

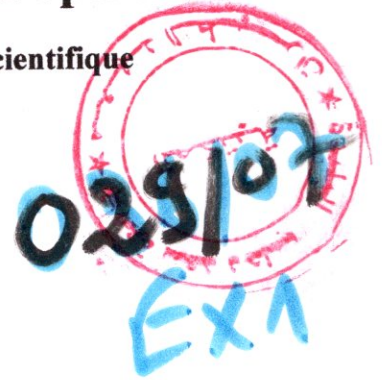
# République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Université SAAD DAHLEB De Blida

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'Aéronautique



## PROJET DE FIN D'ÉTUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME D'INGENIEUR  
D'ÉTAT EN AÉRONAUTIQUE

**Spécialité : Construction Aéronautique**

**Option : Structure**

## THÈME

SIMULATION NUMERIQUE DU SOUDAGE TIG PAR

LA METHODE VOLUMES FINIS

APPLICATION POUR DIFFERENTES FORMES DE CORDONS

**Travail Réalisé Par :**

- CHEKROUN Nabil.
- MIMOUNI Oussama.

**Encadré par :**

**Mr. NECHE Ahmed.**

## Résumé

Cette étude numérique apporte une réelle contribution dans la modélisation du phénomène du soudage de l'aluminium, pour l'étude du comportement thermique d'un joint de soudure, obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique TIG (Tungsten-Inert-Gas). Le modèle qui simule la source d'énergie de soudage, utilise une distribution surfacique Gaussienne du flux de chaleur provenant de l'arc électrique. La forme de cette source est supposée de forme bi-elliptique pour notre cas, dans cette optique nous allons procéder à l'évaluation de la distribution des champs thermiques à chaque instant, afin de déterminer avec précision les zones à risque, et l'effet du maillage sur ces dernières. Cela va nous permettre ainsi d'aboutir par la suite, aux problèmes de contraintes résiduelles et déformations générées dans l'assemblage soudé. L'équation de chaleur régissant le problème est discrétisée par la méthode des volumes finis. Les calculs sont effectués en considérant que les propriétés physiques et thermiques ainsi que les conditions aux limites de conduction thermique dépendent de la température. Pour définir la précision du modèle, une comparaison avec plusieurs types de maillage a été effectuée, les résultats obtenus peuvent être confrontés ultérieurement à des résultats expérimentaux.

## Abstract

This numerical study contributes a real share in the modeling of the phenomenon of the welding of aluminum, for the study of the thermal behavior of a joint of welding, obtained by the method of arc welding TIG (Tungsten-Inert-Gas). The model which simulates the source of energy of welding uses a surface distribution Gaussienne of the heat transfer rate coming from the electric arc. The form of this source is supposed of Bi-elliptic form for our case, accordingly we will carry out the evaluation of the distribution of the thermal fields at every moment, in order to determine with precision the areas at the risk, and the effect of the mesh on these last. That will thus enable us to succeed thereafter, with the problems of residual stresses and deformations generated in the welded joint. The equation of heat governing the problem is discretized by the method of finished volumes. Calculations are carried out by considering that the physical properties and thermal as well as the boundary conditions of thermal conduction depend on the temperature. To define the precision of the model, a comparison with several types of mesh was carried out; the results obtained can be confronted later on with experimental results.

# Remerciements

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre promoteur Mr NECHE Ahmed qui a su nous conseiller par ses critiques constructives et nous guider dans notre modeste travail*

*Nous remercierons également les membres du département d'Aéronautique qui nous ont assuré l'environnement adéquat afin de réaliser notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tout ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent travail.*

*Nos sentiments de profonde gratitude vont à nos professeurs qui tout au long des cinq années d'étude nous ont transmis leur savoir sans réserve.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous nos amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de la préparation de ce mémoire.*

*Le binôme OUSSAMA & NABIL*

A LA MEMOIRE DE NOTRE AMI HAMIDA TAYEB ...

# Dedicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents : ma  
mère, mon père pour leur amour,*

*encouragements, et sacrifices*

*A mes très cher frère et sœur,*

*A toute la famille CHEKROUN*

*A tout mes amis d'ORAN, Blida*

*Et du Bloc 02*

*A mon binôme OUSSAMA que j'apprécie*

*beaucoup ainsi qu'à toute sa famille*

*A toute la famille BEKKADJA*

*A mes très chers amis Rafik,mouh,said*

*A tous ceux et celles dont les noms ne sont*

*pas cités*

*NABIL.*

# Dedícaces

*Je dédie ce modeste travail à mes parents,  
mes sœurs, ma famille, mes amis  
Nabil, Rafik , Djebbar , toufik, mon promoteur  
et mes encadreur à tout ceux qui m'ont  
aidé de près ou de loin.*

*Je dédie ce travail aussi à tous les amis du  
Bloc02 et à tout ceux et celles qui m'ont  
connus et que j'ai connus.*

Oussama.

**Nomenclature des symboles:**

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

I : Intensité de courant [A]

U : Tension [V]

T : Température [C° ou K°]

V : Vitesse de déplacement de l'arc [m/s]

$\epsilon$  : Emissivité

L : Longueur d'arc [m]

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

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

$\Delta x$  : Longueur d'un volume de contrôle [m]

$\Delta y$  : Largeur d'un volume de contrôle [m]

X, Y : Variable indépendant [m]

$\Delta t$  : Pas temporel [Sec]

t : Temps [Sec]

C<sub>p</sub> : Chaleur massique à pression constante [J/kg K°]

K° : Conductivité thermique [W/m K°]

## Nomenclature des symboles.....

$E_n$  : Energie nominale [J/m]

$E_d$  : Energie dissipée dans le joint soudé [J/m]

$E_q$  : Energie équivalente [J/m]

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

$\sigma$  : Constante de Stephano-Boltzmann [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

$h$  : Coefficient de convection [W/m<sup>2</sup> K]

$\eta$  : Rendement [%]

$Pe$  : Nombre de Peclet

$S$  : Terme source dans les équations discrétisées

$S_c, S_p$  : Partie constante de la linéarisation du terme source

$E$  : Nœud Est

$e$  : Interface du volume de contrôle entre  $P$  et  $E$

$N$  : Nœud Nord

$n$  : Interface du volume de contrôle entre  $P$  et  $N$

$P$  : Central

$S$  : Nœud

$s$  : Interface du volume de contrôle entre  $P$  et  $S$

$W$  : Nœud West

$w$  : Interface du volume de contrôle entre  $P$  et  $W$



# SOMMAIRE

**RESUME**  
**REMERCIEMENTS**  
**LES DEDICACES**  
**NOMENCLATURE DES SYMBOLES**  
**INTRODUCTION :**

## **CHAPITRE I (MAITRISE DES PROCEDES DE SOUDAGE TIG)**

I. LE SOUDAGE	1
II. LE PROCEDE TIG	2
II.1 PRINCIPE DU SOUDAGE TIG	2
II.2 PROCEDES DU SOUDAGE	3
II.3-LES DIFFERENTS PROCEDES DU SOUDAGE	4
II.4- LE SOUDAGE A L'ARC	4
III. SOUDAGE TIG	5
III.1- LE TIG	5
III.2- CARACTERISTIQUES DE LA SOUDURE	6
III.3-FORMATION DU BAIN DE FUSION	7
III.4-AUTOMATISATION DU SOUDAGE TIG	8
IV. L'ARC ELECTRIQUE	9
V. GAZ DE SOUDAGE	10
V .1- L'ARGON	11
V .2- L'HELIUM	11
V .3- LES GAZ ACTIFS	12
VI-PROBLEMATIQUE	12
VI.1-ACTIF TIG	13
VII-METHODES ET CRITERES DE VALIDATION DES PARAMETRES D'ASSEMBLAGES CONTROLES NON DESTRUCTIFS (CND)	13
VII.1-CONTROLES VISUELS	13
VII.2- RESSUAGE	13
VII.3-RADIOGRAPHIE X	14
VIII-SYSTEME DE PROTECTION ET DE BRIDAGE	14
IX-MATERIAU AERONAUTIQUE LE PLUS UTILISE	15
ALUMINIUM	15

## **CHAPITRE II: (MODELISATION MATHEMATIQUE DU TRANSFERT THERMIQUE)**

I. MODELISATION THERMIQUE	17
II. BILAN D'ENERGIE	17
III. LES EVENTUELS CAS DE LA CONDUCTIVITE	19
IV. L'EQUATION QUI REGIT LE PHENOMENE DE LA CONDUCTION	21
V. HYPOTHESES PRINCIPALES	22
VI. LES CONDITIONS AUX LIMITES	22
VII. LA SOURCE DE CHALEUR	24

VII. 1- SOURCE DE CHALEUR PONCTUELLE	24
VII.2- SOURCE DE CHALEUR GAUSSIENNE	25
VII.3-SOURCE DE CHALEUR EN SEGMENTS DE LIGNES	25
VII.4- MODELISATION DU TERME SOURCE	27
VIII. PROPRIETES PHYSIQUE	28
IX. CONCLUSION	30
<b>CHAPITRE III: (METHODE NUMERIQUE DES VOLUMES FINIS)</b>	
INTRODUCTION	32
III.1- RAPPEL SUR LA METHODE DES VOLUMES FINIS	32
III.1-1 PRINCIPE	32
III.1-2 - CONDUCTION THERMIQUE IN STATIONNAIRE EN DEUX	
DIMENSIONS (2D)	33
III.1.2.a-FORME GENERALE DE L'EQUATION DISCRETISEE	33
III.1.3- CONDITIONS AUX LIMITES	38
III.3 -GENERATION DU MAILLAGE	41
III.4 – CONDUCTIVITE THERMIQUE VARIABLE	42
III.5-LES REGLES D'APPLICATION DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS	45
III.6- EXEMPLE ILLUSTRATIF DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS	46
<b>CHAPITRE IV : (ANALYSE ET RESOLUTION NUMERIQUE)</b>	
IV.INTRODUCTION	50
IV.1-LE CALCUL NUMERIQUE	51
IV.1-1-PRINCIPE	51
IV.1-2 AVANTAGES	52
IV.1-3 INCONVENIENTS	52
IV.2- LES COMPOSANTES D'UN LOGICIEL DE MODELISATION ET DE	
SIMULATION NUMERIQUE	52
IV.2-1- LE PREPROCESSEUR	52
IV.2-2- LE PROCESSEUR DE CALCUL	53
IV.2-3- LE POST PROCESSEUR	53
IV.3 METHODES DE RESOLUTION	54
IV.3-1- LES METHODES DE RESOLUTION DIRECTES	54
IV.3-2- LES METHODES ITERATIVES	54
IV.3-2-a- L'ALGORITHME T.D.M.A	54
IV.4- LE MAILLAGE	58
IV.5- PROCEDURE DE CALCUL	59
<b>CHAPITRE V (RESULTATS ET DISCUSSION)</b>	
A-CORDON RECTILIGNE	64
V.1 INTRODUCTION	64
V.1.1 DONNEES DU PROGRAMME	64
V.1.2 GENERATION DU MAILLAGE	64
V.1.3 RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE	65
V.2.DISCUTION DES RESULTATS	69

V.3.COMPARAISON DES CYCLES THERMIQUES	69
a-CYCLE THERMIQUE POUR LA ZONE AFFECTEE THERMIQUEMENT	70
b- CYCLE THERMIQUE POUR LA ZONE FONDUE	70
CONCLUSION	71
B-CORDON INCLINE	73
V.1.1 DONNEES DU PROGRAMME	73
V.1.2 GENERATION DU MAILLAGE	74
V.1.3 RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE	75
C-CORDON COURBE	
V.1.1 DONNEES DU PROGRAMME	77
V.1.2 GENERATION DU MAILLAGE	78
V.1.3 RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE	79
CONCLUSION GENERALE	80
LES ANNEXES	
LISTE DES FIGURES	
BIBLIOGRAPHIE	

# Introduction :

## **Introduction générale :**

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 soudés de bonne qualité, avec une très bonne reproductibilité.

L'expérience, pour les procédés de soudage à l'arc comme pour d'autres, permet d'avoir accès à un certain nombre de résultats indispensables à la mise en œuvre du procédé et en particulier à la tenue des soudures réalisées en fonction des paramètres de soudage utilisés. Toutefois, certaines conditions de soudage peuvent être coûteuses à mettre en place pour une simple expérience (par exemple, l'utilisation de paramètres sortant des gammes opératoires de la machine disponible, ou le test de géométries peu usuelles nécessitant la réalisation spécifique d'échantillons).

Dans cette optique, la simulation numérique telle que les méthodes (Volumes Finis, Eléments finis et différences finies) rendues possible par le développement de fortes puissances de calcul, est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes résultant du soudage.

De plus, la compréhension de la physique du procédé s'avère complexe, parce que des phénomènes mécaniques, électriques, thermiques et métallurgiques s'y trouvent fortement couplés.

A cet effet, la connaissance des sollicitations qui sont engendrées par l'opération de soudage, nous permet de déterminer les caractéristiques finales de cordon de soudure au point de vue métalliques et mécaniques. En conséquent, la première étape critique dans l'analyse précise de comportement physique de la soudure, est l'évaluation d'une carte thermiques qui détermine le champ de températures dans l'assemblage soudé, et de prédire ainsi les zones à risques à savoir la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) et cela en utilisant différent type de maillage.

L'objectif de ce travail est de qualifier la simulation numérique du procédé de soudage TIG des assemblages en aluminium par la méthode des volumes finis, et tout particulièrement de juger de l'aptitude des modèles numériques à prédire avec robustesse les contraintes, dans le cas de tests simplifiés, faisant intervenir des phénomènes représentatifs de ceux qui sont observés lors d'une opération de soudage.

Dans cette continuité, le présent travail se focalise désormais sur l'aluminium 2024 T3, constitutif des plaques à épaisseurs minces, soudées sous hautes températures pour définir numériquement le transfert thermique en déduisant la répartition du champ thermique qui résultent lors de cette opération des deux plaques minces d'aluminium de la série 2024-T3 sans métal d'apport à différentes forme de cordon, avec plusieurs maillage pour différentes zones (la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF)).

Introduction :.....

Afin de satisfaire cet objectif, nous avons mis en oeuvre un certain nombre d'essais dans cette étude. Ces essais sont de complexité croissante, afin d'intégrer de façon progressive les phénomènes et difficultés de modélisation qui interviennent lors d'une opération de soudage complète.

Les études présentées ne prétendent donc pas intégrer tous les aspects de la simulation numérique du soudage en général, mais elles constituent une étape permettant de quantifier la robustesse de la simulation pour des cas tests relativement simples, représentatifs du soudage.

Le problème à étudier est bidimensionnel instationnaire, la source de chaleur surfacique à distribution gaussienne de forme bi-elliptique et mobile, les propriétés physiques sont en fonction de la température.

Cette étude comporte 5 chapitres, qui sont :

- **Chapitre I** : Ce chapitre est une approche générale sur le procédé du soudage TIG, dans lequel on va donner des généralités sur l'opération du soudage, plus particulièrement le procédé T.I.G.  
On présente aussi le matériau aéronautique le plus utilisé, ainsi que des exemples sur les différentes formes de cordon de soudure utilisés en industrie aéronautique.
- **Chapitre II** : à partir du bilan énergétique, on va présenter la modélisation mathématique du transfert thermique lors d'une opération du soudage T.I.G, tout en tenant compte des conditions aux limites et des hypothèses appropriés.
- **Chapitre III** : Ce chapitre présente les différentes étapes, et les règles à suivre pour discrétiser l'équation de chaleurs régissant le problème avec la méthode des volumes finis pour différents types de maillages utilisés.
- **Chapitre IV** : Dans ce chapitre, on va donner les différentes méthodes utilisées dans la résolution des systèmes algébriques obtenus après la discrétisation. on explique aussi, la méthode qu'on a optée pour la résolution de notre système. On donnera enfin un organigramme général du programme de calcul qu'on a traduit.
- **Chapitre V** : ce chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus numériquement.

A la fin, une conclusion générale qui englobe notre travail.



# Chapitre I :

## **I. 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 œuvre 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<sup>1</sup>.

**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 (Tungsten Inert Gas) qui fait l'objet de cette étude.

## **II. LE PROCÉDE TUNGSTEN INERT GAS (TIG) :**

### **II.1 PRINCIPE DU SOUDAGE TIG :**

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), également appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est à dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder.

L'électrode et le bain fondu sont protégés contre l'oxydation de l'air par un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur. Parfois un mélange Argon-Hélium est utilisé pour augmenter la pénétration du bain de fusion, l'ajout d'Hélium permettant d'augmenter la tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation plus élevé de celui-ci. L'Hydrogène, parfois présent dans le mélange gazeux, joue un rôle similaire à l'Hélium.

Contrairement à d'autres procédés de soudage comme le laser ou le faisceau d'électrons, qui mettent en jeu de fortes densités d'énergie ( $> 10^6$  W/cm<sup>2</sup>) et provoquent la vaporisation d'une partie du métal, le TIG ne provoque que la fusion du métal, avec dans certain cas une vaporisation très localisée.

Le soudage TIG n'apporte que des calories à la pièce à souder, et s'effectue sans métal d'apport, contrairement à d'autres procédés à l'arc (électrode enrobée, MIG, MAG...). Néanmoins, un supplément de matière peut être apporté, sous forme de fil ou baguette. Le métal d'apport peut être de même constitution que le métal de base (soudage homogène), ou de constitution différente (soudage hétérogène).

Le TIG est un procédé facilement mécanisable. Il est très utilisé, entre autre, dans l'industrie nucléaire pour la réalisation des tuyauteries de circuit primaire des centrales nucléaires de type REP. Le TIG est en effet bien adapté pour la fabrication de tubes roulés soudés en acier inoxydable austénitique. Dans ce cas on utilise le courant continu avec pôle positif relié à la pièce à souder (polarité directe), qui permet de localiser le plus grand apport de chaleur sur le métal à fondre.

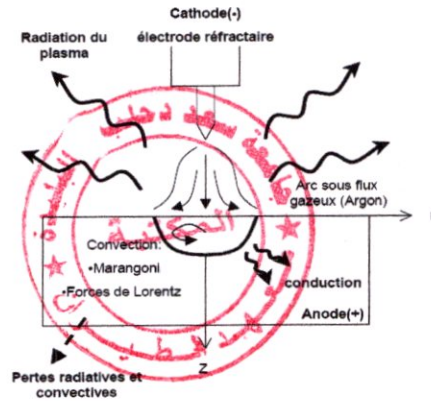


Fig. (I.1) : Transfert d'énergie en procédé TIG

II.2 PROCÉDES DE SOUDAGE :

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (figure I.2)

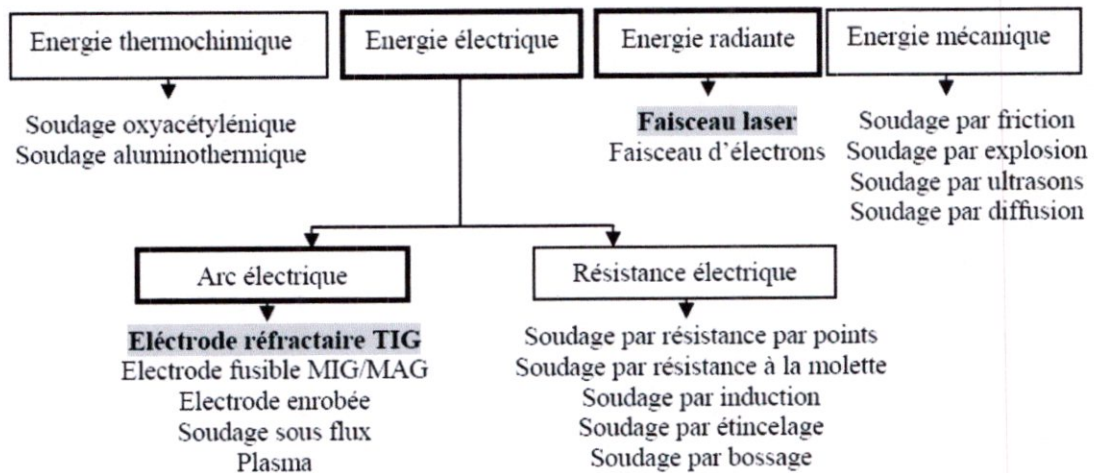


Fig. (I.2): Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie

Ce sont les procédés de soudage à l'arc qui sont les plus répandus dans l'industrie et tout particulièrement dans la construction métallique. Le choix du procédé le plus adapté dépend de très nombreux paramètres, à la fois techniques et économiques.

## II.3 LES DIFFERENTS PROCÉDES DE SOUDAGE :

Se divise en deux groupes selon la source d'énergie utilisée

• Le soudage utilisant une source d'énergie interne (ou endogène) aux pièces.

- soudage électrique par résistance
- soudage par friction
- soudage par diffusion
- soudage par explosion
- soudage par ultrasons

• Le soudage utilisant une source d'énergie extérieure à la pièce : flamme, arc électrique, faisceau d'électrons, faisceau Laser, jet de plasma...

Ce second groupe est le plus répandu dans l'industrie (hormis dans l'automobile où on soude par résistance), et plus particulièrement le soudage à l'arc, technique de très loin la plus utilisée pour le soudage d'aluminium et des autres métaux et alliages :

## II.4 LE SOUDAGE A L'ARC :

Le soudage à l'arc est un terme générique, au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle, et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure.

On choisit l'un ou l'autre de ces procédés selon que l'on veut privilégier avantages économiques ou techniques.

### ▪ A l'électrode enrobée (SMAW\*)

*Procédé inventé en 1907*

Caractéristique : moins utilisé que les procédés recourant à des fils fusibles pour des raisons de faible productivité, mais garantit des joints de très haute qualité grâce particulièrement à l'utilisation d'enrobage de type basique.

### ▪ A fils fusible

Ce procédé, aujourd'hui d'utilisation plus répandue que celui à l'électrode enrobée, offre une meilleure productivité car il permet un soudage semi-automatique ou robotisé avec ou sans protection gazeuse. On peut utiliser des fils pleins (GMAW\*), des fils fourrés (FCAW\*) ou des fils sous flux en poudre (SAW\*).

- ❖ **Le soudage avec une électrode réfractaire** : L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur. On nomme aussi cette technique Tungstèn Inert Gaz «**T.I.G**».

### **III- SOUDAGE TUNGSTEN INERT GAS (TIG) :**

(Soudage TIG : Tungsten Inert Gas, GTAW Gas Tungsten Arc Welding selon les normes américaines ou encore procédé 141 selon l'ISO 4063).

#### **III.1 LE TUNGSTEN INERT GAS (TIG) :**

Signifie "*Tungsten Inert Gas*" où le mot "*Tungsten*" (Tungstène) désigne l'électrode et les mots "*Inert Gas*" (Gaz inerte) désignent le type de gaz plasmagène utilisé. Ce procédé de soudage rentre dans la catégorie des procédés de soudage à l'arc avec une électrode non fusible. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire (- du générateur) et la pièce (+ du générateur) sous un flux gazeux ; de façon générale, il s'agit d'un gaz ou d'un mélange de gaz rares.

L'amorçage se fait grâce au gaz circulant dans la buse qui entoure une grande partie de l'électrode. Le soudage s'effectue en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour la majorité des métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un laps de temps, l'électrode est reliée au pôle + du générateur). Il est important de noter que souder de façon continue en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) détruit cette électrode en la faisant fondre.



**Fig. (I.3)** .Soudage à l'arc avec électrode fusible sous flux gazeux

### III.2-CARACTERISTIQUES DE LA SOUDURE :

Le soudage TIG est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quelle que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (figure I.4).

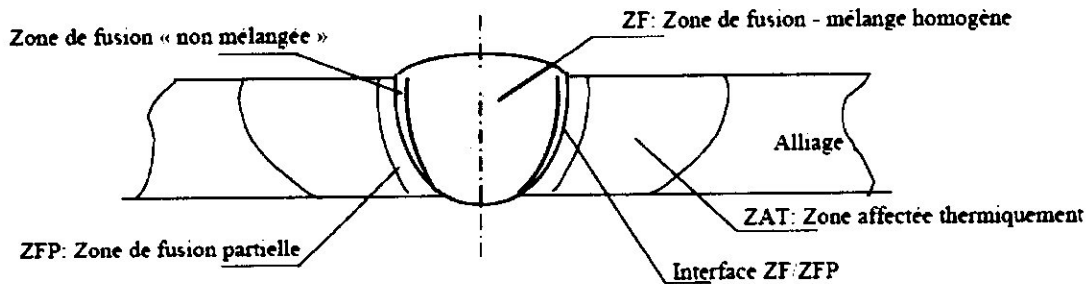


Fig. (I.4): Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG.

a) **La zone fondue** : (nommée **ZF**) Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

b) **La zone affectée thermiquement**: (nommée **ZAT**) Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

c) **La zone de liaison**: Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

d) **Le métal de base**: Au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée thermiquement.

e) **zone de fusion partielle** (nommée **ZFP**) le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage.

### III.3-FORMATION DU BAIN DE FUSION :

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

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage TIG sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeux des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants .

Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon et les transferts de chaleur pouvant induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origine différentes sont :

- les forces de gravité (ou flottabilité),
- les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- la pression de l'arc en surface,
- les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à l'arc.

La figure (I.5) présente les forces agissant sur la forme du bain de fusion par procédé de soudage TIG. Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par rayonnement, convection et conduction dans le métal adjacent.

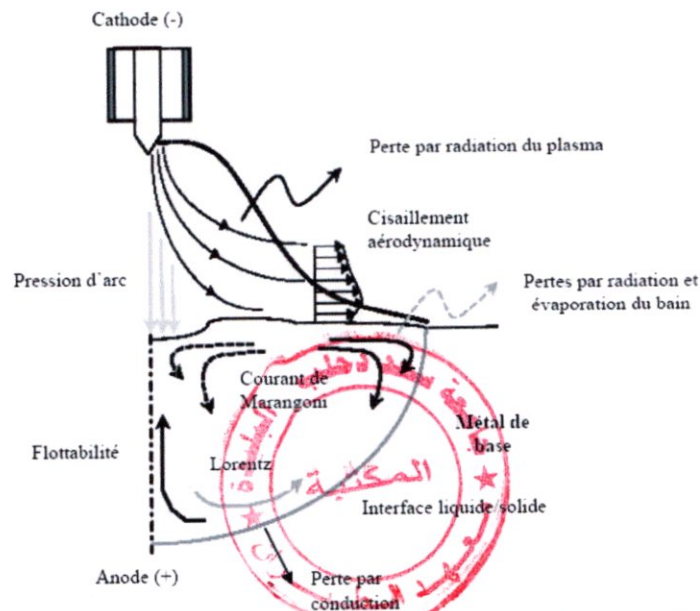


Fig. (I.5): Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG

La forme du bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage qui influence la cinétique de solidification par le contrôle de la vitesse de croissance du front de solidification. Cette vitesse est décrite sur la figure (I .6) et s'exprime par la relation suivante :

$$P=R \cdot \cos \alpha$$

R : vitesse de croissance linéaire en tout point du front de solidification (cm/min)

$V_s$  : vitesse de soudage (cm/min)

$\alpha$  : angle entre la direction de soudage et la direction de croissance des cristaux

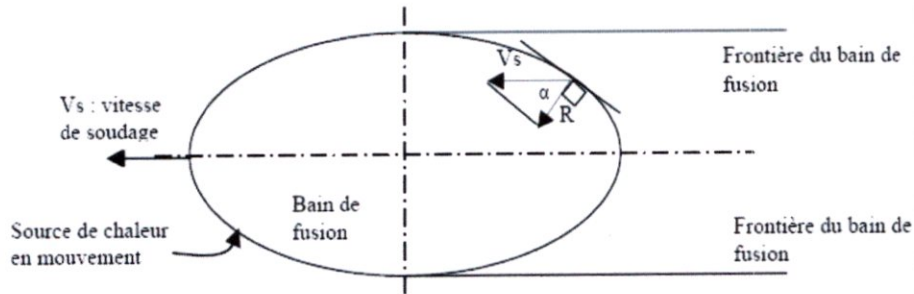


Fig. (I .6): Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de soudage dans un bain de fusion bi elliptique.

### III.4-AUTOMATISATION DU SOUDAGE TIG

Le procédé nécessite une bonne dextérité du soudeur (pour certains assemblages l'électrode est à 1 mm de la pièce). Néanmoins il existe des installations semi-automatiques où l'apport de métal est réalisé par un dispositif annexe. Le métal d'apport sous forme de bobine (bobine au même format que celles utilisées en soudage MIG / MAG) est amené à travers une gaine, puis une canne qui le présente devant l'électrode. Différents systèmes existent permettant de reproduire l'amenée du fil manuelle par un mouvement de cadencage.

Le TIG peut également être complètement automatisé au travers d'installation robotisée.

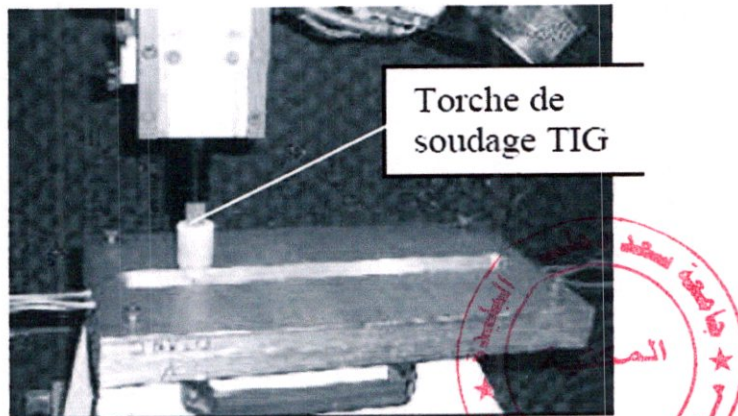


Fig. (I.7): Dispositif de soudage TIG.

#### IV. L'ARC ELECTRIQUE :

A l'aide d'un courant électrique, on fait jaillir dans une veine d'argon un arc électrique entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder de polarité opposée (figures I.8 et I.9). Cet arc électrique engendre un champ magnétique auto induit qui crée à son tour des forces de Lorentz qui vont entraîner le gaz en projection vers la surface de la pièce.

L'énergie calorifique provenant du plasma constitué des particules d'ionisation du gaz de protection, des électrons de l'arc électrique et d'éléments métalliques vaporisés, permet de faire fondre localement la pièce formant ainsi le joint soudé après refroidissement.

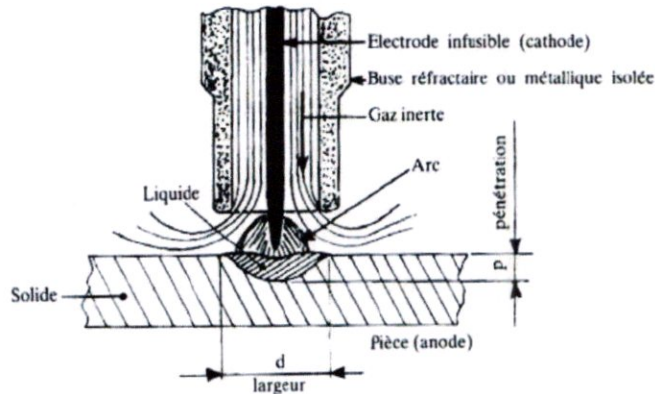


Fig. (I.8): Principe du procédé de soudage TIG simple flux.

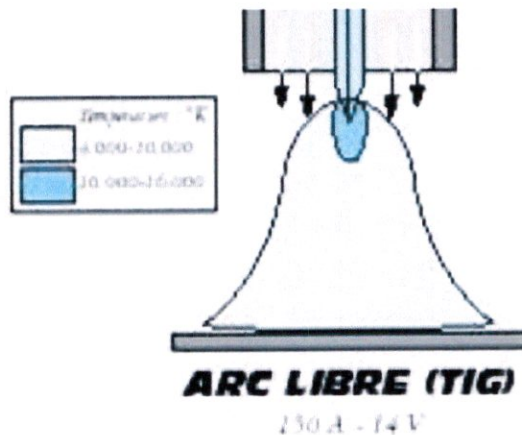


Fig. (I.9): Forme de l'arc électrique de soudage TIG.



La chaleur générée par l'arc électrique  $E_n$  est donnée par : (J /mm),

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

Avec

U : tension de l'arc (V)

I : intensité du courant (A)

$V_s$  : vitesse d'avance de la torche (mm/s)

- Cependant, à cause des faibles pertes électriques de l'arc, toute la chaleur n'est pas transmise à la pièce à souder. La chaleur réellement transmise est  $H_n = \eta EI/v$  où  $\eta$  est le coefficient d'efficacité du transfert de chaleur qui est à peu près égal à 0,7 pour le procédé de soudage TIG.

## V. GAZ DE SOUDAGE :

Les gaz employés dans l'immense majorité des cas peuvent être de l'**argon**, de l'**hélium** ou un mélange des deux. Ces gaz influent sur la facilité d'amorçage de l'arc (plus facile sous argon car sa tension d'ionisation est plus faible que celle de l'hélium), la forme du cordon, la profondeur de pénétration, la vitesse de soudage (les vitesses élevées sont plutôt réservées aux mélanges majoritaires en hélium).

Pour l'Aluminium, l'utilisation de mélanges binaires argon + hydrogène améliore la productivité en augmentant la pénétration et les vitesses de soudage.

❖ Défauts rencontrés :

- Inclusions de tungstène
- Porosités (surtout avec de l'argon)
- Collages et manques de pénétration
- Oxydation si mauvaise protection gazeuse, notamment à l'envers des soudures débouchantes ("rochage").

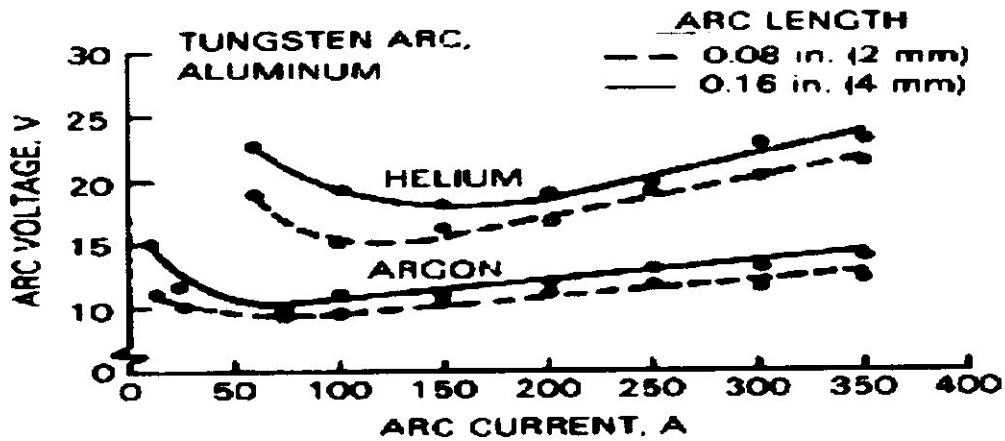


Fig. (I.10) : Evolution de la tension d'arc sous argon et sous hélium suivant l'intensité Appliquée

V.1- L'argon :

C'est le gaz le plus couramment utilisé en soudage TIG. Totalement inerte et relativement lourd, il assure une excellente protection du bain et de l'électrode. Par contre, la présence d'un film d'oxydes ou de dépôts de surface réduit son efficacité. Enfin, son faible potentiel d'ionisation facilite l'amorçage de l'arc et se traduit par une colonne d'arc plutôt conique.

V.2- L'hélium :

Comme l'argon, l'hélium est chimiquement inerte mais a une densité très faible. Il faut donc débiter trois fois plus d'hélium pour obtenir une protection équivalente à celle de l'argon, or son coût est supérieur. La facture gazeuse finale est quatre fois plus coûteuse qu'une soudure sous argon, ce qui explique sa faible utilisation en soudage TIG. De plus, son potentiel d'ionisation élevé conduit à un amorçage d'arc qui se révèle difficile mais les énergies incidentes sont plus importantes comparativement à l'argon et permettent d'éviter les défauts de fusion (cf. Figure I.10). Par conséquent, les vitesses de soudage associées sont plus élevées et peuvent compenser le surcoût d'utilisation de l'hélium.

- ❖ Voici des exemples de mélanges de gaz de protection employés communément pour le soudage au gaz à l'arc de tungstène:
  - 50% d'argon et 50% d'hélium pour des épaisseurs moyennes.
  - 25% d'argon et 75% d'hélium pour les épaisseurs lourdes d'éléments de grande conductibilité thermique tels que l'aluminium et le cuivre.

### V.3- Les gaz actifs

L'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont parfois utilisés, en faible proportion, en combinaison avec l'argon ou l'hélium.

L'oxygène est choisi pour répondre à deux fonctions qui sont de stabiliser l'arc mais surtout de modifier les tensions de surface du métal fondu et ainsi éviter les défauts surfaciques comme les caniveaux initiateurs de concentrations de contraintes.

L'hydrogène, quant à lui, grâce à sa conductivité thermique élevée, donne une tension d'arc plus élevée, favorable à une meilleure pénétration (gain de 50% avec 5% d'H<sub>2</sub>) et à une section fondue plus importante. Cependant, le ratio géométrique pénétration sur largeur de bain diminue très nettement par cet ajout. Par ailleurs, l'hydrogène, très réducteur, est utilisé pour éliminer la couche d'oxydes en surface du bain.

Pour ce qui est de l'azote, il sert, entre autre, à maîtriser les structures formées au cours de la solidification. Par exemple, l'ajout d'azote favorise la présence de ferrite dans le cas de soudure d'aciers duplex austéno-ferritiques. Le taux d'azote permet également d'affiner la taille de grains austénitiques des aciers austénitiques à haute limite élastique.

Cependant, il faut être extrêmement vigilant quant à l'utilisation de ces gaz à cause des phénomènes de pollution et de fragilisation. Une étude complète sur la sensibilité du matériau soudé est nécessaire avant tout ajout dans le gaz d'assistance.

## **VI- PROBLEMATIQUE :**

Le soudage TIG réalise des assemblages de qualité en réalisant un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder dans une veine gazeuse. Ceci en fait un procédé de prédilection pour les industries chimiques et pétrochimiques, aéronautiques, agroalimentaires ou nucléaires.

Mais cette excellence se fait au détriment de cordons soudés pénétrants. Ceci conduit, dans de nombreux cas (épaisseurs soudées supérieures à 3mm), à usiner les bords à souder, puis à effectuer plusieurs passes avec métal d'apport pour réaliser l'assemblage souhaité. Les origines de ces limites sont de deux ordres :

- d'une part, l'absence de transfert de métal conduit à un arc diffus dont 60%), ≈ l'énergie spécifique est faible, le rendement d'arc est donc médiocre
- d'autre part, le métal fondu a naturellement tendance à être mouillant, c'est-à-dire à générer des courants de convection thermo-capillaires, internes au volume fondu, orientés du centre vers les bords du bain.

Pour améliorer ce procédé, il faut intervenir à la fois sur les densités d'énergie, mais aussi sur les courants internes au bain de fusion.

## VI.1-ACTIF TIG :

Le soudage ATIG est une technique qui émerge en construction mécano-soudée de produits chaudronnés depuis le milieu des années 1990. Le matériel nécessaire est identique qu'en soudage TIG. Il utilise un dépôt alcalin de flux actif qui joue un double rôle au passage de l'arc :

- il modifie le comportement et l'équilibre électrochimique de la zone ionisée, conduisant à une constriction de l'arc électrique, réduisant ainsi la tache anodique ; les densités de courant et d'énergie sont donc augmentées au sein de la source thermique ;
- il inverse les courants de convection thermo-capillaires au sein du bain métallique, initiant alors des courants centrifuges qui sont favorables au transfert des calories dans la pièce ainsi qu'à la formation de profils de bords pénétrants plutôt que mouillants.

Il en résulte une forte modification de la morphologie des cordons soudés, doublant la gamme des épaisseurs soudables d'une seule passe. Les flux alcalins sont des composés classiques dans la gamme des éléments rentrant dans la composition des flux de brasage, des enrobages d'électrodes ou de flux solides pour le soudage en arc submergé.

## VII- METHODES ET CRITERES DE VALIDATION DES PARAMETRES D'ASSEMBLAGES CONTROLES NON DESTRUCTIFS (CND) :

Après chaque opération de soudage un contrôle visuel à la loupe binoculaire a été effectué suivi par un contrôle par ressuage fluorescent et un contrôle par radiographie de rayons X suivant la norme NFL06-394.

### VII.1-CONTROLES VISUELS :

Les cordons de soudure TIG présentent un aspect argenté brillant synonyme d'une absence de contamination et donc de la grande efficacité du système de protection gazeuse utilisé.

### VII.2- RESSUAGE :

Le ressuage est la technique de CND la plus utilisée. C'est le premier contrôle à effectuer sur une pièce afin de détecter les défauts débouchant en surface (craquelures, retassures,...) qui sont les plus courants et les plus dangereux. Son principe repose sur l'amplification artificielle du phénomène que constitue la présence du défaut. Le ressuage permet donc rarement de déterminer la nature, la forme et la dimension de ce défaut. La surface à contrôler est d'abord nettoyée et séchée puis elle est recouverte d'un pénétrant liquide contenant des traceurs fluorescents qui doit s'étaler parfaitement sur la surface et pénétrer dans les moindres discontinuités. L'excès de pénétrant restant en surface est éliminé par l'application d'un émulsifiant par immersion, puis la surface est séchée dans une étuve. Un révélateur fluorescent est appliqué sous forme de nuage de poudre micronisée qui fait ressortir le pénétrant hors

des discontinuités. L'excès de poudre est ensuite éliminé par soufflage d'air et l'examen des indications est réalisé dans une chambre noire en utilisant un éclairage sous lumière ultraviolette pour détecter l'émission fluorescente provenant des défauts éventuels qui apparaissent en couleur jaune verte sous fond bleu.

### VII.3-RADIOGRAPHIE X :

Le contrôle par radiographie de rayons X permet la détection des hétérogénéités, comme les fortes ségrégations chimiques ou les inclusions, ainsi que les défauts de continuité, comme les défauts volumiques (soufflures, porosités, retassures, cavités, etc.) et les défauts bidimensionnels (manques de liaison dans le cas des soudures). L'irradiation du joint de soudure s'effectue par des rayons X produits par un tube à émission et les interactions rayonnement/matière (émissions de photoélectrons) vont provoquer des différences relatives d'absorption du rayonnement selon les hétérogénéités présentes. La perte d'énergie des rayonnements est mesurée à l'aide de détecteurs. Les zones traversées sans hétérogénéités sont vues en clair alors que les éventuels défauts donnent des zones sombres. Globalement les assemblages TIG réalisés ne contenaient pas de défauts volumiques même si quelques rares éprouvettes ont présenté des porosités.

### VIII- SYSTEME DE PROTECTION ET DE BRIDAGE:

Afin de protéger les soudures vis-à-vis des contaminations par les gaz de l'atmosphère pendant la fusion mais également au refroidissement, un système de protection endroit et envers des cordons a été utilisé (figure I .11).

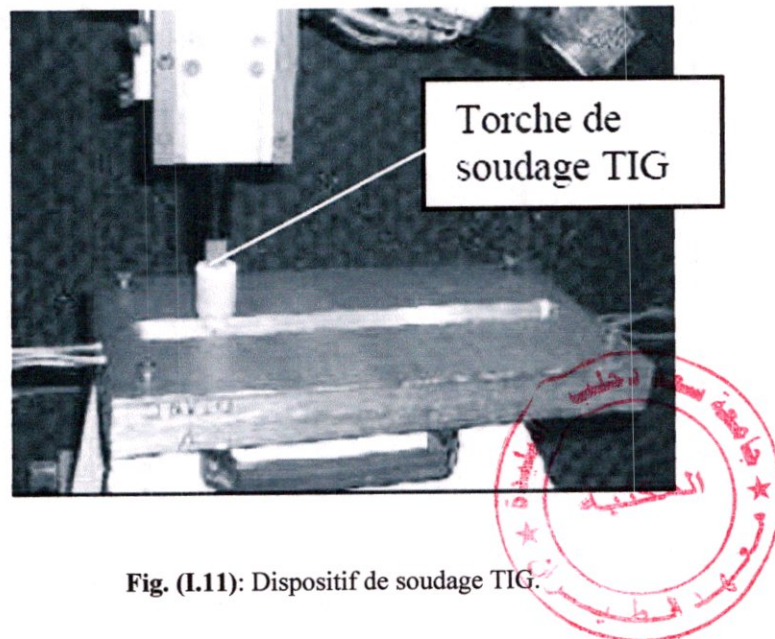


Fig. (I.11): Dispositif de soudage TIG.

Deux plaques en aluminium, matériau amagnétique qui évite toute instabilité de l'arc due au soufflage magnétique, permettent également le bridage des éprouvettes et un accostage quasi-parfait des bords à souder en évitant les déformations au chauffage. La protection gazeuse à l'endroit du cordon de soudure est assurée par un flux d'argon provenant de la torche simple flux ainsi que par deux flux transversaux qui protègent la surface du cordon de soudure après le passage de la torche (figure I.12). A l'envers du cordon la protection est assurée par un quatrième flux d'argon. Le système des flux transversaux permet le soudage automatique sans l'utilisation d'un système spécifique de protection entraîné par la torche et appelé traînard.

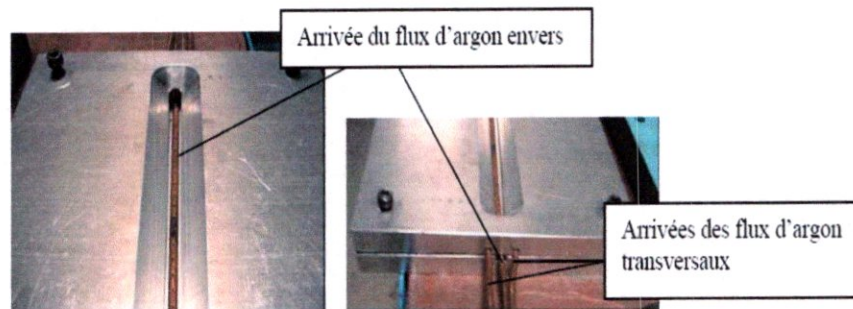


Fig. (I.12): Système de bridage et de répartition des flux gazeux.

## IX-LE MATERIAU AERONAUTIQUE LE PLUS UTILISE :

### Aluminium : [annexe B]

L'aluminium est un élément chimique, de symbole *Al* et de numéro atomique 13. C'est un élément important sur la planète Terre avec 1,5 % de la masse totale en élément Al.

C'est un métal argenté et malléable. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité.

En fait, il est très oxydable mais à l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) imperméable qui protège le reste du métal et qui se reforme très rapidement. On parle alors d'une protection cinétique (contrairement à la protection thermodynamique car il est très oxydable).

Il est principalement extrait d'un minerai appelé bauxite où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine ( $Al_2O_3$ ). Il pourrait également être extrait d'autres minéraux : néphéline, leucite, sillimanite, andalousite, muscovite.

L'aluminium est employé dans beaucoup d'industries pour faire de nombreux produits différents et il est très important pour l'économie mondiale. La Chine est un important pays producteur loin derrière l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada). Les composants structuraux faits à partir d'aluminium sont essentiels à l'industrie aérospatiale ; très importants dans d'autres secteurs du transport et de la construction où sa faible densité, sa longévité et sa résistance sont nécessaires.

# Chapitre II :

## II. MODELISATION THERMIQUE :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les équations qui régissent le phénomène de la conduction, nous nous intéresserons aux équations du bilan régissant le transfert thermique lors d'une opération de soudage (**TIG**), sur la résolution de ces équations, en considérant le cas bidimensionnel instationnaire d'un assemblage de deux plaques minces d'aluminium.

Donc on va aboutir vers la fin à un système d'équations, Pour résoudre toutes les équations considérées dans cette étude, il est nécessaire de spécifier les conditions initiales et les conditions aux limites de toute la frontière du domaine.

### II.1- BILAN D'ENERGIE :

Notre modèle mathématique est obtenu à partir d'un bilan énergétique, effectué sur un volume de contrôle élémentaire ( $dV$ ) de la plaque métallique considérée (Figure II.1).

On a :

$$\Delta E_{\text{int } errr} = q_x + SdV - q_{x+dx} \quad (\text{II.1})$$

Ou :

$$dV = Adx$$

S : source d'énergie.

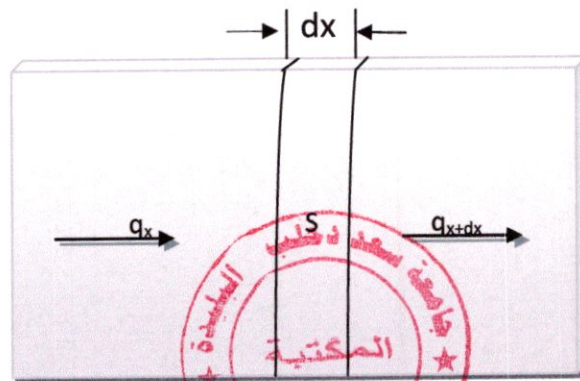


Figure -II.1- Bilan d'énergie.



Donc l'équation (II.1) devient :

$$\Delta E_{interr} = q_x + SA dx - q_{x+dx} \quad (II.2)$$

La variation de l'énergie interne selon la direction considérée est :

$$m Cp \Delta T = \rho V Cp \frac{dT}{dt} = \rho A C p \frac{dT}{dt} dx \quad (II.3)$$

En remplaçant chaque terme de l'équation (II.2) avec leurs expressions on obtient :

$$\rho A C p \frac{\partial T}{\partial t} dx = q_x + SA dx - q_{x+dx}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \rho A C p \frac{\partial T}{\partial t} dx &= q_x + SA dx - \left( q_x + \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) dx \right) \\ &= q_x + SA dx - \left( q_x + \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) dx \right) \\ &= SA dx - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\ &= SA dx + A dx \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{dT}{dx} \right) \end{aligned}$$

Tel que :

$$q = -KA \frac{dT}{dx}$$

K : la conductivité thermique.

Alors

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad ; \text{ Dans la direction de } (Ox)$$

De la même façon on trouve :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad ; \text{ Dans la direction de } (OY)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad ; \text{ Dans la direction de } (OZ)$$

➤ En coordonnées cartésiennes :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{dT}{dz} \right) \quad (II.4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(-K \cdot \overline{\text{grad}T}) + S \quad (II.5)$$

➤ En coordonnées cylindriques on aura :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( K \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (II.6)$$

### II.3- LES EVENTUELS CAS DE LA CONDUCTIVITE :

En générale ;  $K = f(T)$  , l'équation de la chaleur est de type non linéaire.

- Si  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$  ; le régime est dit permanent.
- Si  $K = cst \Rightarrow \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + S$ .

D'une façon générale pour une variable quelconque 'r' on a :

$$\nabla T = \frac{1}{r^p} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^p \frac{\partial T}{\partial r} \right) ;$$

Avec :

$P = 0$  ; pour les coordonnées cartésiennes.



$P = 1$ ; pour les coordonnées cylindriques.

$P = 2$ ; pour les coordonnées sphériques.

Dans le cas de :

- Milieu homogène :  $K$  est indépendant de la position.
- Milieu isotrope :  $K$  est un scalaire indépendant de la direction.
- Milieu anisotrope :  $K$  est un tenseur.

On va donner quelques valeurs des la conductivité  $K$  dans des différents milieux :

➤ Pour le solide :

- |  |  |
|--|--|
| 1. les Métaux Pur $K = 15$ à $340$             | $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$ |
| 2. Alliages : $K = 12$ à $104$                 | $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$ |
| 3. Solides non métalliques : $K = 0.3$ à $0.2$ | $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$ |
| 4. Solides isolant : $K = 0.53$ à $0.8$        | $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$ |

➤ Pour les liquides :  $K = 0.075$  à  $0.8$   $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$

➤ Pour les gaz :  $K = 6.10^{-4}$  à  $0.15$   $\frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.C}^\circ}$

En récapitulant tous ça :

- Si  $K = cst \Rightarrow K = cst \Rightarrow \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + S$
- Si  $K = f(T) \Rightarrow \rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial K}{\partial x} \text{grad} \vec{T} + K \frac{\partial(\text{grad} \vec{T})}{\partial x} + S$

Dans la direction (OX) on aura :

$$\frac{\partial K}{\partial x} = \frac{\partial K}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial K}{\partial T} \text{grad} \vec{T} = \frac{dK}{dT} \text{grad} \vec{T}$$

Alors :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dK}{dT} (\overline{\text{grad}T})^2 + K \nabla^2 T + S \quad (\text{II.7})$$

➤ Dans un milieu anisotrope :  $K$  devient un tenseur

Donc l'équation (II.7) devient :

$$\|\bar{K}\| = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix};$$

Donc :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + K_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + K_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + K_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S.$$

#### II.4- L'EQUATION QUI REGIT LE PHENOMENE DE LA CONDUCTION :

L'équation de conduction de la chaleur dans les deux plaques métalliques à souder s'écrit, après avoir effectué le bilan énergétique et les calculs nécessaires:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) + S(x, y, t) \quad (\text{II-8})$$

Ou  $T$  : température

$t$  : Temps

$\rho$  : Densité du matériau à souder

$C_p$  : Chaleur spécifique du matériau

$K$  : Conductivité thermique

$S$  : Chaleur générée ou absorbée par unité de temps.

La résolution de cette équation différentielle (II-8) nécessite la détermination des conditions aux limites et initiales, pour bien poser le problème et avoir une solution unique.

### II.4-1 HYPOTHESES PRINCIPALES :

L'étude du transfert thermique d'une opération de soudage a pour but d'assurer un joint de qualité. Donc les caractéristiques finales d'un cordon de soudure au point de vue métallurgique et mécanique dépendent de la distribution de la température, cette dernière est basée sur la résolution de l'équation fondamentale régissant l'écoulement du flux de chaleur par conduction. Pour cela il est nécessaire d'évoquer et de noter certaines hypothèses :

- Le régime est transitoire et bidimensionnel  $(x, y, t)$ .
- La direction de soudage s'effectue selon l'axe 'y'.
- Les propriétés thermiques ( $K$  et  $\rho Cp$ ) du matériau sont en fonction de la température.
- Considération du changement de phases dans les métaux à souder.
- L'écoulement du bain de fusion est négligeable.
- Les déperditions calorifiques par convection et rayonnement à travers les surfaces libres et les frontières de la pièce sont considérées.
- La source de chaleur est mobile et répartie selon une distribution surfacique Gaussienne de forme  $S(x, y, t)$ . (nous verrons par la suite le traitement du terme source et la méthode de sa linéarisation).
- Soudage à modéliser sans métal d'apport.

### II.4-2 LES CONDITIONS AUX LIMITES :

La détermination des conditions aux limites est faite à partir des équations du flux de chaleur par convection et par rayonnement avec le milieu environnant, d'ici elle se présente comme suit :

- Au niveau des frontières ;

Le flux  $q_n$  égale à : 
$$q_n = h_\infty(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4)$$

Avec

$h$  : Coefficient d'échange par convection  $h=10 (W/m^2 K^\circ)$ .

$T$  : Température de bord de l'assemblage ( $K^\circ$ ).

$T_\infty$  : Température ambiante.

$\varepsilon$  : Émissivité thermique égale à **0.82**

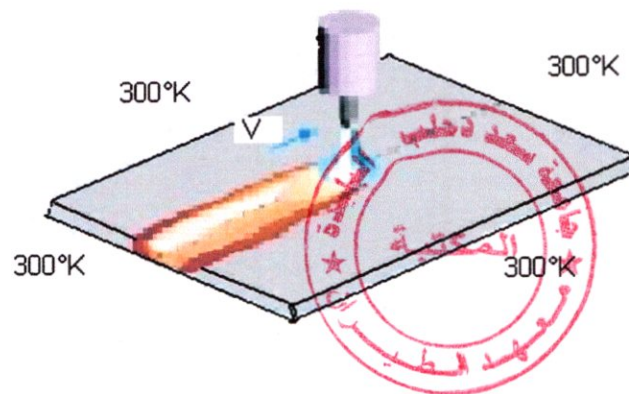
$\sigma$  : Constante de **STEPHAN – BOLTZMAN** égale à  **$5.66.10^{-8} W/m^2.k^4$** .

➤ Au plan symétrique d'assemblage

Le flux de chaleur est nul donc :  $q_n = 0$

Tel que le flux est donné par l'équation de Fourier :  $q_n = -K\vec{\nabla}T$

➤ La température initiale du matériau est supposée égale à la température ambiante  $T_0=300 K^\circ$ .



**Figure (II-2) :** Schéma du processus de soudage de deux tôles

L'équation finale de la conduction de chaleur (bidimensionnelle) dans les deux plaques métalliques à souder s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) + S(T, x, y, t) \\ q_n = h_{\infty} (T - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) \\ q_n = 0 \end{array} \right. \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

T : la température.

t : le temps.

$\rho$  : la densité du matériau à souder.

$C_p$  : la chaleur spécifique du matériau.

K : la conductivité thermique du matériau

S : la chaleur générée ou absorbée par unité de temps.

## II.5- LA SOURCE DE CHALEUR :

Il existe trois modèles de représentation de la source de chaleur :

### II.5-1 SOURCE DE CHALEUR PONCTUELLE :

L'énergie électrique délivrée par l'arc est assimilée à une source de chaleur ponctuelle mobile avec une vitesse constante  $v$ . Cette énergie est définie par :

$$Q = \eta UI$$

Ou :

$\eta$  : Rendement thermique de l'arc

$U$  : Tension de soudage (V)

$I$  : Courant de soudage (A)

Le modèle de source ponctuelle ne fournit pas de renseignements quantitatifs au sujet de la dimension ou la forme du bain fondu.

**II.5-2 SOURCE DE CHALEUR GAUSSIENNE :**

On propose deux formulations de la répartition d'énergie :

- La première formulation est un volume gaussien de révolution de type :

$$q = q_{\max} e^{\left(\frac{1}{2\sigma^2} r^2\right)}$$

Lorsque  $\sigma$  tend vers  $\infty$  on retrouve le cas de source point.

- La seconde formulation est basée sur la considération d'une distribution volumique de la source de chaleur dans le joint soudé. Cette source de chaleur s'apparaît à la forme du bain de fusion qui se déplace sous l'électrode et nous considérons qu'il s'agit d'une forme ellipsoïdale.

$$q(x, y, z) = \frac{3\sqrt{3}}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}}$$

**II.5-3 SOURCE DE CHALEUR EN SEGMENTS DE LIGNES :**

Dans ce modèle, la source de chaleur est composée de segments de lignes, chaque segment correspond à la direction du transfert thermique dans le bain de fusion. Par exemple, le transfert thermique dans la direction de pénétration (profondeur) dû au jet de plasma est approximativement exprimé avec un segment de chaleur dans la direction de l'écoulement dans le bain de fusion. Les longueurs des segments de lignes de chaleur sont déterminées en se basant sur les observations expérimentales de la forme géométrique du bain de fusion.



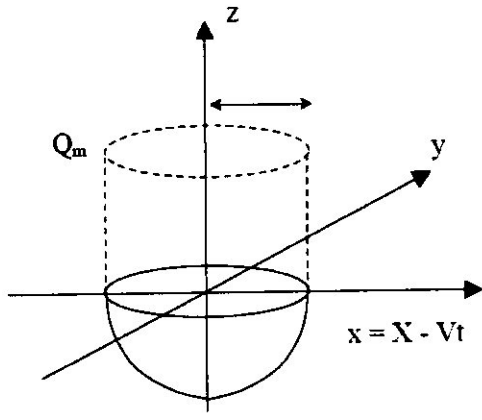
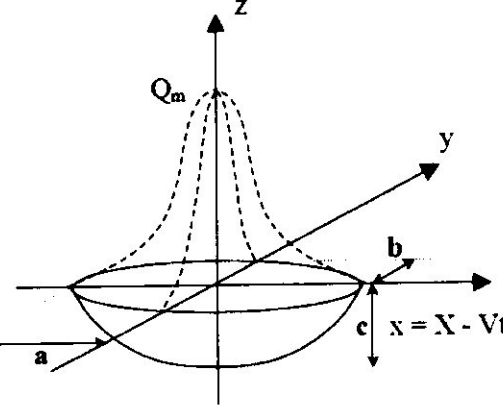
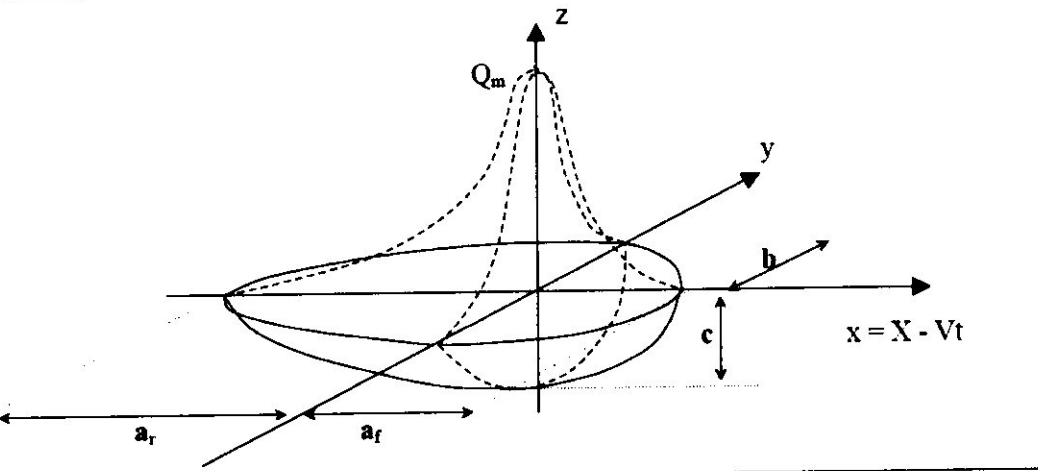
Source volumique : $q(x,y,z) = Q_0 \cdot g(x,y,z) / B = Q_m \cdot g(x,y,z) \text{ W/m}^3$	
	
<p><b>Constante sur une sphère de rayon <math>R_p</math></b></p>	<p><b>Gaussienne 3D à répartition finie sur ellipsoïde de rayons <math>a, b, c</math></b></p>
$q(x, y, z) = Q_m$	$q(x, y, z) = Q_0 \cdot \frac{6\sqrt{3}}{abc\pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$
$B = \frac{2\pi \cdot R_p^3}{3}$ $g(x,y,z) = 1$	$B = \frac{abc\pi^{3/2}}{6\sqrt{3}}$ $g(x, y, z) = \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$
	
<p><b>Gaussienne 3D à répartition finie sur double ellipsoïde de rayons <math>a_r, a_f, b, c</math></b></p>	
$q(x, y, z) = Q_0 \cdot \frac{6\sqrt{3} \cdot f_r}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$ avec $\xi = f$ ou $r$ selon que $x$ est positif ou négatif et $f_r + f_f = 2$ $f_r = \frac{2a_r}{a_r + a_f}$ et $f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f}$	

Figure II-3: exemple de modèles de source volumiques

II.5-4 **MODELISATION DU TERME SOURCE :**

Terme 'S' source de la chaleur s'écrit : [ ]

- Pour le métal de base, c'est l'énergie échangée :

$$S = 2h_{\infty}(T_{\infty} - T) + 2\sigma\varepsilon(T_{\infty}^4 - T^4) \quad \text{(II.10)}$$

- Au niveau du cordon (zone qui contient le bain de fusion) :

$$S = h_{\infty}(T - T_{\infty}) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_{\infty}^4) + q_0 e^{-f(x,y,t)} \quad \text{(II.11)}$$

On remarque que le terme source est non linéaire, donc on doit le représenté sous la forme linéaire de suivante :

$$S = S_c + S_p T \quad \text{(II.12)}$$

La linéarisation de ce terme s'obtient en utilisant la méthode de la tangente suivante :

$$S = \bar{S}^* + \left(\frac{dS}{dT_p}\right)^* (T - T^*) \quad \Rightarrow \quad S_c = \bar{S}^* - \left(\frac{dS}{dT}\right)^* T^* ; \quad S_p = \left(\frac{dS}{dT}\right)^*$$

Tel que, l'indice '\*' indique que le paramètre calculé au cours de l'itération précédente.

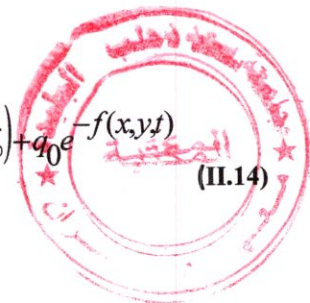
Nous Apercevons donc :

- Au niveau du métal de base :

$$\begin{cases} S_c = 2.0(h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T^{*4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^4) \\ S_p = -2.0(h_{\infty} + 4\sigma\varepsilon T^{*3}) \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

- Au niveau du cordon de soudure :

$$\begin{cases} S_c = (h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T^{*4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^4) + q_0 e^{-f(x,y,t)} \\ S_p = -(h_{\infty} + 4\sigma\varepsilon T^{*3}) \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$



- Rappelons la fonction  $f(x, y, t)$  qui se définit pour le modèle du bain de fusion bi elliptique

$$f(x, y, t) = -3 \left( \frac{(x - v_x t)^2}{b^2} + \frac{(y - v_y t)^2}{a^2} \right)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_x = V \cdot \cos \alpha \\ v_y = V \cdot \sin \alpha \end{cases}$$

Le coefficient  $q_0$  de l'expression de la source de chaleur est donné par :

$$q_0 = 6 \frac{Q}{\pi (r_x (r_{yav} + r_{yar}))} \quad \text{où} \quad Q = \eta \cdot U \cdot I$$

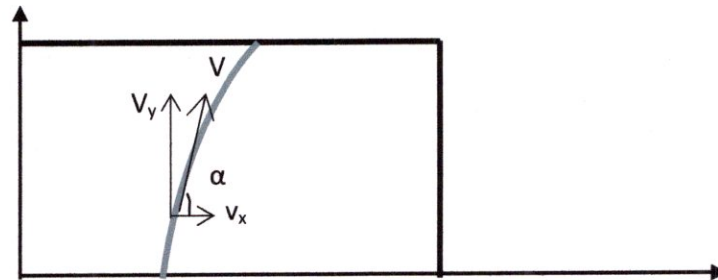


Fig. (II.4) : décomposition de la vitesse dans le cas d'un cordon courbé

## II.6 - PROPRIETES PHYSIQUE :

Dans cette partie on va présenter les propriétés physiques, qui varient en fonction de la température, pour l'aluminium série 2024 -T3 qui fait l'objet de notre étude. Vu, la non disponibilité de la variation de toutes les propriétés physiques en fonction de la température, on va simuler le soudage des deux tôles en utilisant les propriétés physiques constantes ; dans un premier cas, ensuite on donne la conductivité thermique en fonction de la température.

<b>État de la matière</b>	solide
<b>Température de fusion</b>	933,47 K
<b>Température de vaporisation</b>	2792 K
<b>Conductivité thermique</b>	237 W/(m.K)
<b>Chaleur massique</b>	900 J/(kg.K)
<b>Énergie de vaporisation</b>	293,4 kJ/mol
<b>Énergie de fusion</b>	10,79 kJ/mol
<b>Masse volumique</b>	2700 kg/m <sup>3</sup>

Fig. (II.5) : Propriétés physiques de l'aluminium. [ ]

Le graphe ci-dessous représente la variation de la conductivité thermique en fonction de la température :

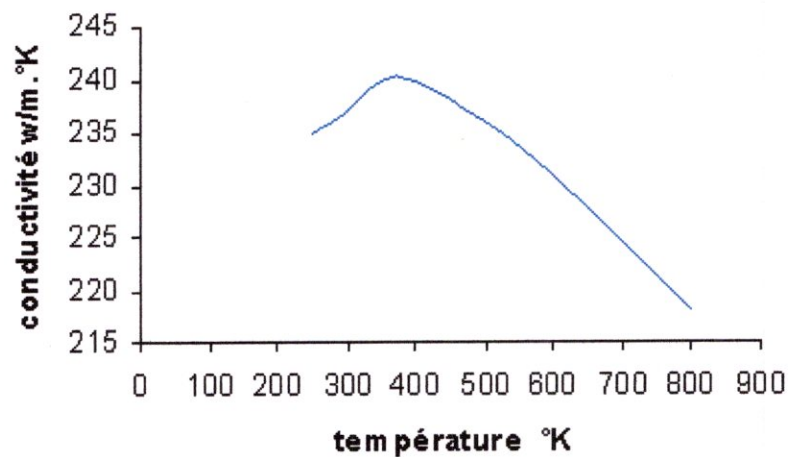


Figure. II.6 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

D'après le graphe (**Figure. II.6**), on peut donner une approximation de la variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

➤ **La conductivité Thermique :**

- Pour  $230 < T < 674 \text{ } ^\circ\text{k}$  :  $K(T) = 217 + 0.007.T$

- Pour  $T > 674 \text{ } ^\circ\text{k}$  :  $K(T) = 262 - 0.006.T$

### **CONCLUSION**

Ce Chapitre nous a permis de poser les modèles mathématiques afin de les résoudre par la méthode numérique des volumes finis qui fait l'objet du prochain Chapitre.



# Chapitre III :

### **III. INTRODUCTION :**

En analyse numérique, la **méthode des volumes finis** est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles comme la méthode des différences finies et à la méthode des éléments finis. Mais, contrairement à la méthode de différences finies qui utilise des approximations de dérivées, la méthode de volumes finis utilise, comme la méthode d'éléments finis, des approximations d'intégrales.

On résout l'équation aux dérivées partielles de manière approchée sur un maillage. Ce maillage est constitué de **volumes finis**, les volumes finis sont des petits volumes (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion forme le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais pas nécessairement.

Les équations gouvernant notre phénomène thermique de soudage, sont des équations différentielles aux dérivées partielles (**voir chapitre II**) de type non linéaire, cela rend la résolution de ces équations très complexe. Donc on fait appel à la **méthode des volumes finis** pour les traiter.

#### **III.1 RAPPEL SUR LA METHODE DES VOLUMES FINIS :**

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar.

##### **III.1-1 PRINCIPE :**

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

Donc le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, décrites au chapitre précédent, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers englobe un nœud dit "nœud principal", comme indiqué dans la figure (Figure III.1).

La méthode des volumes finis, comporte essentiellement :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle ;
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;

- Le choix d'un schéma représentant la variation de la quantité physique et l'assemblage des diverses équations ;
- Le modèle doit être stable est convergent ;

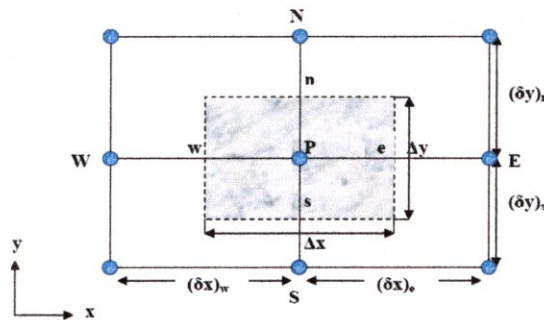


Figure (III-1) : Le volume de contrôle

Le volume de contrôle est représenté par la figure (III-1) pour un nœud principal P, les points E et W (E = Est, W = Ouest) sont des voisins dans la direction (x) tandis que N et S (N= Nord, S = Sud) sont ceux dans la direction (y). Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction (x), n et s dans la direction y.

### III.1-2 CONDUCTION THERMIQUE INSTATIONNAIRE EN DEUX DIMENSIONS (2D) :

#### III.1-2.a. FORME GENERALE DE L'EQUATION DISCRETISEE :

L'équation de conduction thermique in stationnaire pour un problème 2D est la suivante :

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) + S(T, x, y, t) \quad (III.1)$$

Avec le terme source S donné par :

$$S(T, x, y, t) = S_C + S_p T_p \quad (III.2)$$



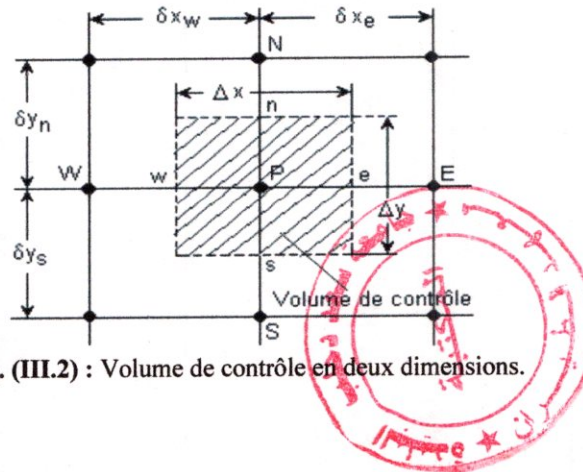


Fig. (III.2) : Volume de contrôle en deux dimensions.

L'intégration de l'équation (III.1) sur le volume de contrôle schématisé à la figure (III.2) donne :

$$\left\{ \begin{aligned} \int \int \int_{w \ s \ t}^{e \ n \ t+\Delta t} \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt &= \int \int \int_{w \ s \ t}^{e \ n \ t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \int \int \int_{w \ s \ t}^{e \ n \ t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) dx dy dt \\ &+ \int \int \int_{w \ s \ t}^{e \ n \ t+\Delta t} (S_C + S_p T_p) dx dy dt \end{aligned} \right. \quad \text{(III.3)}$$

Avec

$$\int \int \int_{w \ s \ t}^{e \ n \ t+\Delta t} \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = (\rho C_p T_p - \rho^0 C_p^0 T_p^0) \Delta x \Delta y \quad \text{(III.4)}$$

Tel que :

$\rho^0$ ,  $C_p^0$  et  $T_p^0$  sont respectivement, la masse volumique, la chaleur spécifique et la température du nœud considéré à l'instant ( $t$ ).

$\rho$ ,  $C_p$  et  $T_p$  sont respectivement, la masse volumique, la chaleur spécifique et la température du nœud considéré à l'instant ( $t + \Delta t$ ).

D'après la référence [ ] :

$$\int_i^{i+\Delta t} T_p dt = [f.T_p - (1-f)T_p^0] \Delta t \quad (III.5)$$

En remplaçant les gradients de température on obtient :

$$\int_w^e \int_s^i \int_i^{i+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \int_s^i \int_i^{i+\Delta t} \left[ \frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dy dt \quad (III.6)$$

$$= \int_i^{i+\Delta t} \left[ \frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y dt \quad (III.7)$$

En tenant compte de l'équation (III.21) l'équation (III.23) devient:

$$\int_w^e \int_s^i \int_i^{i+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \left[ f \left[ \frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[ \frac{K_e (T_E^0 - T_P^0)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P^0 - T_W^0)}{(\delta x)_w} \right] \right] \Delta y \Delta t \quad (III.8)$$

Et

$$\int_w^e \int_n^s \int_i^{i+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \int_i^{i+\Delta t} \left[ \frac{K_n (T_N - T_P)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_P - T_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x dt \quad (III.9)$$

$$\int_w^e \int_n^s \int_i^{i+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \left[ f \left[ \frac{K_n (T_N - T_P)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_P - T_S)}{(\delta y)_s} \right] + (1-f) \left[ \frac{K_n (T_N^0 - T_P^0)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_P^0 - T_S^0)}{(\delta y)_s} \right] \right] \Delta x \Delta t \quad (III.10)$$

Et

$$\int\int\int_{w s i}^{e n t+\Delta t} S(T, x, y, t) dx dy dt = \int\int\int_{w s i}^{e n t+\Delta t} (S_C + S_p T_p) dx dy dt \quad (III.11)$$

Tel que :

$$\int\int\int_{w s i}^{e n t+\Delta t} S_C dx dy dt = S_C \Delta x \Delta y \Delta t \quad (III.12)$$

$$\int\int\int_{w s i}^{e n t+\Delta t} (S_p T_p) dx dy dt = S_p [f T_p^1 + (1-f) T_p^0] \Delta x \Delta y \Delta t \quad (III.13)$$

On rappelle que les équations (III.8), (III.10) et (III.13) sont en fonction du facteur de pondération  $f$ . selon la valeur de  $f$ , le développement du schéma numérique peut se faire de trois manières.

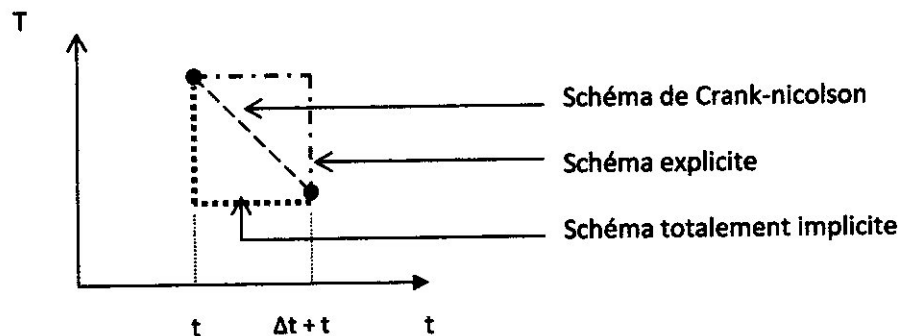


FIG. (III.3) : Loi de variation locale de «T» pour la discrétisation en temps

- ❖ Si  $f = 0$ , le schéma est dit **explicite**, c'est-à-dire que la solution est exprimée de manière non itérative, elle est en fonction des termes précédents connus, des conditions aux limites et initiales.
- ❖ Si  $f \neq 0$ , le schéma est dit **implicite**, c'est-à-dire que la solution n'est obtenue qu'avec la résolution simultanée d'une série d'équations.

- ❖ Si  $f = 1$ , le schéma est dit **totalemtent implicite**.
- ❖ Si  $f = 0.5$ , le schéma est dit schéma de **Crank-Nicolson**.

En utilisant le schéma totalemtent implicite, on obtient :

$$\left\{ \begin{aligned} (\rho C_p T_p - \rho^0 C_p^0 T_p^0) \Delta x \Delta y &= \left[ \frac{K_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta t + \left[ \frac{K_n (T_N - T_p)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_p - T_s)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta t \\ &+ S_p T_p \Delta x \Delta y \Delta t + S_c \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \right. \quad \text{(III.14)}$$

En regroupant les termes dans l'équation (III.14) on obtient la forme générale de l'équation discrétisée :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + a_N T_N + a_S T_S + b \quad \text{(III.15)}$$

Où

$$a_E = \frac{K_e \Delta Y}{(\delta X)_e}$$

$$a_w = \frac{K_w \Delta Y}{(\delta X)_w}$$

$$a_N = \frac{K_n \Delta X}{(\delta Y)_n}$$

$$a_S = \frac{K_s \Delta X}{(\delta Y)_s}$$

$$a_p^* = \frac{\rho C_p \Delta X \Delta Y}{\Delta t}$$

$$b = \frac{\rho_0 C_p^0 \Delta X \Delta Y}{\Delta t} T_p^0 + S_C \Delta X \Delta Y$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^* - S_p \Delta X \Delta Y$$

**REMARQUE :**

L'équation (III.15) est valable pour un nœud intérieur du domaine de calcul. Pour les nœuds situés sur la frontière (le cas des conditions aux limites) les équations discrétisées sont obtenues en tenant compte des conditions aux limites.

**III.1-3 CONDITIONS AUX LIMITES :**

On va prendre les conditions aux limites appliquées à une demi plaque et la relation précédente qui donnée par :

$$q_n = h_\infty (T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \tag{III-16}$$

Cette équation est de degré (4), elle nécessite une linéarisation :

$$q_n = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_p^{*4} - T_\infty^4) \tag{III-17}$$

Avec :

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

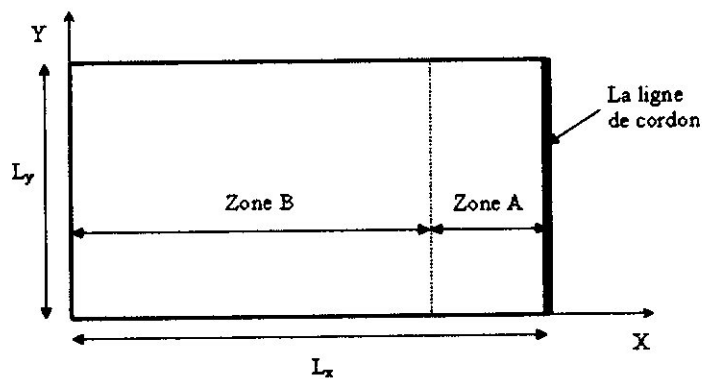


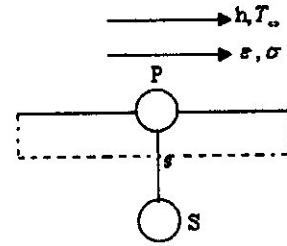
Fig. (III.4) : Illustration des zones A et B

**Face supérieure :**

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_p^{**} - T_\infty^4)$$

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

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



On peut écrire :

$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

$$a_p = a_s = \frac{k_s}{\Delta Y}$$

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

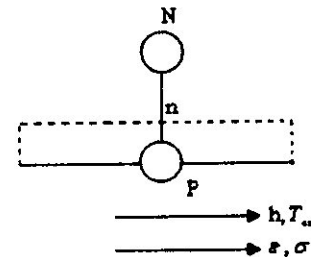
$$a_E = a_N = a_W = 0.$$

**Face inférieure :**

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_p^{**} - T_\infty^4)$$

$$-k_n \frac{(T_p - T_N)}{\Delta Y} = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_p^{**} - T_\infty^4)$$

$$\frac{k_n}{\Delta Y} T_p = \frac{k_n}{\Delta Y} T_N + h_\infty (T_\infty - T_p^*) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^{**})$$



On peut écrire :

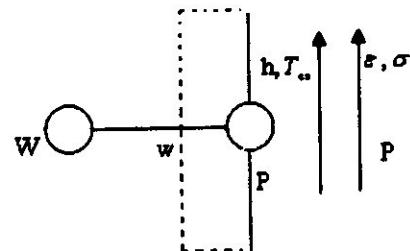
$$a_p T_p = a_N T_N + b$$

$$a_p = a_N = \frac{k_n}{\Delta Y}$$

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

$$a_E = a_S = a_W = 0.$$

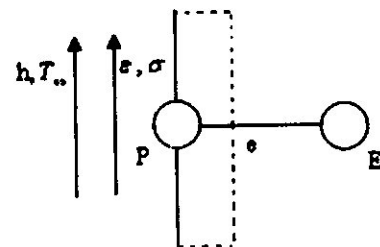
**Face droite :**



$$-k_w \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=L_x} = 0$$

$$-k_e \frac{(T_p - T_w)}{\Delta X} = 0 \Rightarrow T_p = T_w$$

**Face gauche :**



$$-k_e \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{x=0} = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^{*4} - T_\infty^4)$$

$$-k_e \frac{(T_P - T_E)}{\Delta X} = h_\infty (T_P^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_P^{**} - T_\infty^4)$$

$$\frac{k_e}{\Delta X} T_P = \frac{k_e}{\Delta X} T_E + h_\infty (T_\infty - T_P^*) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_P^{**})$$

On peut écrire :

$$a_P T_P = a_E T_E + b$$

$$a_P = a_E = \frac{k_e}{\Delta X}$$

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

$$a_N = a_S = a_W = 0.$$

### **III.3 GENERATION DU MAILLAGE :**

Le maillage est une partie importante de la modélisation des problèmes thermique par la méthode des volumes finis. Il existe plusieurs types du domaine selon la forme de sa frontière, ainsi qu'il existe plusieurs techniques de génération de maillage, selon le degré de complexité du même domaine, un maillage doit toujours vérifier les conditions suivantes :

- Une adaptation aux frontières, et aux conditions aux limites.
- Une adaptation aux propriétés des différentes régions du domaine physique.
- Une bonne régularité.

Dans notre travail on va utiliser trois types de maillage, un maillage rectiligne type (H) (dans le cas d'un cordon rectiligne), un maillage incliné (dans le cas d'un cordon incliné) et un maillage courbé (dans le cas d'un cordon courbé).



### III.4 CONDUCTIVITE THERMIQUE VARIABLE:

Dans nos équations, nous avons besoin des conductivités sur les faces du volume de contrôle  $K_e$  et  $K_w$ .

Le flux à l'interface  $q_e$  :

$$q_e = \frac{T_P - T_E}{(\delta x)_e} K_e$$

Si nous concéderons le volume de contrôle au tour du point  $P$  avec le coefficient  $K_p$  est celui au tour de  $E$ ,  $K_E$ .

Une analyse sans terme source donne :

$$q_e = \frac{T_P + T_E}{\frac{(\delta x)_{e^-}}{K_p} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E}} \quad \text{(III-18)}$$

$$q_e = \frac{K_p}{(\delta X)_{e^-}} (T_P - T_e) = -\frac{K_E}{(\delta X)_{e^+}} (T_e - T_E) \quad \text{(III-19)}$$

Au début on a considéré que la conductivité thermique ( $K$ ) est constante sur tout le domaine de calcul. Cependant ils arrivent que ( $K$ ) varie avec les coordonnées en raison notamment de la variation de la température.

Pratiquement c'est impossible d'avoir une relation mathématique  $K=K(x, y, z)$ , on doit donc déterminer les coefficients  $a_E$  et  $a_W$  en termes des conductivités thermiques prises au niveau des nœuds  $W$ ,  $P$  et  $E$  du réseau, les quels sont uniformes sur le volume de contrôle.

C'est-à-dire que chaque volume de contrôle a une conductivité propre à lui considérant l'interface  $e$ , les distances la séparant des points  $P$  et  $E$  à savoir respectivement  $(\delta x)_{e^+}$  et  $(\delta x)_{e^-}$  ne sont pas forcément égales (maillage non uniforme).

Le coefficient  $a_{E}$  représente la conductance de  $P$  et  $E$ , et donnée par la relation :

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e} \left[ \frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right]^{-1} \quad \text{(III-20)}$$

Ou :

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

La relation (III-20) pour  $a_w$ , l'équation implique que pour chaque volume de contrôle nous aurons un profil de température linéaire avec des pentes différentes :

Le flux de chaleur s'exprime alors par :

$$q_e = \frac{K_P}{(\delta x)_{e^-}} (T_P - T_e) = -\frac{K_E}{(\delta x)_{e^+}} (T_e - T_E)$$

En éliminant «  $T_e$  » on aura :

$$K_e = \left( \frac{1}{(\delta x)_e} \left( \frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right) \right)^{-1} \quad \text{(III-21)}$$

Car :

$$\frac{q_e}{T_P - T_E} = \frac{K_e}{(\delta x)_e} = \left( \frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right) \quad \text{(III-22)}$$

Et

$$(\delta x)_{e^+} = (\delta x)_{e^-} \Rightarrow (\delta x)_e = 2(\delta x)_{e^+} = 2(\delta x)_{e^-}$$

Nous aurons alors :

$$K_e = \frac{2K_E K_P}{K_E + K_P} \quad \text{(III-23)}$$

**REMARQUE 1 :**

La valeur de  $K_E$  évaluée par la relation ci-dessus est une moyenne harmonique de valeurs aux nœuds plutôt qu'une moyenne arithmétique, pour discuter des mérites de la première voyons deux exemples :

- 1- si  $K_E$  tend vers 0, cela donne bien un flux nul, alors que la formulation arithmétique n'aurait pas donné un flux nul.
- 2- Si  $K_P \gg K_E$  alors  $K_e$  tend vers  $2K_E$  donc la conductivité à l'interface ne dépend pas de  $K_P$  ce qui normal car la grande conductivité du matériau autour de point « P » offre peu de résistance par rapport à celle autour de E, cette formulation peut établi pour d'autres dimensions.

**REMARQUE 2 :**

L'hors que  $K_P$  dépend de « T » comme c'est le cas dans notre problème, les étapes à suivre sont les suivantes :

1. donner les valeurs estimées de « T » en chaque point du maillage (choix initial).
2. De ces valeurs, seront déduits les différents coefficients des équations discrétisées.
3. Résoudre les équations discrétisées pour avoir « T ».
4. Avec ces nouvelles valeurs, reprendre l'étape (b) et recommencer jusqu'à ce que les valeurs de « T » ne varient plus. On dit alors qu'on a atteint la convergence.

### **III.5 LES REGLES D'APPLICATION DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS:**

#### **REGLE N°1** : (la consistance).

Quand une surface est commune à deux volumes de contrôle adjacents, le flux à travers cette surface doit être représenté par la même expression dans les équations discrétisées pour les deux volumes.

#### **REGLE 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  $a_E$  et  $a_P$  ont le même signe que nous choisissons positif.

#### **REGLE 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 se danger.

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

#### **REGLE 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  $a_P = \sum a_{nb}$

### III.6 EXEMPLE ILLUSTRATIF DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS :

Pour mieux comprendre les représentations précédentes de la méthode des volumes finis, on va l'appliquer maintenant dans le cas de l'équation de diffusion de la chaleur pour une géométrie monodirectionnelle cartésienne, en régime permanent. En tenant compte des hypothèses citées l'équation de la chaleur prend la forme :

$$\frac{d}{dx} \left( K \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \tag{III.24}$$

Où K est la conductivité thermique, T la température et S un terme source représentant la création ou l'absorption d'énergie par unité de volume. Nous appliquons la méthode pour le volume de contrôle construit autour du point P (Figure III.5).

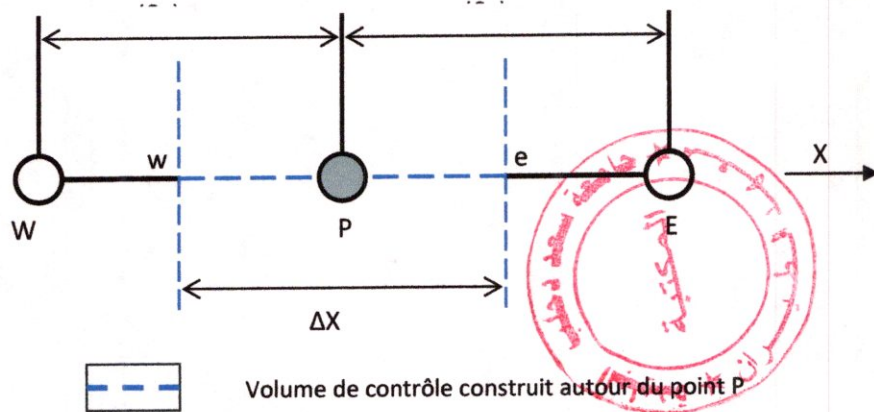


FIG (III.5)- Volume de contrôle dans le cas unidimensionnel

Nous appelons East le premier voisin du point P dans la direction des «X» croissant et West le premier voisin dans la direction des «X» décroissants. Les deux traits verticaux en pointillé (bleu) délimitent le volume de contrôle approprié du point P. les frontières du volume de contrôle sont représenté par les lettres minuscules e et w.

En intégrant l'équation (III.24) sur le volume de contrôle on obtient :

$$\left( K \frac{dT}{dx} \right)_e - \left( K \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad \text{(III.25)}$$

a. Fonction d'interpolation :

Il est nécessaire de choisir une loi de variation locale de la température T, pour poursuivre la discrétisation de l'équation (III.24). Deux lois de variation de T sont Possibles voir (Figure III.6).

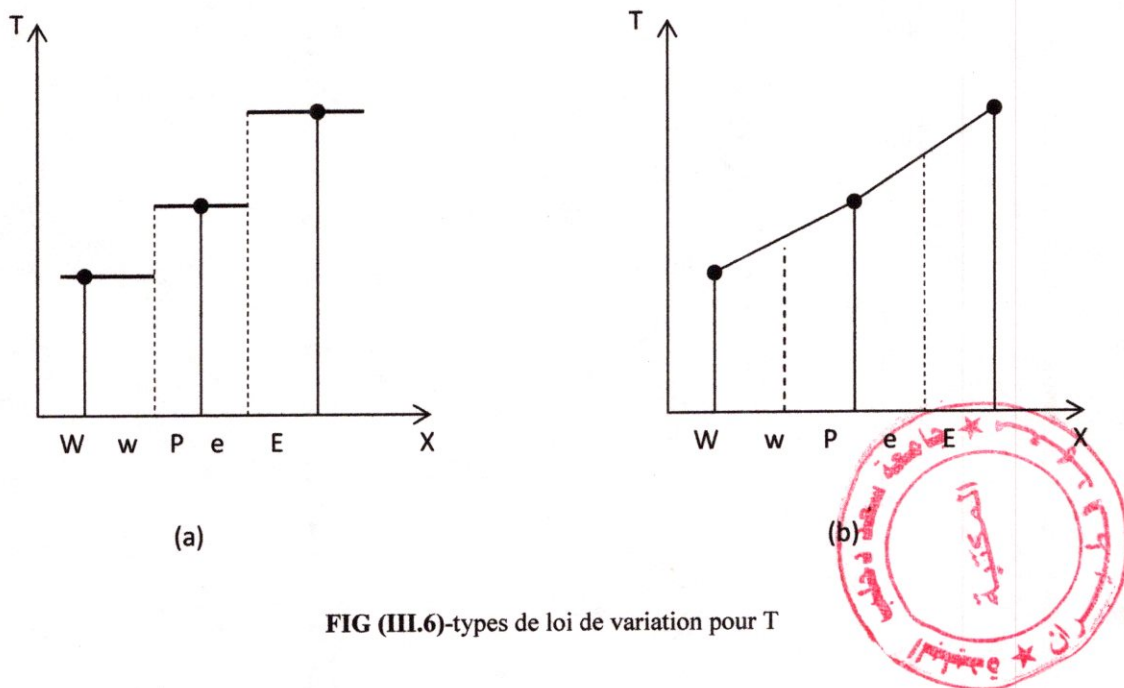


FIG (III.6)-types de loi de variation pour T

Pour le graphe (a), on suppose que la température est constante dans chaque volume de contrôle,  $\frac{dT}{dx}$  n'est pas définie aux points frontières du volume de contrôle (w et e).

Pour le graphe (b) ou l'on suppose une variation linéaire de la température entre deux points du maillage, permet le calcul de  $\frac{dT}{dx}$ .

En adaptant la seconde loi de variation linéaire, l'équation (III.25) devient :

$$K_e \frac{(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - K_w \frac{(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad \text{(III.26)}$$

Où  $K_e$  et  $K_w$  sont les valeurs de la conductivité thermique sur la face e et w du volume de contrôle et  $\bar{S}$  est une valeur moyennée du terme source sur le même volume.

Il est pratique d'écrire l'équation (III.26) sous la forme :

$$a_P T_P = a_e T_E + a_w T_W + b \quad \text{(III.27)}$$

Par identification de l'équation (III.27) et (III.26) on obtient les coefficients et le constant **b** :

$$a_e = \frac{K_e}{(\delta x)_e}$$

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

$$a_P = a_e + a_w \quad \text{Et} \quad b = \bar{S} \Delta x$$



# Chapitre IV :



#### IV. INTRODUCTION :

L'observation d'un phénomène conduit toujours le scientifique à une modélisation qui s'accompagne elle-même d'une mise en équation du problème étudié ; très souvent, les modèles obtenus sont constitués par des équations différentielles ; malheureusement, les méthodes analytiques de résolution de ce type de problèmes mathématiques ne s'appliquent qu'à une classe très limitée d'équations. Par ailleurs les récents progrès du calcul automatique ont permis la mise en œuvre de méthodes de calcul qu'il n'était pas concevable d'envisager auparavant. Ces méthodes numériques ont permis notamment :

- La possibilité d'effectuer une grande quantité de calculs dans des temps très brefs.
- la prise en compte de non-linéarité dans toutes sortes d'équations.
- une analyse d'erreur systématique.
- une analyse de la stabilité des schémas numériques.
- des procédés de parallélisations efficaces sur machines multiprocesseurs.

## IV.1 LE CALCUL NUMERIQUE : (MODELISATION ET SIMULATION)

Le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation dans un système d'équations algébriques.

### IV.1-1 PRINCIPE :

Le principe du calcul numérique est illustré à la figure (IV.1).

Les méthodes de discrétisation les plus connues sont :

- méthodes des différences finies (MDF) ;
- méthodes des éléments finis (MEF) ;
- méthodes spectrales (MS) ;
- méthodes des volumes finis (MVF) (notre étude).

L'algorithme de résolution numérique implique la méthode d'intégration temporelle et de découplage, comme par exemple, les algorithmes SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC et PISO [ ]

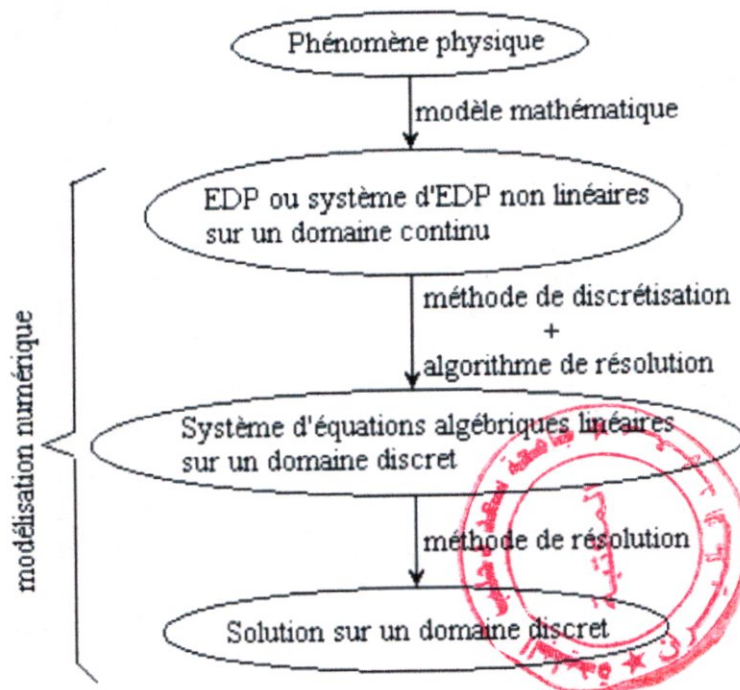


Fig. (IV.1).Le principe du calcul numérique.

#### **IV.1-2 AVANTAGES :**

Le calcul numérique :

- permet le calcul d'une solution numérique pour presque tous les problèmes pratiques ayant un modèle mathématique ;
- à un coût très faible, ayant une tendance à la baisse ;
- présente de la rapidité (permet de modifier la géométrie, les conditions aux limites, etc.) ;
- présente une information complète sur tous les champs, tous les points et à tout instant ;
- à la possibilité de simuler des conditions réelles exceptionnelles ;
- à la possibilité de simuler des conditions idéales.

#### **IV.1-3 INCONVENIENTS :**

- tout dépend du modèle mathématique initial ;
- difficulté pour sélectionner la "bonne" solution en cas de solutions multiples au Problème mathématique ;
- parfois, plus coûteux que l'expérience.

### **IV.2 LES COMPOSANTES D'UN LOGICIEL DE MODELISATION ET DE SIMULATION NUMERIQUE :**

La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par des méthodes numériques, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problème du même type. Ces logiciels ont, pratiquement tous, trois composantes principales : (1) un **préprocesseur**, (2) un **processeur de calcul** (solver = résolveur) et (3) un **post processeur**. Par la suite, on examine les fonctions de chaque composante dans un contexte général.

#### **IV.2-1 -LE PREPROCESSEUR :**

Dans cette étape du calcul numérique les activités impliquées sont les suivantes :

- Description de la géométrie dans la région d'intérêt : définition du domaine de calcul.
- Génération du maillage – discrétisation du domaine de calcul en volumes finis.
- Choix du phénomène physique à modéliser.

- Définition des propriétés physiques .
- Spécification des conditions aux limites adéquates.

#### **IV.2-2 LE PROCESSEUR DE CALCUL :**

Celui-ci peut être réalisé, en général, en utilisant quatre méthodes numériques distinctes : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, les méthodes spectrales et la méthode des volumes finis.

La méthode numérique comporte trois pas distincts :

- L'approximation de la variable inconnue par différents types de fonctions simples.
- Discrétisation par la substitution de l'approximation dans les équations différentielles et l'obtention d'un système d'équations algébriques.
- Résolution du système d'équations algébriques.

La principale différence entre les quatre méthodes numériques consiste dans le type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisation.

#### **IV.2-3 LE POST PROCESSEUR :**

À l'intérieur de ce module, on présente les résultats à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème. Par exemple, dans un problème de conduction thermique, le tracé des isothermes est un résultat très utile, surtout si le logiciel autorise la visualisation de courbes isothermes associées à des valeurs choisies de la température.

Le postprocesseur offre différentes facilités pour visualiser et interpréter les résultats comprenant aussi :

- visualisation de la géométrie et du maillage.
- visualisation des vecteurs de grandeurs calculées.
- visualisation des iso-lignes de différentes grandeurs.
- visualisation des surfaces 2D et 3D.
- possibilités d'exporter les différentes grandeurs sous forme de fichiers.
- facilités d'animation.

### **IV.3 METHODES DE RESOLUTION :**

Après avoir discrétiser l'équation aux dérivées partielles par la méthode des volumes finis, on passe à résolution du système algébrique :

$$(\Phi) = [A] (\Phi) + (B)$$

(Avec  $[A]$  est une matrice carrée de  $N^2$  ou  $N$  est le nombre points du maillage)

Soit par :

#### **IV.3-1 LES METHODES DE RESOLUTION DIRECTES :**

L'équation matricielle peut se réécrire sous la forme :

$$([I]-[A]) (\Phi) = (B) \Rightarrow (\Phi) = ([I]-[A])^{-1} (B)$$

Cette méthode est valable que si les coefficients qui forment la matrice  $[A]$  sont indépendants de  $\Phi$  ; c'est-à-dire que le système est linéaire.

#### **IV.3-2 LES METHODES ITERATIVES :**

Dans le cadre de la méthode des volumes finis, qui permet de traiter des phénomènes de transport souvent couplés et fortement non linéaires. On fait appel alors aux méthodes itératives telles que :

- la méthode de Jacobi
- la méthode de Gauss-Seidel
- la méthode TDMA

La méthode des volumes finis est très utilisée dans les études des phénomènes physiques (transfert thermiques, MDF) car elle nous donne de très bons résultats par rapport aux autres méthodes numériques. De plus, elle est la base des logiciels CFD

(FLUENT CFX-F3D, PHOENICS, COSMOS, STAR-CD, TRIO...).

#### **IV.3-2-a L'ALGORITHME TDMA : [Annexe C]**

Les systèmes obtenus sont ici tris diagonaux. Leur résolution se fait donc en utilisant l'algorithme TDMA qui transforme le système tri diagonal en un système triangulaire supérieur dont la résolution est immédiate par remontée.



Ce qui donne:

$$(b_k - \alpha_{k-1}a_k)u_k + c_k u_{k+1} = v_k - a_k \beta_{k-1}$$

Soit:

$$u_k = \frac{v_k - a_k \beta_{k-1}}{(b_k - \alpha_{k-1}a_k)} - \frac{c_k}{(b_k - \alpha_{k-1}a_k)} u_{k+1}$$

Une comparaison avec l'équation (II-4) conduit finalement à:

$$\begin{aligned} \beta_k &= \frac{v_k - a_k \beta_{k-1}}{(b_k - \alpha_{k-1}a_k)} \\ \alpha_k &= \frac{c_k}{(b_k - \alpha_{k-1}a_k)} \end{aligned} \quad \text{(III)}$$

Les suites (III) permettent donc de déterminer les coefficients inconnus d'indice (k) à partir des coefficients d'indice (k-1).

Il nous reste à initialiser ces suites et donc à déterminer  $\alpha_1$  et  $\beta_1$ .

Pour cela, on utilise les deux premières lignes des systèmes (I) et (II):

$$\begin{aligned} b_1 u_1 + c_1 u_2 &= v_1 \\ u_1 + \alpha_1 u_2 &= \beta_1 \end{aligned}$$

Qui conduisent à:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{v_1}{b_1} \\ \alpha_1 &= \frac{c_1}{b_1} \end{aligned}$$

Une fois tous les coefficients déterminés, on peut résoudre le problème par remontée.

Donc dans notre programme, on utilise la méthode de résolution ligne par ligne, cette méthode est une combinaison entre la méthode de **GAUSS-SEIDEL** et la méthode de **THOMAS**.

Pour la résolution des équations de type :

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

La méthode ligne par ligne s'inspire de la méthode des trois diagonales et celle de **GAUSS-SEIDEL**, elle comporte les étapes suivantes :

- 1- Choisir les conditions initiales de la variable « *T* » pour tout le domaine d'étude.
- 2- Choisir une direction du domaine (par exemple *Y*) et considérer l'autre direction comme constante (notée \*), on obtient :

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

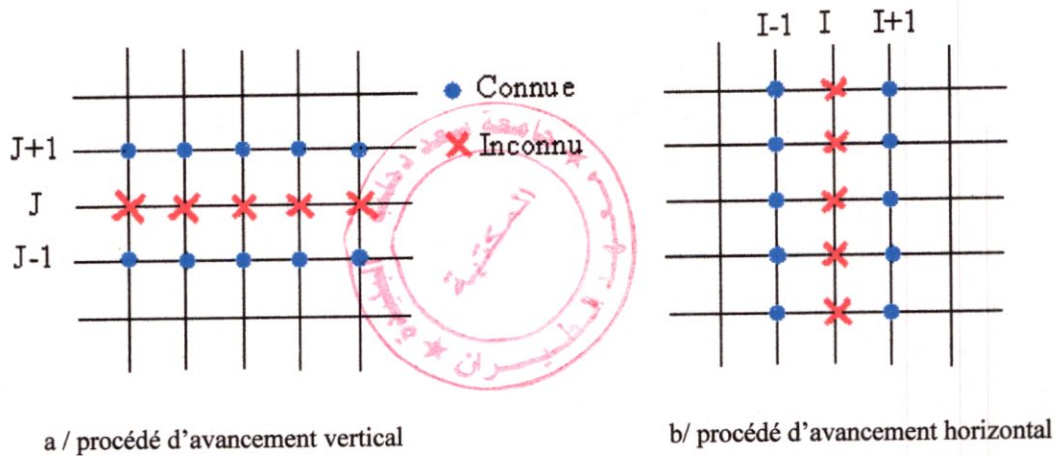


Fig. (IV .2) : Mode d'avancement dans la méthode ligne par ligne

- 3- Résoudre les matrices tri diagonales obtenues à l'aide de l'algorithme **TDMA** pour chaque ligne du domaine d'étude.
- 4- Répéter à partir de (2) les mêmes opérations pour l'autre direction (direction *X*).
- 5- Poser les valeurs obtenues comme choix de départ.
- 6- Retourner à (2) jusqu'à la convergence.



### IV.4 Le maillage :

La génération du maillage est une partie importante de la modélisation des problèmes de transfert de chaleur par la méthode des volumes finis. Pour cela, le développement des méthodes de discrétisation rapides et efficaces est l'objectif principal de cette procédure.

Dans notre problème du soudage, on a deux plaques rectangulaires, comme cité en paravent, on va appliquer la discrétisation géométrique sur une seule plaque à cause de la symétrie.

En effet, vu le gradient important de la température au niveau du cordon (ZF) et sa zone proche (ZAT) de lui d'une part, et d'autre part le faible gradient dans le reste de la plaque, il est convenable de discrétiser le domaine en deux zones différentes telle que la première au alentour de cordon soit très fine et l'autre soit grosse.

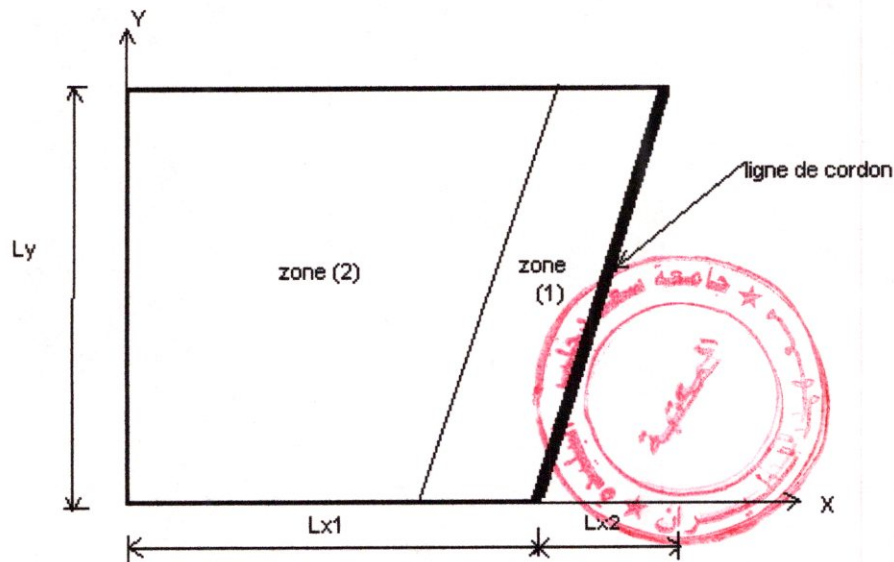
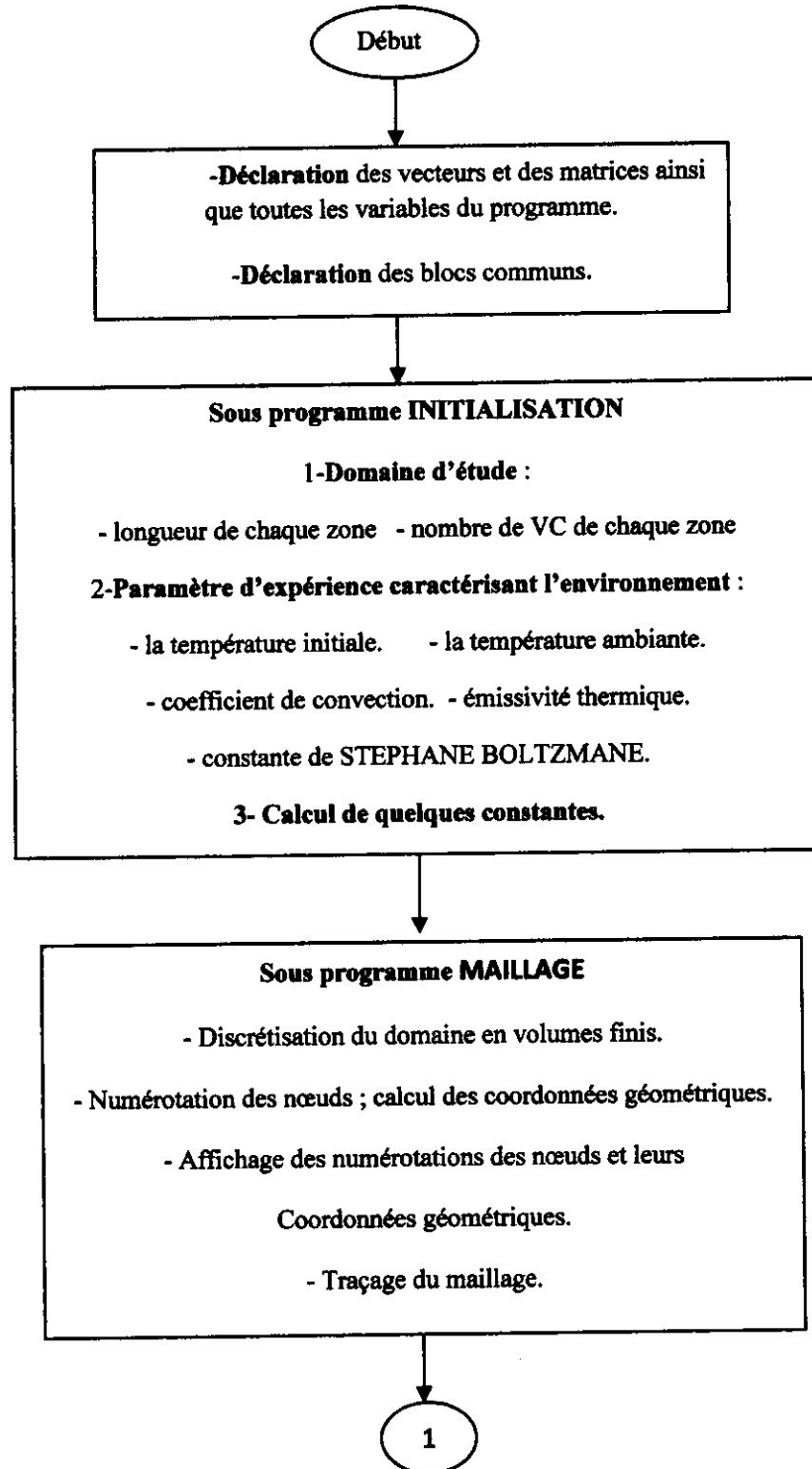
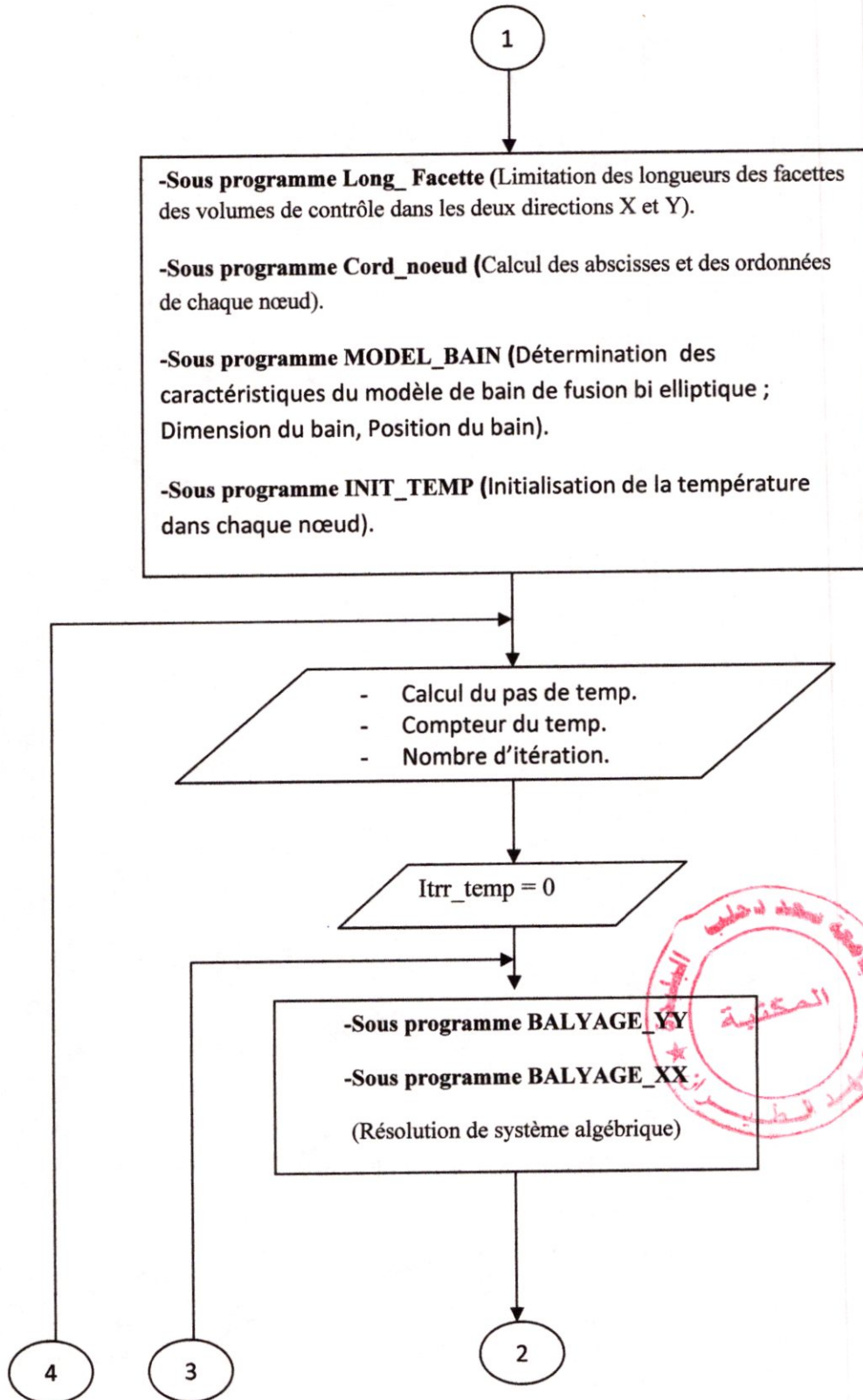


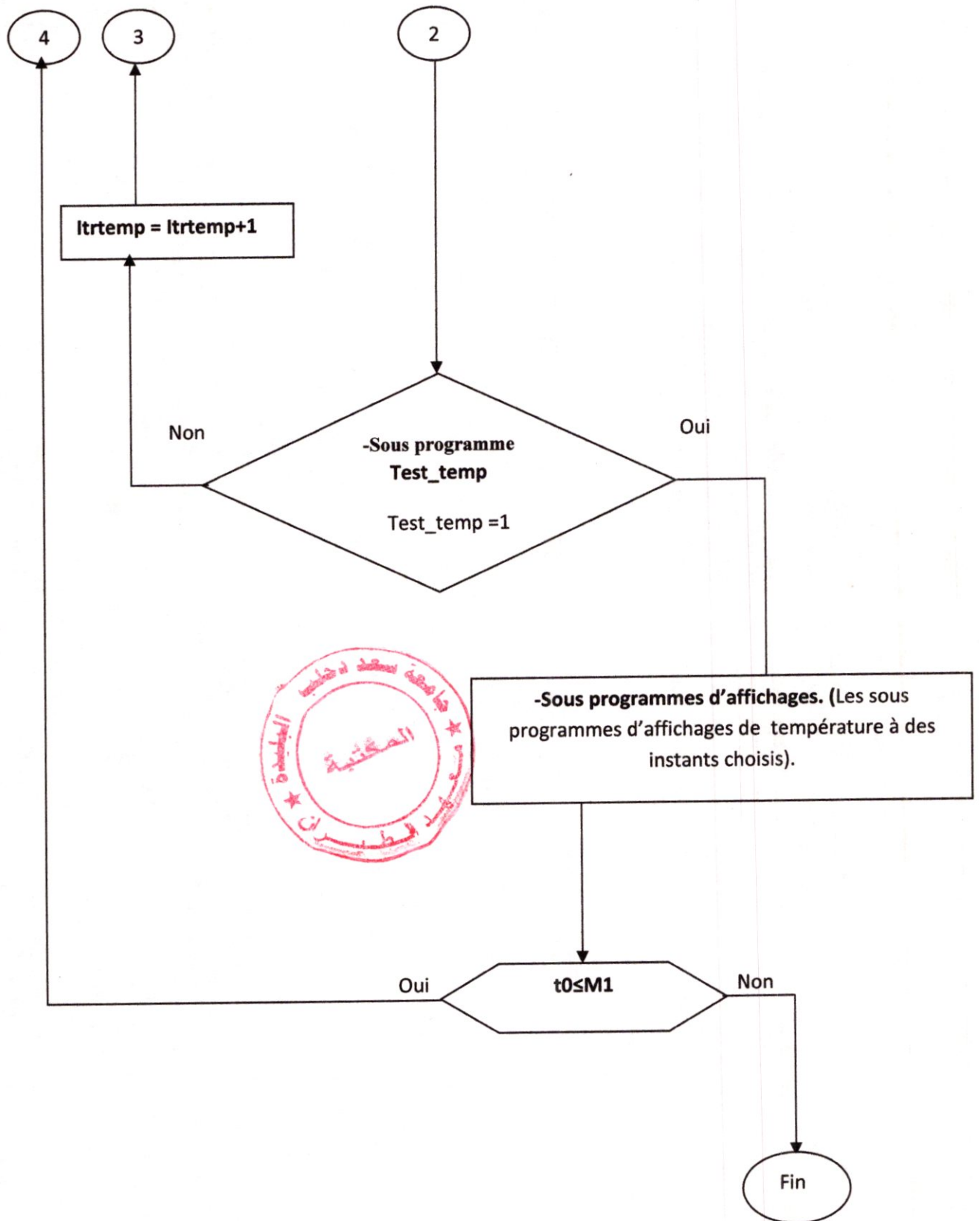
Fig. (IV.3) : Illustration des zones (1) et (2)

### IV.5 Procédure de calcul :

Dans cette partie, on donne une description grossière du programme de calcul à partir de l'organigramme ci-dessous.







Après introduction des différentes données utilisées dans le programme (partie déclaration), l'appelle du sous programme (**INITIALISATION**) permet d'initialiser les différents paramètres du problème (la température initiale ; la température ambiante ; coefficient de convection  $h$  ; émissivité thermique ; constante de STEPHANE BOLTZMAN ; le nombre VC de chaque zone et la vitesse de soudage....) Le calcul du nombre de facettes et le nombre de noeuds seront à la fin de ces sous-programmes (**Long\_Facette**)et (**Cord\_noeud**) .

Après initialisation, on fait appel au sous-programme (**MAILLAGE**) qui a pour rôle la génération du maillage afin d'obtenir les coordonnées géométriques du noeuds, il permet un réarrangement des noeuds du domaine dans un ordre d'affichage logique qui permet le traçage et la représentation du maillage.

Les sous-programmes (**MODEL\_BAIN**) et (**INIT\_TEMP**) nous donnent respectivement les caractéristiques du modèle de bain de fusion et l'initialisation de la température de chaque point du maillage.

Après la décritisation, on passe à l'étape essentiel du programme, qui commence par le sous-programme (**BALYAGE\_YY**) qui fait le balayage des lignes de la matrice suivant l'axe (**OY**),de la même façon le sous-programme (**BALYAGE\_XX**) fait le balayage des lignes de la matrice suivant l'axe (**OX**) . Une fois le calcul est fait, le Sous programme (**Test\_temp**) teste la convergence.

En suite, on incrémente le compteur de temps et on passe à l'instant suivant jusqu'à atteindre le dernier noeud de l'axe (**Y**). Enfin, on fait appel avec la même commande **CALL**, aux (sous-programmes d'affichages) qui affichent le cycle thermique et le champ thermique de la plaque à chaque instant.

# Chapitre V :

**A-CORDON RECTILIGNE :**

**V-I-INTRODUCTION :**

Après avoir adapter le programme en utilisant la méthode des volumes finis. Nous allons procéder à une interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique en prenant compte des données du programme et les conditions aux limites,

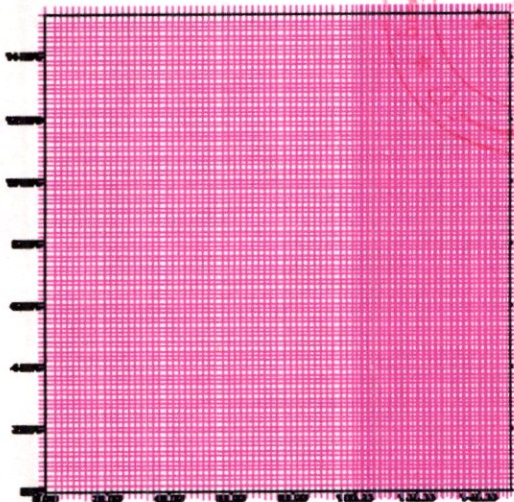
**V-I-1-DONNEES DU PROGRAMME :**

Tension du courant (volts)	Intensité du courant (Ampère)	Temps du soudage (secondes)	Débit du gaz de protection (l/min)	Gaz utilisé
15	35	165	9	Argon

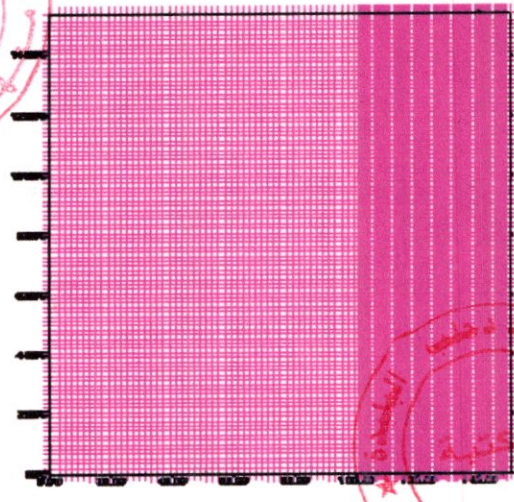
**V-I-2- GENERATION DU MAILLAGE :**

**Pour un maillage 100\*(50+50) :**

**pour un maillage 100\*(50+70) :**



Fig(V-1)



Fig(V-2)

Après introduction des différentes données utilisées dans le programme (partie déclaration), l'appelle du sous programme (**INITIALISATION**) permet d'initialiser les différents paramètres du problème (la température initiale ; la température ambiante ; coefficient de convection  $h$  ; émissivité thermique ; constante de STEPHANE BOLTZMAN ; le nombre VC de chaque zone et la vitesse de soudage....) Le calcul du nombre de facettes et le nombre de nœuds seront à la fin de ces sous-programmes (**Long\_Facette**)et (**Cord\_noeud**) .

Après initialisation, on fait appel au sous-programme (**MAILLAGE**) qui a pour rôle la génération du maillage afin d'obtenir les coordonnées géométriques du nœuds, il permet un réarrangement des nœuds du domaine dans un ordre d'affichage logique qui permet le traçage et la représentation du maillage.

Les sous-programmes (**MODEL\_BAIN**) et (**INIT\_TEMP**) nous donnent respectivement les caractéristiques du modèle de bain de fusion et l'initialisation de la température de chaque point du maillage.

Après la décritisation, on passe à l'étape essentiel du programme, qui commence par le sous-programme (**BALYAGE\_YY**) qui fait le balayage des lignes de la matrice suivant l'axe (**OY**),de la même façon le sous-programme (**BALYAGE\_XX**) fait le balayage des lignes de la matrice suivant l'axe (**OX**) . Une fois le calcul est fait, le Sous programme (**Test\_temp**) teste la convergence.

En suite, on incrémente le compteur de temps et on passe à l'instant suivant jusqu'à atteindre le dernier noeud de l'axe (Y). Enfin, on fait appel avec la même commande **CALL**, aux (sous-programmes d'affichages) qui affichent le cycle thermique et le champ thermique de la plaque à chaque instant.



# Chapitre V :

**A-CORDON RECTILIGNE :**

**V-I-INTRODUCTION :**

Après avoir adapter le programme en utilisant la méthode des volumes finis. Nous allons procéder à une interprétation des résultats obtenus par le calcul numérique en prenant compte des données du programme et les conditions aux limites,

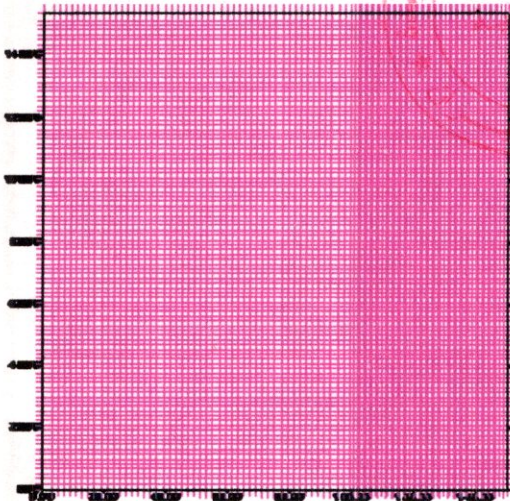
**V-I-1-DONNEES DU PROGRAMME :**

Tension du courant (volts)	Intensité du courant (Ampère)	Temps du soudage (secondes)	Débit du gaz de protection (l/min)	Gaz utilisé
15	35	165	9	Argon

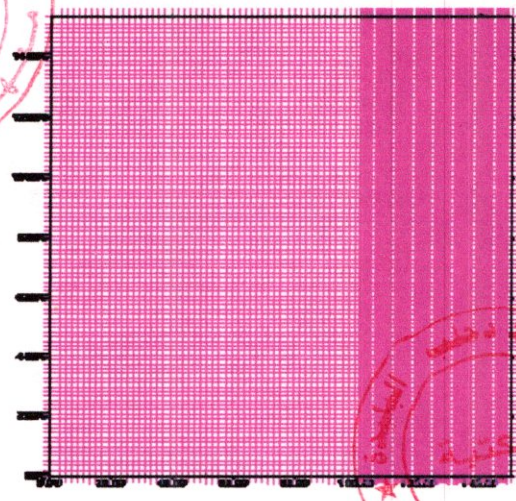
**V-I-2- GENERATION DU MAILLAGE :**

**Pour un maillage 100\*(50+50) :**

**pour un maillage 100\*(50+70) :**



Fig(V-1)



Fig(V-2)

**V-I-3 RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE**

**V-I-3-1 Pour un maillage de 100\*(50+50) :**

**Les isothermes:**

**les nappes :**

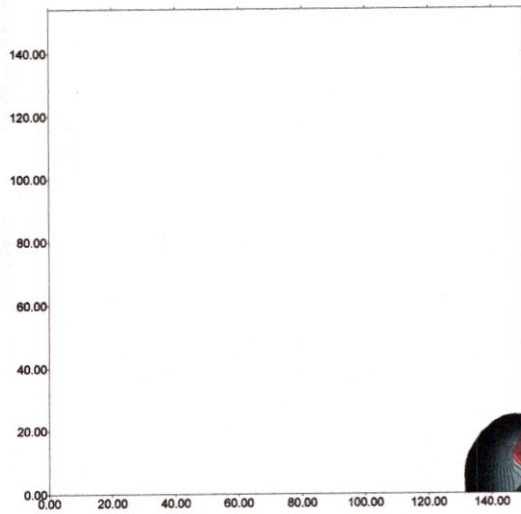


Fig. (V-3)

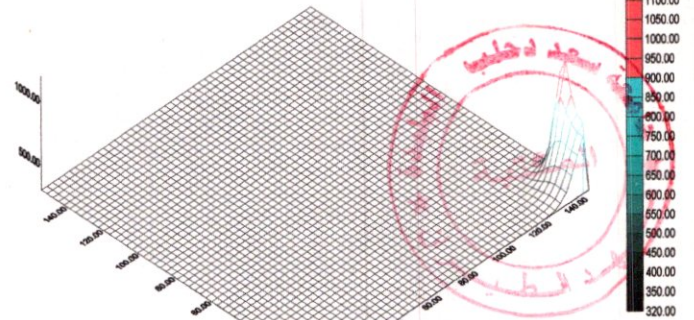
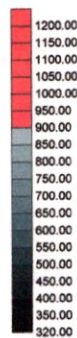


Fig. (V-4)

**T=10**

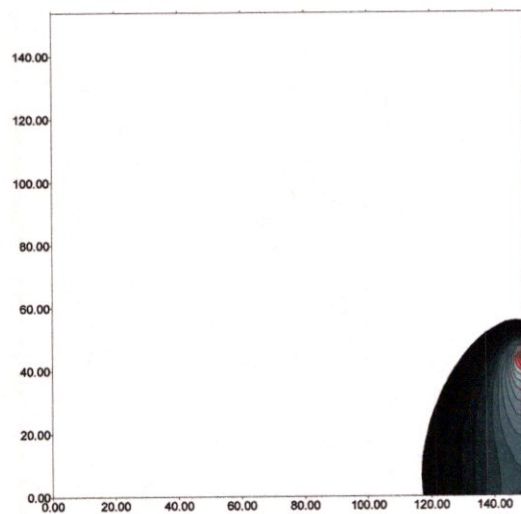


Fig. (V-5)

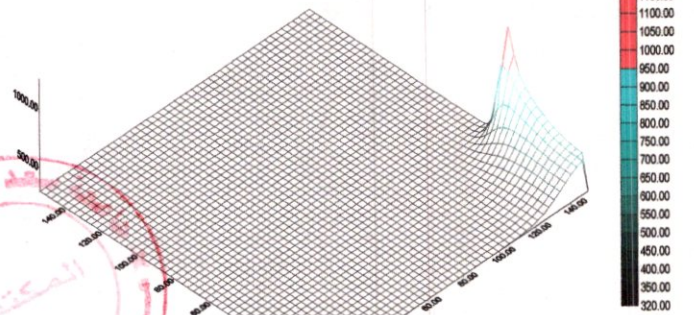
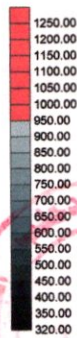


Fig. (V-6)

**T=30**

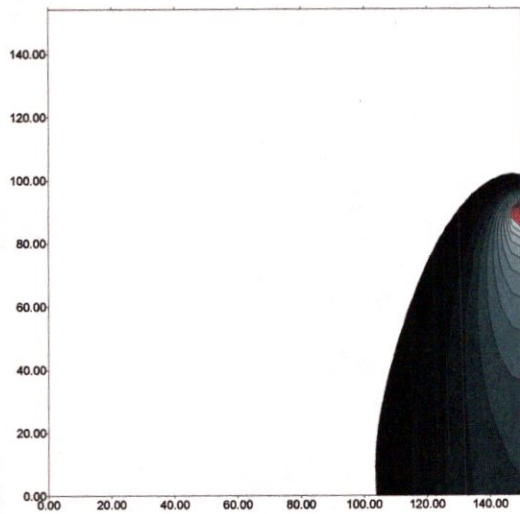


Fig. (V-7)

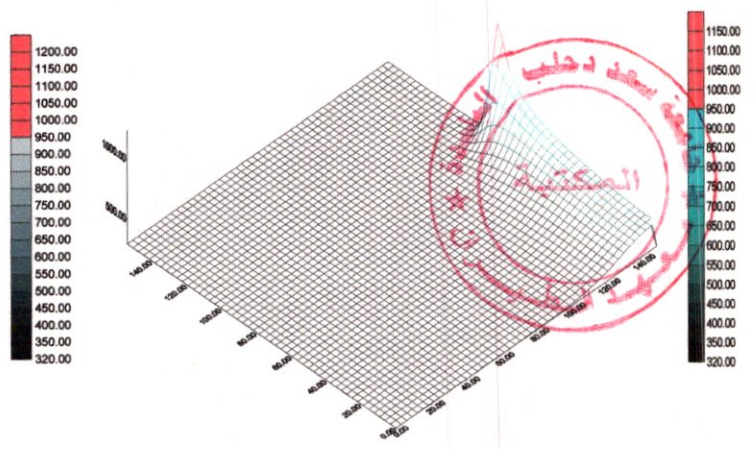


Fig. (V-8)

T=60

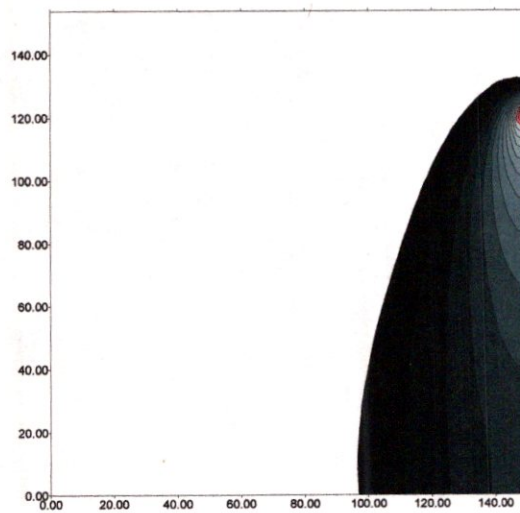


Fig. (V-9)

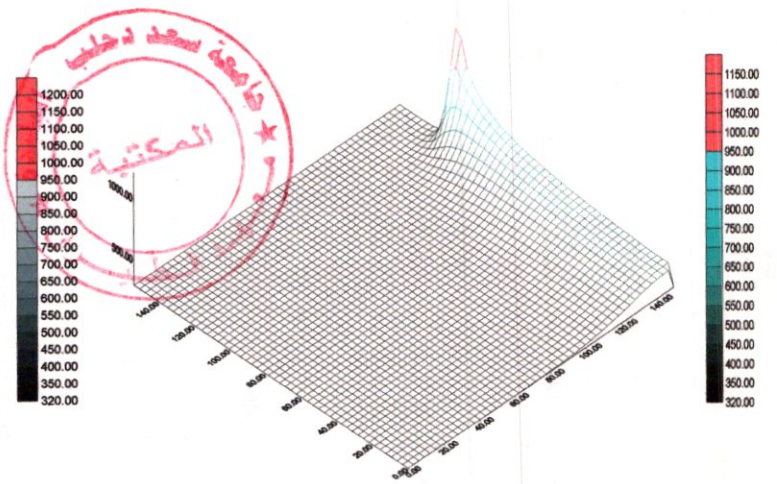


Fig. (V-10)

T=80

V-I-3-2- Pour un maillage 100\*(50+70) :

Les isothermes:

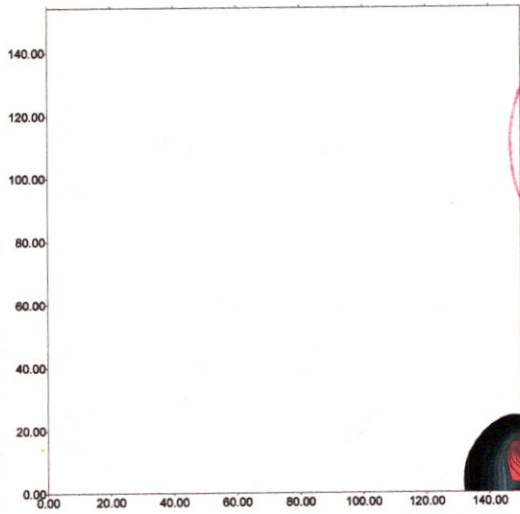


Fig. (V-11)

les nappes :

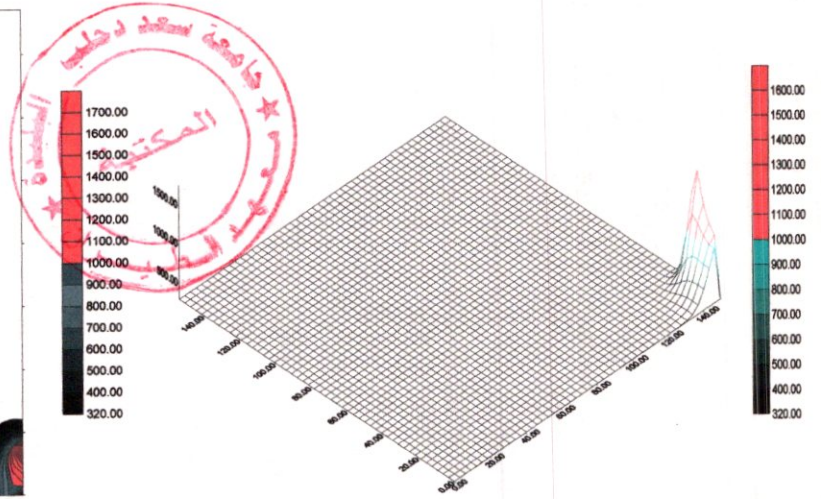


Fig. (V-12)

T=10

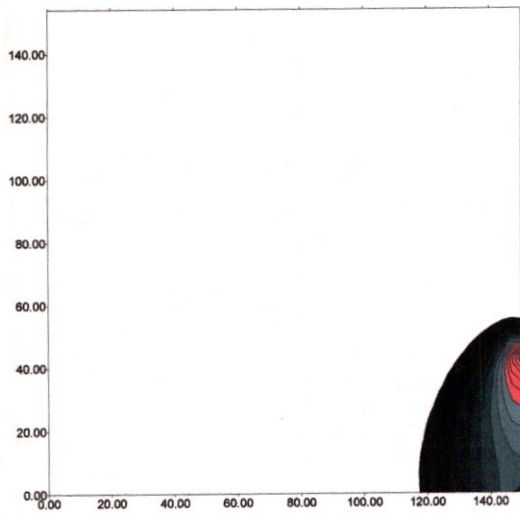


Fig. (V-13)

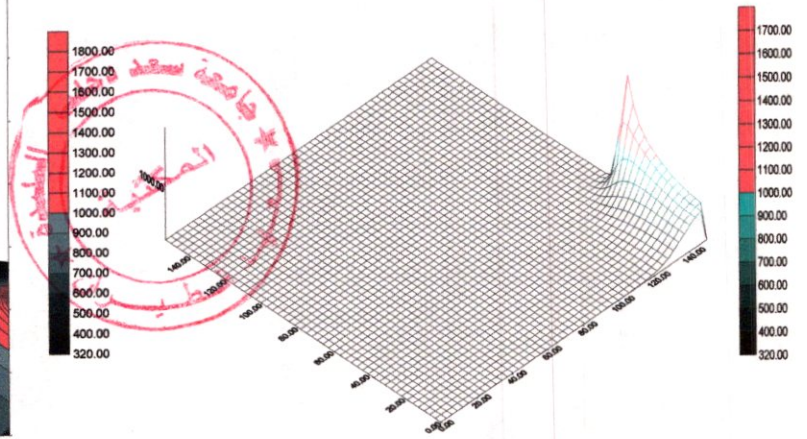


Fig. (V-14)

T=30

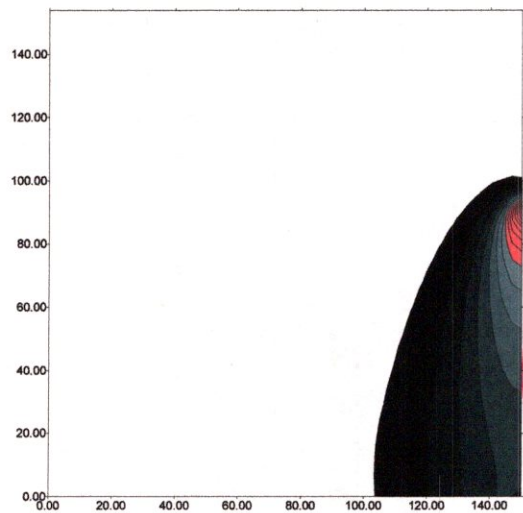


Fig. (V-15)

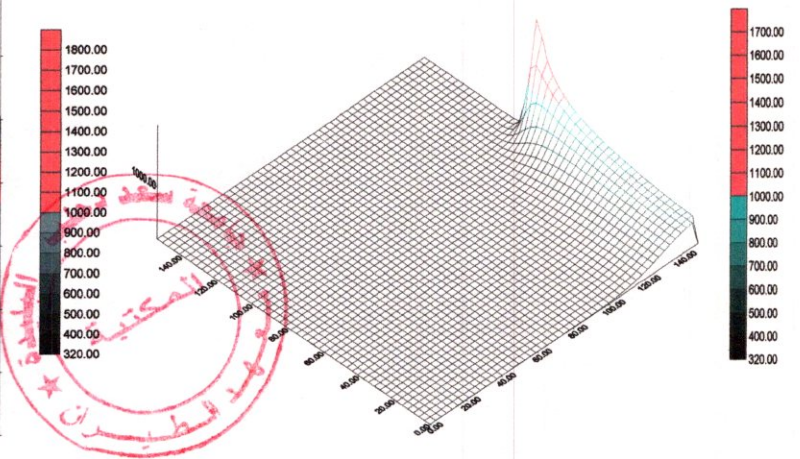


Fig. (V-16)

**T=60**

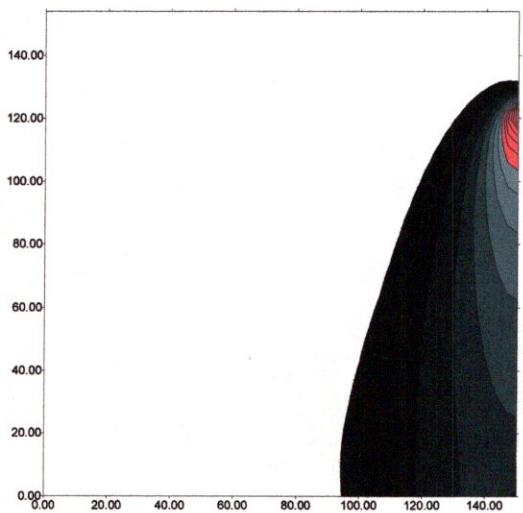


Fig. (V-17)

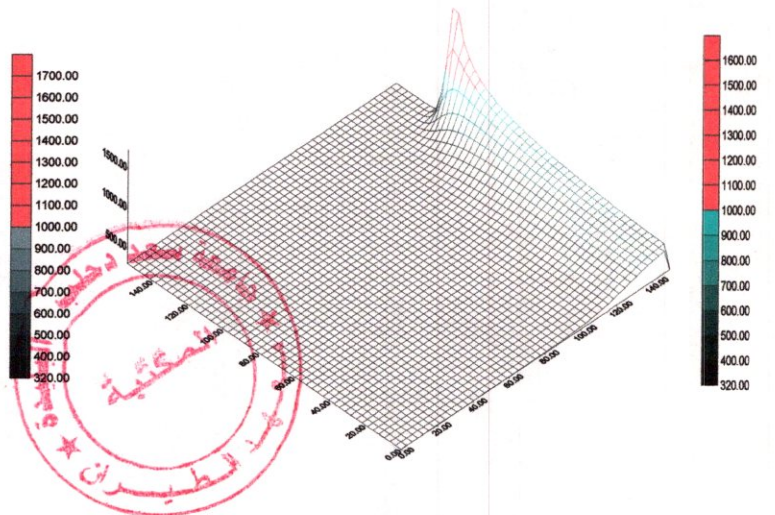


Fig. (V-18)

**T=80**

**V-I-DISCUSSION DES RESULTATS:**

Les figures (V-4), (V-6), (V-8), (V-10), (V-12), (V-14), (V-16), (V-18) représentent la distribution de la température sur la surface de la demi plaque. Les figures (V-3), (V-5), (V-7), (V-9), (V-11), (V-13), (V-15), (V-17) représente la distribution de la température définie par des isothermes, on observe alors une différence entre la distribution de chaleur du premier maillage 100(50+50) et le deuxième 100(50+70), cette différence se situe entre la valeur de la température d'un cycle a un autre entre les deux maillage , c'est-à-dire on a une nette augmentation de la précision de la valeur de la température

On peut à partir de la figure (V-5) et (V13) c'est-à-dire le même cycle qui est de T=30 pour les deux maillage 100\*(50+50) et 100\*(50+70) par exemple, déterminer l'intervalle de la température de la zone fondue (ZF) on alors obtient ce qui suit :

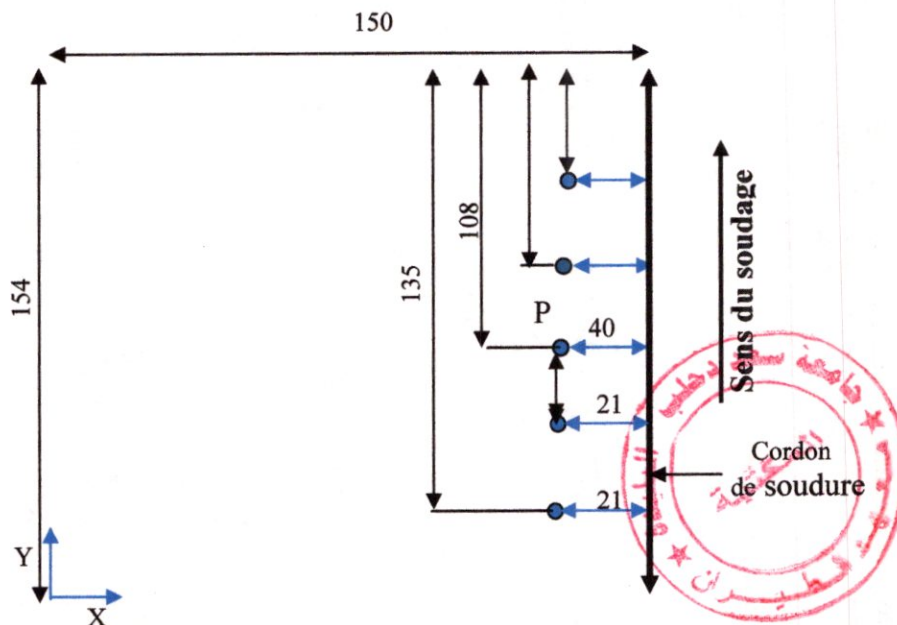
**Exemple :**

**Maillage 100\*(50+50) a T=30 / Fig. (V-5) : [927,1250] °C (ZF)**

**Maillage 100\*(50+70) a T=30 / Fig. (V13) : [927,1700] °C (ZF)**

**V-II- COMPARAISON DES CYCLES THERMIQUES :**

Dans cette partie on va démontrer l'influence du maillage sur les résultats du champ thermiques lors de l'opération de soudage pour cela nous allons prendre un point P qui a comme coordonnées (135,21.6) dans le maillage 100\*(50+50) et (108,40) dans le maillage 100\*(50+70). Dans un premier temps on va comparer les résultats du point P dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et dans un deuxième temps dans la zone fondue (ZF).



**Fig. (V-19) Position du point P dans chaque maillage**

**a- Cycle thermique pour la (ZAT) :**

Les graphes ci-dessous caractérisent les deux cycles thermiques pour deux maillages différents en l'occurrence le maillage 100(50+50) et 100(50+70) de la même plaque pour un point P situé dans une zone affectée thermiquement (ZAT). On constate que la température augmente rapidement en passant par un pique entre 207 et 484 °C, puis suit d'un refroidissement lent

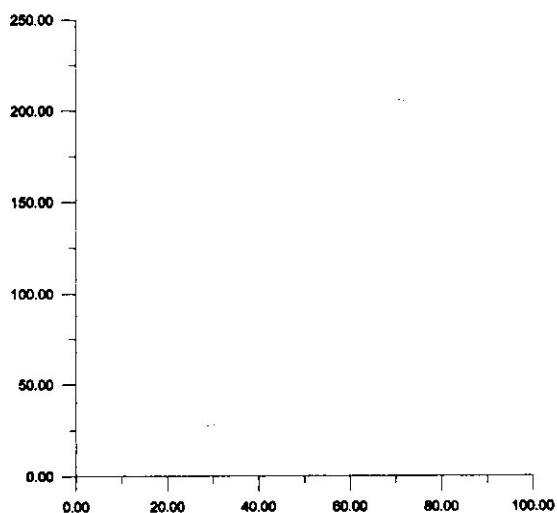


Fig. (V-20) Maillage 20-100\*(50+50)

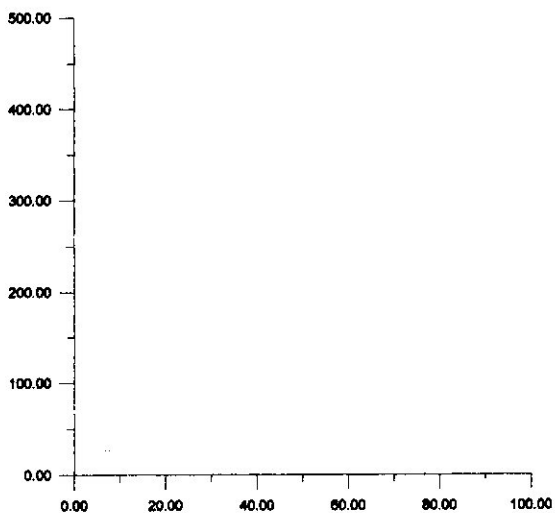


Fig. (V-21) Maillage 100\*(50+70)

Les deux figures nous donnent une comparaison entre un cycle thermique avec un maillage 100\*(50+50) et avec un maillage 100\*(50+70) les deux obtenus par un calcul numérique. On remarque qu'il y a une différence entre ces résultats, cela est dû à la différence de maillage le premier calcul est considéré comme un maillage macro ou autrement dit grossier, le deuxième est un maillage fin donc il y a plus de nœuds ce qui a comme effet d'augmenter la précision de la distribution du champ thermique.

**b- Cycle thermique pour la (ZF) :**

Les graphes ci-dessous représentent les deux cycles thermiques pour deux maillages différents en l'occurrence le maillage 100(50+50) et 100(50+70) de la même plaque pour un point P situé dans la zone fondue (ZF). On constate que la température augmente rapidement en passant par un pique entre 992 et 1593 °C, puis suit d'un refroidissement rapide.



## LES RESULTATS NUMERIQUES

Les données numériques seront introduites dans le programmes est affichées comme suit :

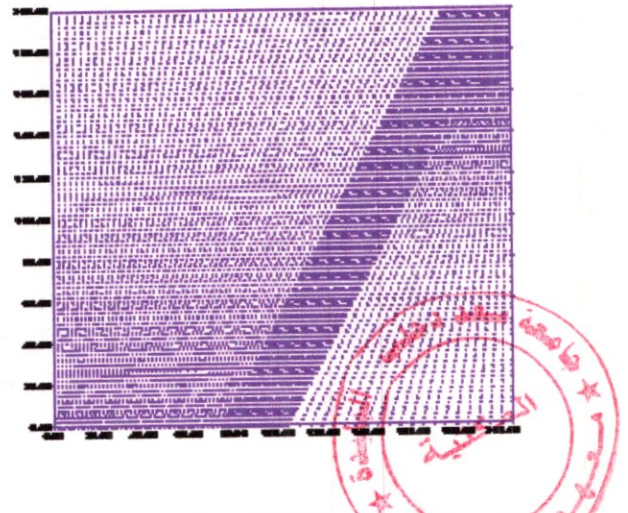
### V-I-2- GENERATION DU MAILLAGE :

#### 1- Maillage d'une demi plaque :



**Fig. (V.24)**  
Représentation de maillage d'une demie plaque

#### 2- Maillage d'une plaque complète :



**Fig. (V.25)**  
Représentation de maillage d'une plaque

#### **Suivant l'axe (OX) :**

Le maillage est divisé en deux zones distinctes, 1<sup>ère</sup> zone : 100 mm ; 50 volumes de contrôle, la 2<sup>ème</sup> zone : 100 mm ; 70 volumes de contrôle.

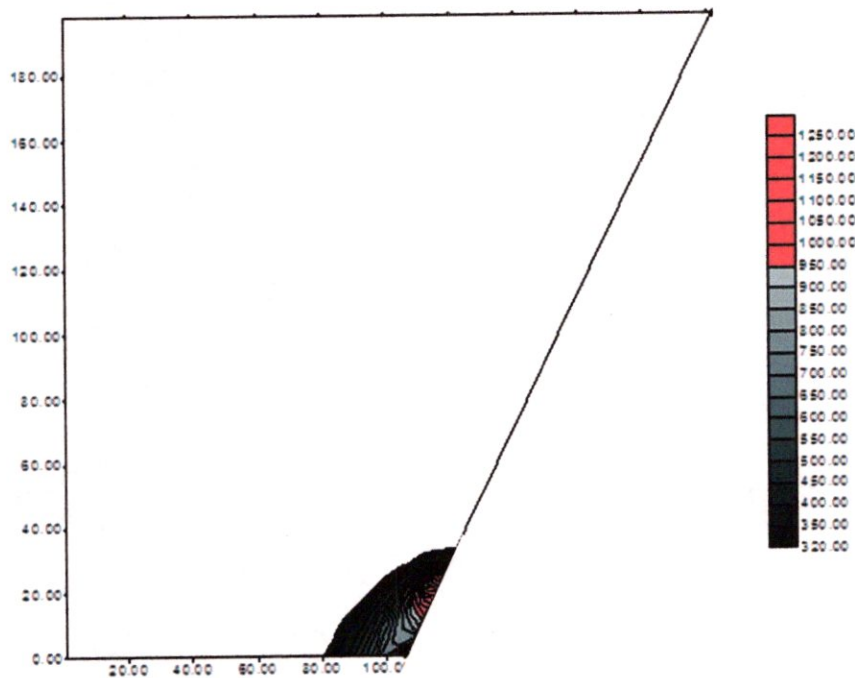
#### **Suivant l'axe (OY) :**

Il y a une seule zone ; 200 mm ; 70 volumes de contrôle.

**V-I-3- RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE :**

Les figures (V.26), (V.27), (V.28) et (V.29) représentent la distribution de la température par les contours isothermes dans la demi plaque, on observe aussi que la source de chaleur suit exactement la ligne de du cordon de soudure.

On remarque clairement que les contours isothermes sont plus denses en amont de la source de chaleur et elles sont de plus en plus dispersive au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers l'aval de la torche. On peut expliquer ça par le fait que la chaleur a eu suffisamment de temps pour ce propager par conduction dans les différentes directions de l'assemblage.



**Fig. (V.26)- Représentation des isothermes a  $t_0 = 10$**

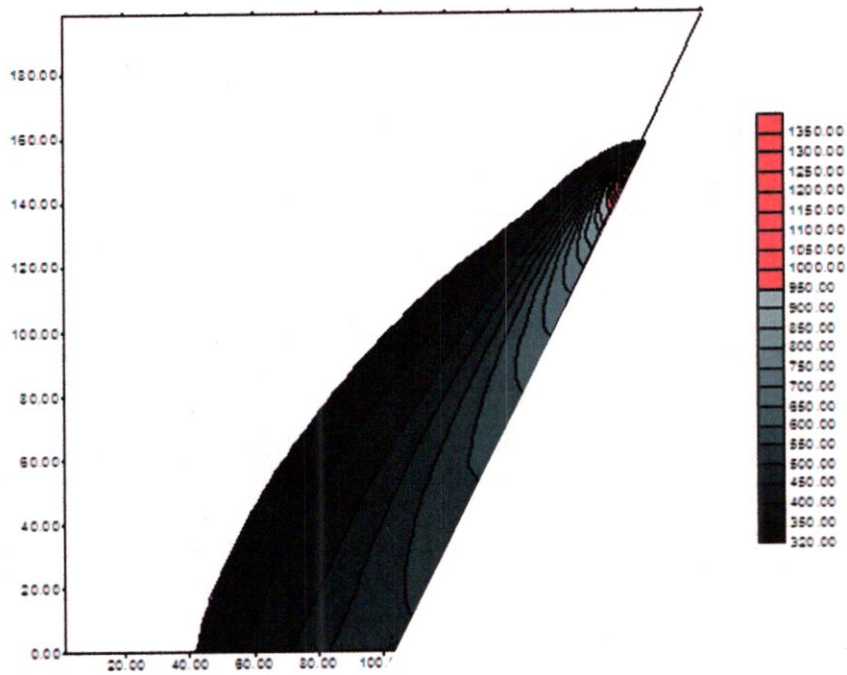


Fig. (V.29)- Représentation des isothermes a  $t_0 = 60$

**Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons pu obtenir des résultats numériques après 26 heures de calcul de la simulation du soudage d'un cordon de soudure incliné, grâce a ces résultats numériques on peut définir la température au niveau de la zone fondu (ZF) ce qui est impossible dans l'étude expérimentale.

**C. CORDON COURBE :**

**V-I-1 DONNEES DU PROGRAMME :**

Les données de la 3<sup>ème</sup> exécution sont données dans le tableau ci-dessous, comme dans la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> exécution nous utiliserons l'aluminium séries 2024 T3.

Tension du courant (volts)	Intensité du courant (Ampère)	Temps du soudage (secondes)	Débit du gaz de protection (l/min)	Gaz utilisé
15	60	102	14	Argon

**Données d'exécution.**

Les dimensions de la demi plaque sont :

- $L_y = 200$  mm (largeur)
- $L_x = 104$  mm (longueur)
- $L_{xc} = 6$  mm (largeur du cordon)
- $E_p = 1.8$  mm (épaisseur de la pièce)

Les conditions initiales et le rendement de l'arc sont :

- $T_\infty = 300$  °K
- $\eta = 0.4$ .

Comme pour le deuxième cas, nous simulerons l'opération du soudage seulement sur un demi plaque avec un cordon courbé.

**V-I-2-MAILLAGE D'UNE DEMI PLAQUE :**

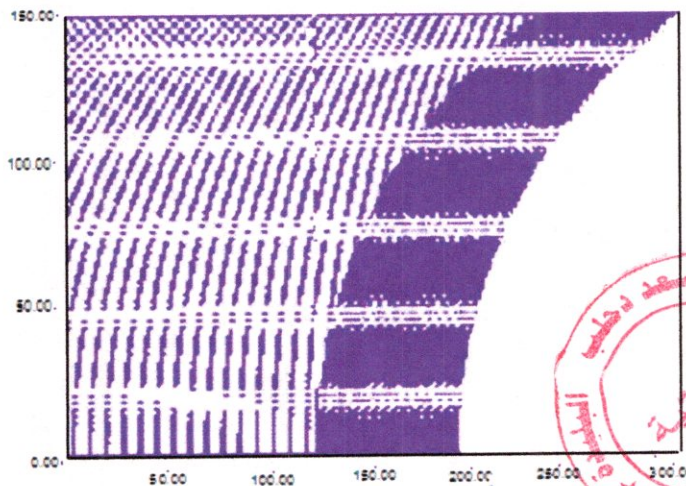
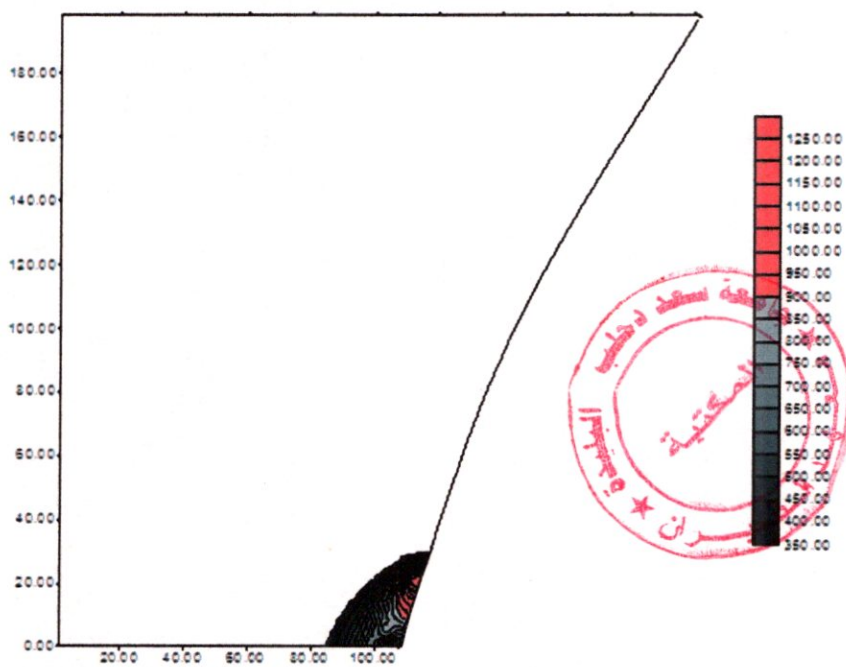


Fig.(V .30-a)Maillage courbé.

**V-I-3- RESULTATS DU CHAMP THERMIQUE :**

Les figures (V.30), (V.30), (V.30) et (V.30) représentent la distribution de la température par les contours isothermes dans la demi plaque, on observe aussi que la source de chaleur suit exactement la ligne de du cordon de soudure qui dans ce cas est une géométrie courbée.

On remarque distinctement que les contours isothermes sont plus denses en amont de la source de chaleur et elles sont de plus en plus dispersive au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vers l'aval de la torche. Cela s'explique par le fait que la chaleur a eu suffisamment de temps pour ce propager par conduction dans les différentes directions de l'assemblage.



**Fig.(V.30)- Représentation des isothermes a  $t_0 = 10$**

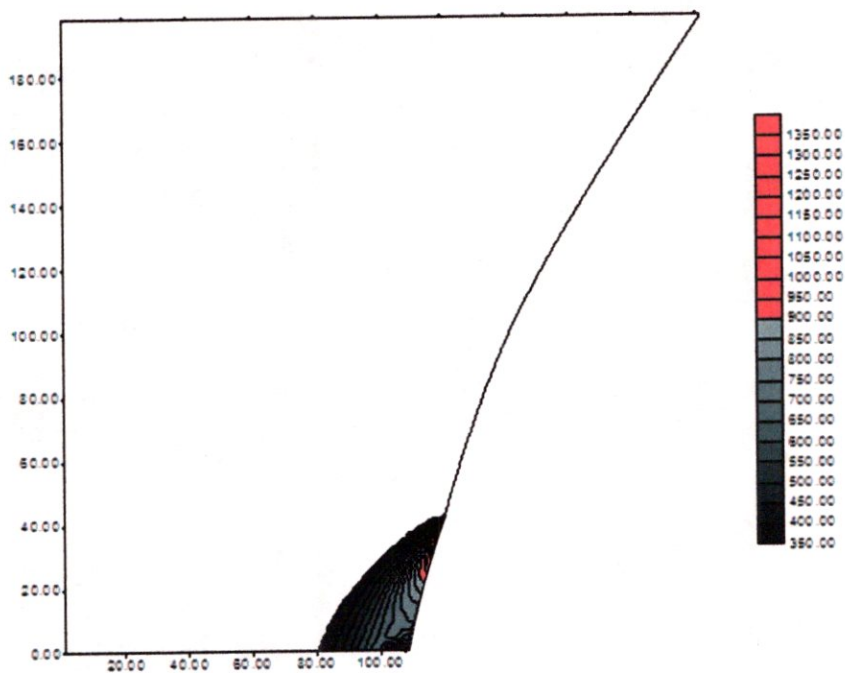


Fig.(V.31)- Représentation des isothermes a  $t_0 = 15$

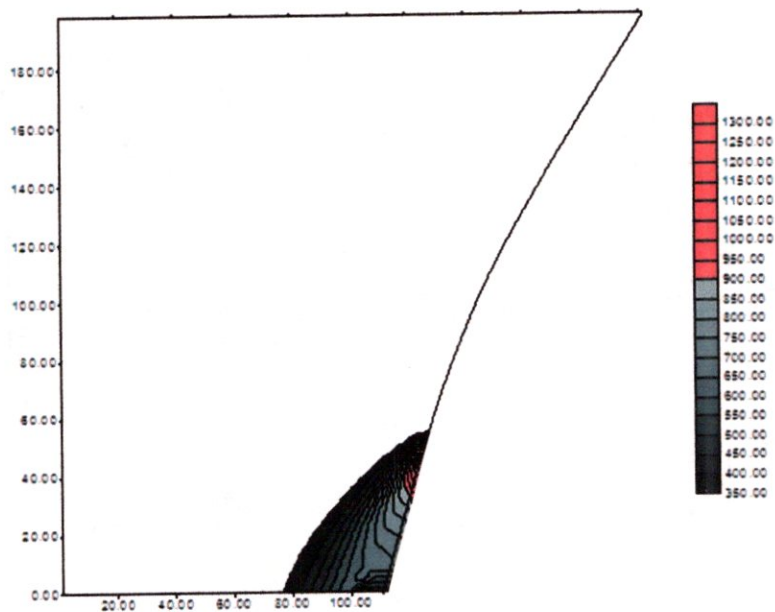


Fig.(V.32)- Représentation des isothermes a  $t_0 = 20$

## Conclusion générale

L'issue de notre travail effectué, concerne l'étude de la simulation numérique du procédé de soudage T.I.G, pour trois formes de cordon de soudure pour des tôles en aluminium séries 2024-T3, en utilisant la méthode des volumes finis. Pour notre modélisation nous avons pris une distribution gaussienne de la source de chaleur, avec un modèle de bain de fusion bi-elliptique et avec des propriétés physiques dépendantes du temps.

Nous avons pu, suite à un grand effort et en tenant compte du maillage selon la trajectoire de la source de chaleurs dans les trois cas (cordon rectiligne, incliné et courbé), déterminer la distribution des températures en exécutant un programme qui nous a données de bons résultats.

Notre travail a été basé sur la détermination de la distribution du champ thermique dans la zone affectée thermiquement ZAT, car cette zone est une zone à risque et la température dans chaque point doit rester inférieure à la température de fusion du métal.

La modélisation mathématique du problème avec un coefficient de conduction thermique  $K$  variable en fonction de temps a simulé le phénomène réel. La détermination de la valeur de la température dans la zone de fusion (ZF) s'avère impossible expérimentalement d'où la nécessité du calcul numérique.

En matière résultats, on peut conclure que les températures atteignent leur pique lors du passage de la source de chaleur, plus précisément dans le point situé au centre de la source. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source de chaleur la température diminue d'une manière rapide, ensuite un refroidissement plus au moins plus lent, qui est prouvé par le cycle thermique, le maillage étant très raffiné nous avons pu déterminer le champ des températures dans le cas

Dans cette continuité, la simulation numérique telle que les méthodes (Volumes Finis, Eléments finis et différences finies) rendues possible par le développement de fortes puissances de calcul, est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes résultant du soudage.

En perspective, On propose une simulation du même procédé en utilisant la méthode des volumes finis, avec plusieurs formes de cordon de soudure plus l'effet de l'épaisseur (3D).

On peut aussi proposer la simulation du même procédé, appliquer sur d'autres types de matériaux aéronautiques avec différentes formes de cordon.

Enfin, nous rappelons que le procédé du soudage TIG (Tungsten Inert Gaz) est valable pour les tôles de 3mm d'épaisseur au maximum nous proposons dans le futur une étude similaire sur le soudage par le procédé ATIG (Actif Tungstun Inert Gaz) qui permet le soudage des tôles de plus de 3 mm d'épaisseur.



**LES ANNEXES :**

## Annexe A

```
program maillage_demi-plaque

implicit doubleprecision (a-h,o-z)
double precision xll(2),yll(1),nx_cv(2),ny_cv(1)
double precision
fv_cx(1000,1000),fv_cy(1000,1000),x0(1000)
double precision vnx(1000,1000),vny(1000,1000)

call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
call long_facette_courb (L1,M1,xcv,ycv)
call cord_noeud (L1,M1,vnx,vny)

do 200 i=1,L1
do 100 j=1,M1
write(1,*)vnx(i,j),vny(i,j)

100 continue
200 continue

stop
end

double precision function Fxx(xx)
double precision xx
Fxx=0.5*xx

return
end

subroutine maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
implicit double precision(A-H,O-Z)
double precision xll(2),yll(1),nx_cv(2),ny_cv(1)
double precision fvcx(1000,1000),fvcy(1000,1000),x0(1000)
integer z,nzx,num,last,fx,nzy,numy,fy,lasty,numyx
parameter (nzx=2,nzy=1)
data xl/100,50/           !la longueur suivant x
data yl/154/             !la longueur suivant y
data nx_cv/50,30/        ! Nombre de maillage suivant x
data ny_cv/70/           ! Nombre de maillage suivant y
last=1
lasty=1
numyx=1
do 14 zy=1,nzy
do 13 fy=1,ny-cv(zy)+1
```

```

num=1
do 12 z=1,nzx
last=1
lasty=1
fx=1
do 11 fx=1+last,nx-cv(z)+last
num=num+1
if(numyx.eq.1)then
fvcy(num,numyx)=0.d0
else
fvcy(num,numyx)=yl(zy)*((fy-lasty)/nycv(zy))
endif
rx=fvcy(num,numyx)
if(num.eq.1)then
fvcx(num,numyx)=0
else
if(z.eq.1)then
fvcx(num,numyx)=(xl(z)+fxx(xx))*((fx-last)/nx-cv(z))
else
fvcx(num,numyx)=xl(z)*((fx-last)/nx-cv(z))+x0(numyx)
endif
endif
continue
x0(numyx)=fvcx(num,numyx)
12 continue
numyx=numyx+1
13 continue
numy=numyx-1
14 continue
return
end

```

```

subroutine long_facette_courb (L1,M1,xcv,ycv)
implicit double precision(A-H,O-Z)
double precision fvcx(1000,1000),fvcy(1000,1000),kx,ky,diff
double precision xcv(1000,1000),ycv(1000,1000)
integer l1,m1,num,numy
call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
L1=num-1
M1=numy-1
do 45 j=1,m1
do 44 i=1,L1
kx =fvcx(i+1,j)-fvcx(i,j)
xcv(i,j)=kx
diff=fvcx(i,j+1)-fvcx(i,j) ! theorme de pitagor pour trouver la longueur
ky =fvcy(i,j+1)-fvcy(i,j) ! de la facette suivant langle de la courbure
ycv(i,j)=sqrt(diff**2+ky**2)
44 continue
45 continue

```

```

return
end

subroutine cord_noeud (L1,M1,vnx,vny)
implicit double precision (A-H,O-Z)
double precision fvcx(1000,1000),fvcy(1000,1000)
double precision vnx(1000,1000),vny(1000,1000)
integer l1,m1,num,numy
call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
l1=num-1
m1=numy-1
do 56 j=1,m1
  do 55 i=1,l1
    vnx(i,j)=((fvcx(i+1,j)-fvcx(i,j))/2)+fvcx(i,j)
    vny(i,j)=((fvcy(i,j+1)-fvcy(i,j))/2)+fvcy(i,j)
55    continue
56    continue
return
end

```

```

Program maillage_plaque_complet

Implicit double precision(A-H,O-Z)
double precision fvcx(700,700),fvcy(700,700),vny(700,700)
double precision xcv(700,700),ycv(700,700),vnx(700,700)
integer num, numy

call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
call long_facette_courb (L1,M1,xcv,ycv)
call cord_noeud (L1,M1,vnx,vny)
do 123 j=1,numy
do 124 i=1,num
write(1,*)fvcx(i,j),fvcy(i,j)
124 continue
123 continue
  call affiche
stop
end
double precision function Fx(xx)

double precision xx

Fc=.0d0*xx

return
end

```

```

subroutine maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
implicit double precision(A-H,O-Z)
double precision xl(3),yl(1),nxcv(3),nycv(1),xl_pla
double precision fvcx(700,700),fvcy(700,700),x0(9000),z0(9000)
integer z,nzx,num,last,fx,nzy,numy,fy,lasty,numyx,nx
parameter (nzx=3,nzy=1)
data xl/74,10,100/
data yl/200/
data nxcv/50,15,20/
data nycv/80/
xl_pla=xl(1)+xl(2)+xl(3)

nx=nxcv(1)+nxcv(2)+1
write(*,*)xl_pla,nx
last=1
lasty=1
numyx=1
do 14 zy=1,nzy
  do 13 fy=1,nycv(zy)+1
    num=1
    do 12 z=1,nzx
      last=1
      lasty=1
      fx=1
      do 11 fx=1+last,nxcv(z)+last
        num=num+1
        if(numyx.eq.1)then
          fvcy(num,numyx)=0.d0
        else
          fvcy(num,numyx)=yl(zy)*((fy-lasty)/nycv(zy))
        endif
        rx=fvcy(num,numyx)
        if(num.eq.1)then
          fvcx(num,numyx)=0
        else
          if(z.eq.1)then
            fvcx(num,numyx)=(xl(z)+Fx(xx))*((fx-last)/nxcv(z))
          else
            if(z.eq.3)then
              fvcx(num,numyx)=z0(numyx)*((fx-last)/nxcv(z))+fvcx(nx,numyx)
            else
              fvcx(num,numyx)=xl(z)*((fx-last)/nxcv(z))+x0(numyx)
            endif
          endif
        endif
      enddo
    enddo
  enddo
11 continue
  x0(numyx)=fvcx(num,numyx)
  z0(numyx)=(xl_pla-fvcx(nx,numyx))
12 continue
  numyx=numyx+1

```

```

13     continue
        numy=numyx-1
14     continue
        return
        end

subroutine long_facette_courb (L1,M1,xcv,ycv)
implicit double precision(A-H,O-Z)
double precision fvcx(700,700),fvcy(700,700),kx,ky,kf
double precision xcv(700,700),ycv(700,700)
integer l1,m1,num,numy
call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
L1=num-1
M1=numy-1
do 45 j=1,m1
  do 44 i=1,L1
    kx =fvcx(i+1,j)-fvcx(i,j)
    xcv(i,j)=kx
    kf=fvcx(i,j+1)-fvcx(i,j) ! theorme de pitagor pour trouver la longueur
    ky =fvcy(i,j+1)-fvcy(i,j) ! de la facette suivant langle de la courbure
    ycv(i,j)=sqrt(kf**2+ky**2)
44     continue
45     continue
        return
        end

subroutine cord_noeud (L1,M1,vnx,vny)
implicit double precision (A-H,O-Z)
double precision fvcx(700,700),fvcy(700,700)
double precision vnx(700,700),vny(700,700)
integer l1,m1,num,numy
call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
l1=num-1
m1=numy-1
do 56 j=1,m1
  do 55 i=1,l1
    vnx(i,j)=((fvcx(i+1,j)-fvcx(i,j))/2)+fvcx(i,j)
    vny(i,j)=((fvcy(i,j+1)-fvcy(i,j))/2)+fvcy(i,j)
55     continue
56     continue
        returnend

```

```
subroutine affiche !(t0)
  implicit double precision (A-H,O-Z)

  double precision vnu(700,700)
  double precision fvcx(700,700),fvcy(700,700)

  double precision vnx(700,700),vny(700,700)
  integer l1,m1,num,numy
  call maillage_courb(num,numy,fvcx,fvcy)
  call cord_noeud (L1,M1,vnx,vny)
  open(unit=1,file='sd_affl0.dat',status='unknown')
  do 888 j=1,m1+1
  do 779 i=1,l1+1
  write(1,*)fvcx(i,j),fvcy(i,j)
779  continue
888  continue
  return
  end
```

## Annexe B

### ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM

On utilise à 90% des aciers et alliages à base de fer. Cependant pour certaines applications les propriétés des alliages de fer sont insuffisantes. C'est pourquoi on est amené à utiliser des alliages différents, tel que les alliages d'aluminium même s'ils sont plus coûteux.

#### • PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES :

##### · Propriétés de l'aluminium :

##### CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

Z=13

M=26.974

R (atomique) = 0.1428 nm

Distance interréticulaire = 0.4049 nm

Structure de CFC (Cubique Faces Centrées)

Compacité = 0.74

Masse volumique = 2700kg/m<sup>3</sup> => faible => utilisé en aéronautique

Conductibilité électrique :

-62% de celle du Cuivre

-s'échauffe moins que le cuivre

##### CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

Résistance à la corrosion :

Couche d'oxyde naturel (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) => utilisé pour les revêtements extérieurs dans le bâtiment

##### Propriétés mécaniques :

A l'origine les propriétés mécaniques de l'alu sont relativement faible, néanmoins on peut les améliorer par :

- Ecrouissage
- Addition d'éléments
- Traitement thermique



## Propriétés de mise en forme :

CFC => excellente ductibilité

T (fusions) basse = 660°C

- Facile à mettre en forme
  - \_ Module élasticité : 67 000 MPa
  - \_ module de torsion : 27 000 MPa
  - \_ Coefficient de Poisson : 0.34

## · Propriétés des alliages d'aluminium :

- Température de travail élevée
- Très bonne résistance à la corrosion
- Léger
- Très bonne solidité, dureté, et rigidité
- Bon rapport force/poids
- Bonnes propriétés de protection contre les interférences électromagnétiques
- Bonne conductivité thermique
- Conductivité électrique élevée
- Bonnes caractéristiques de finition
- Entièrement recyclable

## · LES DIFFERENTS ALLIAGES D'ALUMINIUM :

### QUELQUES DEFINITIONS UTILES :

· **Corroyer** : mise en forme des demi-produits et des produits finis par déformation à chaud.

· **Non trempant** : qui peuvent ne subir aucun durcissement structural.

· **Trempant** : à durcissement structural.

**Durcissement structural** : procès thermique qui permette d'avoir une répartition optimale des précipités.

Comporte trois stades :

- Mise en solution à haute température de l'élément d'addition.

- Trempe : baisse rapide de la température jusqu'à la température ambiante, en vue d'obtenir une solution solide sursaturée.

- Vieillessement à une température inférieure à celle du solvus, en vue de favoriser un retour partiel vers les conditions d'équilibre et d'obtenir ainsi les propriétés mécaniques visées.

## **ALLIAGES SANS DURCISSEMENT STRUCTURAL**

### • **Série 1000** : (99% Al au mois)

- Propriétés faibles à l'état recuit ECROUISSAGE
- Mise en forme par déformation plastique à froid.
- Excellente tenue en atmosphère humide et marine
- Grande conductibilité électrique et thermique.
- Excellente tenue aux très basses températures.

### • **Série 3000** : (Al-Mn )

- Très facile à déformer.
- Bonne résistance à la corrosion.
- Facilement soudable

Remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 quand on veut des meilleures propriétés mécaniques.

### • **Série 5000** : (Al-Mg )

Un séjour prolongé à la température ambiante ou à une température un peu plus élevée provoque une précipitation de  $Mg_2Al_3$  aux joints de grains, ce qui a des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion. Pour palier cette tendance, on soumet des alliages à écrouissage + recuit de stabilisation.

- Grande aptitude aux transformations à chaude et à froid.
- Excellente soudabilité.
- Très bonne résistance à la corrosion (on peut le monter encore plus par anodisation)
- Grande qualité de leurs états de surface après polissage et anodisation.

## **ALLIAGES À DURCISSEMENT STRUCTURAL.**

### • **Série 2000** : (Al-Cu et Al-Cu-Mg)

• Durcissement dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre  $CuAl_2$  et  $CuMgAl_2$ .

• Excellentes propriétés mécaniques (descendent pour les zones adjacentes aux cordons de soudure).

• En rajoutant Fe + Ni, nous obtenons une précipitation de  $Al_9FeNi$  qui nous donne une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (fabrication des moteurs à turbine et structures d'avions supersoniques).

• À l'état trempé et vieille on a résistance médiocre à la corrosion.

· **Série 6000** : (Al-Mg-Si)

· Normalement on a un rapport massique Mg/Si=1.73, si on a un excès de silicium on monte les propriétés mécaniques, mais on descend la résistance à la corrosion.

· En rajoutant Mn + Cr on monte la résistance mécanique, la ténacité, et on affine la taille des grains.

· En rajoutant Cu (< 0.5%) on monte les propriétés mécaniques.

· Excellente aptitude à la mise en forme à chaud.

· Bonne soudabilité

· Excellente résistance à la corrosion

· **Série 7000** : (Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu)

· Propriétés mécaniques les plus élevées (après traitement thermique)

· Cu (<2%) durcit les alliages, descendre rempabilité, soudabilité et ténacité.

· + Cr (<0.3%) : on augmente leur résistance à la corrosion sous tension.

· Grand intervalle de températures de mise en solution + trempabilité + baisses températures de

· Vieillessement se prêtent à traitements thermiques + soudabilité

· Faible résistance à chaud.

· **Alliages de fonderie**

Les opérations de fonderie telle que la coulée du métal liquide, la solidification, ou le refroidissement du métal, déterminent les propriétés de l'alliage.

**Exemples d'alliages d'aluminium :**

Al-Cu : mauvaise coulabilité (+ Ni +Mg => bonnes propriétés à chaud)

Al-Si : Les plus utilisés

5 < %Si < 20

-bonne coulabilité

-bonne résistance à la corrosion

Al-Mg : Excellente résistance à la corrosion en atmosphère marine et à l'eau de mer  
Mais coulabilité médiocre

Al-Zn-Mg : Une variation de la vitesse de refroidissement n'entraîne pas de changement des propriétés mécaniques (indépendant de l'épaisseur de la pièce)

CCL : L'aluminium et ses alliages sont utilisés partout !

## Annexe C

Programme TDMA

TEMP (nn), AX (nn), A (nn), B (nn), C (nn) :reel(1000);

wk (nn), temp1 (nn) réel(1000) ;

DX, Tinf, TB, L, SP, an2 :réel ;

Tinf=20,

TB=100,

L=1,

an2=25;

!----- calcul du pas dans l'espace (DX)-----

DX = L/(NN - 1) ;

ecrire (\*,\*)'DX = ', dx

!-----FORMATION DES VECTEURS DES DIAGONALES-----

!-----diagonale inférieure-----

A (1) = 0.0;

pour i = 2, nn-1

A (i) = - 1/DX;

finpour

!-----diagonale supérieure-----

pour i = 1, nn-2

C (i) = - 1/DX;

finpour

C (nn-1) = 0;

!-----diagonale principale--

SP = - an2\*DX;

pour i = 1, nn-2

B (i) = 1/DX + 1/DX - SP ;

finpour

B (nn-1) = 1/DX - SP/2;

```

!-----formation du vecteur du terme libre (wk)-----
    wk (1) = an2*DX*TINF + (1/DX)*TB    ;
    pour j = 2, nn-2
        wk (j) = an2*DX*TINF ;
    finpour
    wk (nn-1) = an2*DX*TINF/2;
!-----RESOLUTION DU SYSTEME-----
CALL TRIDAG (a, b, c, wk, temp1, nn -1)    ;
!-----formation de la solution finale sur tout le domaine-----
temp (1) = TB ;
    pour j = 2, nn
        temp (j) = temp1 (j-1);
    finpour
!-----formation du vecteur pour les points de calcul sur "x"-----
    AX (1) = 0;
    pour j = 2, NN
        AX(j) = AX (j-1) + DX ;
    finpour
!===== ECRIRE la solution =====
    pour j = 1, nn
        ecrire (ax (j), temp (j) )
    finpour
fin
    SouprogrameTRIDAG (a, b, c, r, u, n)
j entier;
a (n), b (n), c (n), r (n), u (n) :reél(1000) ;
bet, gam (NMAX) :entier(1000);!
!-----a = diagonale inférieure
!-----b = diagonale principale
!-----c = diagonale supérieure
!-----r = le terme de la partie droite

```

!-----u = le terme inconnu  
!-----n = longueur de la diagonale (la dimension du système)  
!-----NMAX = le nombre maximal d'équations à résoudre

Si (b (1) = 0)

    ecrire(rewrite equations !)

    Sinon

bet = b (1) ;

u (1) = r (1) / bet ;

!-----Décomposition et substitution en avante

pour j = 2, n

    gam (j) = c (j-1) / bet ;

    bet = b (j) - a (j)\*gam (j) ;

    Si(bet = 0.)

        ecrire(rewrite equations !)

        Sinon

        u (j) = (r (j) - a (j)\*u (j-1)) / bet ;

    finpour

!-----Substitution en arrière

pour j = n-1, 1 pas(-1)

    u (j) = u (j) - gam (j+1)\*u (j+1) ;

finpour

FIN

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I :

- FIGURE I.1- les Transfert d'énergie en procédé TIG.
- FIGURE I.2- Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie.
- FIGURE I.3- Soudage à l'arc avec électrode fusible sous flux gazeux.
- FIGURE I.4- Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG.
- FIGURE.I.5- Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG.
- FIGURE.I.6- Représentation schématique de la vitesse de croissance en fonction de la vitesse de soudage dans un bain de fusion bi elliptique.
- FIGURE.I.7- Dispositif de soudage TIG.
- FIGURE.I.8- Principe du procédé de soudage TIG simple flux.
- FIGURE.I.9- Forme de l'arc électrique de soudage TIG.
- FIGURE.I.10- Evolution de la tension d'arc sous argon et sous hélium suivant l'intensité Appliquée
- FIGURE.I.11- Dispositif de soudage TIG.
- FIGURE..I.12- Système de bridage et de répartition des flux gazeux.

### CHAPITRE II :

- FIGURE.II.1- Bilan d'énergie.
- FIGURE.II.2- Schéma du processus de soudage de deux tôles.
- FIGURE.II.3- exemple de modèles de source volumiques.
- FIGURE.II.4- Figure. II.4 : décomposition de la vitesse dans le cas d'un cordon courbé
- FIGURE.II.5- Propriétés physiques de l'aluminium.
- FIGURE.II.6- Variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

### CHAPITRE III :

- FIGURE.III.1- Le volume de contrôle.
- FIGURE III.2- Volume de contrôle en deux dimensions. .
- FIGURE.III.3- Loi de variation locale de «T» pour la discrétisation en temps.
- FIGURE.III.4- Illustration des zones A et B.
- FIGURE III.5- Volume de contrôle dans le cas unidimensionnel.
- FIGURE III.6- types de loi de variation pour T.

### CHAPITRE IV :

- FIGURE.IV.1- Le principe du calcul numérique.
- FIGURE.IV.2- Mode d'avancement dans la méthode ligne par ligne.
- FIGURE.IV.3- Illustration des zones (1) et (2)

**CHAPITRE V :**

- FIGURE.V.1 Données d'exécution.
- FIGURE.V.2 Représentation du maillage.
- FIGURE.V.3.a Répartition de champs thermique a  $t_0 = 5$ .
- FIGURE.V.4.a- Représentation des isothermes a  $t_0 = 5$ .
- FIGURE.V.5.a- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 20$ .
- FIGURE.V.6.a- Représentation des isothermes a  $t_0 = 20$ .
- FIGURE.V.7.a- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 60$ .
- FIGURE.V.8.a- Représentation des isothermes a  $t_0 = 60$ .
- FIGURE.V.9.a- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 80$ .
- FIGURE.V.10.a- Représentation des isothermes a  $t_0 = 80$ .
- FIGURE.V.3.b- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 5$ .
- FIGURE.V.4.b- Représentation des isothermes a  $t_0 = 5$ .
- FIGURE.V.5.b- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 20$ .
- FIGURE.V.6.b- Représentation des isothermes a  $t_0 = 20$ .
- FIGURE.V.7.b- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 60$ .
- FIGURE.V.8.b- Représentation des isothermes a  $t_0 = 60$ .
- FIGURE.V.9.b- Répartition de champs thermique a  $t_0 = 80$ .
- FIGURE.V.10.b- Représentation des isothermes a  $t_0 = 80$ .
- FIGURE.V.11- Les thermocouples collés a la plaque.
- FIGURE.V.12- L'appareil d'enregistrement des températures.
- FIGURE.V.13- Position d'implantation des thermocouples.
- FIGURE.V.13- Cycle thermique capté par chaque thermocouple.
- FIGURE.V.14- Cycles thermiques, numérique et expérimental du point P.
- FIGURE.V.15- Données d'exécution.
- FIGURE.V.16- Forme de la demi plaque à souder (cordon incliné).
- FIGURE.V.17- Représentation du maillage de la demi plaque.
- FIGURE.V.18- Représentation du maillage de la plaque.
- FIGURE.V.19- Représentation des isothermes a  $t_0 = 05$  (06 sec).
- FIGURE.V.20- Représentation des isothermes a  $t_0 = 10$  (13 sec).
- FIGURE.V.21- Représentation des isothermes a  $t_0 = 15$  (19 sec).
- FIGURE.V.22- Représentation des isothermes a  $t_0 = 20$  (25 sec).
- FIGURE.V.23 Les thermocouples collés a la plaque A10.
- FIGURE.V.24- Cycle thermique capté par chaque thermocouple.
- FIGURE.V.24- Cycle thermique capté par le thermocouple 5.



## Bibliographie

- . Internet : Site web ; [www.Wikipédia.com](http://www.Wikipédia.com).
- . Internet : Site web ; [www.engineersedge.com](http://www.engineersedge.com)
- . Atelier de propulsion, département d'aéronautique de Blida.
- . Internet : Site web : [www.soudeur.com](http://www.soudeur.com).
- . ROSENTHAL.D: "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", Welding Journal (1947), 20May, PP.220\_s to 234\_s.
- . Mouloud Aissani, halim maza, brahim belkassa et Younes Benkeda: «Calcul théorique d'énergie par un modèle de source a distribution gaussienne du soudage TIG des tôles minces d'acier austénitique 304 la méthode des éléments finis».proceeding du 5<sup>ème</sup> journée de mécanique D'EMP Le 23-28/03/2006.(Bordjel-Bahri. Alger).
- . A.JARDY et H.COMBEAU : " Simulation numérique des phénomènes de transport"2002.
- . S.V.Pathancar, « numerical heat tranfer and fluid flow» Mac graw hill book company, 1989.
- . Mouloud Aissani, calcule des paramètre d'écoulement dans les conduites à section complexes par la méthode des éléments finis, 03/07/2002.
- . Le procédé T.I.G ; PIERRE DAIGLE, Centre de formation professionnelle de l'outawais.
- . Simulation du soudage-Acier316L.validation sur cas testes de complexité croissante ; loinel Depradeux, INSA Lyon 2003.
- . R.Varizllag « Soudage : élément de conception et de réalisation».
- . N.Hermez - M.Djenane ; « simulation numérique de transfert de chaleur lors de soudage à L'arc électrique des assemblages à faible épaisseur mémoire de fin d'études, option, thermo-energetique »Université USTHB, 2001.
- . Technique d'ingénieur- section Aéronautique- Chapitre IV Matériaux.
- . R.BAUS, W.Chapeau «Application du soudage à la construction».
- . Mr M.AISSANI, H.HAMZA et BELKASSA: "Simulation du phénomène transitoire du transfère de chaleur lors du soudage TIG des tôles minces et pipelines avec confrontation expérimentale". Article de "2<sup>nd</sup> International Symposium On hydrocarbons And Chimisrty" mars, 2004.