

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique

---

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude pour l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie mécanique

**THEME**

**Caractérisation thermomécanique des tubes de faibles épaisseurs de l'acier  
inoxydable 304L et en alliage d'aluminium soudés par le procédé TIG**

Étudié par : **FELFEL OTHMAN**

Promoteur : **Mr. H.MAZA (C.S.C)**  
: **Dr A.BOUHDJAR (ENP)**

Promotion: 2006

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Dédicaces

*A ma très chère mère, mon très cher père,  
A mes frères et à mes sœurs  
Et ma nièce*

*A ma grand mère et à mon grand père  
A toute ma famille  
Et tous mes amis*

*Je dédie ce modeste travail*

FELFEL OTHMAN

# Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, notamment :

Mr MAZA HALIM, responsable du laboratoire mécanique et métallurgique du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle CSC de CHERAGA qui a proposé le sujet et a assuré la direction de ce travail avec lucidité.

Monsieur le Docteur BOUHDJAR qui m'a bien dirigé dans la première partie de ce travail.

Mr AISSANI MOULOUD qui m'a aidé à réaliser le soudage des tubes et m'a prodigué des conseils sur le travail pratique de ce sujet.

Mr BETTAHAR KHEIREDDINE qui m'a aidé à faire la micrographie des échantillons des tubes soudés.

Je remercie mes amis de la promotion 2006 ainsi que tous les enseignants du département de génie mécanique de L'E.N.P.

Je remercie les membres de jury Mr BENKOUSSAS, Mr GUERGUEB et Mr BELHADEF pour avoir accepté d'apprécier ce modeste travail, je les remercie pour tout le temps qu'ils ont consacré.

## ملخص:

الغرض من هذه الدراسة هو دراسة الخصائص الحرارية الميكانيكية لفولاذ غير قابل للأكسدة من نوع 304L وخليط الألمنيوم من نوع 5056 بطريقة التلحيم TIG، وذلك بوضع نموذج رقمي لانتقال الحرارة إثر العملية، باستعمال طريقة الأحجام المنتهية. هذه الدراسة تسمح لنا بمعرفة توزيع الحرارة في الجسم الملحّم، وبالتالي تعيين كل من المنطقة المنصهرة والمنطقة المتأثرة حرارياً، ودراسة مدى تأثير الجسم بعد التلحيم ميكانيكياً.

## كلمات مفتاحية :

غير قابل للأكسدة، خليط الألمنيوم، الخصائص الحرارية الميكانيكية، نموذج رقمي، الأحجام المنتهية، المنطقة المنصهرة، المنطقة المتأثرة حرارياً.

## Résumé :

L'objectif premier de cette étude est la détermination du comportement thermique et mécanique d'un joint de soudure de tubes de faible épaisseur d'acier inoxydable 304L et d'un alliage d'aluminium 5056 soudé au procédé TIG, adoptant un modèle numérique utilisant la méthode des volumes finis.

Cette étude nous permet donc de déterminer le champ de la température sur la pièce à souder, de déterminer les dimensions de la zone fondue (ZF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT) et de déterminer la résistance mécanique de la pièce après soudage.

## Mots clés :

Acier inoxydable, alliage d'aluminium, soudage, TIG, modèle numérique, volumes finis, ZF, ZAT, caractéristique mécanique.

## Abstract:

The main purpose of this work consists in studying the mechanical and thermal properties of an austenitic stainless steel 304L and aluminum alloys welded with Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), and making a numerical model using finite volumes.

This work let us know the distribution of temperature in the tube and determine the dimension of fusion zone (FZ) and Heat affected zone (HAZ) and the mechanical properties of the metal after welding.

## Key words:

Stainless steel, aluminum alloys, welding, GTAW, finite volumes, temperature, FZ, ZAT, mechanical properties.

# SOMMAIRE

## Résumé

Introduction.....	1
-------------------	---

## **PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

<b>CHAPITRE 1:Généralités sur le soudage.....</b>	<b>4</b>
1. Le soudage.....	5
1.1 Généralités.....	6
1.2 Les principaux procédés de l'arc .....	7
1.2.1 Soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	7
1.2.2 Soudage automatique sous flux solide.....	8
1.2.3 Soudage au plasma.....	9
1.2.4 Le procédé MIG et MAG.....	10
1.3 Le soudage TIG.....	11
1.3.1 Générateur de courant.....	11
1.3.2 Arc électrique.....	12
1.3.3 Protection de l'électrode.....	12
1.4 Description du phénomène d'arc.....	13
1.4.1 Propriétés énergétiques de l'arc.....	14
1.5 Phénomène de transfert du métal.....	17
1.6 Phénomènes thermique de soudage.....	17
1.7 Le transfert de chaleur et les modes de transmission de chaleur .....	19
1.7.1 Transmission de chaleur par conduction.....	19
1.7.2 Transmission de chaleur par convection.....	21
1.7.3 Transmission de chaleur par rayonnement.....	22
<b>CHAPITRE 2 : Etude et formulation mathématique .....</b>	<b>23</b>
2.1 Introduction.....	24

2.2 Problématique .....	24
2.3 Etude thermique du phénomène du soudage.....	25
2.4 Bilan énergétique.....	28
2.5 Passage de problème cylindrique au problème cartésien.....	29
2.6 modélisation du problème du soudage.....	29
2.7 Description de la source de chaleur de soudage.....	33
2.7.1 Simulation ponctuelle.....	33
2.7.2 simulation gaussienne.....	33
<b>CHAPITRE 3 : Résolution numérique.....</b>	<b>34</b>
3.1 Introduction .....	35
3.2 L'équation de la chaleur .....	35
3.2.1 Cas unidimensionnel.....	35
3.2.2 Cas bidimensionnel.....	42
3.3 Condition aux limites.....	44
3.4 Méthode de résolution.....	48
3.5 Règles de base d'application de la méthode des volumes finis.....	49

## **PARTIE II: PROCEDURES EXPERIMENTALES**

<b>CHAPITRE 4 : Partie expérimental.....</b>	<b>51</b>
4.1 Introduction.....	52
4.2 Procédé de soudage et dispositif expérimental.....	52
4.2.1 Procédé de soudage.....	52
4.2.2 Matériaux et techniques expérimentales.....	53
4.2.2.1 Description de l'opération d'implantation des thermo- couples et acquisition des cycles thermiques.....	53
4.3 Dispositif de soudage.....	55
4.4 compositions chimiques des matériaux étudiés.....	56
4.5 Examen micrographique.....	56
4.5.1 But.....	56
4.5.2 Mode opératoire.....	56
4.5.3 Attaque chimique.....	57

<b>CHAPITRE 5: Résultats et leurs interprétations.....</b>	<b>.59</b>
5: 1 Introduction.....	60
5.2 Choix du maillage.....	60
5.3 Discussions des résultats.....	61
5.3.1 Les résultats thermiques.....	61
5.4.1 Les résultats micrographiques.....	75
5.4.2 Les essais de traction.....	78
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>84</b>

# NOMENCLATURE

<b>C<sub>p</sub></b> : Chaleur spécifique à pression constante.	[J/Kg.k]
<b>E<sub>n</sub></b> : Energie nominale.	[J/m]
<b>E<sub>a</sub></b> : Energie dissipée dans le joint soudé.	[J/m]
<b>E<sub>q</sub></b> : Energie équivalente.	[J/m]
<b>f</b> : Facteur de pondération.	
<b>h</b> : Coefficient de convection.	[W/m <sup>2</sup> .k]
<b>I</b> : Intensité de courant.	[A]
<b>K</b> : Conductivité thermique.	[W/m.k]
<b>L</b> : Longueur de l'arc.	[m]
<b>Q</b> : Chaleur transférée à la pièce.	[W]
<b>S</b> : Terme source dans les équations discrétisées.	[W/m <sup>3</sup> ]
<b>S<sub>c</sub></b> : Partie constante de la linéarisation du terme source.	[W/m <sup>3</sup> ]
<b>S<sub>p</sub></b> : Coefficient de T <sub>p</sub> dans l'expression du terme source.	[W/m <sup>3</sup> k]
<b>T</b> : Température.	[K]
<b>t</b> : Temps.	[s]
<b>U</b> : Tension de soudage.	[V]
<b>V</b> : Vitesse de soudage.	[m/s]
<b>x</b> et <b>y</b> : Variables indépendantes.	[m]
<b>ρ</b> : Masse volumique.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>ε</b> : Emissivité.	
<b>Δx</b> : Longueur d'un volume de contrôle.	[m]
<b>Δy</b> : Largeur d'un volume de contrôle.	[m]

$\Delta z$  : L'épaisseur des tubes. [m]

$\Delta t$ : Pas temporel. [s]

$\delta x$ : Distance entre deux nœuds voisins dans la direction x. [m]

$\delta y$ : Distance entre deux nœuds voisins dans la direction y. [m]

**Indices inférieurs :**

**E** : Nœuds est.

**e** : Interface du volume de contrôle entre P et E.

**N** : Nœud nord.

**n** : Interface du volume de contrôle entre P et N.

**P** : Nœud P.

**S** : Nœud sud.

**s** : Interface de volume de contrôle entre P et S.

**W** : Nœud ouest.

**w**: Interface de volume de contrôle entre P et W.

## **Introduction**

Le soudage est un mode d'assemblage très fréquent. Le développement sans cesse croissant de nouveaux procédés toujours plus performants permet de garantir des joints de soudure de bonne qualité, avec une très bonne reproductibilité.

Cependant, les gradients thermiques très localisés mis en jeu lors du soudage engendrent inévitablement des dilatations locales qui ont pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes non uniformes dans le matériau, qui subsistent après retours à température ambiante. Les distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser des problèmes de tolérances dimensionnelles, tout particulièrement si les structures soudées sont minces (comme c'est le cas pour l'industrie automobile ou l'aéronautique). D'autre part, les champs de contraintes résiduelles auto-équilibrés qui subsistent après soudage dans le composant peuvent contribuer à diminuer la durée de vie de celui-ci, en favorisant les ruptures de fatigue, la fissuration et la corrosion : c'est notamment le cas pour les composants en acier (circuits de refroidissement, réservoirs sous pressions) des installations nucléaires de type REP (Réacteurs à eau pressurisée), pour lesquels ces aspects ont une importance évidente en termes de sécurité. En outre, dans le cas de structure mince, les contraintes internes liées au soudage peuvent induire un état de flambage.

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

Vu la particularité des caractéristiques locales de la fusion, l'assemblage soudé est soumis à des traitements mécaniques à des températures élevées. La connaissance de ces sollicitations qui sont engendrées par l'opération du soudage, nous permet de déterminer les caractéristiques finales d'un cordon de soudure au point de vue métallurgique et mécanique. Par conséquent, la première étape critique dans l'analyse précise du 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".

Notre travail consiste à définir ces zones à risque, en étudiant la répartition de la température lors de l'opération de soudage TIG de deux tubes métalliques de faible épaisseur, en considérant que les propriétés physiques du matériau dépendante de la température, et en assimilant la source de chaleur à une source gaussienne mobile d'une vitesse constante.

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.

La présente étude est abordée de la manière suivante :

- ✚ Le chapitre (I) compote des généralités sur le soudage, et les différents modes de transfert de chaleur.
- ✚ On a consacré le chapitre deux (II) à l'étude thermique et la modélisation du problème de soudage.
- ✚ A travers le chapitre (III), on abordera la résolution numérique du problème.
- ✚ Le chapitre (IV) adoptera les procédures expérimentales.
- ✚ Et le chapitre (V) sera réservé aux résultats et leurs interprétations.

Nous terminerons l'étude par une conclusion générale.

PARTIE I  
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

# **CHAPITRE I**

## **GENERALITES SUR LE SOUDAGE**

## CHAPITRE 1

### Généralités sur le soudage

#### 1. Le soudage

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en oeuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même. Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « *les pièces à assembler participent à la construction du joint* » du brasage dont « *la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport* ». Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

**Le soudage** : opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

**Le brasage** : opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

**Le soudobrasage** : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

Le brasage et le soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Nous verrons que de tels effets existent en soudage mais sont préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

Nous nous contenterons ici de présenter les différentes techniques de soudage, par le biais des sources thermiques, en détaillant particulièrement le procédé TIG (Tungstene Inert Gas) qui fait l'objet de cette étude.

Nous porterons un intérêt tout particulier à la formation du bain de fusion, aux différentes actions internes et externes au volume fondu qui régissent la morphologie finale du cordon, et notamment les effets de quelques micro-éléments d'alliages sur la soudabilité..[1]

## 1.1. Généralités

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en oeuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques.

On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en oeuvre comme présenté sur la Fig. 1.1.

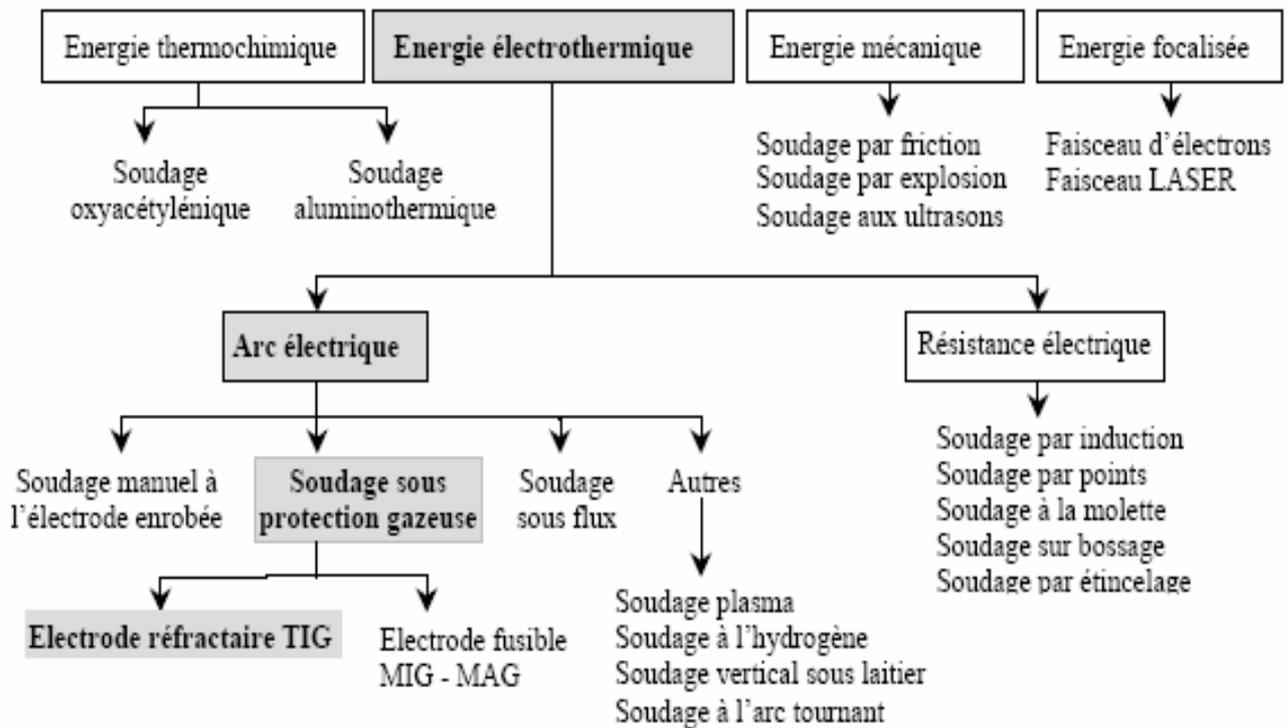


Fig.1.1 classification des procédés de soudage.

La conséquence directe de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources. Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre eux (Fig. 1.2).

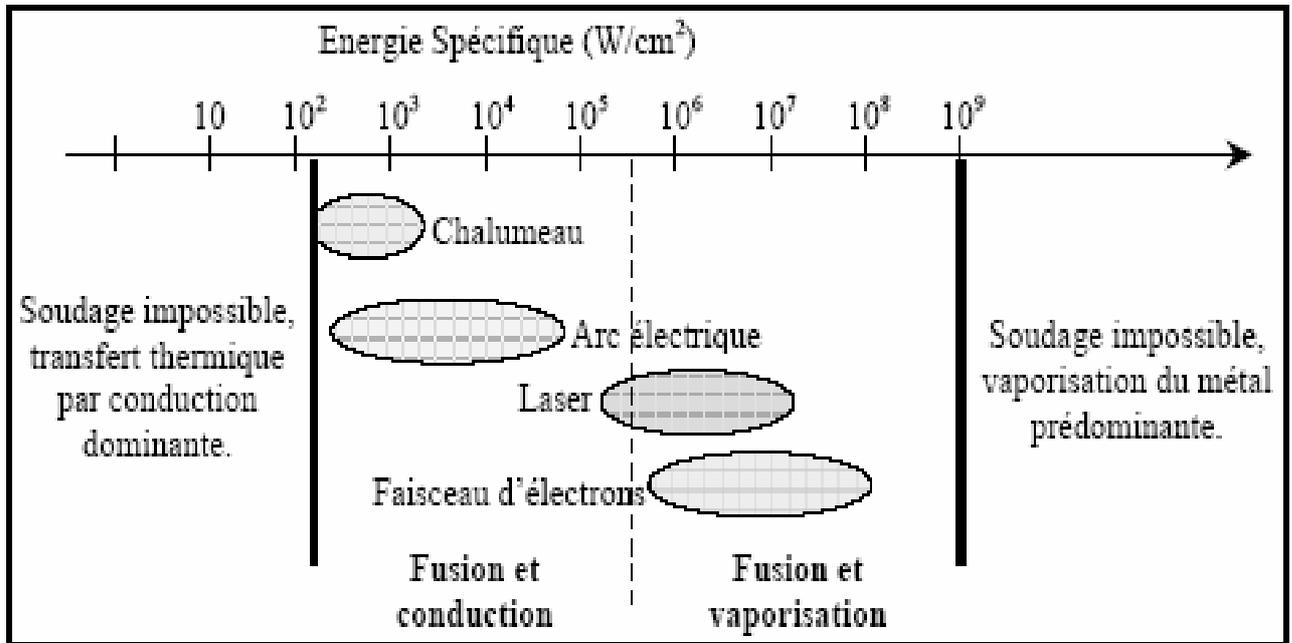


Fig.1.2 Source thermiques et densités d'énergies

Il ressort alors que les procédés à l'arc électrique ont des densités d'énergie moyennes et que leur rendement va varier suivant que l'on ait ou non transfert de métal. En effet, ce dernier facteur va nettement conditionner le rendement d'arc mais surtout le taux de dépôt de métal qui est un des critères de production important dans le choix du procédé pour une réalisation donnée.[1]

## 1.2 Les principaux procédés de l'arc :

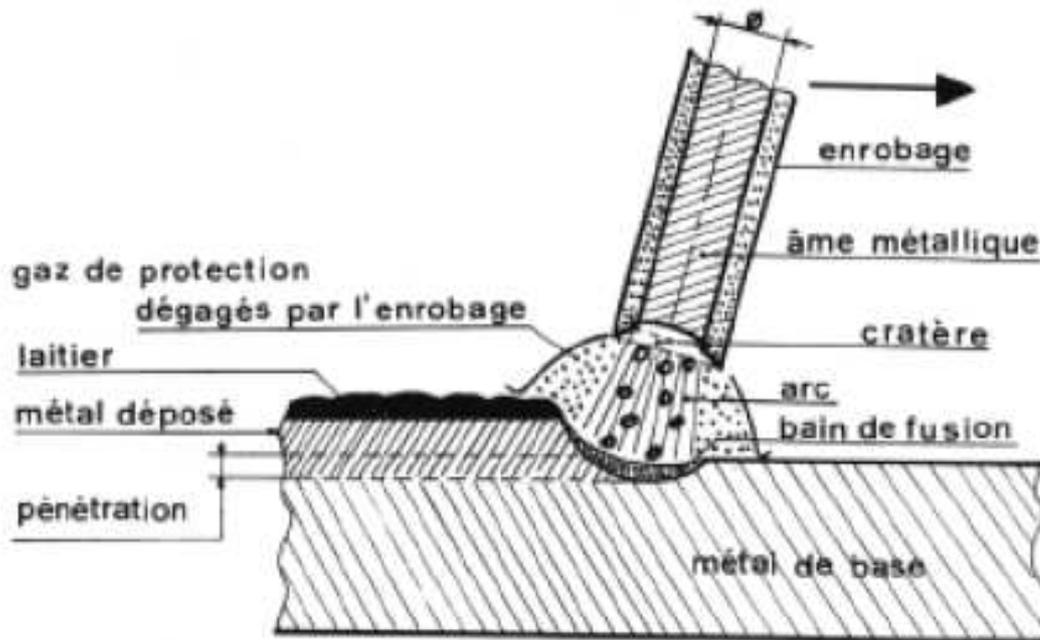
Comme nous intéressons au soudage à l'arc, nous allons définir ces différents procédés :

### 1.2.1 Soudage à l'arc avec électrode enrobée :

Dans ce procédé, un électrode métallique est enrobée de fondants qui est reliée à un générateur de courant électrique, alternatif ou continu. Le métal à souder est relié à l'autre borne de cette même source de courant. En plaçant la pointe de l'électrode sur le métal puis en retirant, un arc électrique se forme.

La chaleur intense de l'arc fait fondre les deux pièces à souder, ainsi que la pointe de l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport pour la soudure.

L'atmosphère gazeuse de l'arc est portée à très haute température (5000 à 8000 °C) et est fortement ionisée.

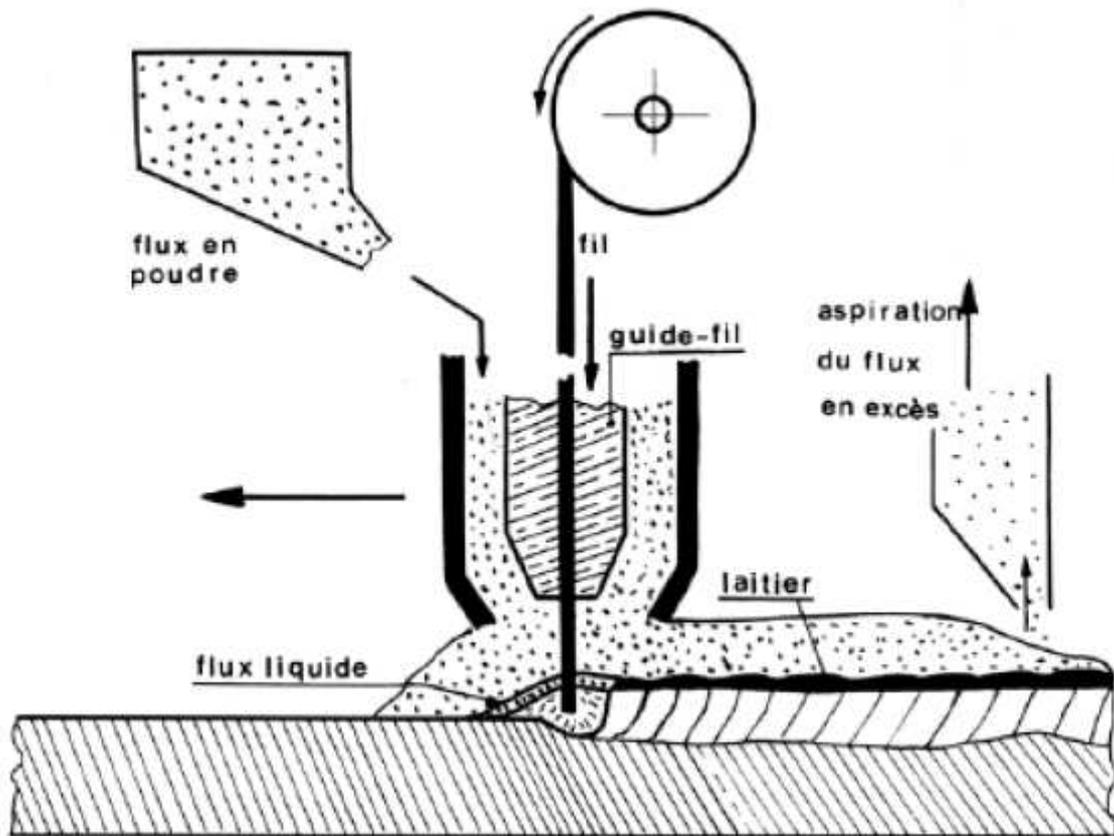


**Fig.1.3 Soudage à l'arc avec électrode enrobée**

### **1.2.2 Soudage automatique sous flux solide :**

Le flux en poudre est déversé en totalité autour du fil électrode. Un arc électrique libre jaillit à l'intérieur du flux, assurant la fusion simultanée des pièces à souder et d'un ou de plusieurs fils électrodes (fournissant le métal d'apport). Le transfert du métal fondu dans l'arc de soudage a lieu par gouttes enrobées de flux fondu, protégé par sa gangue de laitier (auto détachable), le métal déposé est lisse et brillant.

L'excédent de flux qui n'a pas été fondu est récupéré par aspiration.

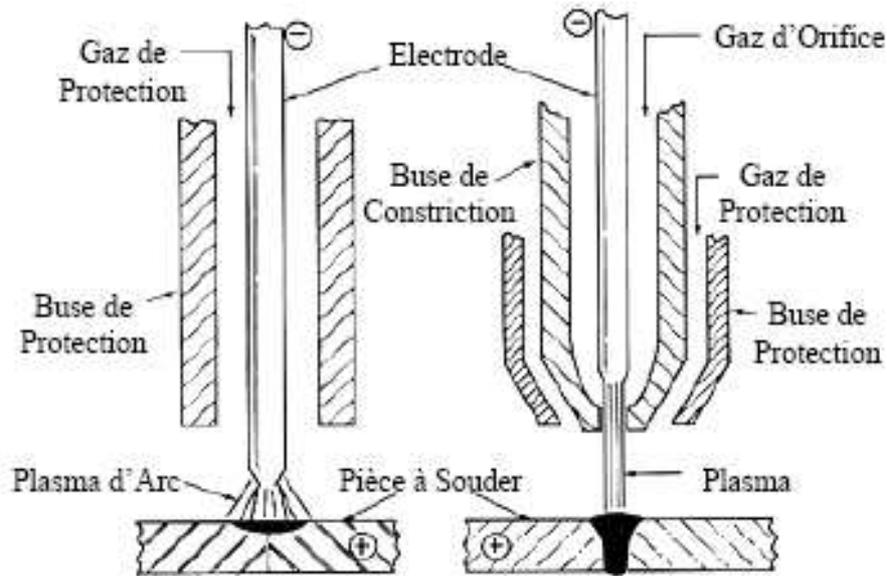


**Fig.1.4 Soudage sous flux solide**

### 1.2.3 Soudage au plasma :

Le procédé « plasma » s'apparente au procédé TIG (réfractaire en tungstène, atmosphère gazeuse protectrice) mais utilise un arc électrique étranglé. A la sortie de la tuyère, le gaz argon, mélange argon-hydrogène) forme un dard extrêmement brillant, dont la température varie de 15000 à 20000 °C, et dont la concentration d'énergie est très importante. Ce dard fait fondre rapidement tous les métaux et alliages avec un grand pouvoir de pénétration, en raison de sa longueur et de sa rigidité due à sa grande vitesse.]

Le principe est donné sur la figure (1-5) en comparaison avec le TIG classique.



**Fig.1.5 Comparaison entre une torche TIG et une torche Plasma**

#### **1.2.4 Le procédé MIG et MAG :**

L'emploi d'un fil électrode fusible dévidé automatiquement en remplacement de l'électrode réfractaire dans le procédé TIG a donné naissance au procédé MIG/MAG. Dans le procédé MIG (métal inerte gaz), l'atmosphère de protection est inerte. Dans le procédé MAG (métal active gaz), elle est active. Les principaux gaz ou mélange de gaz utilisés sont l'Argon et l'Hélium en soudage MIG et le CO<sub>2</sub> ou l'Argon- CO<sub>2</sub> en soudage MAG.

La fusion du fil, ou plus exactement le transfert du métal dans l'arc peut se faire de trois manières : avec courts circuits, en grosse gouttes ou pulvérisation axiale, le mode de transfert dépendant principalement de la nature du gaz utilisé et de la densité du courant de soudage.

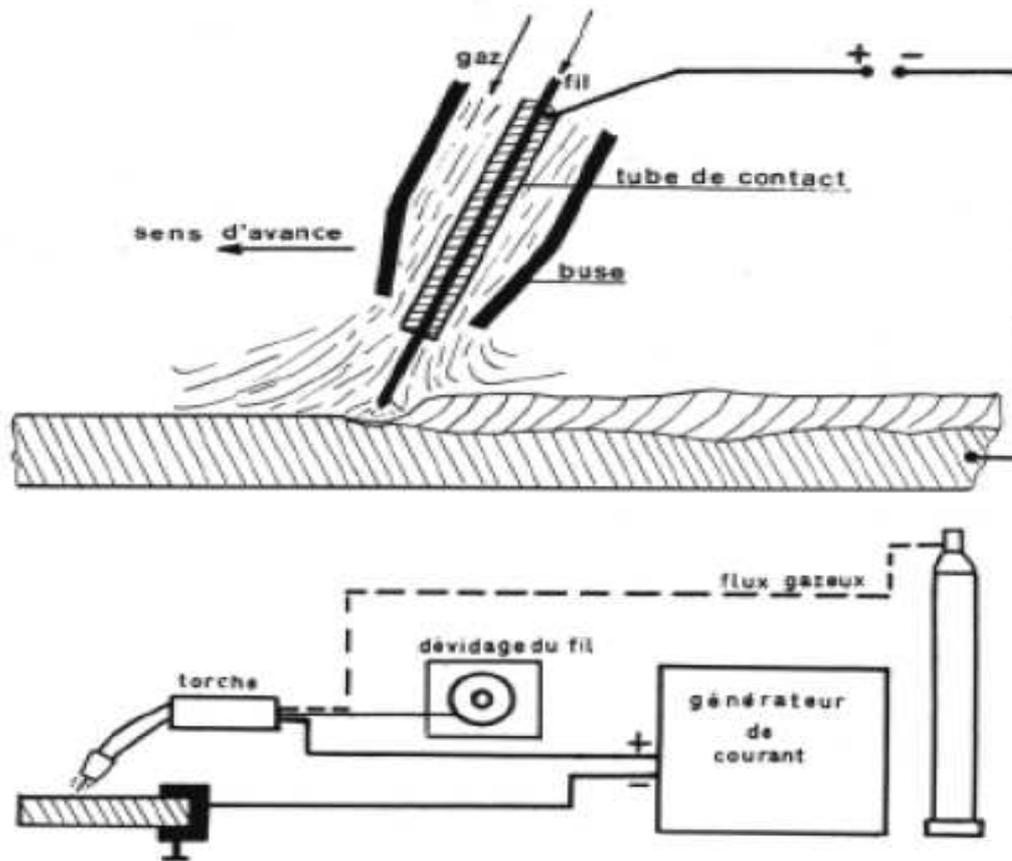


Fig.1.6 Le soudage M.I.G. ou M.A.G

### 1.3 Le soudage TIG

Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique dans une veine de gaz inerte. L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité.

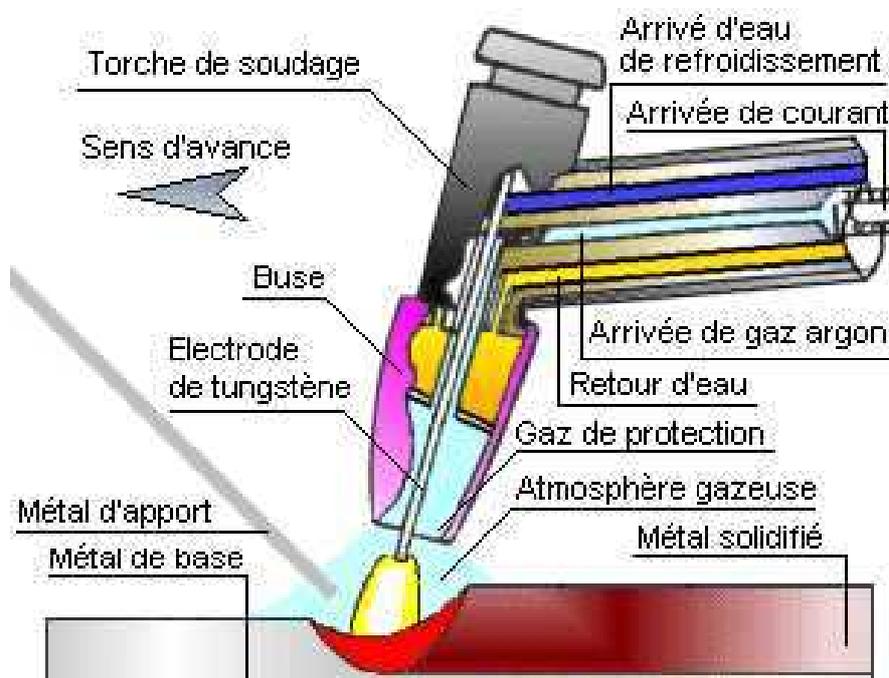
L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport.

Le matériel nécessaire pour réaliser des soudures TIG est relativement simple, et peut être décomposé suivant trois fonctions :

**1.3.1 Générateur de courant :** La source électrique délivre un courant continu lisse, continu pulsé ou alternatif. La plage d'intensités s'étend de quelques ampères à plus de 400A pour les postes automatisés. La tension de soudage varie de 8 à 30V. Toute l'électronique de commande du cycle de soudage (temporisation avant et après soudage, amorçage haute fréquence, dispositif de stabilisation d'arc, rampe de montée ou d'évanouissement d'arc, fréquence et intensité des pulsations) est intégrée dans la source et le cycle est programmé via un pupitre de commande.

**1.3.2 Arc électrique :** réalisé en bout de la torche de soudage, cette dernière est composée d'une électrode de tungstène, d'une buse céramique canalisant le flux de gaz neutre et d'une gâchette utilisable en soudage manuel pour commander l'arc. La torche peut être refroidie par un circuit fermé de fluide caloporteur (Fig.1.7).

**1.3.3 Protection de l'électrode :** le système de protection gazeuse est incorporé à la torche pour protéger l'arc et le bain. Bien souvent, l'utilisation de traînard de protection vient garantir l'intégrité métallurgique du matériau au cours de son refroidissement notamment dans le cas de matériaux très sensibles à la pollution gazeuse comme le titane ou ses alliages. [1]



**Fig.1.7 Torche TIG**

Ce procédé peut être aisément automatisé ; on trouve alors soit un banc de soudage qui permet d'effectuer des soudures rectilignes ou orbitales avec ou sans système d'amenée de métal d'apport, soit un robot articulé qui permet d'effectuer des trajectoires plus complexes.

Le soudage TIG assure l'intégrité de la zone fondue de part sa protection gazeuse. L'absence de transfert de métal dans l'arc assure un comportement d'arc et de bain très stable qui garantit des qualités de cordons optimales, lisses en endroit et en envers, exempts de défauts tels que les caniveaux, les morsures ou les projections de métal. Il est donc très souvent utilisé pour des matériaux dont le risque de pollution atmosphérique est important comme les alliages de titane, de nickel ou le zirconium, ou bien pour des applications qui requièrent une grande qualité de joint comme dans les industries agroalimentaires, pétrochimiques, nucléaires,

aéronautiques et aérospatiales. De plus, pour éviter l'oxydation du métal et des zones thermiquement affectées en cours de refroidissement, on utilise des systèmes de protection du cordon endroit et envers par traînards qui servent à confiner sous atmosphère neutre les zones sensibles. On cherche donc à assurer une intégrité chimique optimale du matériau après soudure. Cependant, les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquences, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint. [1]

#### **1.4 Description du phénomène d'arc :**

Dans un arc électrique, on distingue trois zones schématisées sur la figure (1.8) :

1. la zone cathodique.
2. la colonne d'arc.
3. la zone anodique.

La cathode émet des électrons dont la quantité est proportionnelle à l'intensité du courant, les électrons heurtent les molécules des gaz atmosphériques ou des gaz protecteurs. Par le choc avec les molécules de ces divers gaz, et si l'énergie des électrons est suffisante, il y a formation d'ions soit positives ou négatives, ainsi le gaz est ionisé. En plus, les électrons de la cathode vont bombarder l'anode.

La mobilité des électrons étant environ cent fois plus grandes que celle des ions, la majorité du courant est transportée par les électrons.

Les chutes de potentiel entre la cathode et l'arc, et entre l'arc et l'anode représentent ensemble les deux tiers de la chute totale de la tension entre la cathode et l'anode. [3]

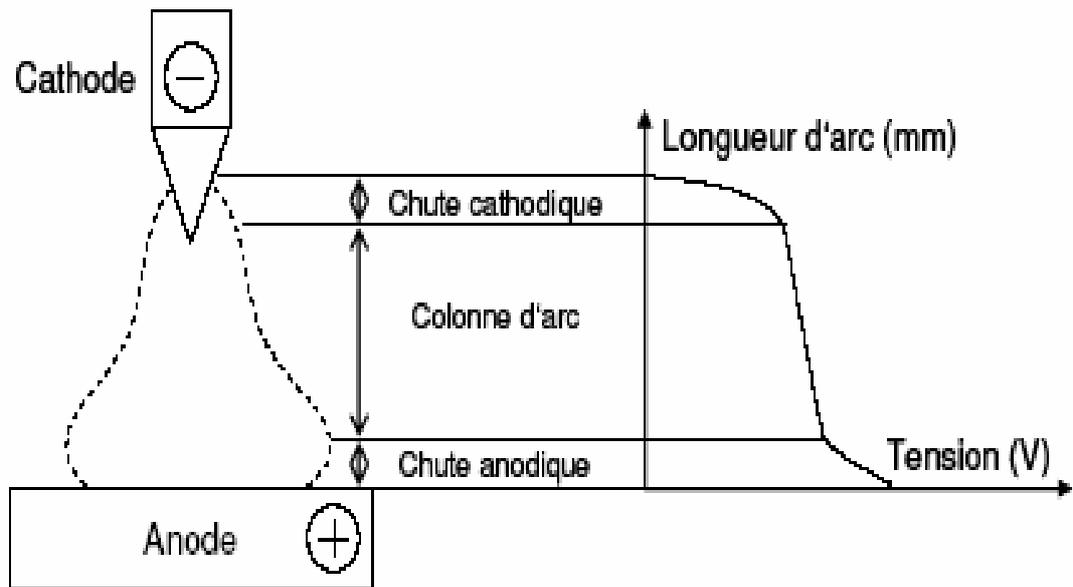


Fig.1.8 structure de l'arc électrique

#### I.4.1 Propriétés énergétiques de l'arc :

##### I.4.1.1 Energie nominale ( $E_n$ ) :

C'est l'énergie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure; elle est exprimée en [J/m], et donnée par la relation :

$$E_n = \frac{UI}{V_s} \quad (1-1)$$

Avec :

U : la tension d'arc en volts (V).

I : l'intensité du courant électrique en ampère (A).

$V_s$  : la vitesse du soudage en (m/s).

##### I.4.1.2 Energie dissipée :

L'énergie fournie au niveau de l'arc n'est pas entièrement transmise au niveau de la pièce à souder en raison des pertes par convection et par rayonnement de la colonne d'arc, elle est exprimée en [J/m], et donnée par la relation :

$$E_d = E_n \eta \quad (1-2)$$

Avec :

$\eta$  : Le rendement énergétique de l'arc.

#### **1.4.1.3 Energie équivalente ( $E_q$ ) :**

Elle résulte de la corrélation de l'énergie dissipée par un coefficient qui tient compte de la géométrie du joint à souder, elle est définie par la relation suivante :

$$E_q = E_d K = E_n \eta K \quad (1-3)$$

K : coefficient de correction.

#### **1.4.1.4 Température dans la colonne d'arc :**

La majorité des mesures des températures dans la colonne d'arc ont été faites par spectroscopie. Ces mesures montrant 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 20000K et ne varie pas beaucoup même avec un courant de soudage allant jusqu'à 400A (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. [5]

#### **1.4.1.5 Efficacité de l'arc :**

Le calcul du taux de chaleur absorbée par les pièces à souder est basé sur la mesure des valeurs du voltage de l'arc et du courant. Il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie transférée à la pièce à partir de l'arc électrique. Cette quantité est connue comme l'efficacité de l'arc. La chaleur est dissipée de l'arc par conduction, par convection ou radiation (rayonnement). La chaleur dissipée par conduction à travers l'arc est faible, mais elle est considérable au niveau de la pièce. La convection de chaleur est due au courant du gaz dans la colonne de l'arc, une partie est transférée à la pièce et l'autre est perdue. Des pertes par radiations sont également enregistrées.

Nous pouvons diviser la production de la chaleur à partir de l'arc en trois parties. [5]

$q_e$ : Chaleur transférée à l'électrode.

$q_p$ : Chaleur transférée par convection et par rayonnement par la colonne d'arc.

$q_w$ : Chaleur transférée à la pièce.

Dans le cas de l'électrode non consommable, une proportion "n" de la chaleur produite par la colonne d'arc est transférée à la pièce. De même, une proportion "m" de la chaleur est perdue par rayonnement. Alors, l'efficacité de l'arc est :

$$\eta = 1 - \frac{(q_e + (1-n)q_p + mq_w)}{UI} \quad (1-4)$$

Sous des conditions pratiques, où U et I sont mesurés à la source de puissance, il peut y avoir des pertes dans le soudage qu'il faut prendre en considération. Pour une électrode non consommable  $q_e$  est aussi transmise à la pièce, le rendement s'écrit :

$$\eta = 1 - \frac{(1-n)q_p + mq_w}{UI} \quad (1-5)$$

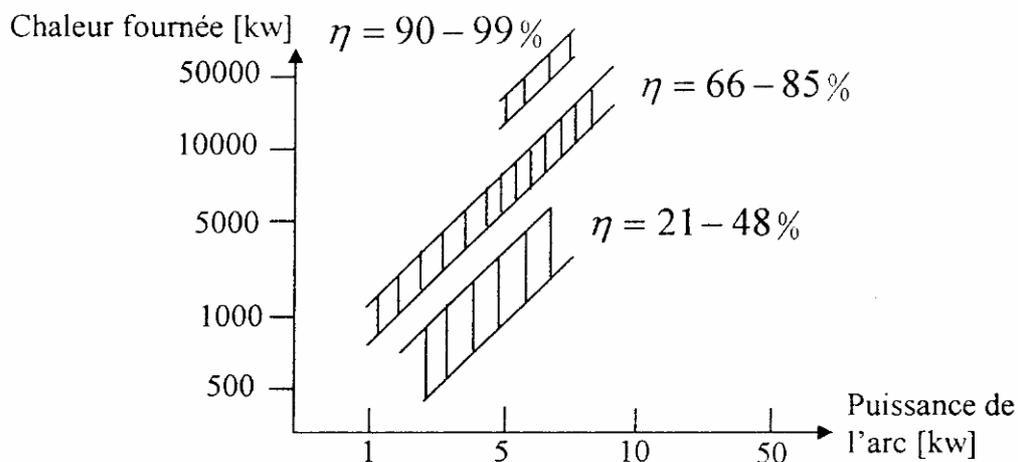


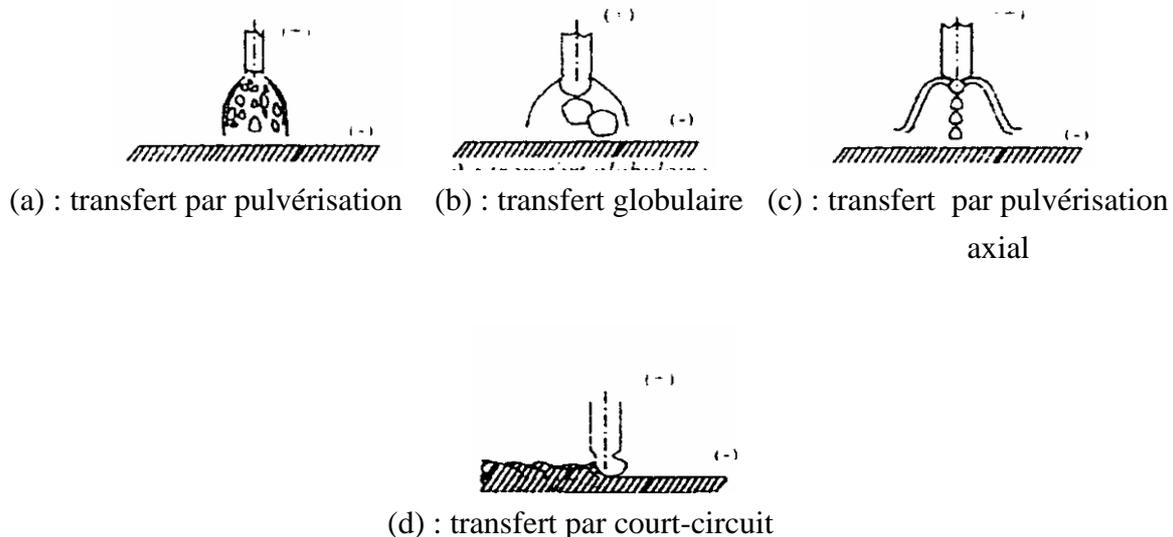
Fig.1.9 rendement de l'arc mesuré par Christensen et Al (1965)

## I.5 Phénomène de transfert du métal : [2]

L'étude et la visualisation du phénomène de transfert du métal ont permis de distinguer quatre modes de transfert principaux :

1. Transfert par court-circuit : les gouttes ont des dimensions importantes, elles touchent le bain de fusion avant de se détacher de l'électrode.
2. Transfert globulaire : le diamètre des gouttes est sensiblement égal à celui de l'électrode, elles transitent en vol libre suivant des trajectoires variées.
3. Transfert par pulvérisation : les gouttes transitent en désordre dans la colonne d'arc, leurs dimensions sont très variables.
4. Transfert par pulvérisation axiale : les gouttes transitent à grandes vitesses dans la colonne d'arc, elles ont toutes sensiblement les mêmes dimensions, d'où un cheminement axial.

Les quatre modes de transfert sont schématisés sur la figure (1-10)



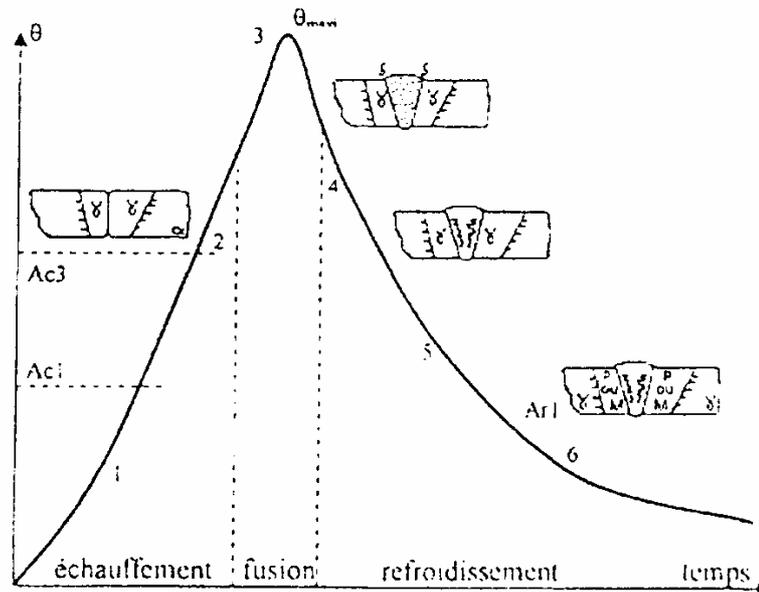
**Fig.1.10 Différents modes de transfert du métal dans le soudage à l'arc avec électrode enrobée.**

## I.6 Phénomènes thermiques de soudage :

### I.6.1 Cycles thermique de soudage :

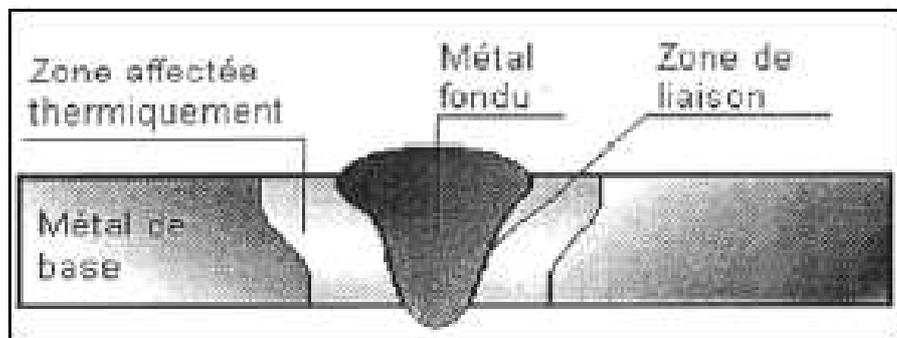
Au cours de l'opération, la pièce est soumise à un certain cycle thermique, la zone qui se trouve aux environs de la soudure subit un échauffement. En chaque point de cette région la température varie en fonction du temps suivant une certaine loi qui dépend :

- du procédé de chauffage.
- de la nature du métal.
- de la forme de pièce.



**Fig.1.11 Cycle thermique de soudage.**

La région de la soudure comporte trois zones visibles sur coupe micrographique de l'assemblage à savoir :



**Fig.1.12 Les différentes zones dans une soudure.**

**a- Zone fondue (ZF):**

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par fusion de métal de base, avec la participation plus ou moins importante du métal d'apport. Si la soudure est brute d'exécution, les gains résultant de la solidification y sont en général visibles sans grossissement. Le métal qui la constitue est appelé métal fondu, le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

**b- Zone de liaison :**

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre. Si on y regarde de plus près, on doit tenir compte du fait que tout alliage (métal-métal ou métal-impurtes) est caractérisé par un domaine de température dit intervalle de solidification dans lequel coexistent deux phases liquide et solide. D'autre part, l'intérêt de cette zone est d'être siège de l'amorçage de la solidification du métal fondu.

**c- Zone affectée thermiquement (ZAT) :**

La ZAT est la zone au sein de laquelle le cycle thermique de soudage a provoqué à partir de l'état initial une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement.

**1.7 Transfert de chaleur:**

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission d'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'un gradient de température qui existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes à températures différentes sont mis en contact.

Le processus par lequel le transfert de chaleur s'effectue est désigné par le terme transmission de la chaleur.

La grandeur transférée, appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais les effets qu'elle produit sont sujets à l'observation et aux mesures.

Le transfert de chaleur s'effectue généralement selon trois modes de transmission :

Conduction, convection et rayonnement. [6]

**I.7.1 Transmission de la chaleur par conduction :**

Dans ce mode de transfert, la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une autre à basse température. L'énergie se propage par contact direct des molécules sans déplacement appréciable de ces derniers. [6]

La loi régissant ce processus particulier de diffusion de chaleur a été établie en « 1822 » par le savant français J.B.J.FOURIER.

$$\vec{q} = -kgr\vec{ad}T \tag{1-6}$$

Avec :

$\vec{q}$  : densité du flux de chaleur. [w/m<sup>2</sup>]

k : conductivité thermique du milieu au point considéré. [W/mc°]

La conductivité thermique est en général fonction de la température pour un milieu homogène et isotrope et dépend aussi de la pression pour les liquides et les gaz.

L'équation de la conduction de la chaleur se traduit par la relation :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = -\text{div} \vec{q} + Ue'' \quad (1-7)$$

$\rho$  : masse volumique. [Kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  : chaleur spécifique massique. [J/Kg C°]

$Ue''$  : Génération d'énergie interne par unité de volume.

Or :

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

L'équation de la conduction s'écrit donc :

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = K \Delta T + \text{grad} \vec{K} \cdot \text{grad} \vec{T} + Ue'' \quad (1-8)$$

$$\rho C_p \left( \frac{dT}{dt} + V \text{grad} \vec{T} \right) = K \Delta T + \text{grad} \vec{K} \cdot \text{grad} \vec{T} + Ue'' \quad (1-9)$$

Pour un milieu isotrope et homogène les caractéristiques thermiques « K » et « Cp » ne dépendent que de la température. Afin de linéariser l'équation de la conduction, on doit supposer que « K » et « Cp » sont indépendantes de la température, et avec l'hypothèse d'un système au repos, l'équation devient :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = K \Delta T + Ue'' \quad (1-10)$$

Cas particuliers :

- Régime permanent  $\frac{dT}{dt} = 0 \Rightarrow \Delta T = -\frac{Ue''}{K}$  « équation de POISSON »
- Régime permanent, milieu sans source interne  $\Delta T = 0$  « équation de LAPLACE »
- Régime transitoire ;  $\Delta T = \frac{\rho C_p}{K} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt}$  « équation de FOURIER »

$\alpha$  : Diffusivité thermique.

### I.7.2 Transmission de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection est un mécanisme de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz). Il est désigné selon le mode d'écoulement de fluide par convection libre (naturelle) ou convection forcée.

- Convection libre ou naturelle : ce mouvement résulte simplement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide.
- Convection forcée : ce mouvement des fluides est produit par une action extérieure (ventilateur, pompe, etc...) ce mode de transfert est évalué par la relation :

$$Q_{cv} = h(T_p - T_\infty) \quad (1-11)$$

Avec :

Q : Flux de chaleur par unité de surface [W/m<sup>2</sup>]

h : coefficient d'échange [W/ m<sup>2</sup> K]

T<sub>p</sub> : Température de la paroi. [K]

T<sub>∞</sub> : Température ambiante [K]

T<sub>p</sub> > T<sub>f</sub> > T<sub>∞</sub>

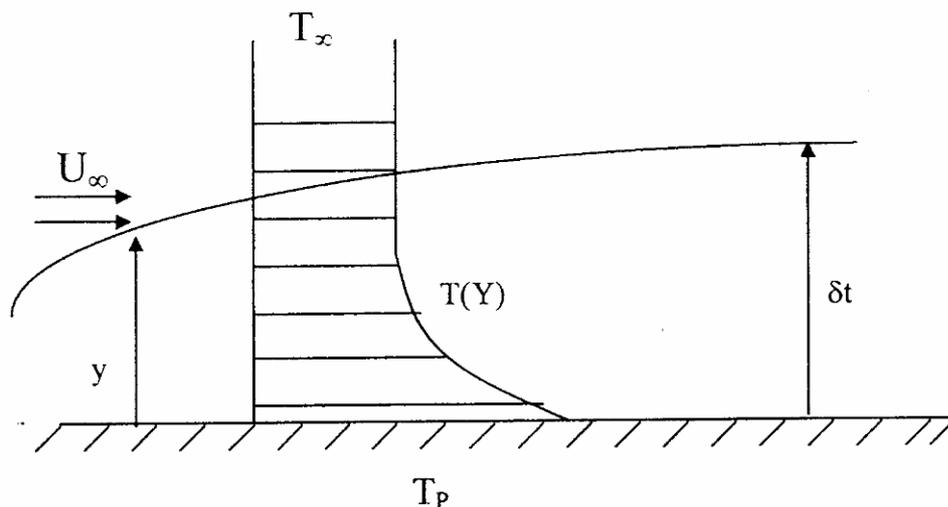


Fig. 1.13 Echange de chaleur par convection forcée au dessus d'une paroi solide.

$U_{\infty}$  : Vitesse d'écoulement.

$\delta_t$  : Epaisseur de la couche limite.

### I.7.3 Transmission de chaleur par rayonnement :

Le terme rayonnement est généralement appliqué à toutes sortes de phénomène électromagnétique, mais dans la transmission de la chaleur, le rayonnement est défini comme le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux.

Les ondes électromagnétiques de fréquences déterminées constituent les supports matériels de ce type de transmission de chaleur.

La quantité de chaleur effective transmise par rayonnement est donnée par :

$$Q_r = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-12)$$

Où :

$\sigma$  : Constant de STEOHAN-BOLTZMAN =  $5,66.10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

A: Surface rayonnante.

T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> : Températures des corps « 1 » et « 2 ».

# CHAPITRE II

## FORMULATION MATHÉMATIQUE

## CHAPITRE 2

### Etude et formulation mathématique du problème du soudage

#### 2.1 Introduction :

L'étude du transfert thermique d'une opération de soudage a pour but d'assurer un joint de qualité. Il est donc important de corréler les propriétés de la structure soudée finale aux paramètres de soudage car l'ensemble de ces propriétés dictent l'évolution thermique de chaque point de l'assemblage.

Les caractéristiques finales d'un cordon de soudure du point de vue métallurgique et mécanique dépendent de la température, cette dernière conditionne le choix des procédés de soudage et les modes opératoires que nécessite chaque procédé. Elle permet aussi de prédire l'étendu des zones à risque (zone fondue et zone affectée thermiquement).

#### 2.2 Problématique :

Ce chapitre est consacré à l'étude de transfert de chaleur lors de l'opération de soudage TIG sans métal d'apport, on considère le cas bidimensionnel instationnaire d'assemblage de deux tubes de faible épaisseur, pour différents matériaux (l'acier inoxydable et l'alliage d'aluminium), dont les propriétés physiques des matériaux dépendent de la température c'est le cas le plus proche de la réalité.

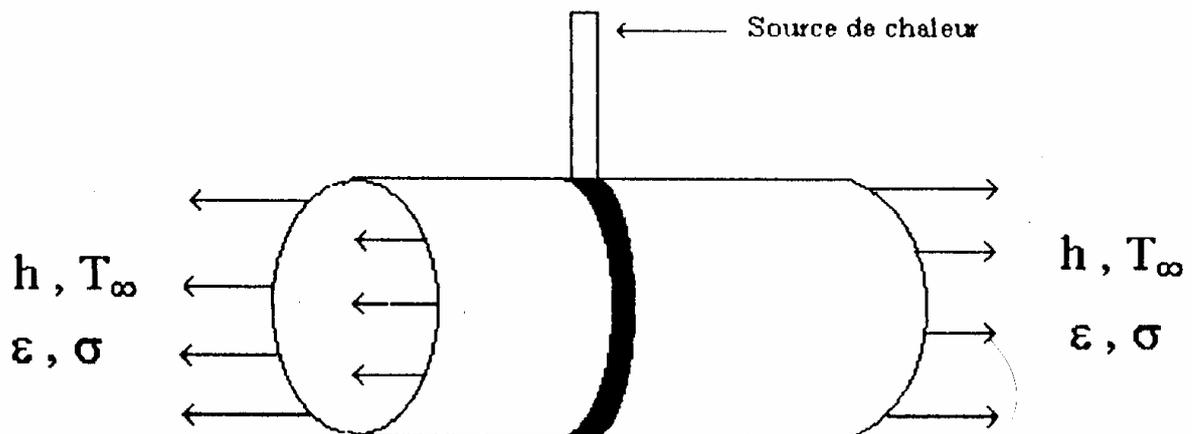


Fig.2.1 Tube.

### 2.3 Etude thermique du phénomène du soudage :

Le phénomène du soudage est régi par l'équation de la conduction, cette équation peut être obtenue à partir de l'équation de l'énergie donnée sous la forme suivante :

$$\rho \frac{dE}{dt} = -\overrightarrow{div} + S - P \overrightarrow{div}V + \phi \quad (2.1)$$

Avec :

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

$P \overrightarrow{div}V$  : Effet de la pression.

$\phi$  : Dissipation visqueuse.

S : source de chaleur interne.

Soit :

$$H = E + \frac{P}{\rho} \quad (2.2)$$

H : Enthalpie massique.  $(H = \rho C_p T)$

En dérivant l'équation (2-2) par rapport au temps on obtient :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dE}{dt} + \frac{d}{dt} \left( \frac{P}{\rho} \right) \quad (2.3)$$

On multiplie cette équation par  $\rho$  on obtient :

$$\rho \frac{dh}{dt} = \rho \frac{dE}{dt} + \rho \frac{d}{dt} \left( \frac{P}{\rho} \right) = \rho \frac{dE}{dt} + \rho \left( \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} \right) \quad (2.4)$$

On remplace l'équation (2-1) dans l'équation (2-3) on aura :

$$\rho \frac{dH}{dt} = \overrightarrow{\text{div}q} + \frac{dP}{dt} - \frac{P}{\rho} \left[ \frac{d\rho}{dt} + \rho \overrightarrow{\text{div}V} \right] + S + \phi \quad (2.5)$$

$\frac{dP}{dt}$  : La compression du fluide.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \overrightarrow{\text{div}V} = 0 \quad (2.6)$$

L'équation (2-4) devient :

$$\rho \frac{dH}{dt} = -\overrightarrow{\text{div}q} + \frac{dP}{dt} + S + \phi \quad (2.7)$$

L'enthalpie étant fonction de la température, on a :

$$\frac{dH}{dt} = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \frac{dT}{dt} + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dt} \quad (2.8)$$

La thermodynamique fournit les relations :

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P &= C_P \\ \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T &= \frac{1}{\rho} (1 - T\beta) \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Avec

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (2.10)$$

$\beta$  coefficient d'expansion thermique, ou de dilatation cubique à pression constante.

Finalement on peut décrire l'équation (2-6) sous la forme :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = -\overrightarrow{div}q + T\beta \frac{dP}{dt} + S + \phi \quad (2.11)$$

Pour simplifier l'étude du phénomène de soudage, nous allons considérer quelques hypothèses simplificatrices à l'équation (2-10) :

1.  $\frac{dP}{dt} = 0$  (pas de compression de fluide), on néglige les phénomènes d'ordre hydraulique ayant lieu dans le bain de fusion vu leur complexité.

2.  $V = 0$  d'où  $\phi = 0$  milieu solide, on ne considère pas l'écoulement et on néglige le transfert par convection.

3. Transfert de chaleur dans la direction Z négligeable (problème bidimensionnel, tube mince).  
L'équation (2-10) devient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\overrightarrow{div}q + S \quad (2.12)$$

Avec :

q : densité de flux de chaleur.

$$q = -K \overrightarrow{grad}T \quad (2.13)$$

On obtient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (2.14)$$

D'où

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) + S \quad (2.15)$$

Si on considère le cas où les propriétés physiques du matériau (K,  $C_p$  et  $\rho$ ) sont indépendantes de la température, l'équation (2-13) devient :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + S \quad (2.16)$$

### 2.4 Bilan énergétique :

On prend un volume de contrôle à l'intérieur d'un milieu conducteur au point de soudage et l'équation générale de chaleur exprimée dans un système en coordonnées cartésiennes (fig.2.5).

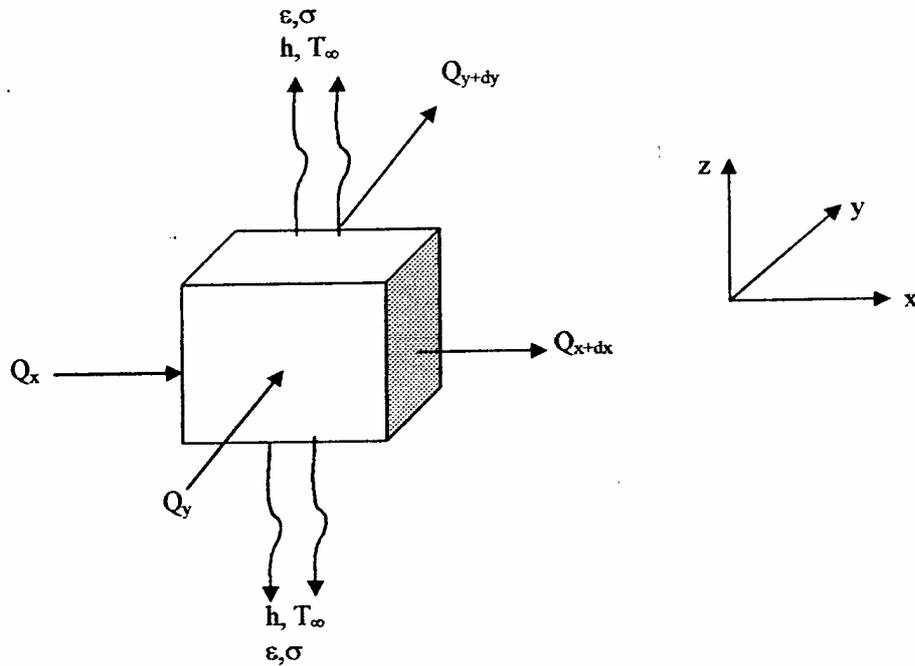


Fig. 2.5 Elément différentiel pris au point de soudage.

$$\rho C_p dx dy dz \frac{dT}{dt} = (Q_{x+dx} - Q_x) + (Q_{y+dy} - Q_y) + S^* \quad (2.17)$$

Tel que:

$$S^* = S(dx dy dz)$$

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \quad \text{et} \quad Q_{y+dy} = Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \quad (2.18)$$

De l'équation (2.17) et l'équation (2.18) on obtient :

$$\rho C_p dx dy dz \frac{dT}{dt} = \left( \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) + \left( \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) + S^* \quad (2.19)$$

Et on a aussi :

$$Q_x = k \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \quad \text{et} \quad Q_y = k \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \quad (2.20)$$

Alors l'équation (2.17) devient :

$$\rho C_p dx dy dz \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz + S^* \quad (2.21)$$

Et finalement on a:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (2.22)$$

## 2.5 Passage du problème cylindrique au problème cartésien :

Dans notre cas on doit utiliser les coordonnées cylindriques, mais la résolution numérique est laborieuse, donc nous allons au coordonnées cartésiennes, en développant le tube, avec les hypothèses suivantes:

- Les deux côtés sont également portés à la même température.
- Le flux entrant d'un côté de l'ouverture du cylindre égal au flux sortant de l'autre côté.
- Poser  $y=r\theta$ .

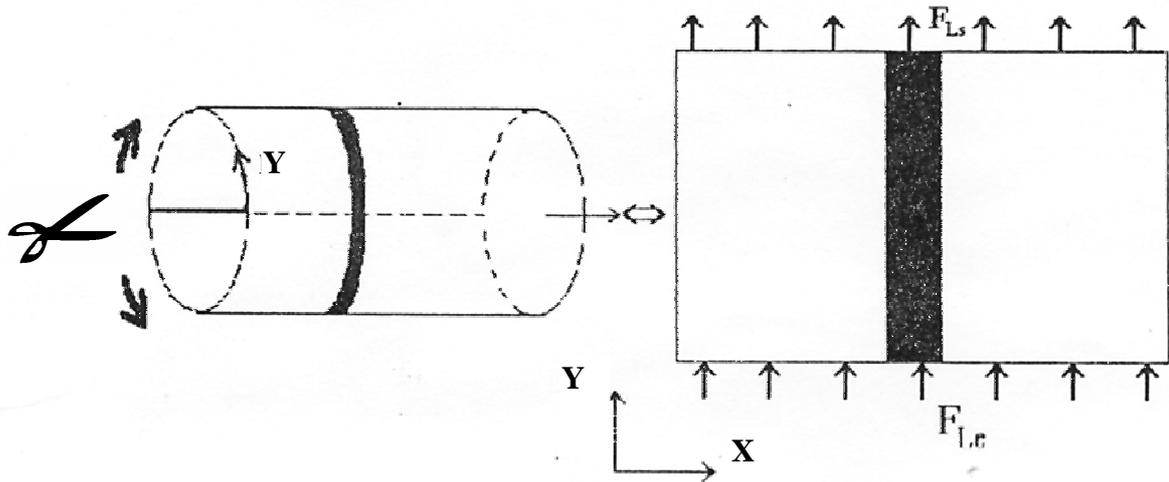


Fig.2.2 Passage du problème cylindrique au problème cartésien

## 2.6 Modélisation du problème du soudage :

### 2.6.1 Première application:

Dans cette application, nous allons étudier le transfert de chaleur en régime transitoire, des deux tubes de l'acier inoxydable dont les corrélations de leurs propriétés sont:[9]

**Pour  $T < 1700K$**

$$K(T) = 8.116 + 0.01618 \times T \text{ [w/m.k]}$$

$$\rho C_p(T) = 3561240.8 + 10022.3072 \times T \text{ [J/m}^3 \cdot \text{k]}$$

Pour  $T > 1700\text{k}$

$$K(T) = 12.29 + 0.003248 \times T \text{ [w/m.k]}$$

$$\rho C_p(T) = 5407942.2 \text{ [J/m}^3\text{.k]}$$

Les figures (2-3a) et (2-3b) illustrent les variations de ces paramètres en fonction de la température.

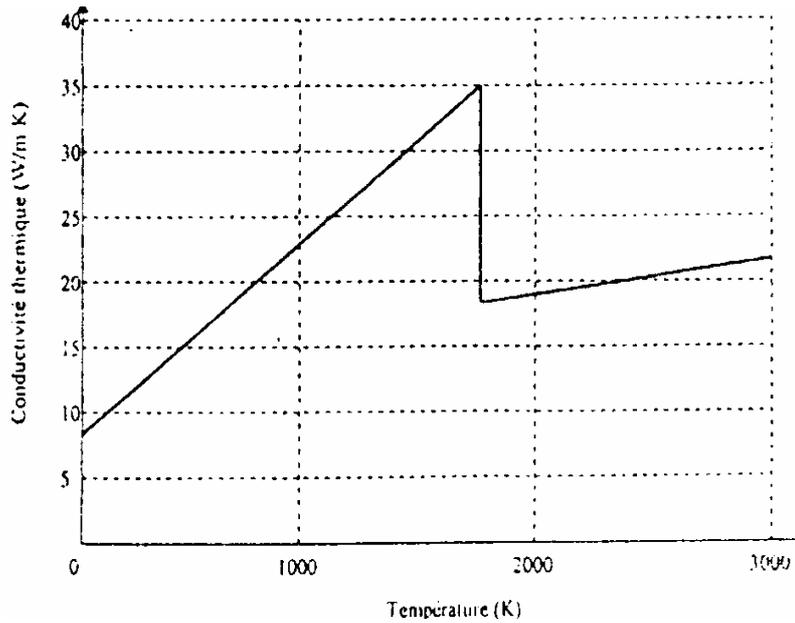


Fig.2.3a conductivité thermique du 304L

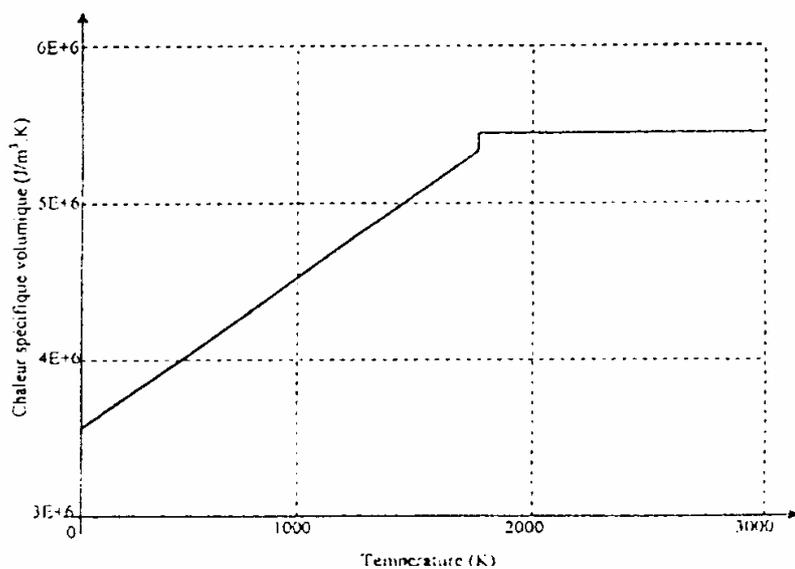


Fig.2.3b chaleur spécifique du 304L

### 2.6.2 Deuxième application:

Dans cette application, nous allons étudier le transfert de chaleur en régime transitoire, des deux tubes de l'alliage d'aluminium dont les corrélations de leurs propriétés sont:[8]

#### **Pour $T < 350\text{K}$**

$$K(T) = 219 + 0.06 \times T \text{ [w/m.k]}$$

$$\rho = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_p = 904 \text{ [J/kgk]}$$

#### **Pour $350 < T < 400$**

$$K = 240 \text{ [w/m.k]}$$

$$\rho = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

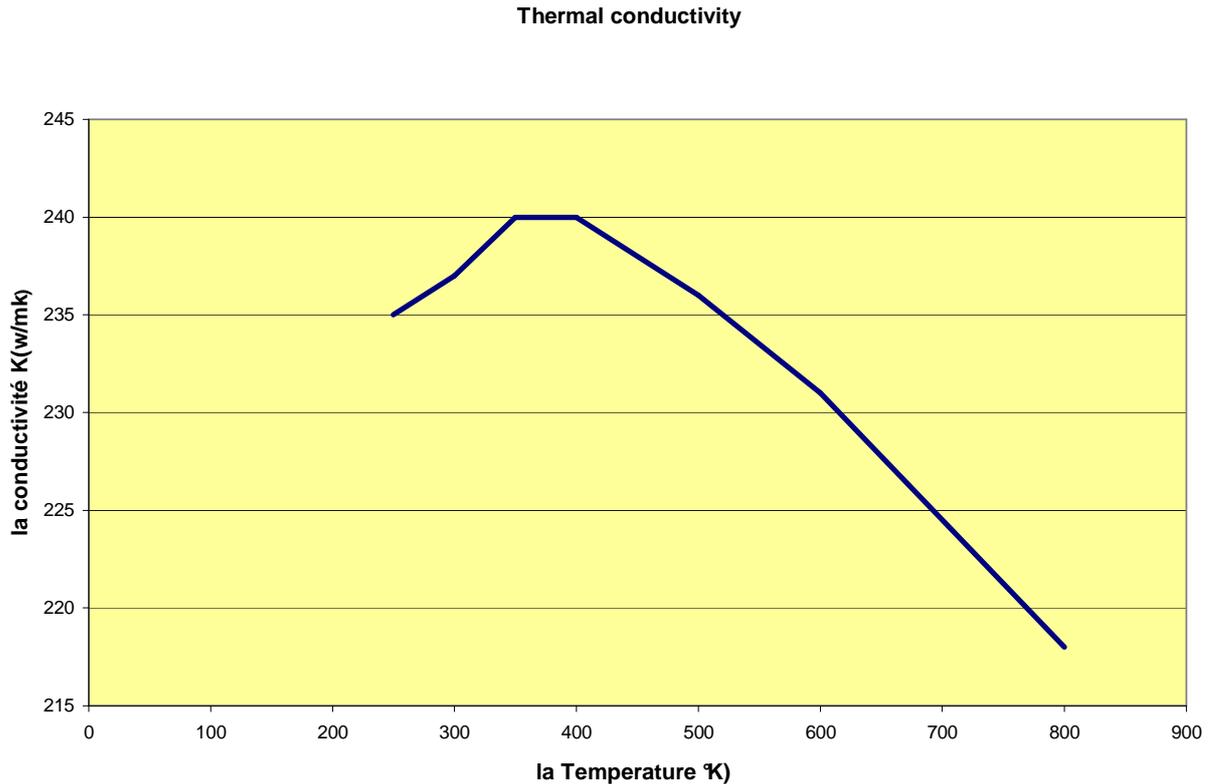
$$c_p = 904 \text{ [J/kgk]}$$

#### **pour $T > 400$**

$$K(T) = 262 - 0.055 \times T \text{ [w/m.k]}$$

$$\rho = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_p = 904 \text{ [J/kgk]}$$



**Fig.2.4 conductivité thermique de l'alliage d'aluminium**

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

**Conditions initiales :**

Initialement les tubes à souder sont à une température  $T_0$  égale à la température ambiante ( $T_0 = 300K$ ).

**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 :

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

Avec :

$h$  : coefficient d'échange par convection ( $h = 20 \text{ w/m}^2.k$ ). [7]

$T_p$  : Température de bord de l'assemblage.

$T_\infty$  : Température ambiante.

$\varepsilon$  : Emissivité thermique = 0.82.

$\sigma$  : Constante de STEPHANE-BOLTZMAN ( $\sigma = 5,66.10^{-8} \text{ w/m}^2.k^4$ ).

## 2.7 Description de la source de chaleur de soudage :

### 2.7.1 Simulation ponctuelle :

Du point de vue phénomène thermique, un arc électrique thermique est assimilable, avec une bonne approximation, à une source de chaleur ponctuelle et mobile, qui peut être remplacée par une série des sources ponctuelles instantanées placées les unes à la suite des autres, le long de la trajectoire de la source mobile (cordon de soudure). [4]

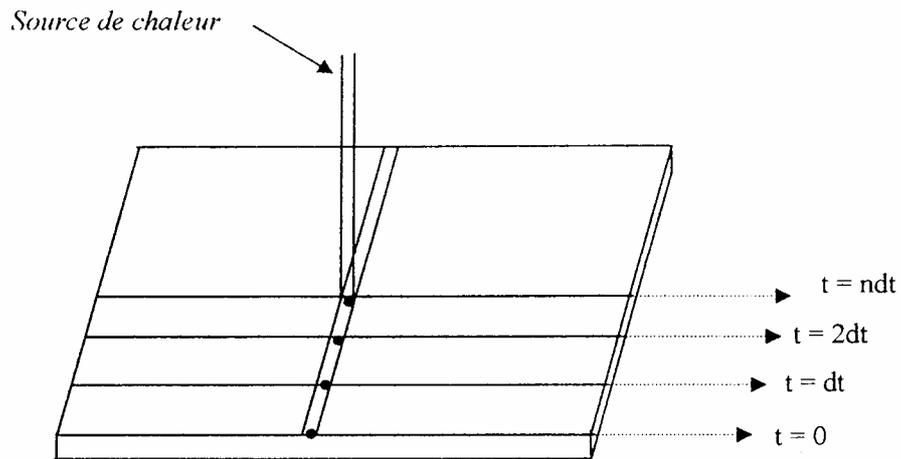


Fig.2.6 Simulation ponctuelle de la source de chaleur.

$$\text{Tel que : } Q = \eta UI = \iiint Q_0 dx dy dz = Q_0 \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.23)$$

$$\text{Donc : } Q_0 = \frac{\eta UI}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.24)$$

Dans ce cas le terme source s'écrit :

$$S = \left( h(T_\infty - T_p) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^4) \right) / \Delta z + Q \quad (2.25)$$

### 2.7.2 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". dans ce cas la source de chaleur est loin d'être ponctuelle mais plutôt gaussienne (sa forme est elliptique). la littérature propose l'expression suivante pour ce modèle de source:

$$Q = Q_0 \text{EXP} \left( -3 \left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right)$$

Certain proposent une autre formule dans le cas bidimensionnel:

$$Q(x, y, t) = Q_0 \text{EXP} \left( -\frac{3}{r_b^2} (x^2 + (y - vt)^2) \right) \quad \text{C'est la forme donnée par P.Tekriwal et M.Stitt.}$$

$$\text{avec : } Q_0 = \frac{3\eta \cdot U \cdot I}{\pi \cdot r_b^2}$$

U: la tension du courant ;

I: l'intensité;

v: la vitesse de déplacement de la source;

$\eta$ : le rendement de soudage;

$r_b$  : le rayon de la gaussienne.

Ainsi on assimile notre source de chaleur à un disque de rayon  $r_b$ , c'est la projection du volume gaussien sur le plan avec une approximation.

Le modèle de gauss nous permet d'étudier l'influence des paramètres opératoires et géométriques sur la morphologie du cordon de soudure.

La résolution du problème posé passe par la recherche de la solution du modèle mathématique utilisé. Pour cela, une méthode de résolution doit être adoptée.

# CHAPITRE III

## RESOLUTION NUMERIQUE

## CHAPITRE 3

### Résolution numérique

#### 3.1 Introduction

La méthode des volumes de contrôle développée par Spalding et Patankar est une méthode de résidus pondérés dans laquelle les fonctions de poids sont égales à l'unité dans des volumes finis donnés, et nulles partout ailleurs. Sa grande simplicité de mise en oeuvre a fait qu'elle a connu un essor depuis les années 1980. Elle est à l'origine de la majorité des codes de calculs en géométrie cartésienne (Fluent,Phoenics...).

Nous considérons ici l'exemple de l'équation de la chaleur en régime stationnaire et instationnaire.

#### 3.2 L'équation de la chaleur

##### 3.2.1 Cas unidimensionnel

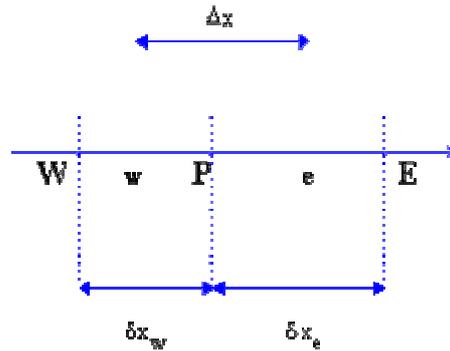
##### 3.2.1.1 Régime stationnaire

Les principes de base de la méthode sont présentés ici à travers l'exemple de l'équation de diffusion monodimensionnelle:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S = 0 \quad (3.1)$$

Le domaine est d'abord discrétisé à l'aide d'une grille unidimensionnelle (uniforme ou non) orientée positivement vers la droite. Pour écrire le schéma de discrétisation en un point P, nous désignerons par E et W les noeuds situés immédiatement à sa droite et à sa gauche.

Le " volume de contrôle" centré en P a donc ici pour dimension  $\Delta x$ . Nous désignerons enfin les points situés aux limites de ce volume par w et e relativement à gauche et à droite Fig. 3.1.



**Fig.3.1 Discretisation unidimensionnelle montrant les volumes finis**

Le principe de la méthode des volumes finis consiste à intégrer l'équation à résoudre sur chacun des volumes de contrôle.

Nous avons donc au point P:

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \int_w^e S dx = 0$$

Soit:

$$\left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (3.2)$$

$$\bar{S} = S_C + S_P T_P$$

$S_C$  = Partie constante de la linéarisation de terme source.

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

$$K_e \frac{(T_e - T_p)}{\Delta x_e} - K_w \frac{(T_p - T_w)}{\Delta x_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (3.3)$$

L'équation (3.3) peut se mettre sous la forme:

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + b \quad (3.4)$$

Avec:

$$a_e = \frac{K_e}{\partial x_e}; a_w = \frac{K_w}{\partial x_w}; a_p = a_e + a_w - S_p \Delta x; b = S_C \Delta x.$$

L'équation (3.4) sera écrite en chaque noeud du maillage.

### 3.2.1.1.1 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 :

$$\bar{S} = S_C + S_P T_P \quad (3.5)$$

Où  $S_C$  et  $S_P$  sont des constantes.

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

$$S = 2h_\infty (T_\infty - T_P) / \Delta z + 2\sigma\varepsilon (T_\infty^4 - T_P^4) / \Delta z + q_0 e^{-a(x^2+(y-vt)^2)} \quad (3.6)$$

Ce terme doit être représenté sous la forme linéaire :  $\bar{S} = S_C + S_P T_P$

Pour ce faire on va utiliser la méthode de la tangente recommandée par Patankar [10]

$$\bar{S} = \bar{S}^* + \left( \frac{dS}{dT_P} \right)^* (T_P - T_P^*) \quad (3.7)$$

Avec :

$$S_C = \bar{S}^* - \left( \frac{dS}{dT_P} \right)^* T_P^*$$

$$S_P = \left( \frac{dS}{dT_P} \right)^*$$

On aura :

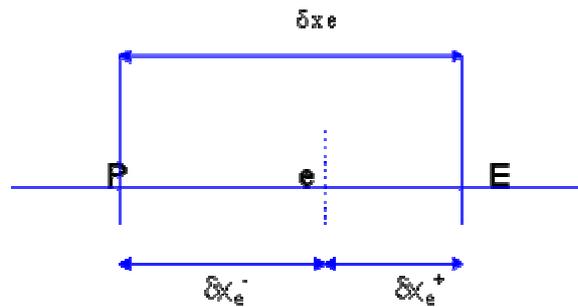
$$S_C = 2(h_\infty T_\infty + 3\sigma \varepsilon T_P^{*4} + \sigma \varepsilon T_P^4) / \Delta z + q_0 e^{-a(x^2+(y-vt)^2)} \quad (3.8)$$

$$S_P = -2(h_\infty + 4\sigma \varepsilon T_P^{*3}) / \Delta z \quad (3.9)$$

Avec \* symbole de la dernière itération.

### 3.2.1.1.2 Calcul de la conductivité aux interfaces

La méthode des volumes finis repose sur le calcul des flux aux interfaces. On a donc besoin (quand le domaine est hétérogène) de déduire les conductivités aux points e et w à partir des conductivités aux noeuds E, P et W.



**Fig.3.2** Discrétisation unidimensionnelle montrant le coté est de volume

La conductivité peut être déterminée en supposant un comportement linéaire:

$$K_e = f_e K_P + (1 - f_e) K_E \quad (3.10)$$

Avec  $f_e = \frac{\partial x_e^+}{\partial x_e^-}$ ;

Pour un maillage régulier on retrouve la moyenne arithmétique:

$$K_e = \frac{2K_P K_E}{K_P + K_E} \quad (3.11)$$

### 3.2.1.2 Régime transitoire

$$\rho c p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (3.12)$$

Dans ce cas on intègre dans l'espace et dans le temps:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c p \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e S dx dt \quad (3.13)$$

Le terme d'accumulation est intégré en supposant que la valeur de T au point P est uniforme dans tout le volume:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \rho c p \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c p \Delta x (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \quad (3.14)$$

En ce qui concerne les autres termes, une fois l'intégration spatiale effectuée, on utilise l'écriture générale suivante:

$$\int_t^{t+\Delta t} f(t) dt = [\alpha f(t + \Delta t) + (1 - \alpha) f(t)] \Delta t$$

où f(t) est l'une des fonctions à intégrer.

Cette écriture permet de retrouver les trois schémas classiques de la méthode des différences finies suivant les valeurs de  $\alpha$ :

$\alpha=0$ : schéma explicite (conditionnellement stable)

$\alpha=1$ : Schéma implicite

$\alpha=0.5$ : schéma semi-implicite de Crank-nicolson

Le schéma implicite est recommandé pour sa grande stabilité et traduit une réalité physique. [10].

On prend donc  $\alpha=1$  ( Schéma implicite).

$$\rho c p \Delta x (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) = \left( K_e \frac{T_E^{t+\Delta t} - T_P^{t+\Delta t}}{\partial x_e} - K_w \frac{T_P^{t+\Delta t} - T_W^{t+\Delta t}}{\partial x_w} + \overline{S^{t+\Delta t}} \Delta x \right) \Delta t \quad (3.15)$$

Ce qui se met sous la forme:

$$a_P T_P^{t+\Delta t} = a_E T_E^{t+\Delta t} + a_W T_W^{t+\Delta t} + b \quad (3.16)$$

avec:

$$a_E = \frac{K_e}{\partial x_e}; a_W = \frac{K_w}{\partial x_w}; a_P = a_E + a_W + \frac{\rho c p \Delta x}{\Delta t} - S_p \Delta x; b = S_C \Delta x + \frac{\rho c p \Delta x}{\Delta t} T_P^t$$

On a donc ici un système tridiagonal à résoudre à chaque pas de temps.

### 3.2.1.2.1 Algorithme de Thomas ou TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)

Cet algorithme permet de calculer la solution d'un système linéaire lorsque la matrice est tridiagonale .C'est notre cas, car les équations discrétisées dans le système linéaire s'écrivent :

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad 1 \leq i \leq N \quad (3.17)$$

Où le maillage est présenté à la figure 3.1.



**Fig.3.3 Application de TDMA dans le cas 1D**

La température  $T_i$  est exprimée en fonction des températures voisines  $T_{i-1}$  et  $T_{i+1}$  pour prendre en compte la forme spéciale des équations pour les points de frontière 1 et N il faut que :

$$c_1 = 0 \quad \text{et} \quad b_N = 0 \quad (3.18)$$

Si, par exemple, la température  $T_1$  est connue on a  $b_1=0$  et  $c_1=0$  l'équation (3.17) pour  $i = 2$  est une relation entre  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , mais parce que  $T_1$  est exprimée en fonction de  $T_2$  ou est connue, la relation entre  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , est réduite à une relation entre  $T_2$  et  $T_3$ , c'est-à-dire  $T_2$  peut être exprimée en fonction de  $T_3$ . Le processus de substitution continue jusqu'à quand  $T_N$  est exprimée en fonction de  $T_{N+1}$  qui ne joue aucun rôle ( $b_N=0$ ), donc on obtient, dans cette étape, la valeur de  $T_N$ . On commence ensuite le processus inverse où l'on détermine  $T_{N-1}$  en fonction de  $T_N$ ,  $T_{N-2}$  en fonction de  $T_{N-1}$  et ainsi de suite  $T_2$  en fonction de  $T_3$  et  $T_1$  en fonction de  $T_2$ . Dans le processus de substitution en avant les équations sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 a_1 T_1 &= b_1 T_2 + 0 + d_1 & \Rightarrow T_1 = f(T_2) &= \frac{b_1}{a_1} T_2 + \frac{d_1}{a_1}; \\
 a_2 T_2 &= b_2 T_3 + c_2 T_1 + d_2 & \Rightarrow T_2 &= f(T_3); \\
 a_3 T_3 &= b_3 T_4 + c_3 T_2 + d_3 & \Rightarrow T_3 &= f(T_4); \\
 & \dots & & \\
 a_{N-1} T_{N-1} &= b_{N-1} T_N + c_{N-1} T_{N-2} + d_{N-1} & \Rightarrow T_{N-1} &= f(T_N); \\
 a_N T_N &= 0 + c_N T_{N-1} + d_N & \Rightarrow T_N &= Q_N.
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Dans cette étape on cherche les relations de type  $T_i = f(T_{i+1})$  sous la forme,

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i. \tag{3.20}$$

Mais on peut écrire également la relation suivante :

$$T_{i-1} = P_{i-1} T_i + Q_{i-1}. \tag{3.21}$$

En remplaçant l'équation (3.21) dans l'équation (3.17) on obtient :

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i (P_{i-1} T_i + Q_{i-1}) + d_i. \tag{3.22}$$

En regroupant les termes dans l'équation (3.22) sous la forme générale (3.21) on obtient les coefficients  $P_i$  et  $Q_i$  en fonction des coefficients  $P_{i-1}$  et  $Q_{i-1}$  :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}}. \tag{3.23}$$

Les valeurs de  $P_1$  et  $Q_1$  sont données par les formules suivantes:

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad \text{et} \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \tag{3.24}$$

Il est bien de préciser que les relations (3.24) sont obtenues si l'on remplace  $c_1=0$  dans les relations (3.23). à la fin du processus de récurrence on constate que  $b_N=0$  et donc  $P_N=0$  et de l'équation (3.20) on obtient :

$$T_N = Q_N \tag{3.25}$$

À ce point, on est dans la situation de démarrer le processus de substitution en arrière en utilisant la relation (3.20).

**Résumé de l'algorithme**

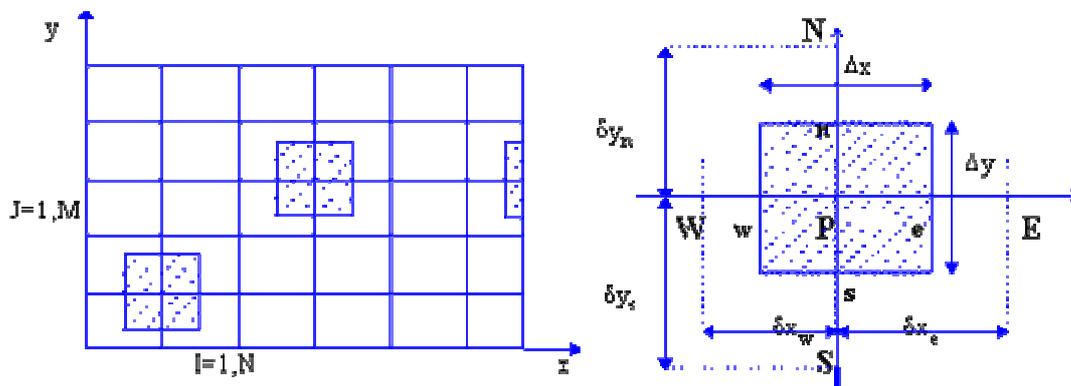
1. Calculer  $Q_1$  et  $P_1$  en utilisant les relations (3.24);
2. Calculer  $P_i$  et  $Q_i$ , pour  $i = 2, N$ , avec les relations de récurrence (3.23);
3. Poser  $T_N = Q_N$  ;
4. Utiliser l'équation  $T_i = P_i T_{i+1} + Q_i$  de  $i=N-1$  à 1 pour obtenir  $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_1$

**3.2.2 Cas bidimensionnel**

Considérons à présent l'équation:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \tag{3.26}$$

Sur un domaine bidimensionnel discrétisé de façon cartésienne, les volumes finis de surface  $\Delta x \Delta y$  ont l'allure de la figure 3.4. Le point P a maintenant 4 voisins suivant les 4 points cardinaux : E, W, N, S.



**Fig.3.4: Discrétisation bidimensionnelle montrant les volumes finis**

Une intégration dans l'espace et dans le temps donne:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s \rho c p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_s \text{div}(K \text{grad} T) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s S dx dy dt \quad (3.27)$$

On aura :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s \rho c p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_s \left[ \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[ \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s S dx dy dt. \quad (3.28)$$

Les différentes dérivées partielles sont ensuite approximées de la façon suivante:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e = \frac{T_E - T_P}{\delta x_e}; \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = \frac{T_P - T_W}{\delta x_w}; \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n = \frac{T_N - T_P}{\delta y_n}; \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s = \frac{T_P - T_S}{\delta y_s};$$

On obtient finalement dans le cas du schéma implicite ( $\alpha=1$ ):

$$a_P T_P^{t+\Delta t} = a_E T_E^{t+\Delta t} + a_W T_W^{t+\Delta t} + a_N T_N^{t+\Delta t} + a_S T_S^{t+\Delta t} + b \quad (3.29)$$

Avec:

$$a_E = \frac{K_e \Delta y}{\delta x_e}; a_W = \frac{K_w \Delta y}{\delta x_w}; a_N = \frac{K_n \Delta x}{\delta x_n}; a_S = \frac{K_s \Delta x}{\delta x_s};$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + \frac{\rho c p \Delta x \Delta y}{\Delta t} - S_P \Delta x \Delta y; b = S_C \Delta x \Delta y + \frac{\rho c p \Delta x \Delta y}{\Delta t} T_P^t$$

**Remarque:** la résolution du système matriciel précédent peut encore se faire par l'algorithme TDMA. On se ramène pour cela à un système unidimensionnel sur une ligne ou une colonne et on procède à une résolution itérative par balayages successifs.

Un premier balayage est effectué ligne par ligne en écrivant:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + B$$

Avec:

$$B = a_N T_N^* + a_S T_S^* + b$$

Où  $T_N^*$  et  $T_S^*$  sont les valeurs de  $T_N$  et  $T_S$  à l'itération précédente. Quand le balayage sur les lignes est terminé, on passe au balayage colonne par colonne. Sur chaque colonne, l'algorithme TDMA est utilisé pour résoudre le système:

$$a_p T_p = a_N T_N + a_S T_S + C$$

Avec:

$$C = a_E T_E^* + a_W T_W^* + b$$

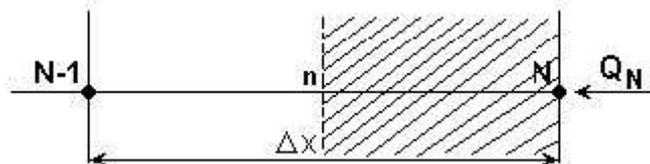
Où  $T_E^*$  et  $T_W^*$  sont les valeurs de  $T_E$  et  $T_W$  à l'itération précédente. Ce processus itératif est répété jusqu'à convergence.

Cette technique présente l'avantage d'éviter la construction de systèmes matriciels.

### 3.3 Traitement des conditions aux limites

#### 3.3.1 Conditions aux limites de type Neumann [11]

En intégrant l'équation (3.1) sur le demi-volume de contrôle (VC) illustré à la Fig. 3.5 on obtient :



**Fig.3.5 Traitement d'une condition à la limite de type flux imposé (Neumann)**

$$\int_{VC} \frac{d}{dx} \left( K \frac{dT}{dx} \right) dV + \int_{VC} S dV = 0 \quad (3.30)$$

ce qui donne pour  $dV = Adx = 1 \times 1 \times dx$  (le cas unidimensionnel)

$$\int_n^N \frac{d}{dx} \left( K \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_n^N S dx = 0 \quad (3.31)$$

et finalement après l'intégration, on obtient :

$$\left( K \frac{dT}{dx} \right)_N - \left( K \frac{dT}{dx} \right)_n + \bar{S}_N \frac{\Delta x}{2} = 0 \quad (3.32)$$

Comme la densité du flux thermique  $Q_N$  au point  $N$  s'exprime :

$$Q_N = -\left(K \frac{dT}{dx}\right)_N$$

L'équation (3.30), en exprimant la dérivée au point "n" avec différences centrales, devient :

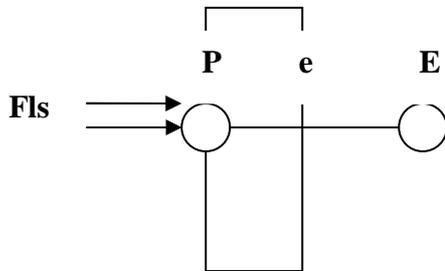
$$-Q_N - K_N \frac{T_N - T_{N-1}}{\Delta x} + \bar{S}_N \frac{\Delta x}{2} = 0 \quad (3.33)$$

En regroupant les termes dans l'équation (3.32), on obtient l'équation discrétisée, valable pour le point de frontière  $N$ , pour la condition à la limite de type Neumann (flux imposé):

$$T_{N-1} - T_N = \frac{\bar{S}_N (\Delta x)^2}{2K_{N-1/2}} + \frac{Q_N \Delta x}{K_{N-1/2}} \quad (3.34)$$

Pour la condition à la limite de type Neumann homogène on a  $Q_N = 0$ . Le terme  $S_N$  est en fait la moyenne arithmétique entre le terme source du point  $N$  et le terme source de l'interface  $n$  du demi-volume de contrôle.

### 3.3.1.1 Surface gauche :



$$fle - q_E + \bar{S} \Delta x \Delta y / 2 = 0$$

$$fle - \frac{k_E (T_P - T_E) \Delta y}{(\delta x)_e} + (S_C + S_P T_P) \Delta x \Delta y / 2 = 0$$

$$fle = \frac{k_E (T_P - T_E) \Delta y}{(\delta x)_e} - (S_C + S_P T_P) \Delta x \Delta y / 2$$

$$a_P = a_E - S_P \Delta x \Delta y / 2$$

$$a_E = \frac{k_e \Delta y}{(\delta x)_e}$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y / 2 + fle$$

$$a_P T_P = a_E T_E + b$$

$$a_S = a_W = a_N = 0$$

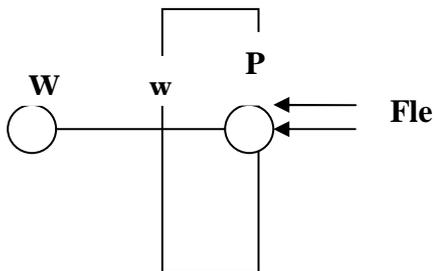
$$fls = -fle$$

Avec :

Fle: le flux de chaleur entrant à la surface droite de l'ouverture.

Fls: le flux de chaleur sortant par la surface gauche de l'ouverture.

### 3.3.1.2 Surface droite :



$$fls - q_W - \bar{S} \Delta x \Delta y / 2 = 0$$

$$fls - K_w \frac{(T_W - T_P) \Delta y}{\partial x_w} + (S_C + S_P T_P) \Delta x \Delta y / 2 = 0$$

$$a_P T_P = a_W T_W + b$$

$$a_S = a_E = a_N = 0$$

$$a_P = a_W - S_P \Delta x \Delta y / 2$$

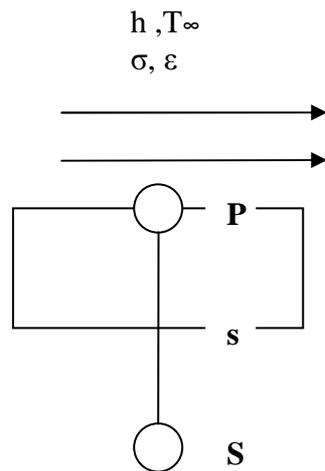
$$a_W = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y / 2 + fle$$

$$f_{ls} = \frac{k_w (T_w - T_p) \Delta y}{(\delta x)_w} - (S_c + S_p T_p) \Delta x \Delta y / 2$$

$$f_{le} = -f_{ls}$$

### 3.3.1.3 Surface supérieure:



Dans ce cas :  $q_p = (h_\infty (T_p - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^4)) \Delta x \Delta y / 2$

$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

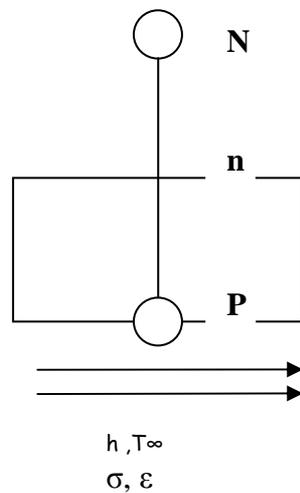
$$a_E = a_W = a_N = 0$$

$$a_p = a_s - S_p \Delta x \Delta y / 2 + h \Delta x \Delta y / 2$$

$$a_s = \frac{k_s \Delta y}{(\delta x)_s}$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y / 2 + h T_\infty \Delta x \Delta y / 2$$

### 3.3.1.4 Surface inférieure :



Dans ce cas :  $q_p = (h_\infty (T_p - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^4)) \Delta x \Delta y / 2$

$$a_p T_p = a_N T_N + b$$

$$a_E = a_W = a_S = 0$$

$$a_p = a_N - S_p \Delta x \Delta y / 2 + h \Delta x \Delta y / 2$$

$$a_N = \frac{k_N \Delta y}{(\delta x)_n}$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y / 2 + h T_\infty \Delta x \Delta y / 2$$

### 3.4 Méthode de résolution :

Le programme utilise la méthode de résolution ligne par ligne, cette méthode est une combinaison entre la méthode de GAUSS-SEIDEL et la méthode de THOMAS.



**Règle N°2 :** coefficients positifs.

Si nous avons un accroissement en un point ( $T_E$  par exemple), il faut que le point voisin  $T_P$  ait un accroissement et donc les coefficients  $a_P$  et  $a_E$  ont même signe que nous choisissons positif.

**Règle N°3 :** pente négative.

Quand nous linéarisons le terme source, le coefficient  $a_P$  peut devenir négatif, il faut donc que  $S_P$  soit négatif pour ne pas courir ce danger.

**Règle N°4 :** Somme des coefficients voisins.

Quand le terme source est constant, le coefficient  $a_P$  doit être égal à la somme des coefficients des voisins  $a_P = \sum a_{nb}$

Alors :

$$\bar{S} = S_c + S_P T_P$$

PARTIE II

PARTIE EXPERIMENTALE

# CHAPITRE IV

## PROCEDURES EXPERIMENTALES

## CHAPITRE 4

### Procédures expérimentales

#### 4.1 Introduction

Le but de cette partie est de prélever les cycles thermiques et caractériser mécaniquement et métallurgiquement notre soudure pour pouvoir évaluer les étendues des ZF et ZAT et leurs conséquences sur l'assemblage soudé, cette partie nous permet de voir l'influence des paramètres de soudage sur la qualité de cordon de soudure. Les essais que nous avons effectués nous ont confirmé la bonne soudabilité des matériaux métalliques par le procédé TIG. L'assemblage soudé peut être contrôlé par une technique non destructive (radiographie) afin de vérifier son intégrité.

#### 4.2 Procédé de soudage et dispositif expérimental

##### 4.2.1 Procédé de soudage :

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



**Fig.4.1** Poste de soudage TIG (atelier de CSC)

**4.2.2 Matériaux et techniques expérimentales:**

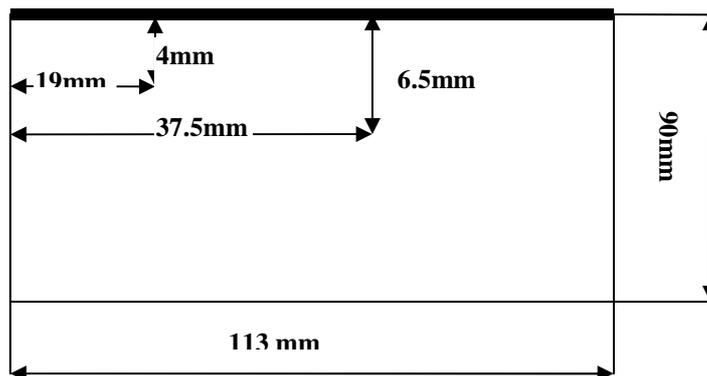
On a soudé deux tubes, avec des paramètres adéquats pour chacun, ces paramètres sont illustrés dans le tableau suivant:

Type de matériaux	Vitesse (mm/s)	Gaz de protection	Débit du gaz	Longueur de cordon (mm)	polarité	Tension (V)	Intensité (A)
Acier inox 304L(e=1.8mm)	1.215	Argon	6.5 l/min	113	Direct	17-18	39-40
Alliage d'aluminium (e=2.75mm)	1.01	Argon	13 l/min	188	Alternatif	17	72

**Tableau N°1 les paramètres de soudage des deux Tubes.**

**4.2.2.1 Description de l'opération d'implantation des thermocouples et acquisition des cycles thermiques:**

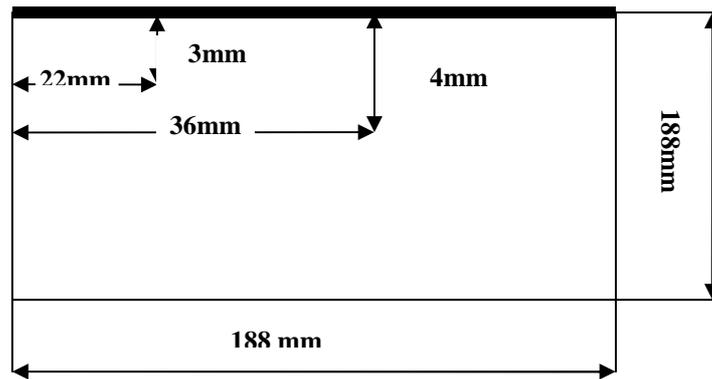
On a implanté les thermocouples K (chromel-alumel) supportant des températures allant jusqu'à 1200°C. les positions de ces thermocouples sont illustrées sur les figures(4.2 et 4.3). Ces positions ont été choisies de telle sorte qu'elles coïncident avec le maillage qu'on a choisit pour pouvoir comparer les cycles thermiques prélevés avec les résultats obtenus par simulation.



**Fig.4.2 Position des thermocouples sur le tube de l'inox ep=1.8mm**

Les coordonnées des points sont:

**1(4,19) ; 2(7,38)**



**Fig.4.3 Positions des thermocouples sur le tube d'alliage d'aluminium  $e_p=2.7\text{mm}$**

Les coordonnées des points sont:

**1(3,22) ; 2(4,36)**

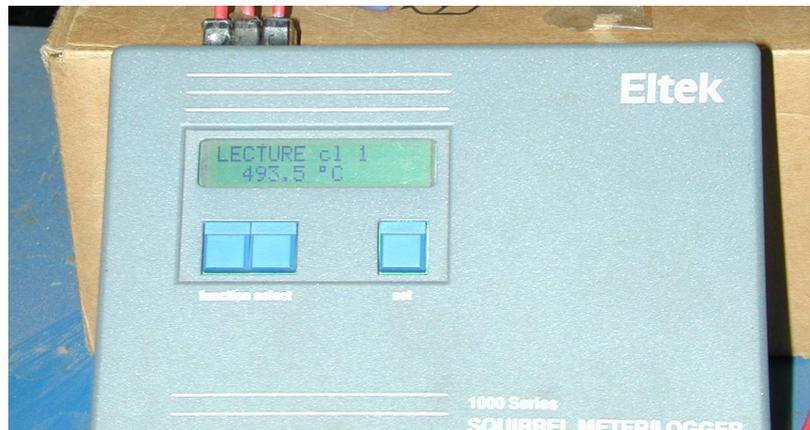


**Fig.4.2 Le Soudage du thermocouple**



**Fig.4.3 Les thermocouples soudés sur le tube.**

Les thermocouples sont reliés à un enregistreur qui fait l'acquisition de la température (l'histoire thermique) de chaque point au cours du temps, l'évolution de la température de tous les points sont donnés dans le même graphe. Nous avons les valeurs correspondant à chaque thermocouple, pour tracer les différents cycles thermiques prélevés et enregistrés séparément.



**Fig.4.4 Enregistreur des cycles thermique.**

#### **4.3 Dispositif de soudage:**

Les tubes sont placés bout à bout, et reposent sur un support qui permet de faire tourner les tubes avec une vitesse constante.

Notre dispositif expérimental est illustré dans la figure 4.5, on voit bien le support qu'on a mis, avec la protection gazeuse à l'intérieur du tube et à l'extérieur pour éviter toute sorte d'oxydation afin de réaliser une soudure avec une bonne pénétration.



**Fig.4.5 La protection gazeuse à l'intérieur des tubes**

On a soudé avec le procédé TIG. Nous avons évité d'utiliser du métal d'apport pour ce mettre dans les mêmes conditions qu'on a supposé dans notre modèle numérique.

#### 4.4 Compositions chimiques des matériaux étudiés :

Composition													
Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr+Ti	Autres total	Al
5056	Min.	/	/	/	0.05	4.50	0.05	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0.30	0.40	0.10	0.20	5.60	0.2	/	0.10	0.20	/	0.15	

Compositions chimiques de l'acier inoxydable 304L									
Teneur des éléments	C	Mo	Cu	Ni	Mn	Cr	Si	P	S
en %massique	0.024	0.307	0.42	8.32	1.69	18.18	0.70	0.026	0.020

#### 4.5 Examen micrographique :

##### 4.5.1 But :

L'essai micrographique rend compte de la répartition thermique et met en évidence l'hétérogénéité microstructurale des différentes zones de la soudure. Cet essai fait apparaître les différentes zones d'une soudure à savoir la zone fondue (ZF), la zone affecté thermiquement (ZAT), la zone de liaison (ZL) et le métal de base (MB) et permet de mesurer les étendues des différentes zones.

##### 4.5.2 Mode opératoire :

**Préparation des échantillons :** la première étape à effectuer est le polissage utilisant des papiers abrasifs de granulométries décroissantes.



**Fig.4.6 Polisseuse**

#### **4.5.3 Attaque chimique :**

Pour relever les différentes zones de la soudure, il est nécessaire d'effectuer une attaque chimique adéquate pour la micrographie. L'attaque chimique utilisée pour l'acier inoxydable austénitique est l'eau régale classique qui est composée de (1 volume d'acide nitrique, 2 volumes HCL et 2 à 3 volumes de glycérine). Pour l'alliage d'aluminium c'est la solution Keler qui est composé de (1ml HF, 1.5ml Hcl, 2.5ml HNO<sub>3</sub> et 95ml H<sub>2</sub>O).



**Fig. 4.7 Les échantillons de la pièce soudée  
(Tube d'aluminium)**



**Fig. 4.8 L'échantillon de la pièce soudée  
(Tube d'inox)**

Les échantillons ont été par la suite immergés respectivement chacun dans sa solution chimique adéquate pendant des durées normalisées.

# CHAPITRE V

## RESULTATS ET INTERPETATIONS

## CHAPITRE 5

### Résultats et leurs interprétations

#### 5.1 Introduction :

Ce chapitre sera consacré aux résultats et à leur interprétation, les résultats obtenus pour les différentes applications, vont nous permettre la détermination des étendues des zones à risque 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, en suite on va discuter et interpréter les résultats obtenus expérimentalement.

#### 5.2 Choix du maillage :

Pour la direction X, un maillage fin est utilisé vu l'importance du gradient de température, particulièrement à proximité du cordon de soudure.

Dans la direction de déplacement de l'arc (suivant l'axe des Y), un maillage plus grossier comparé à celui utilisé dans la direction des x.

On passe en suite à l'optimisation du pas temporel « $\Delta t$ » par le bais du pas spatial  $\Delta y$  liés par la relation :

$$\Delta y = V \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta y}{V}$$

Avec :

$\Delta y$  : pas spatial suivant l'axe Y (correspondant au déplacement de l'arc).

V : la vitesse de soudage.

Le choix du maillage par lequel nous avons opté est:

Pour les tubes de l'inox 304L:

$$\Delta x = 0.001 \text{ m.}$$

$$\Delta y = 0.0015 \text{ m.}$$

$$\Delta t = 1.23 \text{ s}$$

Pour les tubes de l'alliage d'aluminium :

$$\Delta x = 0.001 \text{ m.}$$

$$\Delta y = 0.002 \text{ m.}$$

$$\Delta t = 1.98 \text{ s}$$

### 5.3 Discussions des résultats

#### 5.3.1 Les résultats thermiques.

Les cycles thermiques schématisés sur les figures (5.1 à 5.4) décrivent le comportement thermique des deux points proches de la zone fondue. On peut distinguer sur la courbe  $T = f(t)$  trois zones différentes:

Une zone où la température est relativement constante, elle correspond à la température ambiante et à la durée où la source d'énergie de soudage n'a pas encore atteint le point en question.

Une zone correspondant à un chauffage très rapide atteignant la température maximale égale à 1320k pour l'inox et 900k pour l'aluminium.

Ce chauffage a lieu quand la source d'énergie de soudage se trouve au minimum de distance par rapport aux points en question.

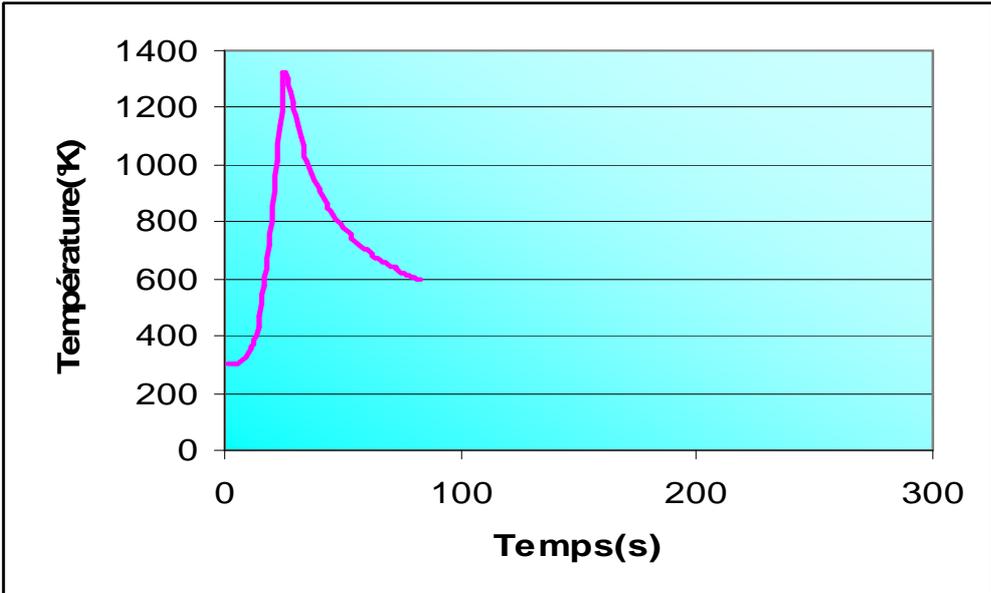
Un refroidissement rapide qui succède immédiatement au passage de la source.

Les pics des courbes obtenues numériquement ne coïncident pas avec ceux obtenus expérimentalement. Cela est dû au fait que contrairement au modèle numérique qui est caractérisé par une vitesse constante, l'opération expérimentale, quand à elle, peut connaître des accélérations ou décélération dans l'avancement manuel de la source d'énergie.

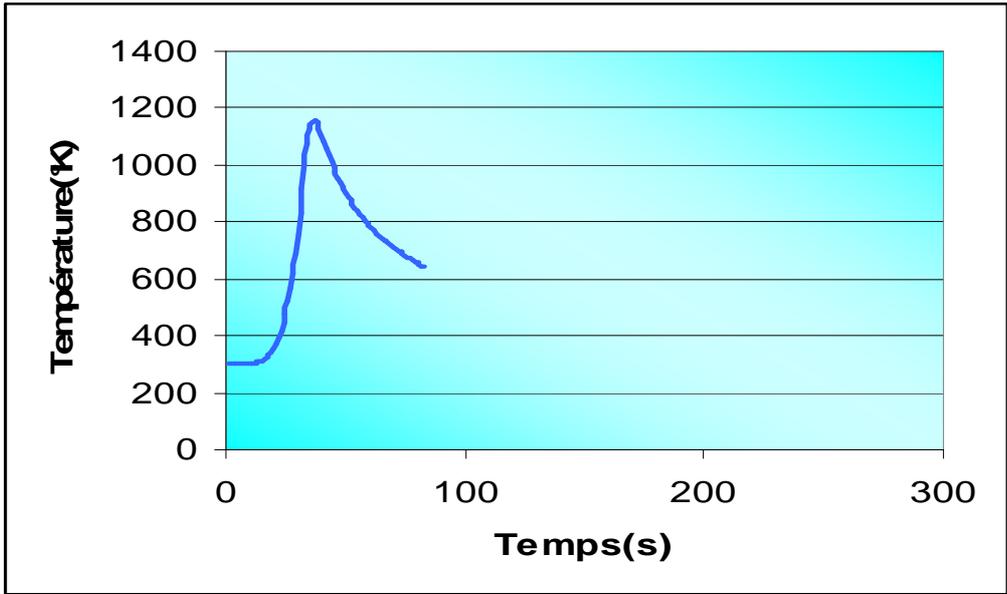
Les figures (5.5 et 5.6), illustrent les profils de température pour différents instants. Ces derniers atteignent la valeur de 2280 K pour L'inox et de 1467 K pour l'alliage d'aluminium, correspondant aux sommets des courbes. Elles correspondent au point d'impact de la source. Les parois nord et sud de l'assemblage sont portées à la même température, ce qui prouve que les conditions aux limites établies sont correctes. Les frontières nord et sud de l'assemblage ne sont en fait que la même génératrice du tube (Inox ou Aluminium).

On constate sur les figures (5.7 et 8), qui représentent la répartition de la température aux différents instants, que les isothermes sont resserrées sous forme d'ellipses autour du point d'impact de la source, cela est dû à l'important apport de chaleur à ce niveau et au fait que la vitesse de déplacement de la source d'énergie de soudage est supérieure à celle avec laquelle s'opère le transfert de chaleur dans le métal.

Les isothermes s'étalent dans les deux directions (x, y) lors du déplacement de la source. Leur élargissement est dû au transfert de chaleur par conduction.



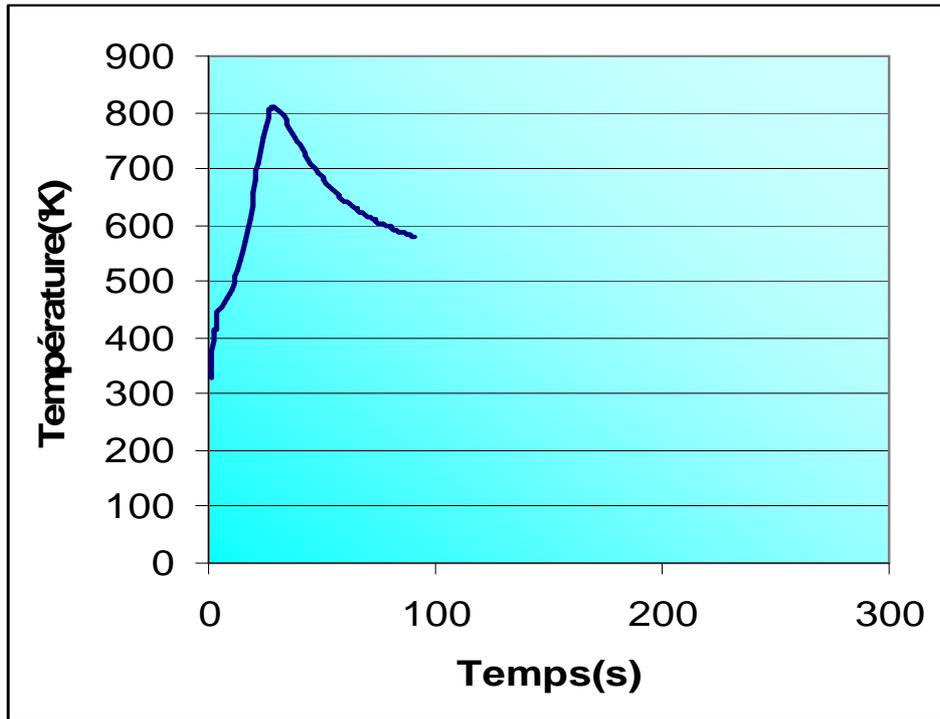
Point 1 (4,19)



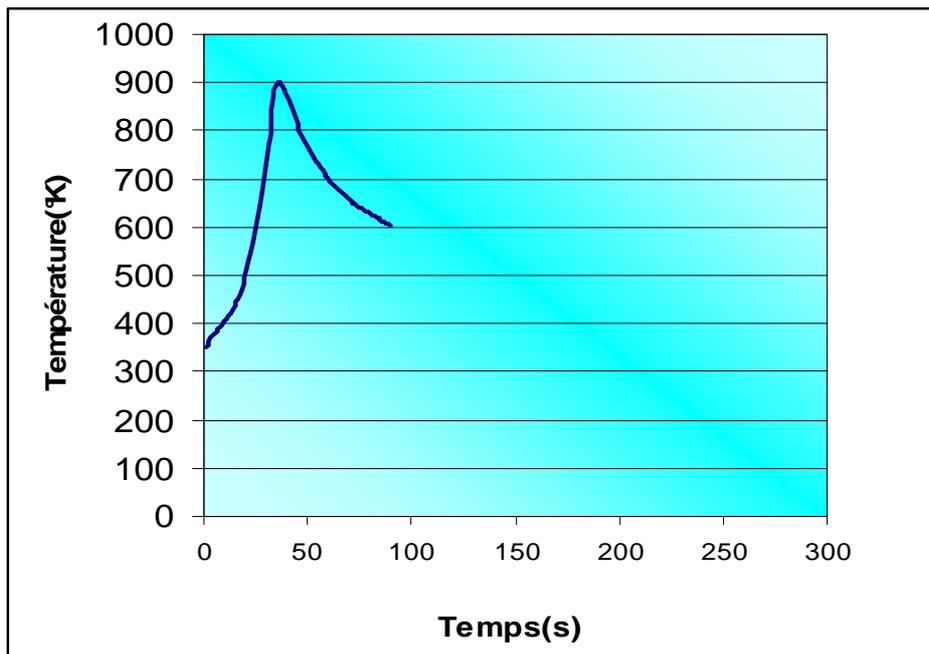
Point 2 (7,38)

Fig. 5.1 Variation de la température des points proches du cordon en fonction de temps. (Résultat obtenue numériquement (tube en inox)).



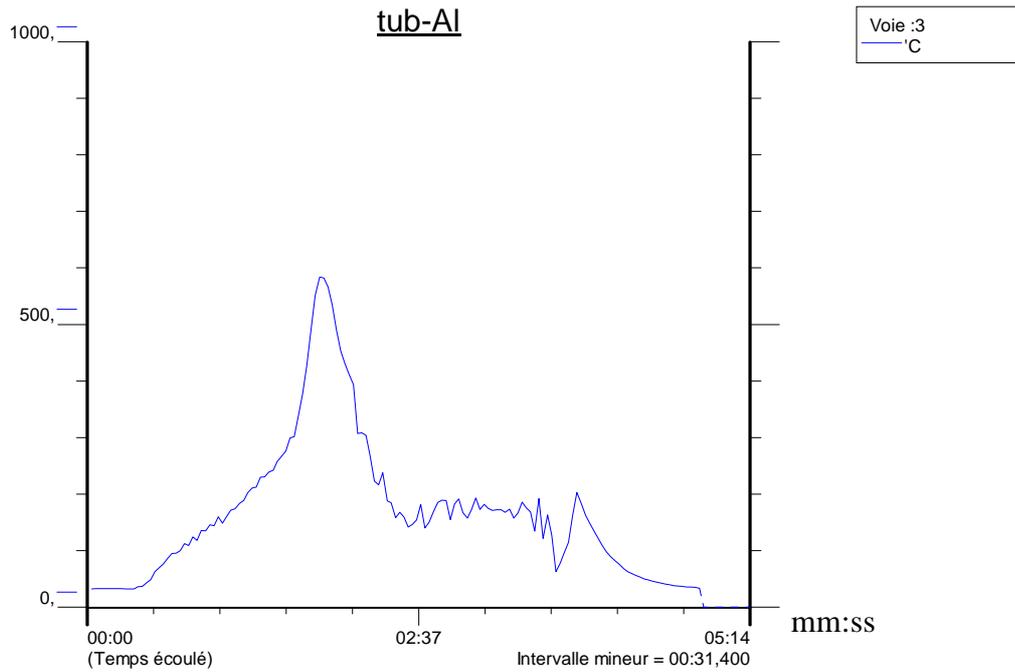


Point 1 (3,22)

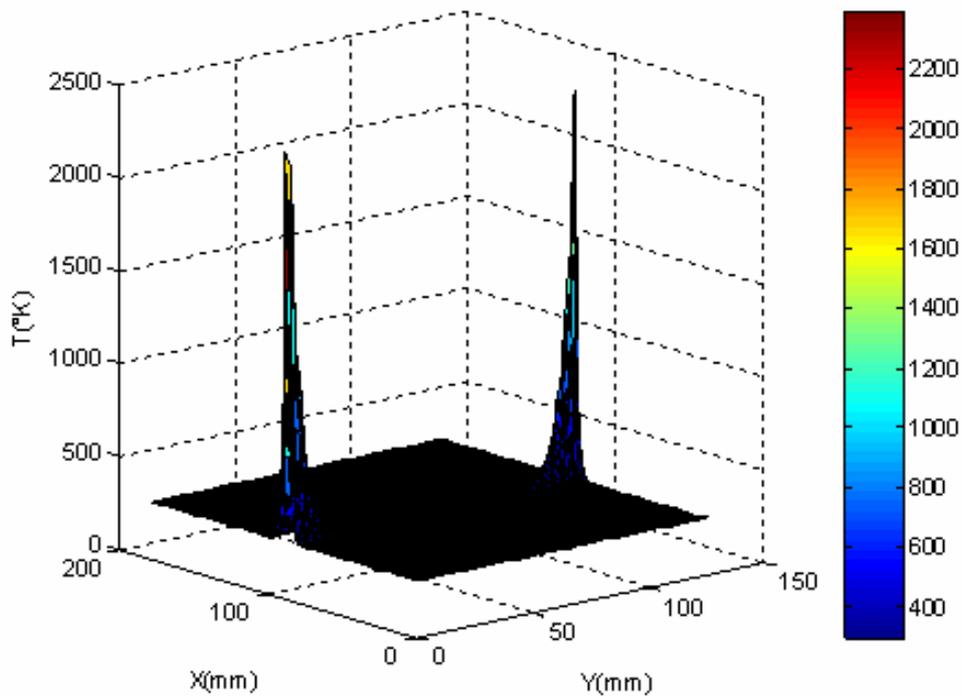


Point 2 (4,36)

Fig. 5.3 Variation de température des points proches de cordon en fonction de temps. (Résultat obtenue numériquement ( tube en aluminium)).

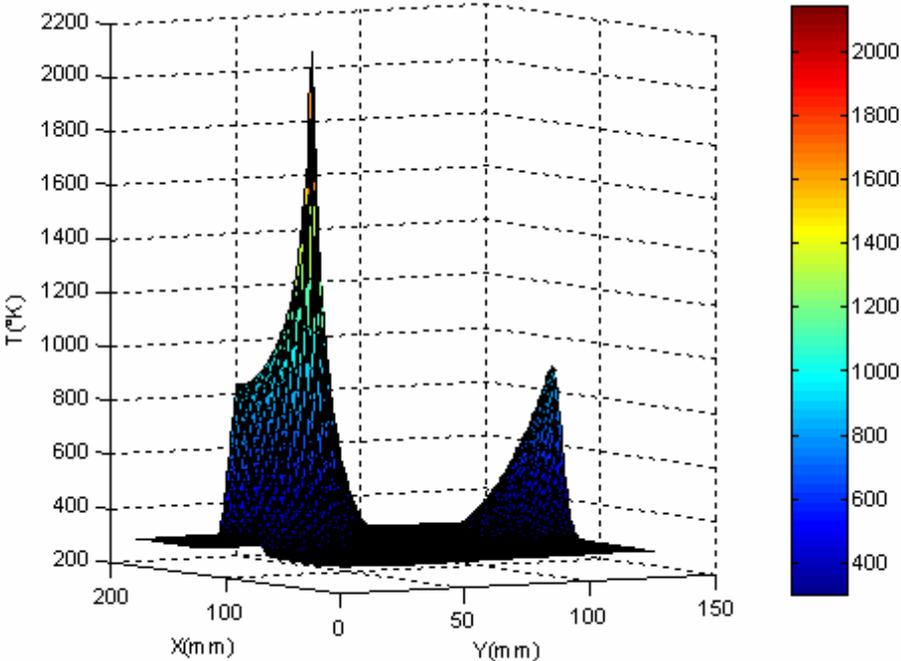


**Fig. 5.4** Variation de température en °C du point 2 en fonction de temps. (Résultat obtenue expérimentalement de tube d'aluminium).

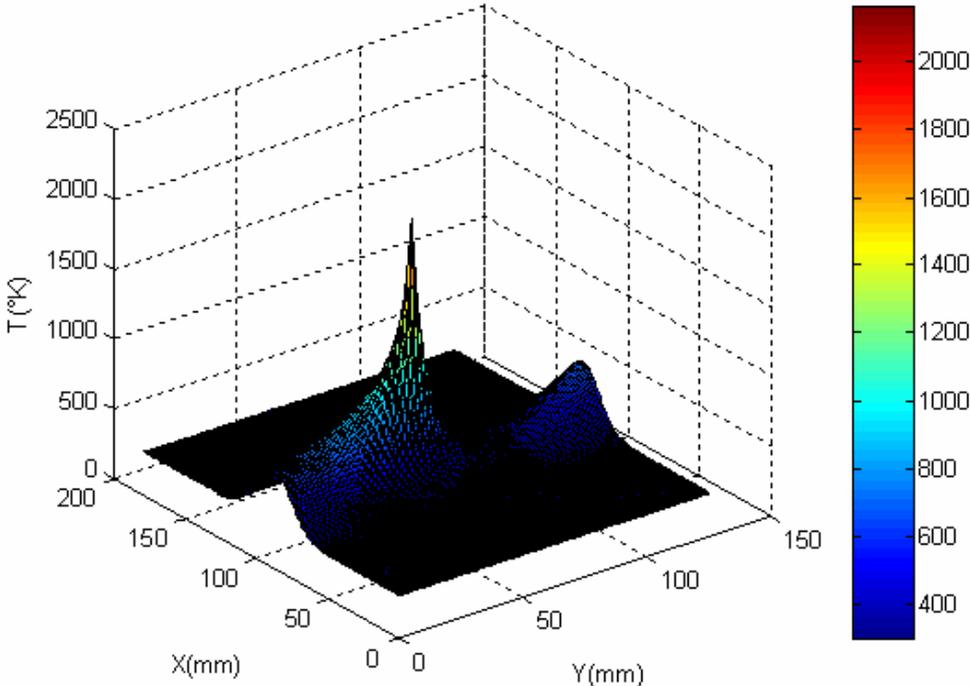


**Profile de température (t=2s) de l'inox 304L**

**Fig.5.5.a** Profil de température en (t=2s) de l'inox 304L

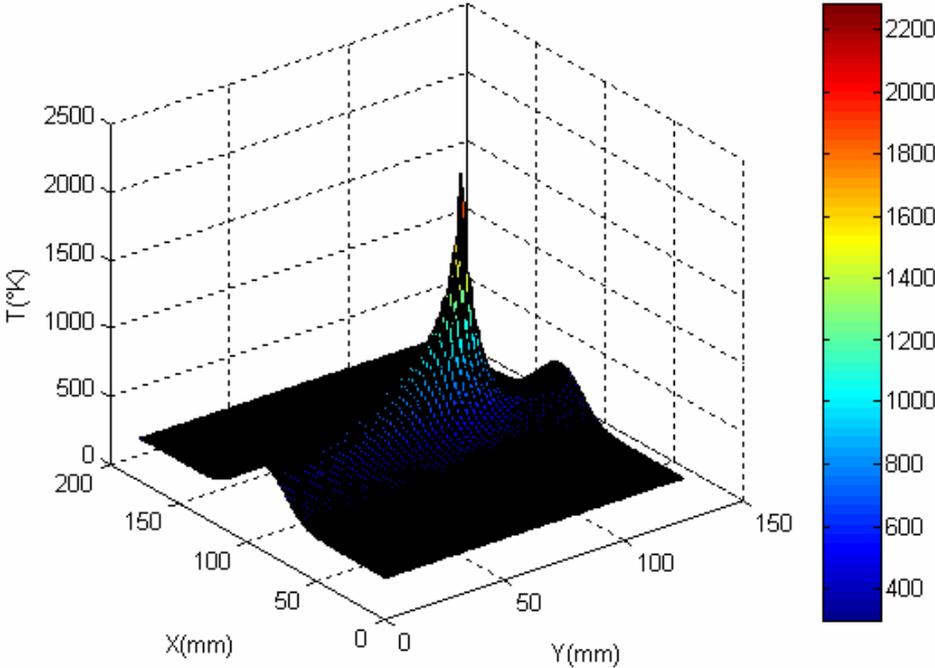


Profile de température (t=22s) de l'inox 304L

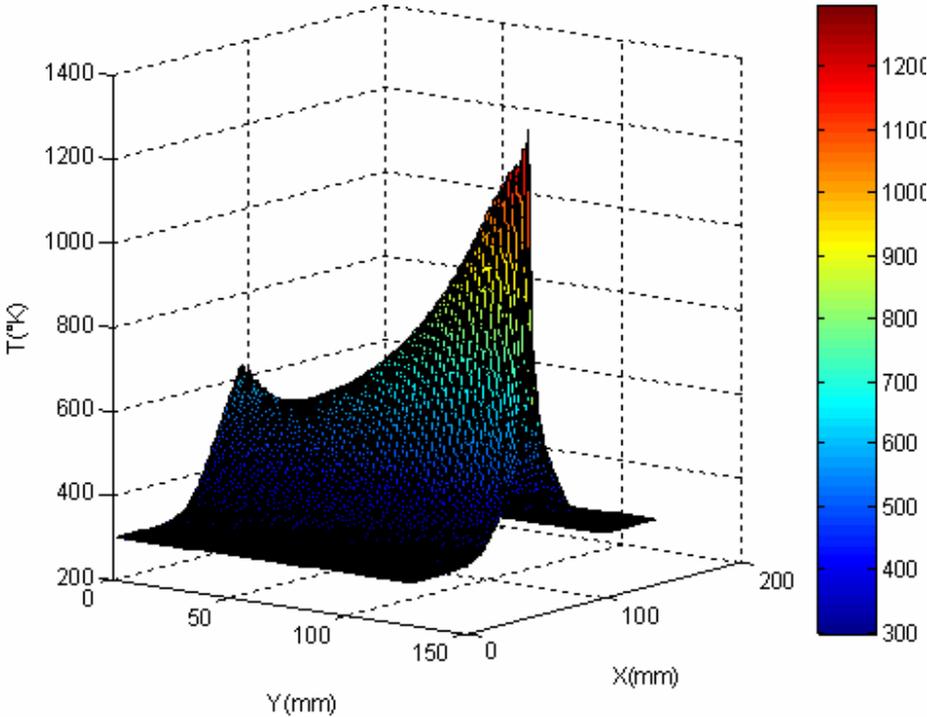


Profile de température (t=42s) de l'inox 304L

Fig.5.5.b Profil de température en (t=22s) et (t=42s) différents instants de l'inox 304L

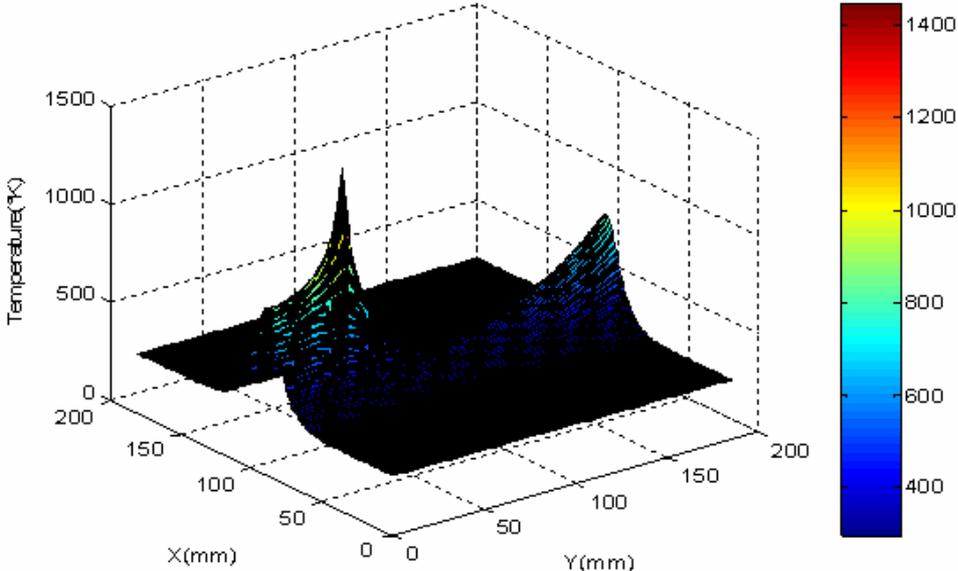


**Profile de température (t=62s) de l'inox 304L**

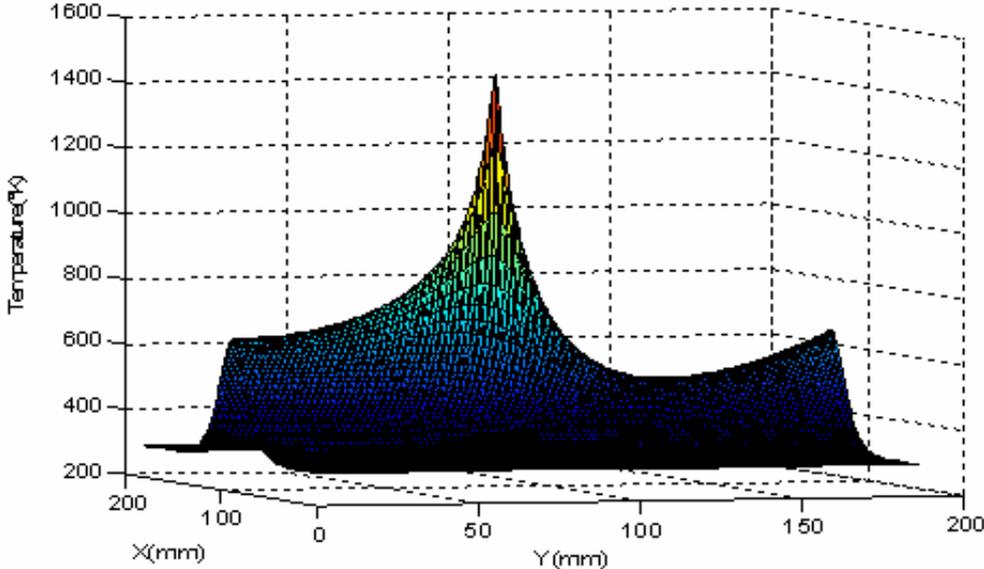


**Profile de température (t=92s) de l'inox 304L**

**Fig.5.5.c Profil de température en (t=92s) et (t=62s) de l'inox 304L**

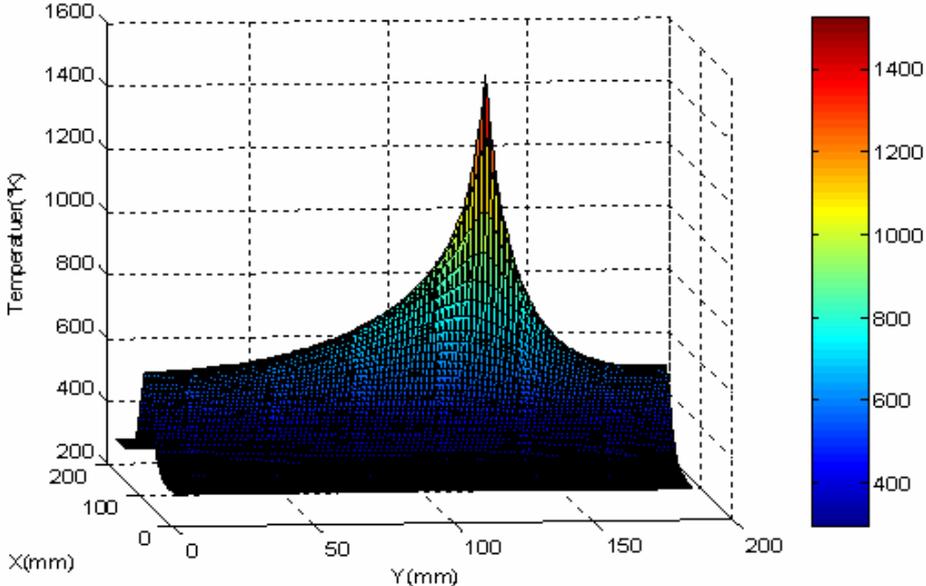


**Profile de température (t=40s) de l'aluminium.**

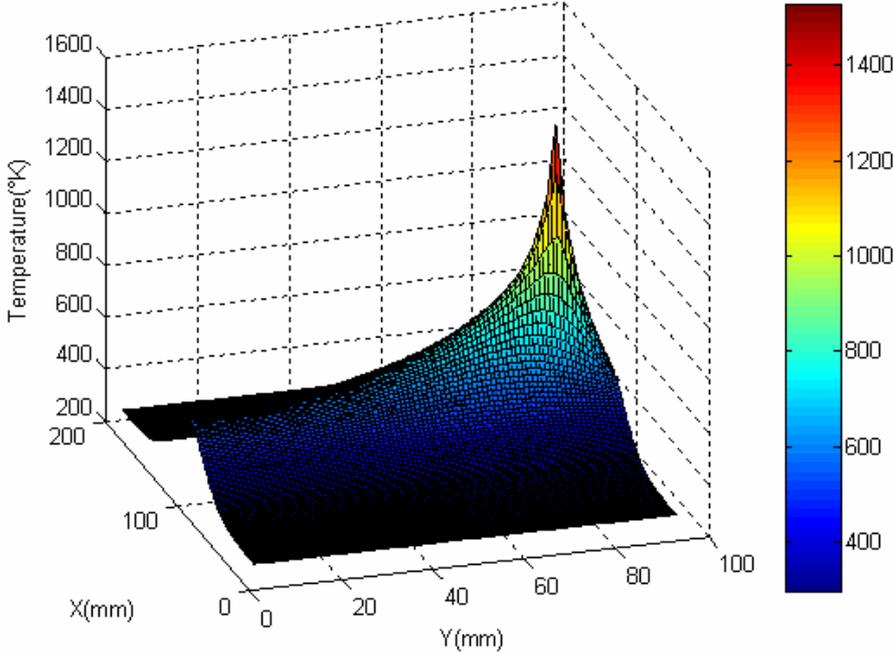


**Profile de température (t=80s) de l'aluminium.**

**Fig.5.6.a Profil de température en (t=40s) et (t=80s) de l'aluminium**

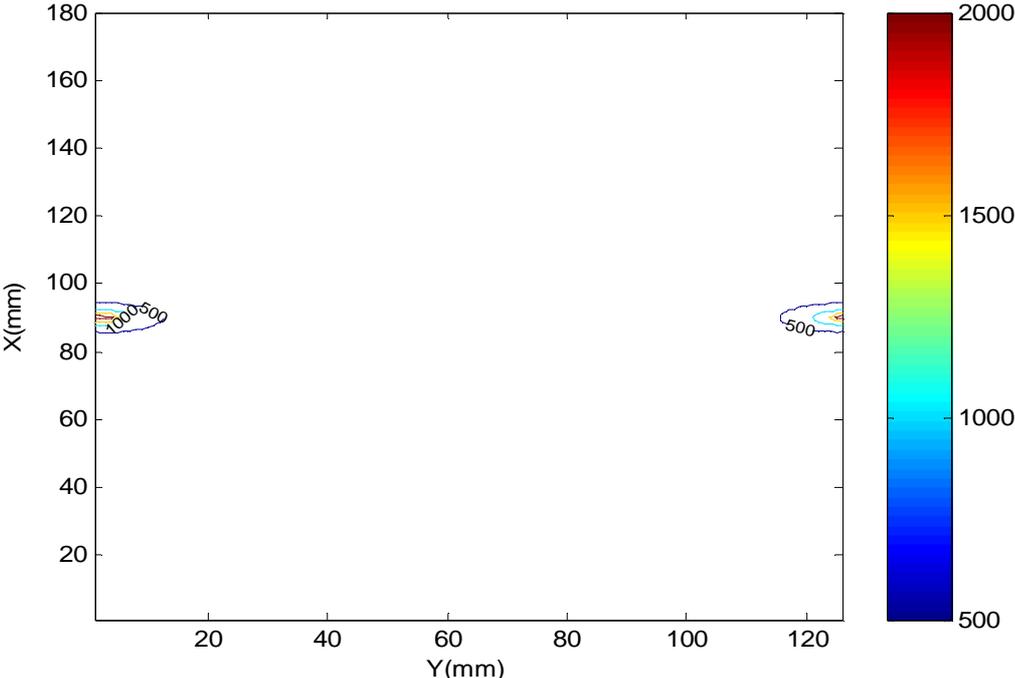


**Profile de température (t=120s) de l'aluminium.**

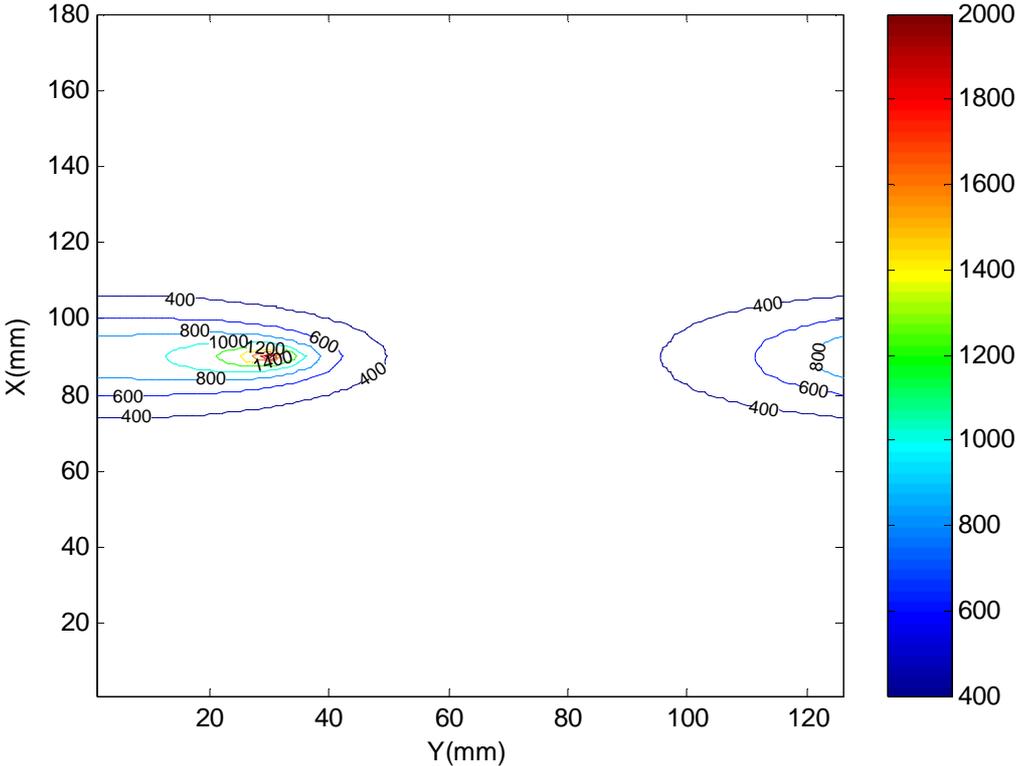


**Profile de température (t=160s) de l'aluminium.**

**Fig.5.6.b Profil de température en (t=120s) et (t=160s) de l'aluminium.**

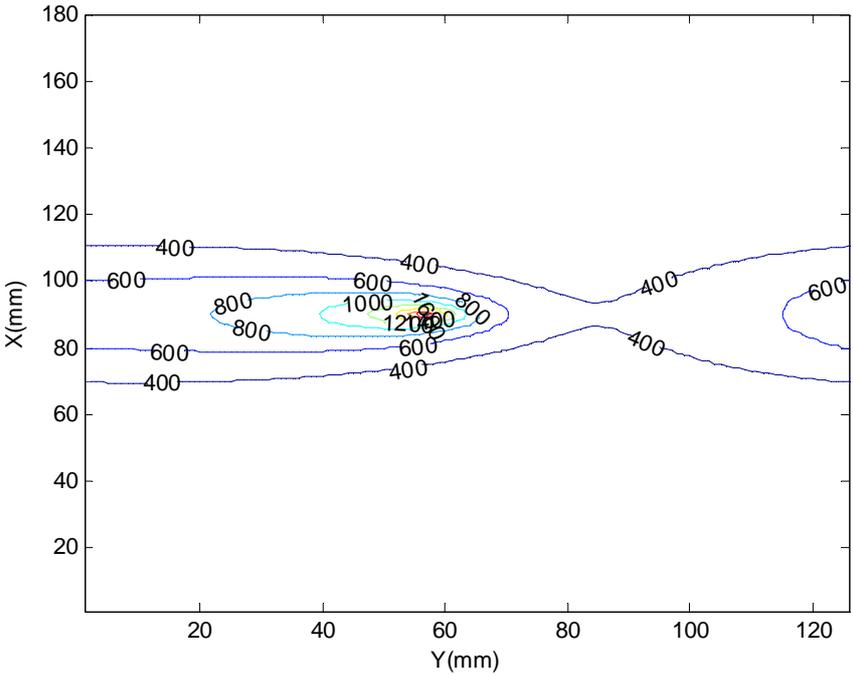


Répartition de la température (t=2s) de l'inox 304L

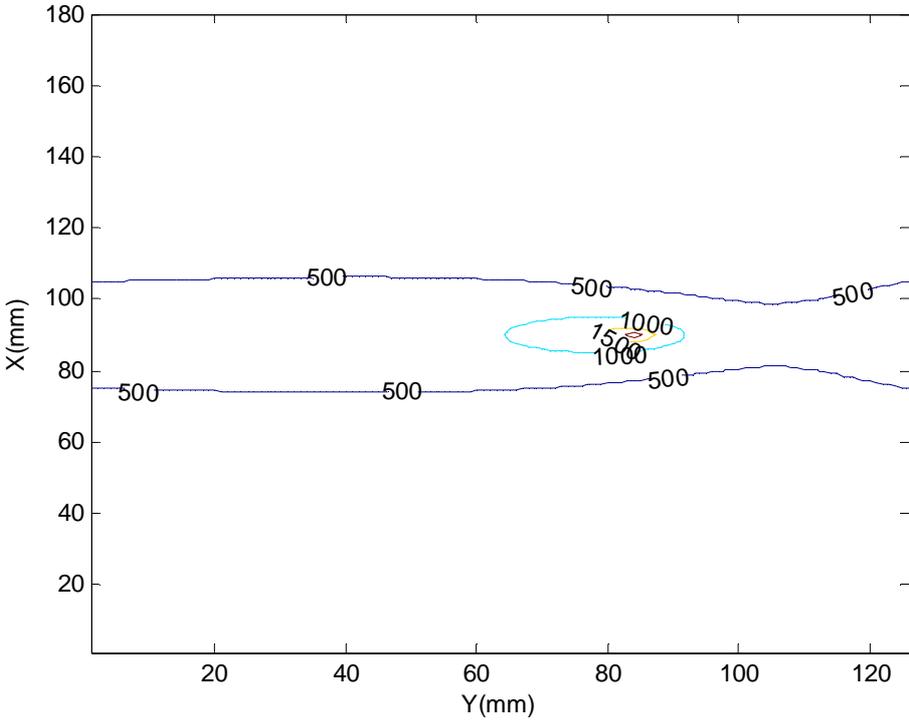


Répartition de la température à (t=22s) de l'inox 304L

Fig. 5.7.a: Répartition de la température en (t=2s) et (t=22s) pour les tubes d'inox.

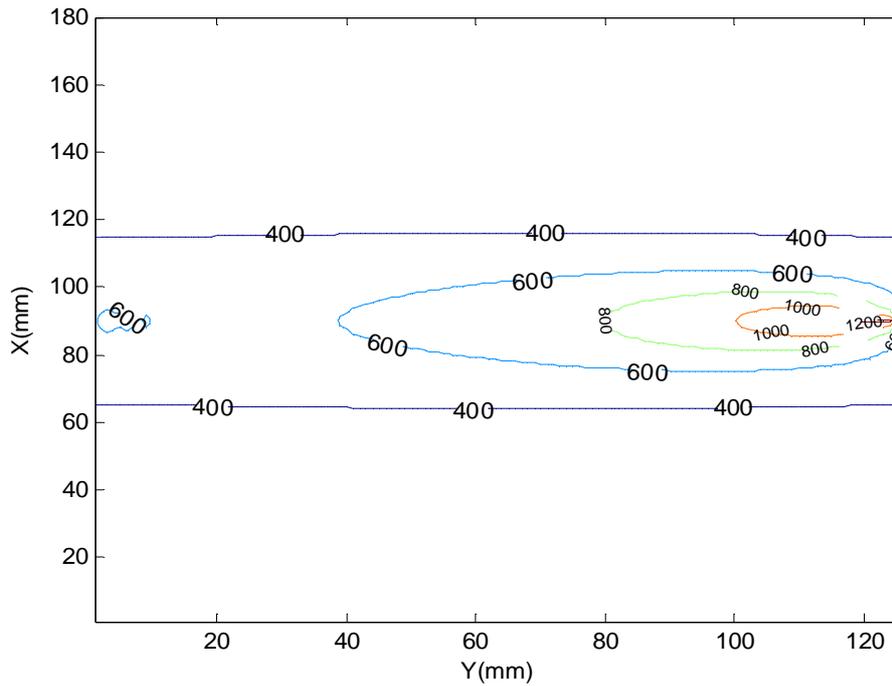


Répartition de la température (t=42s) de l'inox 304L



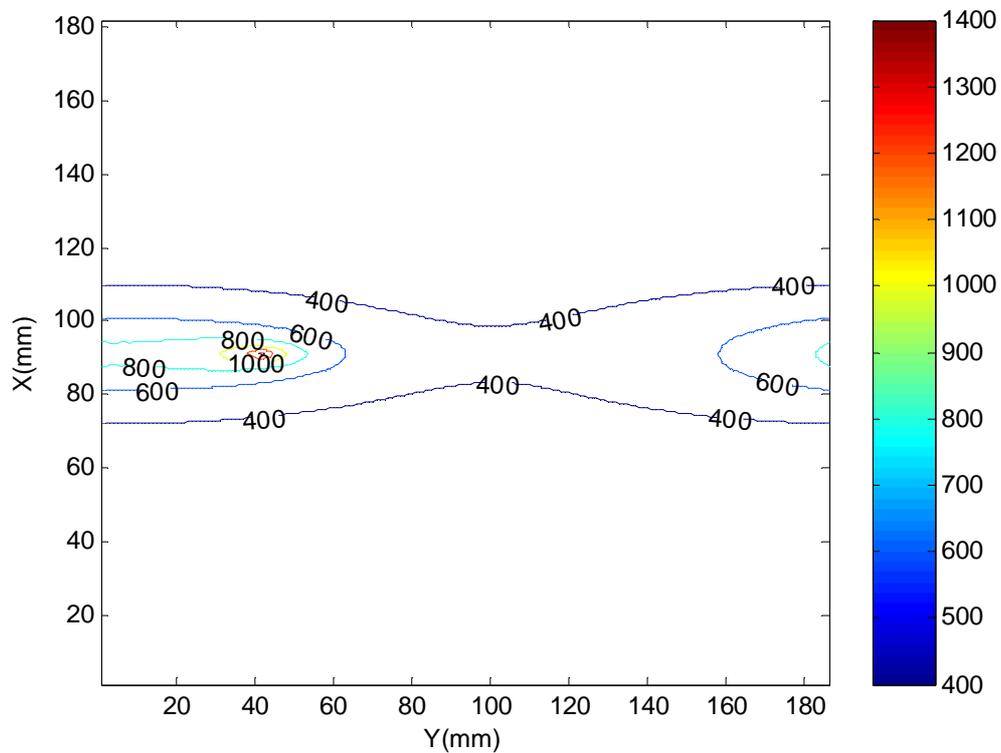
Répartition de la température (t=62s) de l'inox 304L

Fig. 5.7.b: Répartition de la température en (t=42s) et (t=62s) pour les tubes d'inox.



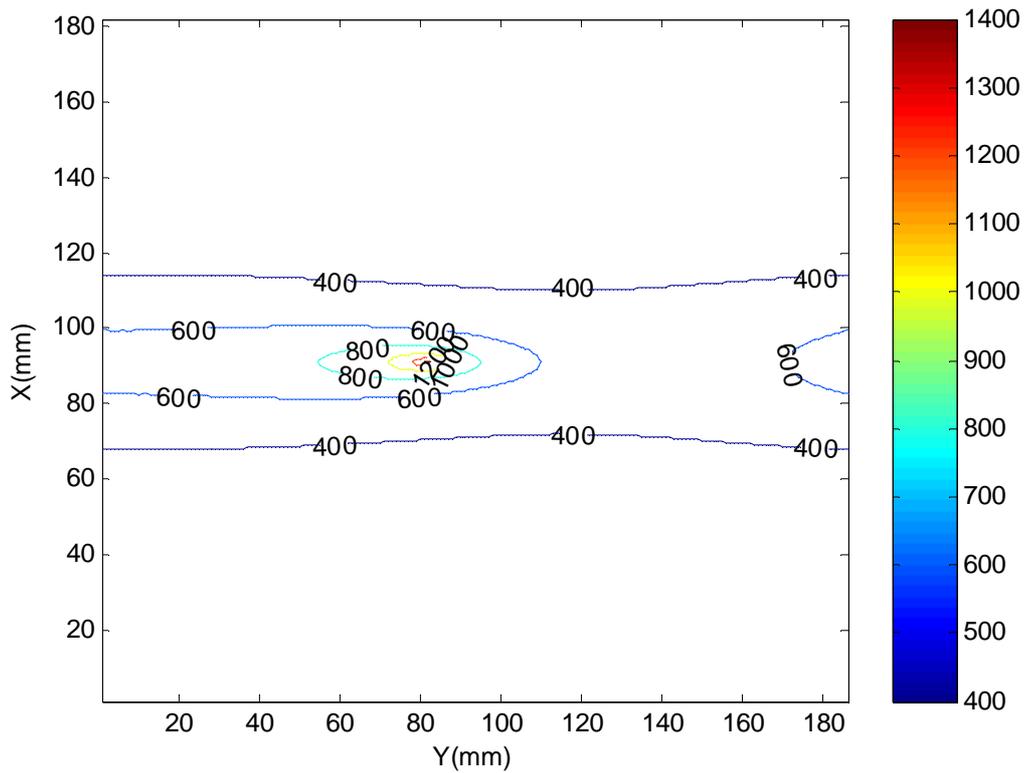
Répartition de la température ( $t=92s$ ) de l'inox 304L

Fig. 5.7.a: Répartition de la température en ( $t=92s$ ) pour les tubes d'inox.

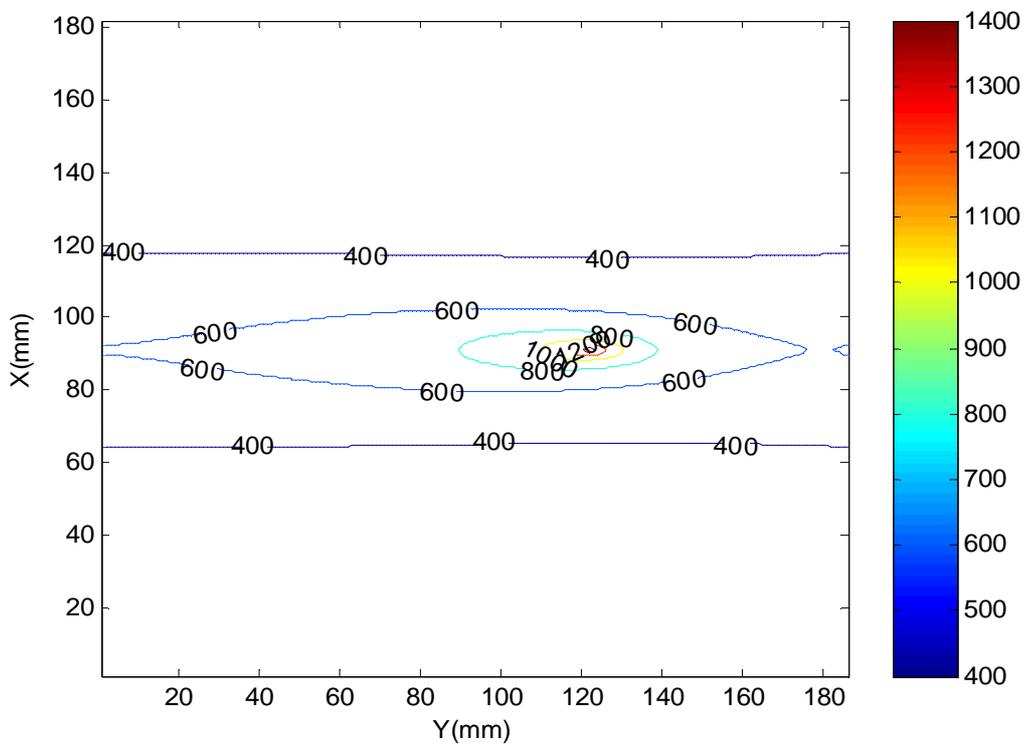


Répartition de la température à ( $t=40s$ ) de l'aluminium

Fig. 5.8.a: Répartition de la température en ( $t=40s$ ) pour les tubes d'aluminium.

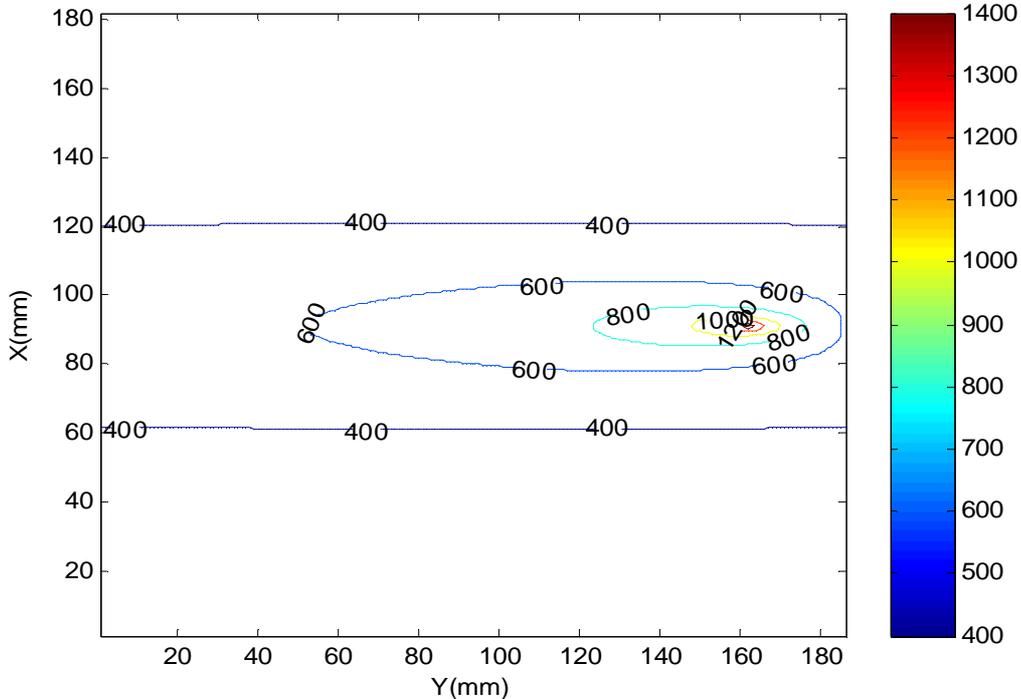


Répartition de la température à ( $t=80s$ ) de l'aluminium



Répartition de la température à ( $t=120s$ ) de l'aluminium

Fig. 5.8.b: Répartition de la température en ( $t=80s$ ) et ( $t=120s$ ) pour les tubes d'aluminium.

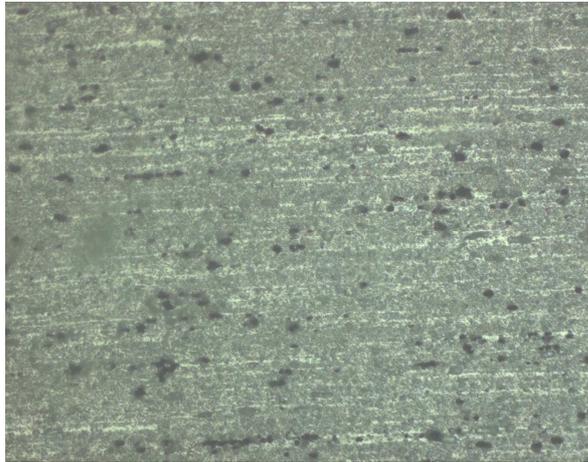


Répartition de la température à (t=160s) de l'aluminium

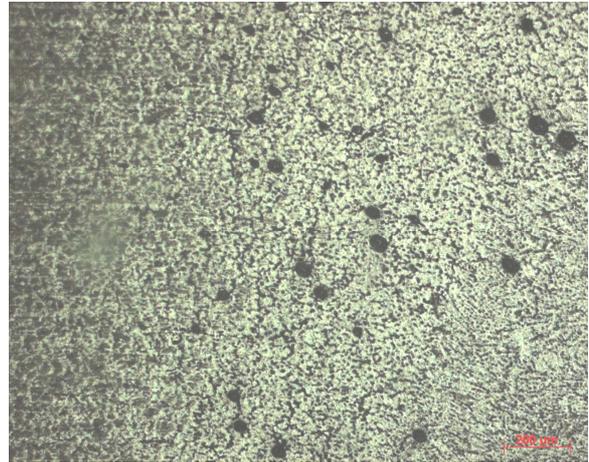
Fig. 5.8.c : Répartition de la température en (t=160s) pour les tubes d'aluminium.

### 5.3.2 Les résultats micrographiques :

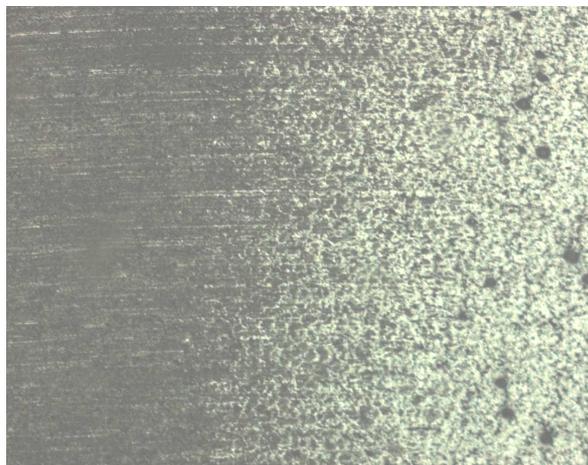
Les micrographies obtenues nous ont permis au moyen d'une agrandissement pré-établie sur chaque photo de relever la dimension de la zone affectée thermiquement et ce en exploitant le contraste existant entre les différentes régions.



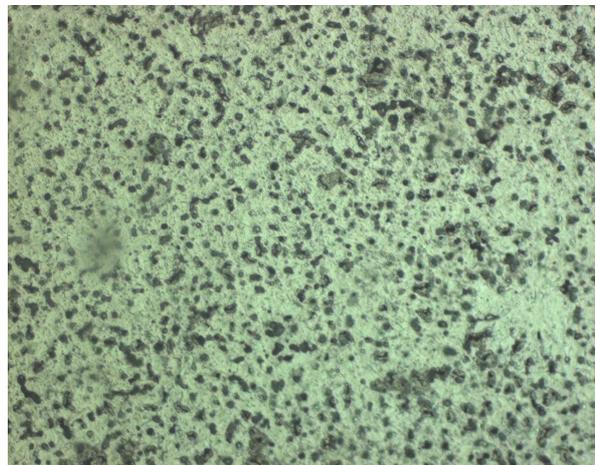
**Vue micrographique de Métal de base  
X200**



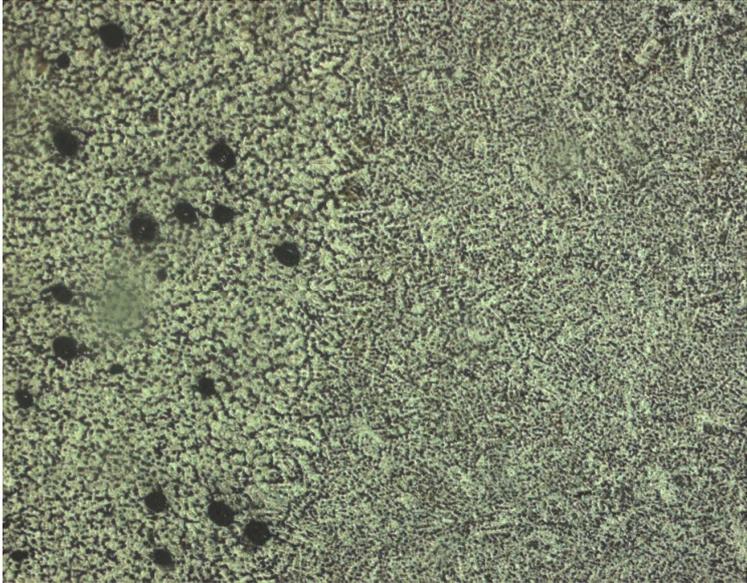
**Vue micrographique de La ZAT  
X200**



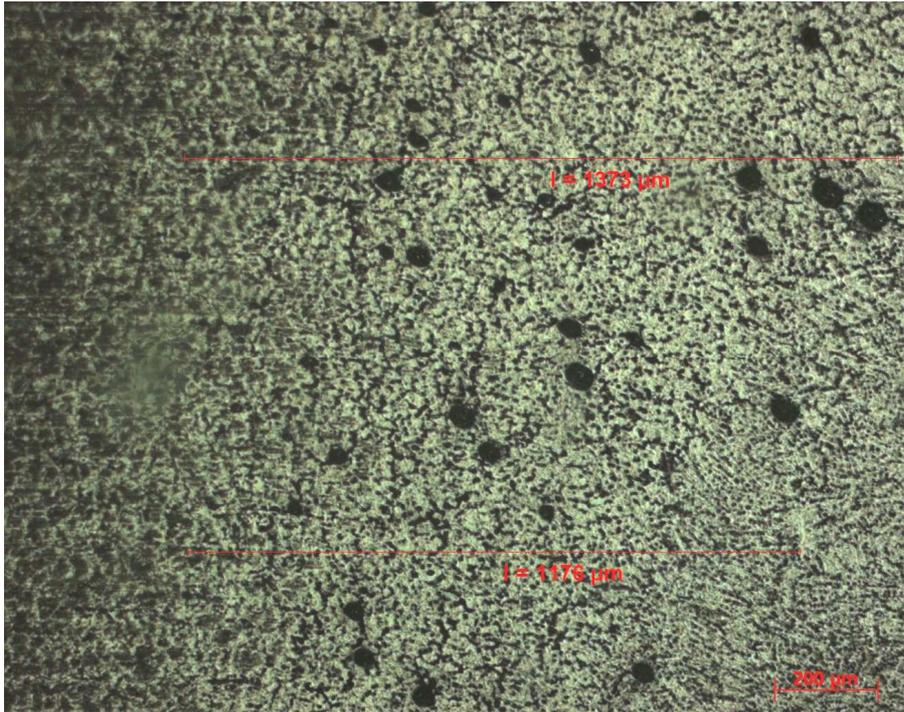
**Vue micrographique de la ZAT +MB  
X200**



**Vue micrographique de la ZAT  
X50**

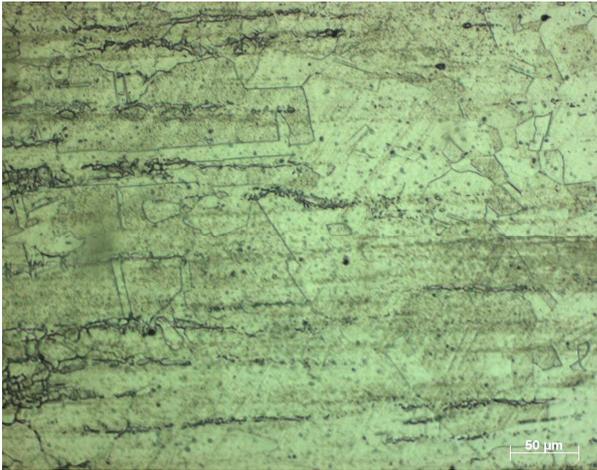


**Vue micrographique de la ZF + la ZAT  
X200**

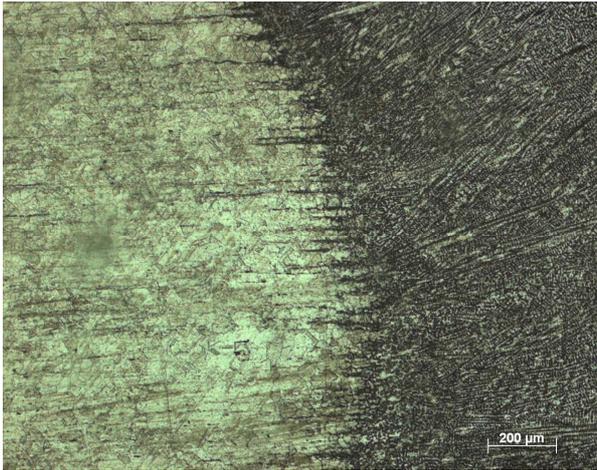


**La dimension de ZAT**

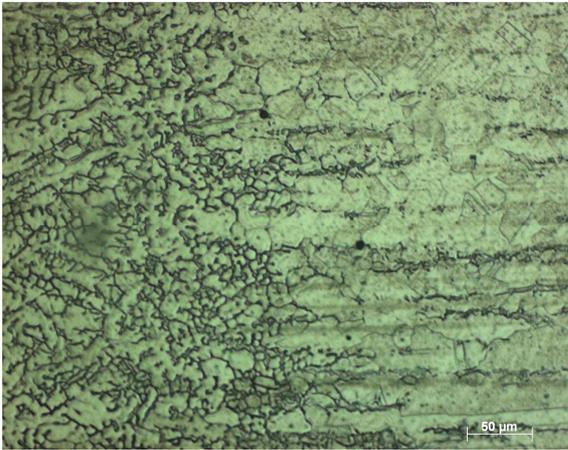
**Fig. 5.9 Micrographie de l'alliage d'aluminium**



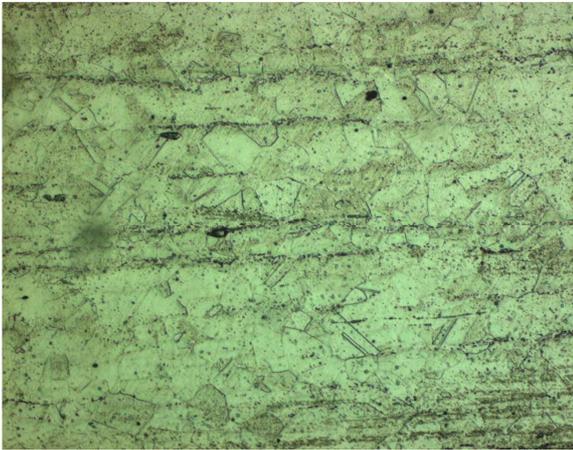
**Vue micrographique de Métal de base  
X50**



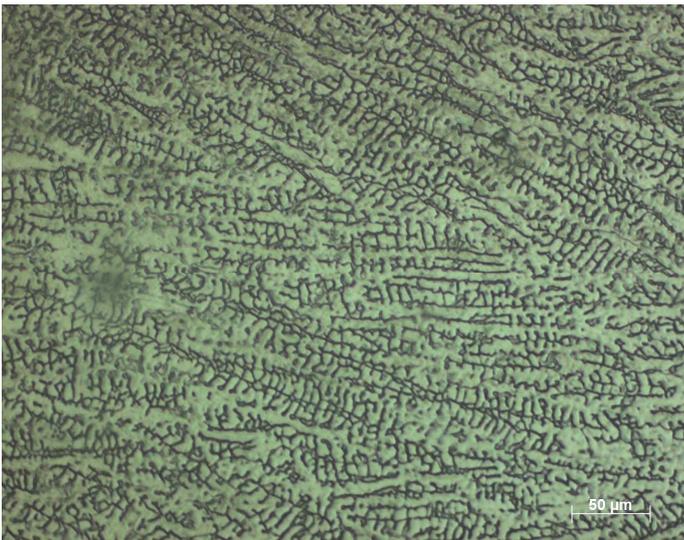
**Vue micrographique de cordon  
X200**



**Vue micrographique de cordon  
X50**



**Vue micrographique de la ZAT  
X50**



**Vue micrographique de la ZF  
X50**

**Fig.5.10 Micrographie de l'acier inoxydable 304L**

5.3.3 Les essais de traction

a) Eprouvette n°1 de tube d'aluminium vitesse:12.8mm/s

- Position de rupture : cordon de soudure.
- Grandeurs mesurées et calculées:

Position de la rupture	Module de Young E (Mpa)	Fm [KN]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	So [mm <sup>2</sup> ]	a (ep) [mm]	b (larg) [mm]
<b>Cordon de soudure</b>	886.6	12.198	66.5	224.7	54.28	2.95	18.40

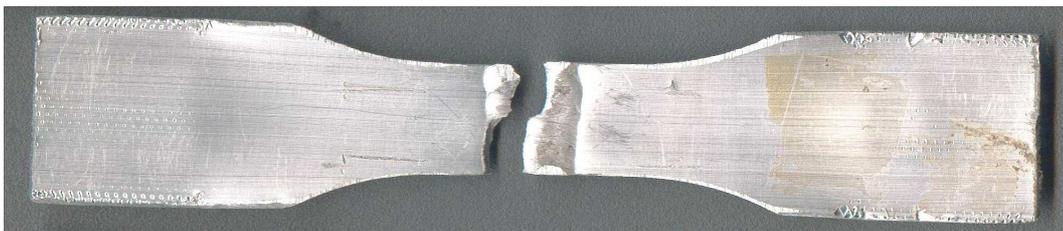


Fig. 5.11 L'éprouvette d'aluminium après essai de traction

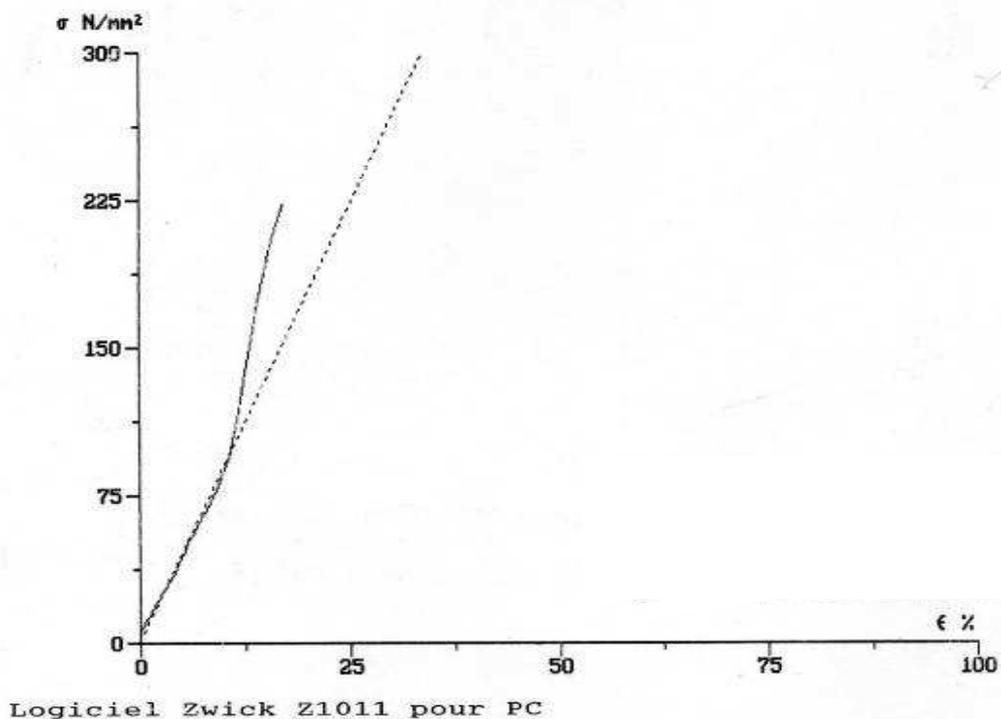


Fig. 5.12 Courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé à V1=12.8mm/s d'une éprouvette d'aluminium.

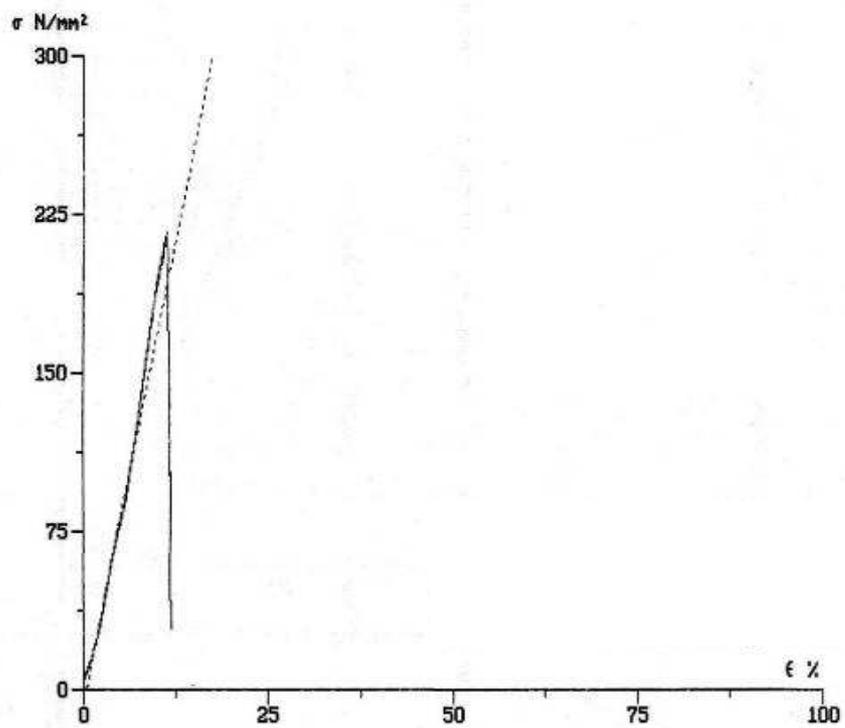
b) Epreuve n°2 de tube d'aluminium vitesse :12.8mm/min

- Position de rupture : Zone de liaison.
- Grandeurs mesurées et calculées:

Position de la rupture	Module de Young E (Mpa)	Fm [KN]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	So [mm <sup>2</sup> ]	a (ep) [mm]	b (larg) [mm]
<b>Cordon de soudure</b>	1766.9	12.169	88.4	216.0	54.35	2.95	19.10



Fig. 5.13 L'éprouvette d'aluminium après essai de traction



Logiciel Zwick Z1011 pour PC

Fig. 5.14 Courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé à V2=12.8mm/min d'une éprouvette d'aluminium.

c) Epreuve n°1 de tube d'inox

- Position de rupture : Zone de liaison.
- Grandeurs mesurées et calculées:

Position de la rupture	Module de Young E (Mpa)	Fm [KN]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	a (ep) [mm]	b (larg) [mm]
<b>Cordon de soudure</b>	4752.2	8.057	265.2	373.2	21.59	1.70	12.70



Fig. 5.15 L'éprouvette d'inox après essai de traction

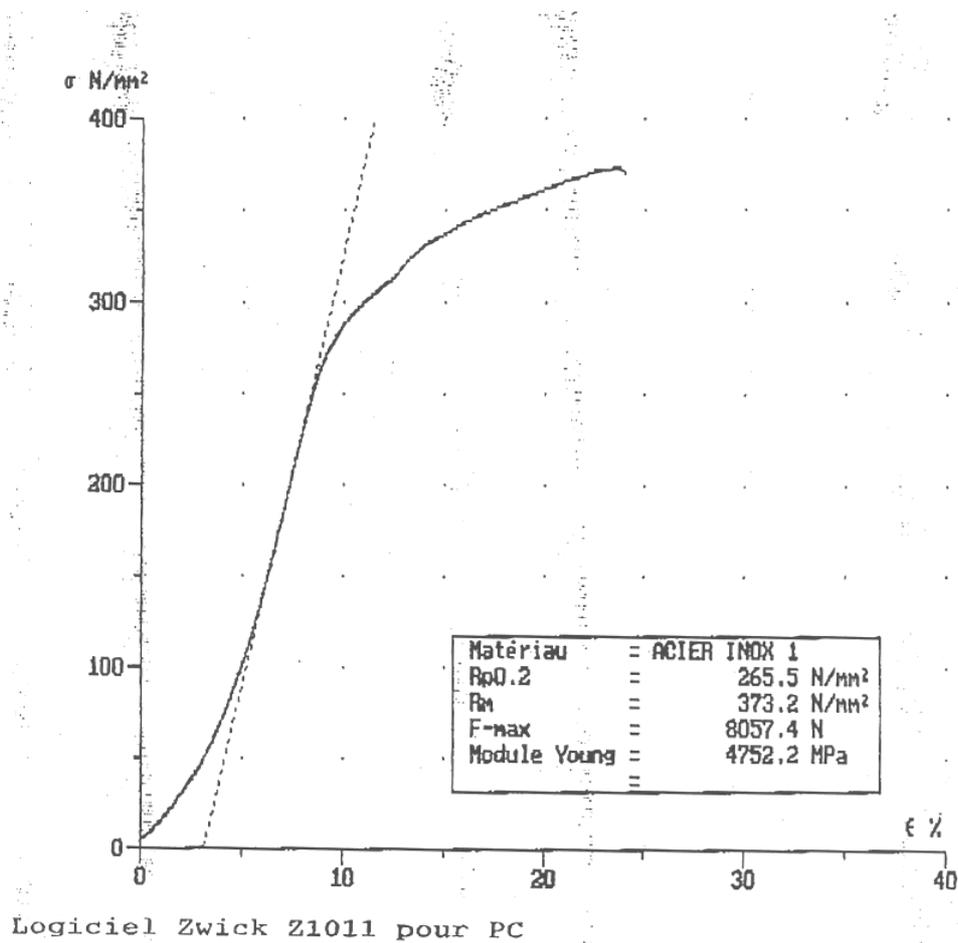


Fig. 5.16 Courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé d'inox 304L.

d) Eprouvette n°2 de tube d'inox

- Position de rupture : Zone de liaison.
- Grandeurs mesurées et calculées:

Position de la rupture	Module de Young E (Mpa)	Fm [KN]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	So [mm <sup>2</sup> ]	a (ep) [mm]	b (larg) [mm]
<b>Cordon de soudure</b>	3390.7	8.739	252.6	411.3	21.25	1.70	12.70



Fig. 5.17 L'éprouvette d'inox après essai de traction

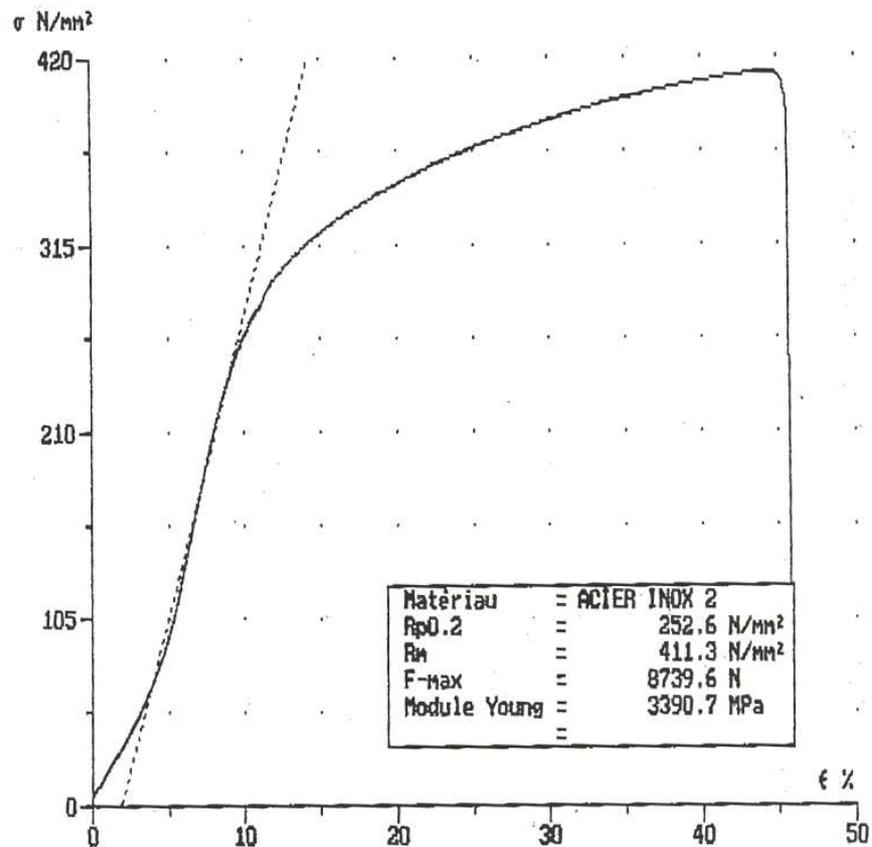


Fig. 5.18 Courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé d'inox 304L.

Les figures (5.9 et 5.10) représentent les différentes zones de la pièce, nous voyons bien l'inhomogénéité de la zone du cordon, nous distinguons trois zones différentes, le métal de base qui garde la structure initiale, la ZAT et la zone fondue.

La dimension de la ZAT pour l'alliage d'aluminium se situe entre  $1373\mu\text{m}$  et  $1176\mu\text{m}$ .

Les figures (5.11 à 18) représentent les Courbes de traction (contraintes-déformations) correspondant aux essais effectués sur des éprouvettes des éprouvettes prélevées des tubes soudés à cette effet. Elles nous permettent de déterminer la limite d'élasticité et la résistance à la traction et le module de Young.

La contrainte maximale  $R_m$  de la soudure en alliage d'aluminium 5056 est 224 Mpa, alors qu'elle devrait avoisiner les 290 Mpa que prévoit la norme définissant cet alliage. L'écart important est dû à la présence de défaut (manque de fusion) au sein du cordon de soudage, qui provoque une réduction de la section droite de l'éprouvette et constitue par conséquent la section faible de celle-ci. Si on procède à la correction de la valeur de la section, la valeur de  $R_m$  expérimentale se verrait augmentes de manière significative. Et en est évidemment de même pour la limite d'élasticité

Pour l'inox 304L  $R_m$  avant le soudage est de 485 Mpa et après soudage  $R_m$  égal à 411 Mpa.

Pour  $R_{p0.2}$ , avant soudage est de lors 220 Mpa et après soudage est de 256.2 Mpa.

Le 304L présent, quant à lui, une  $R_m$  plus faible que celle prévue par la norme ASTM et une  $R_{0.2}$  plus élevée. Ceci est dû aux changements microstructuraux induits par l'opération de soudage qui se sont traduits par des changements des caractéristiques mécaniques.

# CONCLUSIONS GENERALES

## **Conclusions générales**

L'objectif de notre étude est de simuler le transfert de chaleur lors de l'opération de soudage avec le procédé TIG pour des tubes de faibles épaisseurs, et la caractérisation mécanique et métallographique après soudage.

La formulation mathématique du problème, nous a donné des équations différentielles aux dérivées partielles assez complexes. Pour la résoudre nous avons utilisé une méthode numérique la méthode des volumes finis, on a développé un programme utilisant le Matlab. Les résultats obtenus ont été interprétés et confrontés à d'autres travaux.

- La distribution de la température pour l'aluminium est plus rapide sur la pièce que celle de l'inox.
- Les résultats obtenus numériquement sont relativement proches des résultats expérimentaux.
- La simulation de la source gaussienne est proche du cas réel (pratique). D'après les travaux faisant foi.

Pour les essais mécaniques nous avons pu tirer les conclusions suivantes.

- Les propriétés mécaniques de l'inox ne varient pas beaucoup.
- La ZAT pour les matériaux étudiés et soudés au procédé TIG possède des dimensions réduites. Cela signifie que le soudage TIG est de qualité.
- Le procédé TIG est un excellent procédé qui donne de meilleures qualités de la soudure.

Enfin, nous notons que ce travail reste ouvert et à enrichir. Pour cela nous proposons comme suite à ce travail :

- Le choix d'un maillage fin et irrégulier qui se déplace avec la source de chaleur.
- Traitement du problème tridimensionnel.
- Traitement du problème avec un métal d'apport.

# BIBLIOGRAPHIE

1. **PERRY Nicolas** «Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables» Thèse de doctorat le 15 Juin 2000 à l'Ecole Centrale de NANTES.
2. **Jean-Luclet** Erwan Champroux «Soudage coupage pour l'industrie» SAF/TECHNO-NATHAN, France 1985.
3. **Roger Legouic**«Précis de soudage , brasage et techniques connexes» Troisième édition, nouveau tirage, édition EYROLLES, 1982 Paris.
4. - **Lionel DEPRADEUX** «Simulation numérique du soudage\_Acier 316L, validation sur cas tests complexité croissante» Thèse de doctorat, le 1<sup>er</sup> Mars 2004 , à l'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCE APPLIQUEES DE LYON .
5. **J-F Lancaster** «THE physics of welding» International institute of welding, pergaman international library of science, technology engineering and social study, August 1983.
6. **F.Kreith** «Transmission de la chaleur et thermodynamique» Masson et Cie, Paris 1967.
7. **R.Varisillaz** «Soudage, élément de conception et de réalisation » édition dunond.
8. [http://www.efunda.com/materials/elements/TC\\_Table.cfm?Element\\_ID=A1](http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=A1)
9. Computational Modeling of Stationary Gas-Tungsten-Arc welds Pools and comparaison to Stainless Steel 304 Experimental Results.
10. **S.V Patankar** «Computation of conduction and duct flow heat transfer» Publier par: Innovation Reasearch, USA 1991.
11. **Claudui**.«Méthode des volumes finis appliquée aux problèmes de conduction thermique.Chapitre4».