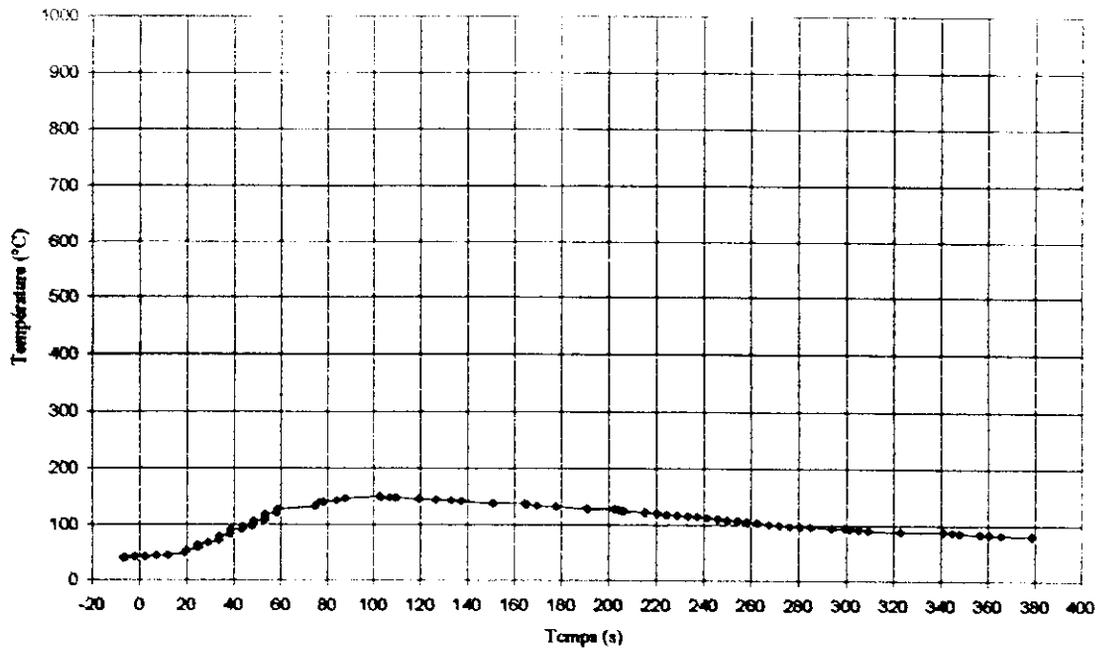


FIG.V.17 Courbe de température- temps au point A6

Cycle thermique du point A2

Thermocouple A2

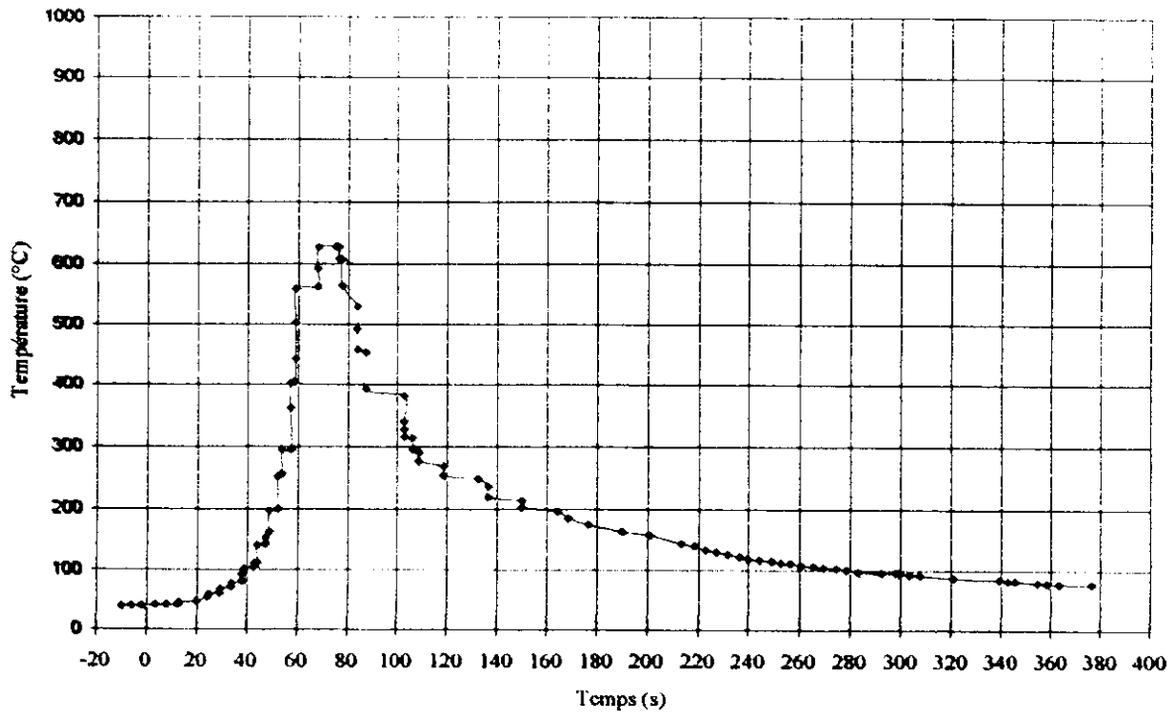


FIG v.18 Courbe de température- temps au point A2

Cycle thermique du point A1

—●— Thermocouple A1

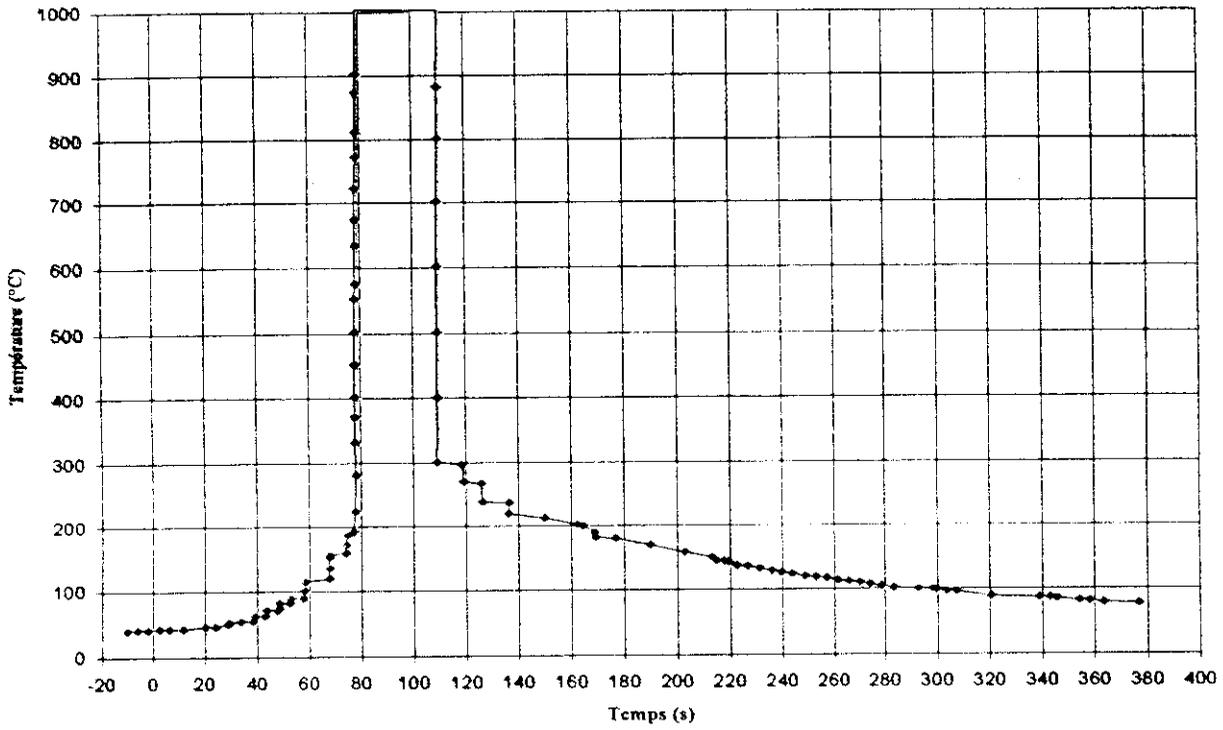


FIG V.19. Courbe de température- temps au point A1

Conclusion générale :

La variation de la vitesse de soudage influée directement sur les étendues de la zone fondue ZF et celle de la zone affectée par la chaleur .On a constaté que la ZAT et la ZF augmente avec la diminution de la vitesse de soudage .Cela est en relation avec la quantité d'énergie apportée par le source à l'assemblage , cet apport croit en diminuant la vitesse de soudage , ceci a été confirmé par l'expérimentation .

La divergence entre les résultats numériques et expérimentales est due d'une part aux hypothèses simplificatrice qu'n à posé et d'autre part aux conditions ou on à effectuer le soudage pour cela on propose :

1. De se rapprocher plus en plus de modèle physique en ce qui concerne la source de chaleur .
- 2 . de travailler avec d'autre méthode numériques pour pouvoir comparé les résultats .

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.
- [6] J.F. LANCASTER, « The physics of welding », international institute of welding, Pergman international library of science, technologie engineering and social study, August 1983.
- [7] F. KREITH, « Transmission de la chaleur et thermodynamique », Masson et Cie, 1967.
- [8] P. THUREAU, « Introduction aux transferts 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 transfert during arc welding wich applications to pure metals or alloys and low or high boiling temperature materials”, Numerical heat transfert, vol 11, PP.477-489, 1987.
- [11] R. ULE, YO GENDRA JOSHI and E.B. SEDY, “ A new technique for a three dimensinal trasient heat transfert computation for autogeonous 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] Modeling 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 modeling of heat transfer for gas tangsten 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.

