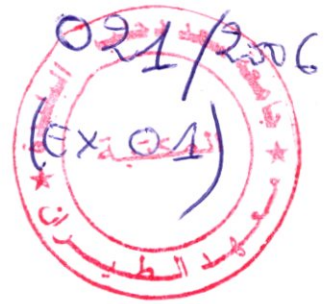


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES EN VU D'OBTENTION
DE DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN AERONAUTIQUE
OPTION : PROPULSION

THEME

Etude de l'effet de l'inclinaison d'une soudure par TIG
sur la répartition du champ thermique
d'un assemblage en matériaux aéronautique

REALISER PAR :

BENAZZOUZ SAID.
OUCHEBER REDHOUANE.

PROPOSER ET DIRIGER PAR:

Mr. AISSANI MOULOUD

2005 - 2006

RESUME

Ce travail contribue dans la modélisation du phénomène du soudage de l'aluminium séries 2024-T3, afin d'étudier le comportement thermique d'un joint de soudure en deux formes différentes, obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique TIG (Tungsten-Inert-Gas).

Le modèle simulant 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 bi-elliptique, tout en procédant à l'évaluation des champs et cycles thermiques à chaque instant, pour déterminer l'étendu des zones à risque, et l'effet de la vitesse de soudage sur ces dernières. Permettant ainsi de remonter 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 convection et rayonnement, sont dépendante de la température. Pour évaluer la précision du modèle, une comparaison avec des mesures expérimentales de température d'un essai de soudage a été effectuée, les résultats indiquent un bon accord.

SUMMARY

This work contributes in the modeling of the phenomenon of the welding of aluminium series 2024-T3, in order to study the thermal behaviour of a joint of welding in two different forms, obtained by the process of arc welding TIG (Tungsten-Inert-Gas).

The model simulating the source of energy of welding uses a surface distribution Gaussian of the heat flow coming from the electric arc. The form of this source is supposed to be Bi-elliptic, while carrying out the evaluation of the fields and thermal cycles at every moment, to determine wide zones at the risk, and the effect the speed of welding on these last. Thus allowing going up thereafter, with the problems of residual stresses and deformations generated in the welded joint. The equation of heat governing the problem is discredited 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 convection and radiation, are dependent on the temperature. To evaluate the precision of the model, a comparison with experimental measurements of temperature of a test of welding was carried out; the results indicate a good agreement.

REMERCIEMENTS

On remercie Dieu de nous avoir donner la force et le courage à bien finir ce travail.

On tient à remercier particulièrement notre promoteur Mr M. AISSANI pour ces conseils et son suivi continu.

On dresse également nos remerciements à l'ensemble des enseignant de l'institut d'aéronautique, surtout les membres de jurés qui ont acceptés de juger notre travail.

Enfin, on adresse nos remerciements a notre ami ALI KALKOULI et à tous ceux qui nous ont aider a faire se travail de prêt ou de loin.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Mon père et ma mère qui ont été toujours à mes coté.
Mes frères et ma soeur.
Marie Cheminat.
Mes amis et toutes la promotion *AERO* 2005 -2006.

B.SAID

Je dédie ce travail à :

La mémoire de mon père.
Ma mère qui a été toujours présente à mes coté.
Mes soeurs et mes frères.
Mes amis et toute la promotion *AERO* 2005-2006.

O.REDHOUANE

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

| symbole | signification | unité |
|---------------|---|---------------------------------|
| C_p | Chaleur massique à pression constante | J/kg K° |
| E_n | Energie nominale | J/m |
| E_d | Energie dissipée dans le joint soudé | J/m |
| E_q | Energie équivalente | J/m |
| ρ | Masse volumique | Kg/m ³ |
| σ | Constante de stephan-Boltzman | W/m ² K ⁴ |
| h | Coefficient de convection | W/m ² K° |
| K | Conductivité thermique | W/m K° |
| Q | Flux de chaleur par unité de surface | W/m ² |
| I | Intensité de courant | A |
| U | Tension | V |
| T | Température | C° ou K° |
| V | Vitesse de déplacement de l'arc | m/s |
| ε | Emissivité | |
| L | Longueur d'arc | m |
| δx | Distance entre deux nœuds voisins dans la direction x | m |
| δy | Distance entre deux nœuds voisins dans la direction y | m |
| Δx | Longueur d'un volume de contrôle | m |
| Δy | Largeur d'un volume de contrôle | m |
| X, Y | Variable indépendant | m |
| Δt | Pas temporel | Sec |
| t | Temps | Sec |
| η | Rendement | % |
| P_e | Nombre de pecllet | |
| S | Terme source dans les équation discrétisées | |
| S_c, S_p | Partie constante de la linéarisation du terme source | |
| E | Nœud Est | |
| e | Interface du volume de contrôle entre Pet 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 | |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

- FIGURE I.1- les différents procédés du soudage.
- FIGURE I.2- Comparaison d'énergie.
- FIGURE I.3- Le Procédé T.I.G.
- FIGURE I.3.a- Poste de soudage T.I.G.
- FIGURE I.4- l'arc électrique.
- FIGURE I.5- Quelques valeurs du rendement de l'arc (d'après J.C.WALTER).
- FIGURE I.5.a- Courant continu a polarité normale.
- FIGURE I.5.b- Courant continu a polarité inverse.
- FIGURE I.6- Différent gaz de protection utilisés.
- FIGURE I.7- Application des aciers en aéronautique.
- FIGURE I.8- Soudure d'une aube de turbine du moteur équipant l'hélicoptère MI-8.
- FIGURE I.9- Soudure d'une tuyère d'échappement du turbopropulseur équipant l'hélicoptère MI-8.
- FIGURE I.10- Soudure de la tuyère du banc d'essai du moteur Artouste.
- FIGURE I.11- Soudure du réservoir d'huile du banc d'essai du moteur Artouste.
- FIG.I.11- Soudure du réservoir de carburant en aluminium du banc d'essai du moteur Artouste.

CHAPITRE II :

- FIGURE.II.-1- Bilan d'énergie.
- FIGURE.II.2- Configuration de quelques types de source surfacique à distribution Gaussienne.
- FIGURE.II.3- Décomposition de la vitesse dans le cas d'un cordon courbé.

CHAPITRE III :

- FIGURE.III.1- Emplacement des nœuds (1) et des faces de volume de contrôle (2) pour le procédé A.
- FIGURE III.2- Demi volume de contrôle pour le procédé A.
- FIGURE.III.3- Emplacement des nœuds (2) et des faces de volume de contrôle (1) pour le procédé B.
- FIGURE.III.4- Demi volume de contrôle pour le procédé B.
- FIGURE III.5- Distance entre des nœuds voisins.
- FIGURE III.6- Un volume de contrôle dans le cas unidimensionnel.
- FIGURE III.7- Types de loi de variation pour T.
- FIGURE.III.3- Un volume de contrôle bidimensionnel.
- FIGURE III.4- Loi de variation locale de «T» pour la discrétisation en temps.
- FIG.III.5 Illustration des Frontières du demi plaque pour un cordon rectiligne.
- FIGURE.III.6- Illustration domaine à mailler dans le cas d'un cordon rectiligne.
- FIGURE.III.7- Transformation d'un domaine simplement connexe à un rectangle.
- FIGURE.III.8- Illustration des frontières du demi plaque pour un cordon courber.
- FIGURE.III.9- Génération des nœuds sur les cotés 1 et 2.
- FIGURE.III.10- Génération des nœuds sur le coté 3.
- FIGURE.III.11- Discrétisation sur le coté AD.

CHAPITRE VI :

- FIGURE.IV.1- Numération des nœuds du réseau.
- FIGURE.IV.2- Illustration des modes d'avancement de la méthode ligne par ligne.

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.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| RESUME..... | I |
| REMERCIEMENT..... | II |
| DEDICACES..... | III |
| NOMENCLATURE DES SYMBOLES..... | IV |
| LISTE DES FIGURES..... | V |
| | |
| INTRODUCTION GENERALE..... | VI |
| | |
| CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | |
| | |
| I.1 GENERALITEES..... | 1 |
| I.2 PROCEDES DE SOUDAGE..... | 2 |
| I.3 LE SOUDAGE A L'ARC..... | 3 |
| I.3.1 Le soudage à l'électrode enrobée..... | 3 |
| I.3.2 Le soudage avec fils pleins (GMAW)..... | 3 |
| I.3.3 Le soudage avec une électrode réfractaire..... | 3 |
| I.3.4 Le soudage à arc submergé sous flux solide..... | 3 |
| I.4. PRINCIPE DU SOUDAGE T.I.G..... | 4 |
| I.4.1 Formation du bain de fusion..... | 5 |
| I.4.2 Avantages et inconvénients du soudage T.I.G..... | 6 |
| I.5 L'ARC ELECTRIQUE..... | 7 |
| I.5.1 La cathode..... | 7 |
| I.5.2. L'anode..... | 8 |
| I.5.3 La colonne d'arc..... | 8 |
| I.6 PROPRIETES ENERGETIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE..... | 9 |
| I.6.1 Flux énergétique dans la colonne d'arc..... | 9 |
| I.6.2 Température dans la colonne d'arc..... | 9 |
| I.6.3 L'énergie Nominale..... | 9 |
| I.6.4 L'énergie dissipée dans le joint soudé..... | 9 |
| I.6.5 Le rendement de l'arc électrique..... | 10 |
| I.6 CARACTÉRISTIQUES DU COURANT..... | 11 |
| I.6.1 Courant continu..... | 11 |
| I.6.2 Courant alternatif..... | 12 |
| I.7 LES GAZ DE PROTECTION..... | 12 |
| I.7.1 L'argon..... | 12 |
| I.7.2. L'hélium..... | 13 |
| I.8 APPLICATION DU SOUDAGE T.I.G..... | 14 |
| I.9 MATERIAUX AERONAUTIQUE LES PLUS UTILISES..... | 15 |
| I.9.1 Matériaux pour fonctionnement à des températures faibles ou moyennes..... | 15 |
| I.9.2 Matériaux pour fonctionnement à hautes températures pendant une longue durée.... | 16 |
| I.9.3 Matériaux pour fonctionnement à hautes températures pendant une courte durée..... | 17 |
| I.9.4 Matériaux composites structuraux..... | 17 |
| I.10 EXEMPLES DE DIFERENTES FORMES DE CORDONS DE SOUDURE APPLIQUES EN AERONAUTIQUE..... | 18 |

CHAPITRE II : MODELISATION MTHEMATIQUE

| | |
|--|----|
| II.1 INTRODUCTION..... | 21 |
| II.2 BLAN D'ENERGIE..... | 21 |
| II.2.1 Les différent cas de la conductivité..... | 22 |
| II.3 EQUATION REGISSANT LA CHALEUR..... | 24 |
| II.3.1 Hypothèses principales..... | 24 |
| II.3.1 Les conditions aux limites..... | 24 |
| II.4 LA SOURCE DE CHALEUR..... | 26 |
| II.4.1 Les différents modèles des sources de chaleur..... | 26 |
| II.4.1.a. Source de chaleur ponctuelle..... | 26 |
| II.4.1.b. Source de chaleur en segment de ligne..... | 26 |
| II.4.1.c. Source de chaleur a distribution Gaussienne..... | 26 |
| II.5 MODELISATION DU TERME SOURCE..... | 28 |
| II.6 PROPRIETES PHYSIQUE DES MATERIAUX..... | 30 |

CHAPITRE III : DISCRETISATION PAR LAMETHODE DES VOLUME FINIS

| | |
|---|----|
| III.1 INTRODUCTION..... | 32 |
| III.2 DEMARCHES DE BASE DE LA METHODES DES VOLUMES FINIS..... | 32 |
| III.2.1 Exemple illustratif de la méthode des volumes finis..... | 35 |
| III.2.1.a. Fonction d'interpolation..... | 35 |
| III.3 CONDUVITE THERMIQUE VARIABLE..... | 37 |
| III.4 DISCRETISATION DE L'EQUATION DE CHLAEUR REGISSANT LE PROBLEM..... | 39 |
| III.4.1 Représentation du volume de contrôle bidimensionnel | 39 |
| III.4.2 Intégration de l'équation de chaleur..... | 40 |
| III.5 CONDITIONS AUX LIMITES..... | 43 |
| III.6 REGLES DE BASE D'APPLICATION DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS | 45 |
| III.7 GENERATION DE MAILLAGE | 45 |
| III.7.2 Génération de maillage pour un cordon rectiligne..... | 46 |
| III.7.3 Génération de maillage pour un cordon courbé..... | 46 |

CHAPITRE IV : RESOLUTION NUMERIQUE

| | |
|--|----|
| IV.1 LES METHODES DE RESOLUTION DES SYSTEMES ALGEBRIQUE..... | 51 |
| IV.I.1 Introduction..... | 51 |
| IV.1.2 Méthode Directe..... | 51 |
| IV.1. 3 Les méthodes itératives..... | 52 |
| IV.1.3. a. La méthode de Jacobi..... | 52 |
| IV.1.3.b La méthode de Gauss-Seidel..... | 53 |
| IV.1.4 Comparaison des deux Méthodes..... | 53 |
| IV.2 ALGORITHMME DE THOMAS..... | 54 |
| IV.2.1 Exemple illustratif de la T.D.M.A..... | 55 |
| IV.3 METHODE DE RESOLUTION UTLISEE DANS LE CODE DE CALCUL..... | 56 |
| IV.4 ORGANIGRAMME DU PROGRAMME PRICIPAL | 59 |

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|--|----|
| V.1 INTRODUCTION | 64 |
| A. CORDON RECTILIGNE..... | 64 |
| V.A.1 DONNEES DU PROGRAMME..... | 64 |
| V.A.2 RESULTATS NUMERIQUES..... | 64 |
| V.A.2.1 Résultats du maillage..... | 64 |
| V.A.2.2 Résultats des champs thermiques..... | 65 |
| V.A.2 COMPARAISON DES RESULTATS..... | 74 |
| B. CORDON INCLINE..... | 77 |
| V.B.1 DONNEES DU PROGRAMME..... | 77 |
| V.B.2 RESULTATS NUMERIQUES..... | 78 |
| V.B.2.1 Résultats du maillage..... | 78 |
| V.B.2.2 Résultats des champs thermiques..... | 78 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE | 83 |

INTRODUCTION GENERALE

Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge de bronze, ce n'est que depuis le début du 20^{ème} siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis solidification de matériaux pour constituer un assemblage dit par soudage. Il faut pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation des structures aéronautiques ou autre.

On commence alors à parler de mécano-soudage. Or, les seuls procédés industrialisés de façon *importante* sont la soudure oxyacétylénique et la soudure à l'arc à l'électrode enrobée.

Au fur et à mesure de la maîtrise des sources thermiques (arc électrique, Laser, plasma d'arc, faisceau d'électrons) et des systèmes automatisés, les différents procédés ont gagné en fiabilité et en qualité de réalisation. Les ensembles mécano-soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications.

Parmi l'ensemble des procédés, le *soudage T.I.G* est utilisé pour des réalisations délicates qui requièrent des qualités d'assemblage optimales. Il met en jeu un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et les pièces à souder dans une veine d'argon. L'électrode et la zone fondue sont protégées contre la pollution ambiante par des gaz inertes. Le soudage T.I.G est ainsi un procédé de prédilection dans des secteurs aussi variés que le nucléaire, l'aéronautique, les industries chimiques et agro-alimentaires.

Nonobstant ces qualités, ce procédé souffre d'un lourd handicap : sa faible productivité, tout particulièrement dans le cas des pièces de fortes épaisseurs. En effet, au-delà de 3mm, il est nécessaire de réaliser une préparation des bords à assembler (chanfreins) et d'utiliser du métal d'apport en soudage multi-passes. Ceci est principalement dû au faible rendement d'arc résultant de l'absence de transfert de métal, ainsi qu'à la formation au sein du bain métallique de courants de convections centrifuges, défavorables à une forte pénétration des soudures. La première étape critique dans l'analyse précise de comportement physique de la soudure, est l'évaluation d'une carte thermique qui détermine le champ de 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).

Donc, la simulation numérique du procédé de soudage, qui met en jeu de hautes températures, est un moyen d'accès privilégié aux grandeurs thermiques qui caractérise le procédé à étudier. La modélisation des interactions complexes entre des phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques et la mise en oeuvre des méthodes numériques particulières est indispensable pour la simulation d'un procédé de soudage.

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

L'objet de notre travail, est de définir numériquement les cartes thermiques en déduisant les zones à risque qui résultent, lors de l'opération du soudage T.I.G « Tungstène Inerte Gaz », des deux plaques minces d'aluminium de la série 2000 (c.à.d 2024-T3) sans métal d'apport à différent forme de cordon, avec confrontation expérimentale. Les zones à risques sont ; la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF).

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 supposées constantes en premier cas ; ensuite elles sont en fonction de la température.

La modélisation mathématique du problème donne des équations assez complexes. Pour cela, on a choisie la **méthode des volumes finis** comme méthodes numérique pour discrétiser les équations obtenues.

Ce présent document comporte 5 chapitres, qui sont :

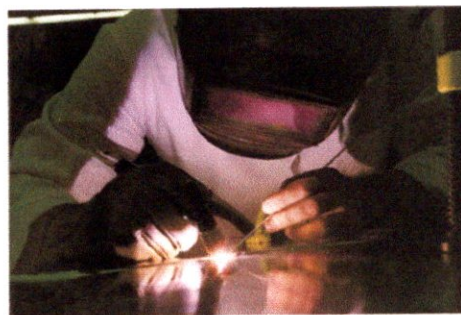
- **Chapitre I** : Ce chapitre est une synthèse bibliographique, dans laquelle on va donner des généralités sur l'opération du soudage, plus particulièrement le procédé T.I.G. On présente aussi les matériaux aéronautiques les plus utilisés, ainsi que des exemples sur les différentes formes de cordon de soudure utilisés en industrie aéronautique.
- **Chapitre II** : Dans ce chapitre et 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 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, avec les techniques de maillage utilisées.
- **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** : Dans ce dernier, on va présenter les différents résultats qu'on a obtenus avec des interprétations.

A la fin, une conclusion général qui clôtura notre travail.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

- ❖ **GENERALITEES.**
- ❖ **PROCEDES DE SOUDAGE.**
- ❖ **SOUDAGE A L'ARC.**
- ❖ **PRINCIPE DU SOUDAGE T.I.G.**
- ❖ **L'ARC ELECTRIQUE.**
- ❖ **PROPRIETES ENERGETIQUES DE L'ARC.**
- ❖ **CARACTERISTIQUES DU COURANT.**
- ❖ **LES GAZ DE PROTECTION.**
- ❖ **APPLICATION DU SOUDAGE TIG.**
- ❖ **MATERIAUX AERONAUTIQUES LES PLUS UTILISES.**
- ❖ **QUELQUES APPLICATION DU SOUDAGE EN AERONAUTIQUE.**



I.1 GENERALITES :

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique, et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois, de la composition chimique élaborée, et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :

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.

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base, et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Le faible temps de maintien de la température maximale.
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique du matériau, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- Le couple métal d'apport - gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone affectée thermiquement.

I.2 PROCÉDES DE SOUDAGE :

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

On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en oeuvre comme présenté sur la Figure I.1.

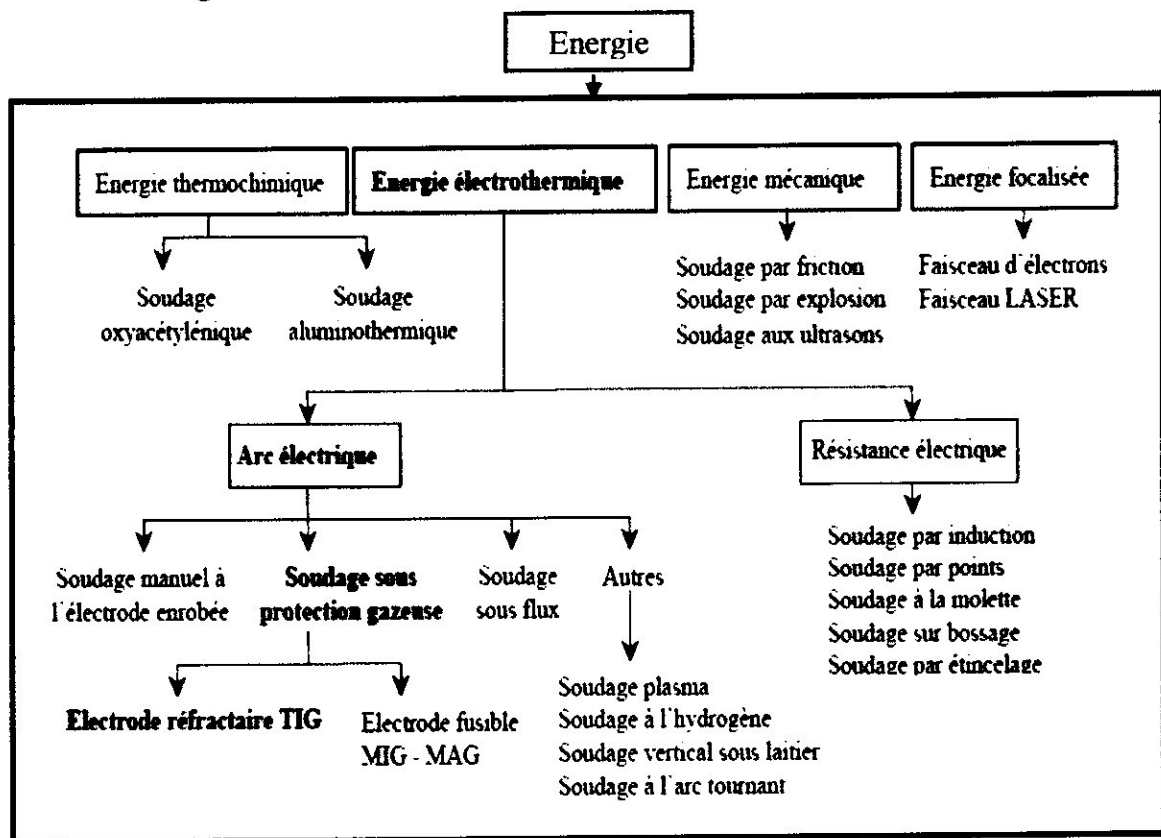


FIG I.1 - les différents procédés du soudage.

La conséquence directe de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources. Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre eux (Figure I.2).

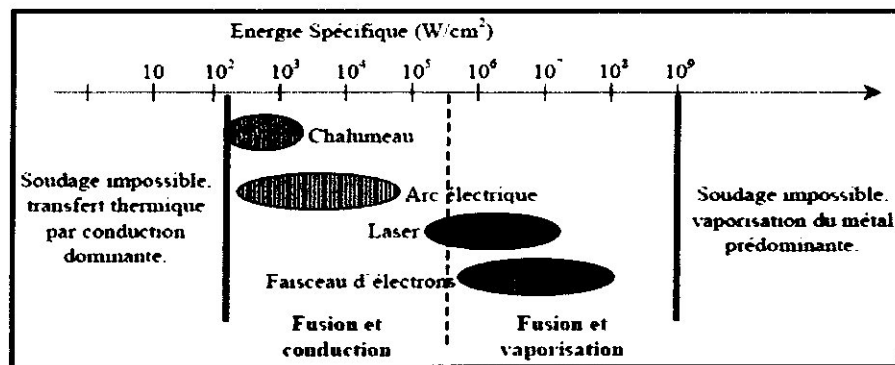


FIG I.2 Comparaison d'énergie

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

I.3 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. Il regroupe quatre procédés :

I.3.1 Le soudage à l'électrode enrobée :

Afin de limiter l'oxydation et la nitruration du métal, l'âme métallique de l'électrode est enrobée par un oxydant, un acide, un basique ou un cellulosique selon les besoins. Il a pour but de faciliter l'amorçage, de protéger le métal et le cordon contre un refroidissement trop rapide, ainsi que de guider l'arc grâce à un retard à la fusion. Suivant les propriétés recherchées pour le cordon ou le laitier, différents modèles de fil existent.

I.3.2 Le soudage avec fils pleins (GMAW) :

L'électrode est composée d'un fil fusible continu, servant de métal d'apport et se dévidant automatiquement sous protection gazeuse (Ar ou CO₂).

I.3.3 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 Tungstène Inert Gaz «T.I.G.».

I.3.4 Le soudage à arc submergé sous flux solide :

Un flux en poudre est versé en talus autour du fil de l'électrode. L'arc jaillissant à l'intérieur du flux est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.

I.4. PRINCIPE DU SOUDAGE T.I.G : [1]

Par définition, le terme « **T.I.G** » est l'abréviation de « Tungsten Inert Gas » et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène aussi appelée « GTAW ». Le soudage à l'arc au tungstène est un procédé qui utilise un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège l'arc électrique et la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage. (Figure I.3)

Le métal d'apport peut être ou ne pas être utilisé. Lorsque l'on a besoin de métal complémentaire, on utilise une baguette d'apport qui vient alimenter le bain de fusion remplissant ainsi le joint à souder. La technique de soudage utilisée est la même que pour le procédé de soudage oxyacétylénique. Pendant qu'une main tient la torche pour amener le métal de base en fusion, l'autre tient la baguette et alimente le bain de fusion.

Le principe de soudure « **T.I.G** » est simple en soit puisque la torche électrique est conçue pour alimenter un jet de gaz inerte argon, hélium ou parfois un mélange (argon-hélium) qui vient envelopper l'arc électrique à la pointe de l'électrode et créer un bouclier gazeux empêchant l'air ambiant de venir en contact avec l'opération de soudure.

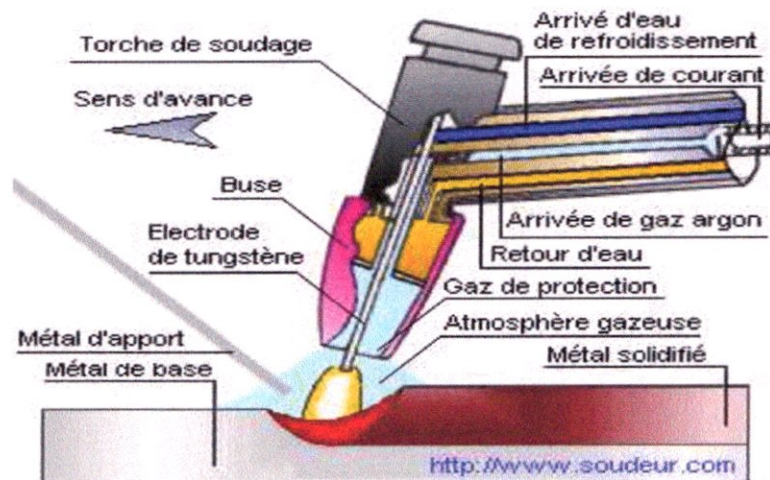
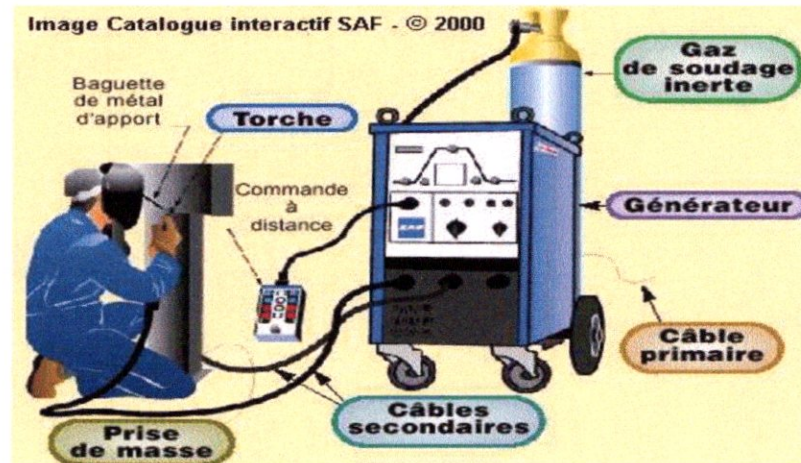


FIG I.3 -Le Procédé T.I.G.

En résumé, on peut ainsi décrire ce procédé par, un arc qui est amorcé entre l'extrémité d'une électrode réfractaire (tungstène) et la pièce à souder en provoquant la fusion du métal de base. Une buse, concentrique à l'électrode, canalise un gaz inerte qui isole de l'atmosphère extérieure l'arc et le bain de métal en fusion. Le métal d'apport a d'ordinaire la forme de baguettes pour la torche manuelle ou de fil embobiné lorsqu'on veut un apport automatique.

Le procédé **T.I.G** peut être aisément automatisé, on trouve alors soit un banc de soudage qui permet d'effectuer des soudures rectilignes ou orbitales avec ou sans système d'amenée de métal d'apport, soit un robot articulé qui permet d'effectuer des trajectoires plus complexes



Poste de soudage T.I.G. [2]

I.4.1 Formation du bain de fusion :

L'étude du soudage «T.I.G» (source thermique et comportement de bain) est fondamentale pour les autres procédés à l'arc car l'absence de transfert de métal facilite l'interprétation et la modélisation (s'il y a lieu) des phénomènes intervenant dans l'arc et dans le bain liquide.

En effet, au cours du soudage, un arc électrique jaillit entre l'électrode non fusible de tungstène et la pièce à souder. Il se crée alors un bain de métal fondu dont la morphologie (volume fondu, pénétration et largeur) est conditionnée par de nombreux paramètres que nous pouvons regrouper en deux catégories :

- Influence sur l'énergie incidente :
 - répartition spatiale de l'énergie dans l'arc.
 - pression d'arc.
 - rendement d'arc.

- Influence sur la convection du métal liquide :
 - présence d'éléments tensioactifs.
 - viscosité du métal liquide.
 - cisaillement aérodynamique.
 - effets de Lorentz

L'ensemble des paramètres régissant l'arc et le bain de fusion sont nombreux et complexes. Il est impossible de les dissocier les uns des autres et de les modifier de manière indépendante afin de comprendre leurs effets.

Dans ce qui suit , on va présenter les avantages et les inconvénient du procédé, pour une connaissance plus proche du phénomène qu'on va traiter.

I.4.2 Avantages et inconvénients du soudage T.I.G :

I.4.2.a. Avantages:

La grande qualité des soudures obtenues par le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse en fait un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux. Il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après la soudure.

Le soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire sous protection gazeuse s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal. De plus, les soudures se font sans l'emploi du laitier, éliminant ainsi les inclusions de laitier. Le chauffage des pièces s'effectue sur une petite surface, le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage, relativement élevée.

En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. Le dépôt de soudure est très dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels les alliages de titane et le zirconium. Enfin, le procédé est idéal aussi pour effectuer des réparations et de petites séries de fabrication de pièces.

I.4.2.b. Inconvénients:

Procédé de soudage lent, il nécessite souvent les deux mains du soudeur. De plus, il n'est pas vraiment avantageux pour le soudage sur tôles épaisses. Il exige un équipement plus considérable que certains autres procédés.

- Équipement dispendieux.
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement.
- Déformations des pièces soudées.

Les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquences, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3mm nécessitent, pour les aciers inoxydables, le zirconium, les alliages de titane et de nickel, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint.

I.5 L'ARC ELECTRIQUE : [3]

L'arc électrique est un passage de flux d'électrons d'une cathode à une anode initié par une différence de potentiel entre une électrode de tungstène (généralement la cathode) et la pièce à souder. Il est confiné dans un gaz neutre qui va limiter la formation de plasma d'arc.

On distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc. (Figure I.4)

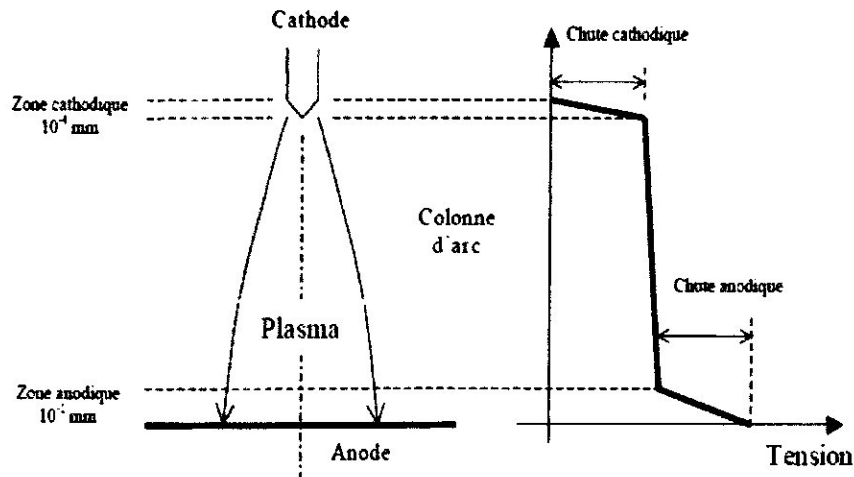


FIG I.4 - l'arc électrique.

L'anode et la cathode ont des caractéristiques similaires par plusieurs aspects. Elles présentent toutes les deux une chute de tension qui a lieu sur de très courtes distances conduisant à des champs électriques localement très importants (pouvant atteindre 10^9 V/m à la cathode contre 10^3 V/m dans la colonne d'arc).

Ces zones appelées tache anodique et tache cathodique sont caractérisées par une contraction de l'arc aux deux pôles. Elles sont nécessaires à la stabilité de l'arc électrique. Les énergies mises en jeu dans ces régions vont conditionner la qualité de l'arc ainsi que la célérité des électrons émis. Les densités de courant au sein de la colonne ionisée sont proches de 10^7 à 10^8 A/m² alors qu'elles sont de 10^8 à 10^9 A/m² pour l'anode et peuvent atteindre des valeurs encore supérieures pour la cathode. Nous allons revenir sur chacune de ces trois zones pour comprendre les principes qui régissent le transfert des électrons.

I.5.1 La cathode:

C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire selon deux modes distincts appelés émission thermoionique ou émission non thermoionique (autrement nommée cathode froide). L'émission thermoionique est la conséquence de l'échauffement de la cathode par effet Joule. A l'extrémité de la cathode, l'énergie des électrons dépasse la fonction de travail de l'électron (énergie nécessaire pour arracher un électron). Ce mode d'émission est caractéristique d'une polarité directe (l'électrode est la cathode et la pièce l'anode). Pour les électrodes en tungstène pur, il faut atteindre la fusion du tungstène pour obtenir une émission thermoionique. La pointe de l'électrode devient alors hémisphérique et stabilise l'arc par une émission uniforme sur la surface.

Des oxydes de thorium (ThO_2), de zirconium (ZrO_2) ou de cérium (CeO_2) sont ajoutés au tungstène pour profiter de leur plus forte émissivité à faible température évitant la fusion de la pointe d'électrode.

Ces électrodes sont affûtées en cône pour concentrer l'émission thermoionique et limiter la tache cathodique. Il se crée ainsi une charge spatiale (ou nuage d'électrons) qui va pouvoir transiter vers une autre électrode à plus fort potentiel (dans notre cas la pièce à souder). L'émission non thermoionique crée un arc dont le champ électrique est très intense (dépassant 10^9 V/m). Ce champ très intense arrache les électrons de la cathode « froide ».

Cette méthode s'applique en polarité inverse (la pièce joue le rôle de cathode et l'électrode celui d'anode). Elle est favorisée par la présence d'une fine couche d'oxydes toujours présente sur la pièce. Avec ce mode d'émission, l'arc est plus instable et il apparaît de petits jets de vapeurs métalliques. Cette configuration est utilisée quand l'on favorise le décapage et que l'on minimise l'apport thermique à la pièce, au détriment d'une morphologie de bain et de la régularité du cordon.

I.5.2. L'anode :

Les paramètres électriques (intensité, tension) contrôlent la décharge électrique à la cathode. En revanche, le flot d'électrons pénètre dans l'anode par la tache anodique avec une certaine densité de courant qui va déterminer la géométrie du bain.

Cette densité d'énergie ne peut être contrôlée qu'indirectement à partir de la cathode. La stabilité de la tache anodique dépend en majeure partie du gaz d'assistance, du matériau à souder et de la géométrie de soudage.

La densité de courant au droit de la tâche anodique est gaussienne, sa largeur sera fonction du gaz d'assistance utilisé (argon ou hélium), de la géométrie d'électrode (type d'affûtage et conicité d'électrode) et des paramètres opératoires (intensité et tension d'arc, vitesse de soudage, longueur d'arc). Pour ce qui est du rendement d'arc mesuré, il varie de 50 à 70%, suivant les paramètres utilisés. La tension d'arc et la nature de l'anode sont les principaux facteurs qui influent le rendement de l'arc.

I.5.3 La colonne d'arc :

Le passage des électrons entre les électrodes ionise partiellement le gaz de protection sur son chemin, ce qui rend la colonne d'arc conductrice et crée un plasma d'arc.

L'ensemble est électriquement neutre, composé d'atomes de gaz de protection, d'électrons (chargés négativement), d'ions gazeux (positifs) et certainement de vapeurs métalliques.

Bien que cette zone soit la plus importante et la plus facile à analyser, elle apporte peu d'informations sur l'optimisation ou le comportement du soudage TIG (encore que de fines analyses des vapeurs du plasma d'arc renseigneraient sur la présence d'éléments favorisant la soudabilité).

I.6 PROPRIETES ENERGETIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE :

I.6.1 Flux énergétique dans la colonne d'arc : [4]

L'importance relative de la conduction et de convection dans la colonne d'arc peut être évalué par le nombre de Peclet (P_e), dont l'expression est donnée comme suite :

$$P_e = \frac{\rho V L C_p}{K}$$

Avec :

ρ : Masse volumique de gaz (Kg/m^3), V : vitesse, L : longueur d'arc, C_p : chaleur spécifique a pression constante (J/kg.k), K : Conductivité thermique (W/m.K°).

Pour des bases pressions P_e peut être chuté de la valeur de 1 ou le transfert de chaleur s'effectue principalement par conduction.

Pour des pressions supérieures à la pression atmosphérique, P_e peut augmenter et la convection devient dominante.

I.6.2 Température dans la colonne d'arc : [4]

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

La température au voisinage de la cathodes dans la colonne d'arc est environ $20\ 000\ \text{K}^\circ$ est ne varie pas beaucoup même avec un courant de soudage allant jusqu'à 400A d'après K.BAYASHI SUGA 1979 et JACKSON 1960.

I.6.3 L'énergie Nominale : [5]

Elle représente l'énergie (E_n) fournie au niveau se l'arc pour exécuter une soudure, elle est exprimée par :

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

Avec : U la tension de l'arc en Volts [V], I l'intensité du courant en Ampère [A] et V_s la vitesse du soudage en [m/s].

I.6.4 L'énergie dissipée dans le joint soudé : [5]

L'énergie fournie au niveau de l'arc n'est pas entièrement transmise aux pièces à souder en raison des pertes par rayonnement et par convection de la colonne d'arc. L'énergie dissipée dans un cordon de soudure (E_d), est donnée par :

$$E_d = E_n \eta$$

Avec : η le rendement de l'arc.

I.6.5 Le rendement de l'arc électrique : [5]

Le taux de la chaleur consommée par la pièce à souder est basé sur les valeurs de la tension et l'intensité du courant, donc il est nécessaire de connaître la proportion de l'énergie d'arc qui est transférée à la pièce qui est connue par « η » le rendement de l'arc électrique.

On trouve deux cas :

➤ Dans le cas d'électrode fusible :
$$\eta = \frac{1 - [(1-n)Q_p + mQ_a]}{U.I}$$

➤ Dans le cas d'électrode non fusible :
$$\eta = \frac{1 - [Q_t + (1-n)Q_p + mQ_a]}{U.I}$$

Avec : $Q_t + Q_p + Q_a = Q_{arc}$ qui est la chaleur produite par l'arc.

Ou :

Q_t : la quantité de chaleur transmise à l'électrode.

Q_p : la quantité de chaleur émise par convection et par rayonnement par la colonne d'arc.

Q_a : la quantité de chaleur transmise à la pièce à souder.

n : la proportion de la quantité de chaleur produite par la colonne d'arc.

m : la proportion de la quantité de chaleur perdue par rayonnement.

La variation du rendement de l'arc est en fonction :

- Du procédé de soudage.
- De la nature du courant.
- Du matériau à souder.
- De l'épaisseur de la pièce à souder.

Le tableau (Figure I.5) résume quelques valeurs du rendement pour des différents procédés de soudage et métaux, qui ont été déterminés après des études expérimentales dans ce domaine.

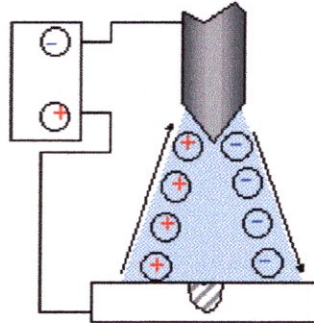
| Procédé de soudage | Métaux | Rendement de l'arc « η » |
|-------------------------------|------------|-------------------------------|
| Automatique sous flux Solide | Aciers | 0.90 à 0.99 |
| A l'arc avec électrode enrobé | Acier | 0.70 à 0.85 |
| Procédé M.I.G | Acier doux | 0.65 à 0.85 |
| | Aluminium | 0.70 à 0.85 |
| Procédé T.I.G | A.C | 0.22 à 0.48 |
| | D.C | 0.36 à 0.46 |
| | A.C | 0.21 à 0.43 |

FIG.I.5- Quelques valeurs du rendement de l'arc (d'après J.C.WALTER).

I.6 CARACTÉRISTIQUES DU COURANT : [2]

I.6.1 Courant continu :

En courant continu, on peut utiliser la polarité négative ou positive. On sait que, pour la polarité négative, la prise à la masse est à la borne positive. De cette façon, les électrons circulent de l'électrode vers la pièce à souder en concentrant la chaleur sur le joint.

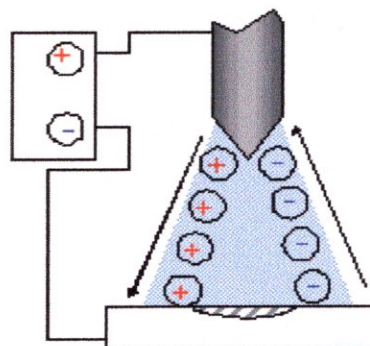


Courant continu a polarité normale

Au courant continu à la polarité normale les électrons frappent la pièce à souder à une grande vitesse, créant ainsi un effet de chaleur intense sur la pièce. La pièce se fusionne rapidement à cause de la grande quantité de chaleur qu'elle reçoit.

Les ions de gaz inerte sont à ce moment dirigés vers l'électrode négative à une vitesse relativement lente. La polarité négative en courant continu ne donne aucun effet de nettoyage pour enlever les oxydes des métaux.

Pour la polarité positive, c'est l'électrode qui est positive et la masse qui est négative. Les électrons circulent de la pièce vers l'électrode.



Courant continu a polarité inverse

En polarité inversée, c'est l'électrode qui reçoit une grande quantité de chaleur au lieu de la pièce. La chaleur a tendance à fusionner le bout de l'électrode de tungstène. À cause de ce surplus de chaleur, il faut utiliser un diamètre d'électrode plus grand à polarité inversée qu'à polarité normale. La pénétration est peu profonde.

I.6.2 Courant alternatif :

Le soudage en courant alternatif réunit à la fois les deux caractéristiques du courant continu. Pendant l'alternance positive, il y a un fort effet de nettoyage du bain de fusion et, pendant l'alternance négative, la chaleur est plus concentrée dans le bain de fusion, ce qui a pour effet d'augmenter la pénétration.

Lorsque l'on soude au courant alternatif, il est recommandé d'employer la haute fréquence et des impulsions à hautes fréquences superposées au courant de soudage. Ce procédé a pour effet de faciliter l'amorçage de l'arc, de le stabiliser et de remédier aux interruptions qui peuvent se produire chaque fois que le courant alternatif passe par zéro. Pour un courant standard de 60 Hz, le courant passe au point zéro 120 fois par seconde.

Un courant alternatif à haute fréquence qui comprend trois millions deux cent mille (3 200 000) cycles par seconde est superposé au circuit de soudage et établit une étincelle pilote ayant la propriété d'ioniser l'espace compris entre l'extrémité de l'électrode de tungstène et la pièce à souder. Cette ionisation a pour but de rendre conducteur de l'électricité l'espace d'air compris entre l'extrémité de l'électrode et la pièce.

La haute fréquence permet l'amorçage de l'arc par simple rapprochement et sans qu'aucun contact ne soit nécessaire entre l'électrode et la pièce. Les générateurs de haute fréquence sont raccordés électriquement ou magnétiquement au circuit de soudage. Ils donnent un courant de haute tension et de faible intensité. Ils peuvent fonctionner en permanence ou bien fournir des impulsions durant les périodes où le courant de soudage passe par zéro, afin de stabiliser l'arc durant le soudage.

I.7 LES GAZ DE PROTECTION : [2]

L'argon et l'hélium sont les gaz inertes les plus couramment employés dans le procédé TIG. Cependant, on recommande particulièrement l'argon car il convient à une grande variété de métaux et le débit nécessaire est très inférieur à celui de l'hélium pour un travail donné.

On a besoin entre deux et trois volumes d'hélium comparativement à un seul volume d'argon pour obtenir la même protection.

I.7.1 L'argon :

L'argon est un gaz inerte qui ne s'allume pas, ne nourrit pas la combustion et ne réagit chimiquement à aucun autre élément. Il est sans couleur, sans odeur et est présent à 0.93% dans l'atmosphère. On l'obtient à partir de la liquéfaction de l'air durant la production de l'oxygène par la distillation fractionnée de l'air liquide. Pour être efficace comme gaz de protection, la pureté de l'argon ne doit pas être inférieure à 99.95% mais on peut en trouver sans trop de difficulté à 99.99%. Un tel degré de pureté impose de ne pas laisser se vider complètement un cylindre d'argon avant d'arrêter de s'en servir.

Il ne faut jamais non plus laisser ouverte la valve du cylindre lorsque celui-ci est vide, l'air pourrait s'introduire dans le cylindre. Les cylindres d'argon sont peints de couleur uniforme (couleur unie selon le fabriquant) et remplis à une pression de 2400 livres au pouce carré (14,000 Kpa). Ces cylindres sont similaires en dimensions aux cylindres d'air (oxygène) et ont des filets de vissage à droite.

L'argon est assez lourd, environ une fois et un tiers aussi lourd que l'air. Pour cette raison, il peut pousser de côté les molécules d'air. Il prévient alors l'oxydation de l'électrode de soudage, la fusion du bain de soudure et la zone touchée par la chaleur à côté du bain de fusion.

Les principales caractéristiques de l'argon sont comme suite :

- Il produit un bas voltage de l'arc. Il en résulte moins de chaleur à l'arc, ce qui fait que l'argon est employé exclusivement pour le soudage manuel des métaux dont l'épaisseur est de 1,6 mm et moins.
- Il produit une bonne action de nettoyage. Il devient un gaz idéal pour les métaux qui possèdent une couche d'oxyde en surface, tels l'aluminium ou les alliages ferreux contenant un fort pourcentage d'aluminium.
- Il facilite l'amorçage de l'arc, ce qui est très important pour le soudage des métaux minces.
- Il possède un arc stable. Cette stabilité est supérieure à celle de l'hélium.
- Il demande un petit volume de gaz. Parce qu'il est plus lourd que l'air, l'argon donne une bonne protection de la soudure avec un petit débit de gaz et, de ce fait, il est moins affecté par les courants d'air que l'hélium.
- Il est utilisé en soudage vertical et au plafond. Quelquefois, l'argon est préféré à l'hélium à cause d'un meilleur contrôle du bain de fusion, mais il donne moins de protection que l'hélium à cause de l'effet de la pesanteur.
- Il est déconseillé en soudage automatique. L'argon peut provoquer des porosités et des caniveaux à une vitesse de soudage supérieure à 25 mm par minute. Ces défauts sont plus ou moins amplifiés selon la sorte de métal et son épaisseur. L'utilisation d'un mélange de gaz d'argon et d'hélium peut les corriger.
- Il est déconseillé pour le soudage du métal épais. Pour les métaux plus épais que 5 mm, on recommande un mélange d'argon et d'hélium.
- Il est préféré pour le soudage des métaux différents et il est normalement supérieur à l'hélium.

I.7.2. L'hélium :

L'hélium (He) est un gaz sans couleur, inodore et sans goût. Chimiquement, il est presque entièrement inactif, et il ne brûlera ni n'explosera. L'hélium est le deuxième plus léger élément connu après l'hydrogène. Il peut aussi être le gaz le plus froid, liquéfié à -269°C .

L'hélium est fourni dans des bouteilles ordinaires qui contiennent 8 m^3 à $18\ 200\text{ kPa}$. Il possède un degré élevé de tension et fournit plus de chaleur que l'argon pur avec le même courant et la même longueur d'arc. C'est pourquoi, il est préféré pour le soudage de sections épaisses en acier et pour le métal à haute conductivité thermique, tels l'aluminium et le cuivre.

I.9 MATERIAUX AERONAUTIQUE LES PLUS UTILISES : [6]

Dans le domaine de l'aéronautique, les problèmes d'encombrement et de masse revêtent une importance toute particulière. C'est-à-dire que le matériau choisi pour la fabrication d'une pièce devra permettre de dessiner cette pièce avec les cotes les plus faibles possible, compatibles avec son utilisation. Cela explique pourquoi les métallurgistes travaillant dans le secteur aéronautique sont toujours à la recherche de matériaux présentant des caractéristiques (résistance, limite élastique, dureté,...) particulièrement élevées à froid ou à chaud, suivant leurs usages.

Les matériaux métalliques sont les plus utilisés, mais il y a lieu de souligner que la part des matériaux non métalliques augmente de plus en plus dans l'industrie aéronautique.

Afin de ne pas alourdir cette synthèse des matériaux les plus utilisés en aéronautique, seuls les alliages d'un emploi suffisamment répandu seront cités.

I.9.1 Matériaux pour fonctionnement à des températures faibles ou moyennes :

Les différentes classes d'alliages rencontrés dans le domaine des températures faibles et moyennes (de l'ambiante à 850 °C) sont les suivantes :

- **Alliages de magnésium** : un emploi typique de ces alliages est constitué par les carters coulés dont la température de fonctionnement reste faible (inférieure à 300°C). Ces alliages ont des caractéristiques mécaniques élevées, mais leur sensibilité à la corrosion saline limite de plus en plus leurs emplois.
- **Alliages d'aluminium** : les alliages d'aluminium sont les matériaux de base des cellules, ils sont largement utilisés pour les structures et les pièces de forge. Par exemple l'avion Concorde, c'est les alliages d'aluminium (AU 2 GN), meilleure tenue à chaud, qui a été retenu comme matériau de base. Sur les turboréacteurs, les températures atteintes dans le compresseur restreignent de plus en plus l'usage des alliages légers tel que l'aluminium.
- **Alliages de titane** : ces alliages présentent le risque de devenir fragiles, ce qui oblige l'utilisateur à prendre de grandes précautions pendant leur mise en œuvre et en service, en particulier ils absorbent facilement l'hydrogène et les ions halogènes et sont très sensibles à la corrosion saline à chaud. Leur emploi tend cependant à se généraliser à cause de l'économie de masse qu'ils apportent dans les structures des cellules et dans les compresseurs (les aubes) et carters des moteurs.
- **Les aciers** : les aciers constituent un groupe extrêmement important parmi les matériaux aéronautiques, on trouve deux types d'acier :
 - aciers faiblement alliés.
 - aciers fortement alliés.

Sur le tableau (figure I.7) figurent les applications types des aciers dans l'aéronautique.

| Type d'acier | Applications en aéronautique |
|--------------------------|--|
| Faiblement alliés | Pièces faiblement sollicitées, pièces nitrurées, pièces de structure, pignons cémentés, train d'atterrissage, corps de fusée, ressort, roulement |
| Fortement alliés | Aubes et disques de compresseur et de turbine ($T < 550^{\circ}\text{C}$), élément en tôle soudable à hautes caractéristiques, structure à haute résistance (Nid d'abeilles), pièces très fortement sollicitées, corps de fusée. |

FIG.I.7-Application des aciers en aéronautique

- **Alliages de cuivre** : les alliages de cuivre ne sont utilisés dans l'aéronautique que pour des emplois bien particuliers, tel que la résistance au frottement. Les cages de roulement, en particulier, sont en alliage de cuivre (UA 10 N ou UN 3 S).

I.9.2 Matériaux pour fonctionnement à hautes températures pendant une longue durée :

C'est les matériaux utilisés dans les parties chaudes du moteur d'avion. Les principaux matériaux sont :

- **Alliages de nickel** : certains de ces alliages sont employés à l'état corroyé, et d'autres à l'état coulé, ces derniers ayant naturellement une capacité d'allongement nettement plus faible. on peut citer comme exemples d'application : les disque de compresseur et de turbine, les carters, anneaux porte brûleurs, chambre de poste combustion, les aube des turbine fixes et mobiles et les chambre de combustion.
- **Alliages de Cobalt** : ces alliages ne sont pas encor d'un emploi très répondu, par rapport aux alliages de nickel ils ont une meilleure tenue à la fatigue thermique et une résistance à chaud compétitive pour les hautes températures (à partir de 900°C), les alliages de cobalt sont retenus pour les aubes fixes de turbine et pour les carters en tôle situé à la partie arrière des réacteurs (canal d'éjection).
- **Alliage de niobium** : ce sont des alliages expérimentaux, ils ne sont pas produits industriellement de façon courante. Lorsque les problèmes techniques (protection, tenue en aux impact et aux chocs thermiques), des emplois ne manquerons pas de se trouver pour toutes pièces fonctionnant à très hautes températures telles que les chambre de combustion, ou de postcombustion.

I.9.3 Matériaux pour fonctionnement à hautes températures pendant une courte durée :

Dans le cas présent les caractéristiques essentielle demandée aux matériaux n'est plus la limitation de sa déformation ou de sa détérioration dans le temps, mais une « durée de vie » minimal, c'est-à-dire que l'on exige du matériaux qu'il soit susceptible remplir son office pendant un durée prescrite. Les températures peuvent dépasser 3000°C mais la durée de vie exigée est alors de quelques dizaines, ou quelques centaines de secondes.

Le premier matériau employé dans la fabrication de la tuyère d'un moteur fusé a été le graphite température de sublimation voisine de 3650°C, puis on a eu recours à des oxydes, comme celui de zirconium et, plus tard, à des composés mixtes de céramique et de métaux, désignés sous le vocable de cermet. Les principaux matériaux retenus sont :

- Composites à base d'oxyde (de silicium, de zirconium).
- Cermets, émaux, silicones.
- Tissus divers (carbonisés, à base d'amiante)
- Résines phénoliques armées, et les Résines polyuréthannes armées.

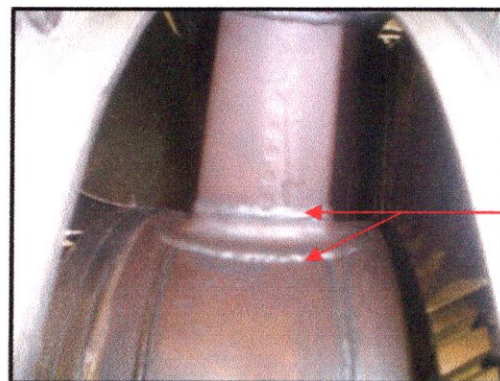
I.9.4 Matériaux composites structuraux :

On désigne sous le nom de composites des corps constitués de plusieurs matériaux de natures différentes et ayant chacun une fonction bien déterminée.

Les types de composite employé dans l'industrie aéronautique comprennent une matrice dans laquelle sont enrobé des fibres. La contrainte appliquée est essentiellement supportée par les fibres, la matrice leurs servant de support de protection et transmettant les contraintes d'une fibre à l'autre. Cette technique permet l'utilisation de matériaux de faible masse volumique, offrant une très grande résistance du fait que leur très faible volume entraîne une réduction des macro défauts qui limitent cette résistance dans les produits de dimensions courantes.

Les composites à matrice métallique conservent d'excellentes propriétés mécaniques à haute température, c'est pourquoi on les utilise notamment dans des aubes de compresseur pour étages chauds de réacteurs. À l'avenir, ce type de composite pourrait remplacer le titane dans le fuselage et les ailes des avions supersoniques.

À très haute température, on préfère les composites à matrice et à fibres de carbone, en particulier dans les nez de fusées intercontinentales. Mais les composites à fibres les plus employées restent les composites à matrice organique, qui possède une souplesse d'élaboration et de réparation, ainsi qu'une excellente isolation thermique. Ils sont utilisés à température ambiante en aéronautique.

I.10 EXEMPLES DE DIFFERENTES FORMES DE CORDONS DE SOUDURE APPLIQUES EN AERONAUTIQUE [16]:

2 cordons
courbés

FIG.I.8- Soudure d'une aube de turbine du moteur équipant l'hélicoptère MI-8.



Cordon
rectiligne
puis
courber

FIG.I.9- Soudure d'une tuyère d'échappement du turbopropulseur équipant l'hélicoptère MI-8.



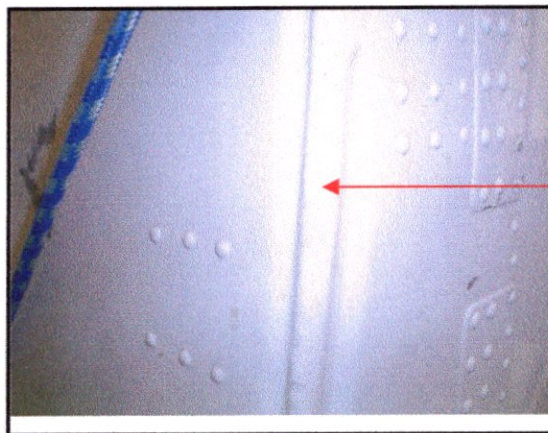
Cordon de
soudure pour
une géométrie
circulaire

FIG.I.10- Soudure de la tuyère du banc d'essai du moteur Artouste.



Cordon
rectiligne

FIG.I.11- Soudure du réservoir d'huile du banc d'essai du moteur Artouste.



Cordon
rectiligne
(sous peinture)

FIG.I.11- Soudure du réservoir de carburant en aluminium du banc d'essai du moteur Artouste.



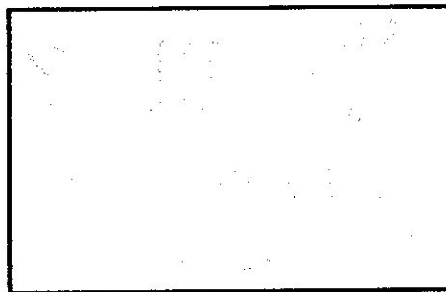
Cordon de
soudure pour
une géométrie
circulaire

FIG.I.11- Soudure d'une chambre de combustion et flasque d'étanchéité.

Chapitre II

Modélisation Mathématique

- ❖ INTRODUCTION.
- ❖ BILAN D'ENERGIE.
- ❖ EQUATION REGISSANT LA CHALEUR
- ❖ LA SOURCE DE CHALEUR.
- ❖ MODELISATION DU TERME SOURCE.
- ❖ PROPRIETES PHYSIQUES.



II.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre on va essayer de modéliser le transfert thermique lors d'une opération de soudage TIG dans le cas bidimensionnel instationnaire d'un assemblage de deux plaques mince d'aluminium.

Le modèle mathématique sera basé sur un volume de contrôle élémentaire (dV) en lui appliquant le bilan d'énergie.

II.2 BLAN D'ENERGIE : [7]

Le bilan d'énergie appliqué sur le volume de contrôle (dV) - Figure II.1- est comme suite

La variation d'énergie interne = (énergie entrante+ énergie produite par la source) - énergie sortante

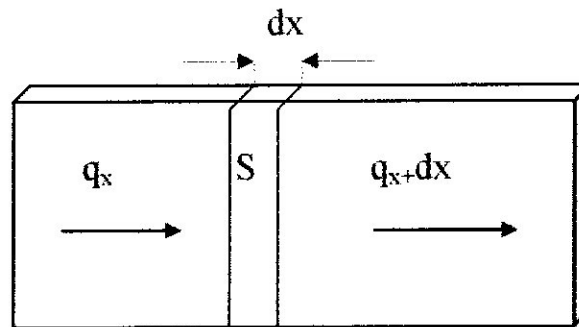


FIG.II.1-Bilan d'énergie

On a :

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

Ou :

$$dV = A dx$$

S : source d'énergie.

Donc l'équation (II.1) devient :

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

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

$$mC_p \Delta T = \rho V C_p \frac{dT}{dt} = \rho A C_p \frac{dT}{dt} dx \quad (II.3)$$

Donc :

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx = q_x + SAdx - q_{x+dx}$$

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx = q_x + SAdx - \left(q_x + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) dx \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= SAdx - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\
 &= SAds + Adx \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{dT}{dx} \right)
 \end{aligned}$$

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

K : la conductivité thermique.

Dans la direction (OX) on aura :

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Dans la direction (OY) on aura :

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Dans la direction (OZ) on aura :

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = S + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Finalement, pour les coordonnées cartésiennes on obtient :

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

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

De la même façon pour les coordonnées cylindriques on aura :

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

II.2.1 Les différent cas de la conductivité :

Généralement la conductivité K est en fonction de la température, $K = f(T)$, dans ce cas la, l'équation de chaleur est de type non linéaire.

➤ Si $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$; le régime est dit permanent.

➤ Si $K = cst \Rightarrow \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + S$

Dans le cas ou les milieux est :

- Homogène : K est indépendant de la position
- Isotrope : K est un scalaire indépendant de la direction.
- Anisotrope : K est un tenseur.

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

➤ Pour les 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 résumant tous ça :

$$\text{Si : } K = \text{cst} \Rightarrow \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + S$$

$$\text{Si : } K = f(T) \Rightarrow \rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial K}{\partial x} \overline{\text{grad}T} = \frac{dK}{dx} \overline{\text{grad}T} + K \frac{\partial(\overline{\text{grad}T})}{\partial x} + S$$

On obtient par la suite, pour une direction (OX) :

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

Finalement on obtient :

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

On a déjà dit que dans un milieu anisotrope la conductivité K devient un tenseur, donc l'équation (II.7) devient :

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

Il est nécessaire pour la résolution des ce genre d'équations des conditions initiales et des conditions aux limites appropriés selon les hypothèses à adoptes, ce qui fait l'objet du § suivant.

II.3 EQUATION REGISSANT LA CHALEUR :

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.

II.3.1 Hypothèses principales : [8]

Les principales hypothèses qu'on peut prendre en considération sont :

- Le régime est transitoire et bidimensionnel (x, y, t) .
- La direction de soudage s'effectue selon l'axe (y) .
- Les propriétés thermiques tel que $(K, \rho \text{ et } Cp)$ du matériau à souder sont supposés constantes en 1^{er} cas, puis elle sont en fonction de la température T .
- Considération du changement de phase dans les métaux a soudé.
- 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.

Comme il est nécessaire de tenir compte de quelques hypothèses, on doit aussi définir les conditions aux limites de l'équation régissant la chaleur.

II.3.1 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 :

- Aux frontières, on a le flux de chaleur q_n qui est défini par :

$$q_n = h_\infty (T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

H : coefficient de convection $h=10(\text{W}/\text{m}^2)$.

T : température de bord de l'assemblage ($^\circ\text{K}$).

T_∞ : température ambiante, ε : émissivité thermique égale à 0.82.

σ : constante de STEPHAN BOLTZMAN égale à $5.66.10^{-8} \text{W}/\text{m}^2.\text{K}^4$

- Au plan de symétrie d'assemblage, le flux de chaleur q_n est nul :

$$q_n = 0 \quad (\text{II.8})$$

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 :
 $T_0 = 300^\circ\text{K}$.

II.3.2 Equation finale :

Après avoir fait le bilan énergétique et les calculs nécessaires (voir § II.2) l'équation finale de la conduction de chaleur (bidimensionnel) 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.

ρ : 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.

La résolution du système d'équation (II.9) est très complexe à cause de la non linéarité des paramètres ainsi que le forme de la source de chaleur, d'ici, le recours aux méthodes de résolution numériques est indispensable.

II.4 LA SOURCE DE CHALEUR :

II.4.1 Les différents modèles des sources de chaleur :

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

II.4.1.a. Source de chaleur ponctuelle : [9]

L'énergie électrique délivrée par l'arc est assimilée à une source de chaleur ponctuelle mobile avec une vitesse constante V . l'expression d'énergie est donnée par :

$$Q = \eta UI$$

Avec :

η : le rendement thermique de l'arc.

U : la tension de soudage [Volt].

I : courant de soudage [ampère].

II.4.1.b. Source de chaleur en segment de ligne :

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.

II.4.1.c. Source de chaleur a distribution Gaussienne :

On retrouve deux solutions pour la source de chaleur a distribution Gaussienne qui permettent d'étudier l'influence des paramètres opératoires et géométriques sur la morphologie du cordon de soudure.

Les deux solutions qui se présentent sont :

- Un volume Gaussien de révolution qui impose un flux thermique de surface, mais l'utilisation d'une telle configuration ne tien pas en compte les effets de creusement de la matière et l'agitation dans le bain de fusion causée par l'arc.
- la seconde solution est basée sur la distribution volumique da la chaleur dans le joint à souder, cette source volumique en mouvement dans le joint soudé s'apparente à la forme du bain de fusion qui se déplace sous l'électrode. (voir annexe B)

La (Figure II.2) représente un tableau qui résume quelques configuration de source de chaleur surfacique a distribution Gaussienne.

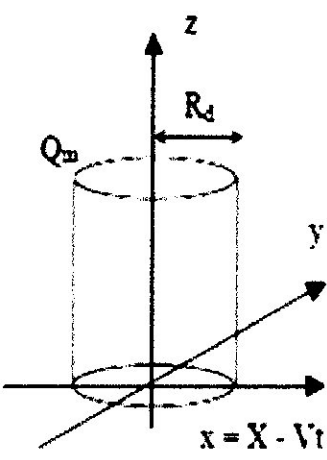
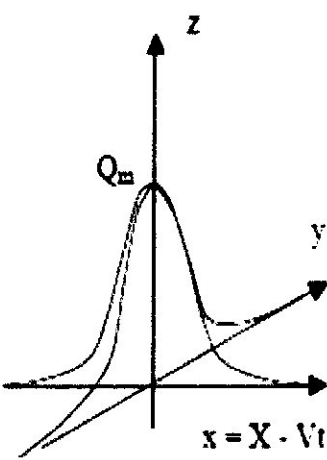
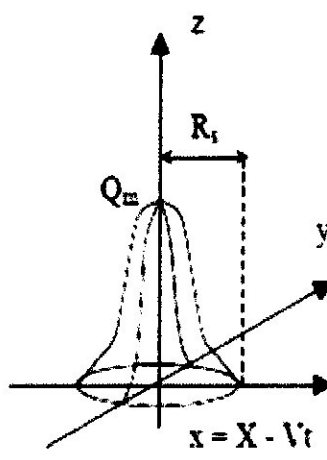
| Source surfacique : $q(x,y) = Q_0.f(x,y) / A = Q_m.f(x,y) \text{ W/m}^2$ | | |
|--|--|---|
| $r^2 = x^2 + y^2$  | $r^2 = x^2 + y^2$  | $r^2 = x^2 + y^2$  |
| Contante sur disque de rayon R_d | Gaussienne à répartition infinie | Gaussienne à répartition finie sur disque de rayon R_s |
| $q(x,y) = Q_m$ $R_d = \sqrt{\frac{Q_m}{\pi Q_0}}$ | $q(x,y) = q(r) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$ $q(x,y) = q(r) = Q_m \exp(-Kr^2)$ $K = \frac{1}{2\sigma^2} \quad ; \quad Q_m = \frac{Q_0 K}{\pi}$ | $q(x,y) = q(r) = \frac{3Q_m}{\pi R_s^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$ $q(x,y) = q(r) = Q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$ $q(x,y) = 0 \text{ si } r > R_s$ $Q_m = \frac{3Q_0}{\pi R_s^2}$ |
| $A = \pi R_d^2$ $f(x,y) = 1$ | $A = \frac{\pi}{K}$ $f(x,y) = \exp(-Kr^2)$ | <ul style="list-style-type: none"> • $A = \frac{\pi R_s^2}{3}$ • $f(x,y) = \exp\left(-\frac{3r^2}{R_s^2}\right)$ |
| | | $K = \frac{3}{R_s^2}$ |

FIG.II.2 configuration de quelques types de source surfacique à distribution Gaussienne. [3]

Mis à part les sources surfaciques, il existe d'autres configurations à distribution gaussienne, tel que les sources volumique. (Voir annexe B)

II.5 MODELISATION DU TERME SOURCE : [10]

Dans notre travail on va prendre comme source, le modèle bi - elliptique à distribution Gaussienne. La terme source « S » s'écrit comme suit :

- Pour le métal de base il représente l'énergie échangée :

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

- Pour la zone qui contient le bain de fusion (au niveau du cordon) :

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

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

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

En utilisant la méthode de tangente pour la linéarisation du terme source on aura :

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

Avec : l'indice (*) représente les paramètre calculé au cours de l'itération précédente.
Après identification nous trouvons :

$$\text{Au niveau du métal de base :} \quad \begin{cases} S_c = 2(h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T^{*4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^4) \\ S_p = -2(h_{\infty} + 4\sigma\varepsilon T^{*3}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

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

Pour le modèle de bain de fusion bi elliptique (FigureII.3) la fonction $f(x, y, t)$ est définie par [8]:

$$f(x, y, t) = -3 \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{(y - vt)^2}{a^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

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

$$q_0 = 6 \frac{Q}{\pi (r_x (r_{yav} + r_{yar}))} \quad (\text{II.16})$$

Avec : $Q = \eta . I . U$

L'équation (II.15) n'est valable que dans le cas d'un cordon rectiligne, car la vitesse V est suivant l'axe Y.

Dans le cas d'un cordon courbé (figure.II.4), la vitesse V a deux composantes V_x et V_y donc l'équation (II.15) devient :

$$f(x, y, t) = -3 \left(\frac{(x - v_x t)^2}{b^2} + \frac{(y - v_y t)^2}{a^2} \right) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$v_x = \|\vec{v}\| \cdot \cos \alpha \quad \text{Et} \quad v_y = \|\vec{v}\| \cdot \sin \alpha$$

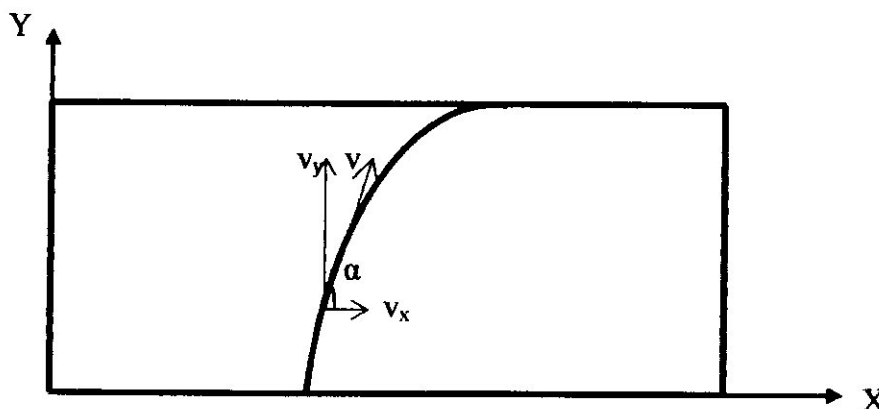


FIG.II.3- décomposition de la vitesse dans le cas d'un cordon courbé

Remarque :

Dans le cas où la fonction de la courbe (Figure.II.4), est de type $ax+b$, les deux composantes de la vitesse restent constantes le long du cordon ; c'est-à-dire ; $\sin \alpha$ et $\cos \alpha$ sont constants dans chaque point.

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 variations 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.

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

FIG.II.5- Propriétés physiques de l'aluminium. [14]

Le graphe ci-dessous représente la variation de la conductivité thermique en fonction de la température, d'après la référence [15] :

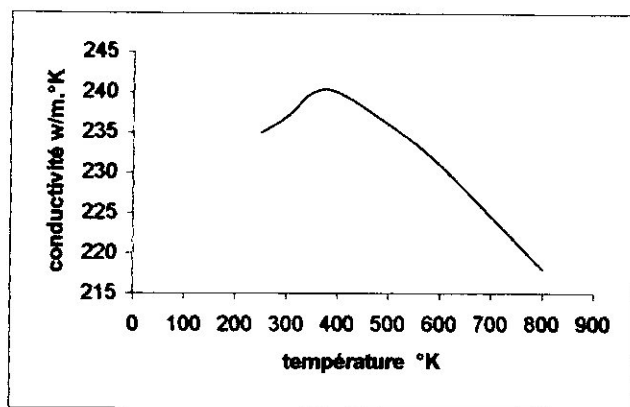


FIG.II.6- Variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

D'après le graphe (figure.II.8), on peut donner une approximation de la variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

➤ **La conductivité Thermique :**

- Pour $T < 674 \text{ °K}$: $K(T) = 217 + 0.006.T$ (W/m.k)

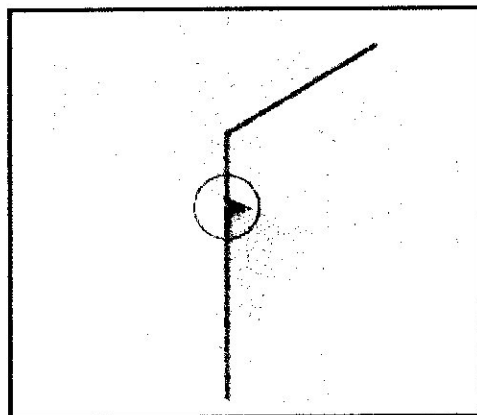
- Pour $T > 674 \text{ °K}$: $K(T) = 262 - 0.055.T$ (W/m.k)

Pour bien comprendre les variations des propriétés physique en fonction de la température (voir annexe C).

Chapitre III

Discretisation par la methode des Volumes Finis

- ❖ INTRODUCTION.
- ❖ DEMARCHES DE BASE DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS.
- ❖ CONDUCTIVITE THERMIQUE VARIABLE.
- ❖ DISCRETISATION DE L'EQUATION DE CHALEUR REGISSANT LE PROBLEME.
- ❖ CONDITIONS AUX LIMITES.
- ❖ REGLES DE BASE D'APPLICATION DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS.
- ❖ GENERATION DE MAILLAGE.



III.1 INTRODUCTION :

Les équations gouvernant le phénomène thermique en soudage, sont des équations différentielle aux dérivées partielles (voir chapitre II) de type non linéaire, cela rend la résolution de ces équations très complexe. Donc on fait appel aux méthodes numériques, en choisissant la méthode qui convient mieux le problème à traité.

Le principe des méthodes numériques est de remplacer le système d'équations différentielles complexes par un système d'équations algébriques discrétisés. Pour obtenir un système discrétisé, nous sommes amené à subdiviser le domaine d'études.

Une équation discrétisée est une équation algébrique reliant les valeurs de la variable « T_{ij} », dans les différents points voisins du maillage. Une telle équation est obtenue à partir de l'équation aux dérivées partielles de départ et contient donc la même information physique.

Il existe plusieurs méthodes pour discrétisé le système d'équations différentielles qui sont :

- **La méthode des éléments finis** : recommandée pour la résolution des problèmes à géométrie complexe.
- **la méthode des différences finies** : vu la facilité de sa mise en œuvre cette méthode est recommandée dans le cas des problèmes simples.
- **La méthode des volumes finis** : elle a pour avantage principal, le respect rigoureux des équations de conservation, non seulement de façon globale et pour des points suffisamment resserrés, mais aussi pour chaque volume du maillage quelle que soit sa forme.

Dans notre étude, on va utiliser la méthode des volumes finis notés (M.V.F) préconisée par PATANKAR et SPALDING en 1980 et ils ont prouvés sont efficacité dans la résolution des équations fortement couplées et non linéaires, tel que les problèmes rencontrés en transfert de chaleur et mécanique des fluides.

III.2 DEMARCHES DE BASE DE LA METHODES DES VOLUMES FINIS :

III.2.1 les démarches :

La méthodes consiste a subdivisé le domaine à étudier en volume de contrôle, ou cellules, qui ne se recouvrent pas et tels que chaque cellule englobe un point et un seul du maillage. L'équation aux dérivées partielles est intégrée sur chaque volume, les lois de variation locale de «T» étant utilisées pour estimer les termes de l'équation de chaleur.

Pour chaque cellule, une équation discrétisée reliant les valeurs de « T_{ij} » pour l'ensemble de points de maillage voisins, est ainsi obtenue. L'équation discrétisé déterminée par la (M.V.F) correspond à l'expression de conservation de la chaleur sous sa forme intégrale (bilan global),

La méthode des volumes finis permet donc d'assurer que la solution obtenue vérifie le principe de conservation sur chaque volume de contrôle et, de ce fait, sur le domaine complet. Ceci est indépendant du nombre de points de maillage.

L'application de la (M.V.F) nécessite la discrétisation du domaine de calcul, c'est-à-dire mettre en place les réseaux des points du maillage délimités par volumes de contrôles associés. Pour cela, il existe deux procédés choix :

Le procédé A :

Ce premier choix consiste à définir d'abord la grille de points, et de placer ensuite les faces des volumes de contrôle à mi-distance de deux nœuds consécutifs. Ceci donne des volumes de contrôle réguliers autour des points internes du maillage, et des demi volumes près de frontières (Figure III.1). Pour un maillage non uniforme, chaque face d'un volume de contrôle est toujours placée au milieu de deux points de maillage, chaque point de maillage n'est pas nécessairement au centre du volume de contrôle qui l'entoure.

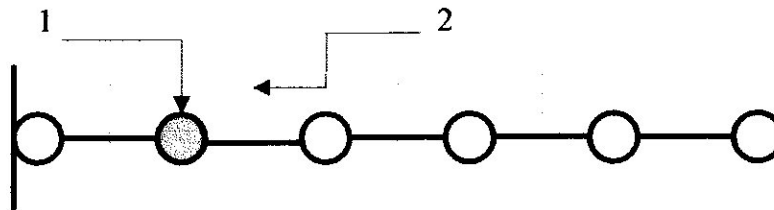


FIG.III.1 Emplacement des nœuds (1) et des faces de volume de contrôle (2) pour le procédé A.

Dans la figure III.2 on va représenter un demi volume de contrôle pour le pratique procédé.

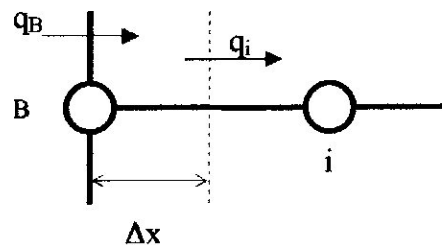


FIG III.2- Demi volume de contrôle pour le procédé A

Le procédé B :

Dans cette pratique on tient compte des discontinuités qui peuvent toucher les différents paramètres, tel que la conductivité « K », dans une ou plusieurs parties du domaine de calcul. Dans notre étude on va considérer que ces quantités sont uniformes à travers le volume de contrôle et on admet les discontinuités à ces frontières.

Pour cela, il est très important que l'emplacement des faces des volumes de contrôle coïncide avec les discontinuités, donc pour cette pratique, on commence tout d'abord par définir les volumes de contrôle de façon adéquate (faire en sorte que les faces des volumes de contrôle coïncident avec les discontinuités). Ensuite on place les nœuds associés aux centres des volumes. Donc, on aura aux frontières des demi volumes de contrôle avec un Δx nul.

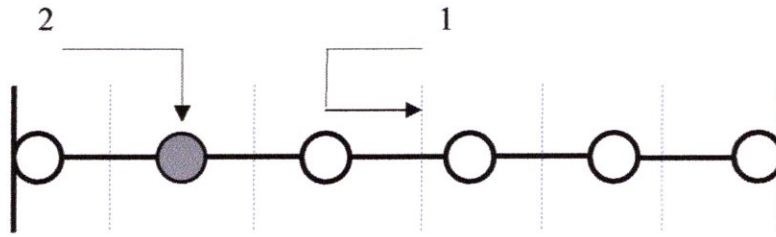


FIG.III.3 Emplacement des nœuds (2) et des faces de volume de contrôle (1) pour le procédé B.

Dans la figure III.4 on va représenter un demi volume de contrôle pour le procédé B.

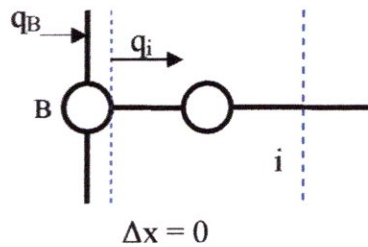
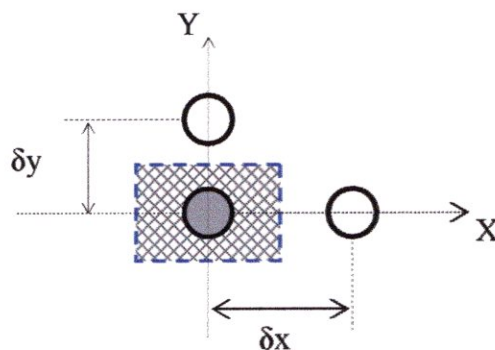


FIG III.4- Demi volume de contrôle pour le procédé B.

On peut résumer la formulation de la (M.V.F) comme suit :

- Le domaine est divisé en un certains nombres de volumes de contrôle non superposé tel que chaque volume entoure un nœud de maillage.
- L'équation différentielle est intégrée pour chaque volume de contrôle, en choisissant les expressions appropriées qui expriment les variations entre les différents points du maillage et qui permettent l'intégration.
- Après intégration, on obtient l'équation discrétisée pour un volume de contrôle.
- L'équation discrétisée obtenue représente la loi de conservation à travers le volume de contrôle approprié, de la même manière que l'équation différentielle exprime pour un volume de contrôle infinitésimal.
- Concernant les distances entre les nœuds voisins (δx et δy), ne sont pas nécessairement égales, en général ceci simplifier la solution, et plus exactement quand le maillage serra serré. (Figure III.5)

FIG III.5 Distance entre des nœuds voisins



III.2.2 Exemple illustratif de la méthode des volumes finis : [11]

Pour mieux comprendre la représentation précédente 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 :

$$\frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (\text{III.1})$$

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.6).

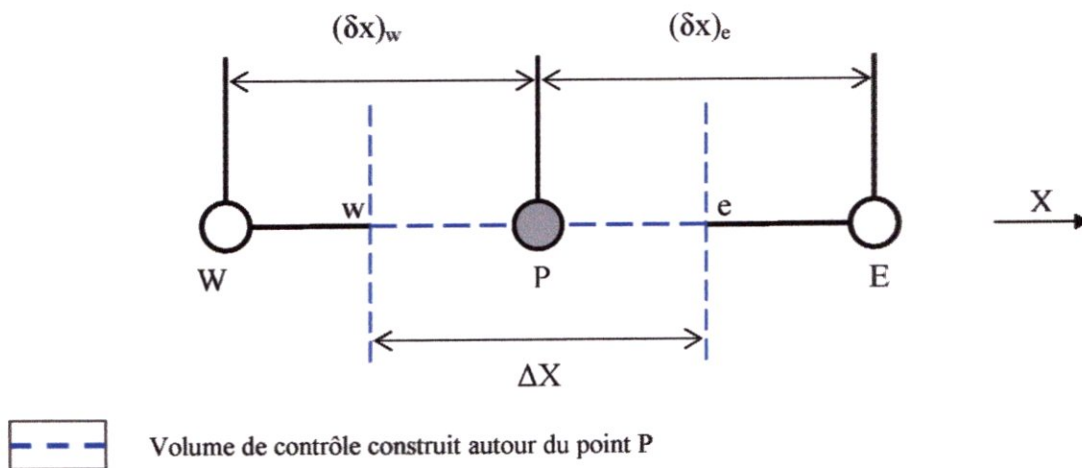


FIG III.6- Volume de contrôle dans le cas unidimensionnel

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 » décroissant. Les deux traits verticaux en pointillé (bleu) délimitent le volume de contrôle approprié du point P . Les frontières du volume de contrôle sont représentées par les lettres minuscules e et w .

En intégrant l'équation (III.1) sur le volume de contrôle on obtient :

$$\left(K \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(K \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (\text{III.2})$$

III.2.2.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.1). Deux lois de variation de T sont possibles voir (Figure III.7).

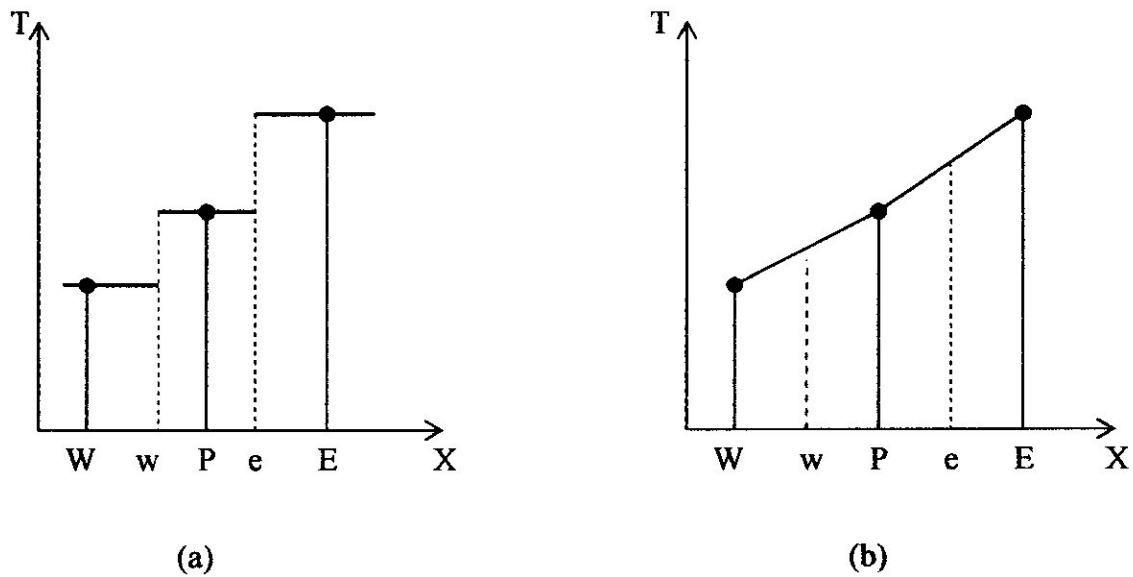


FIG III.7-types de loi de variation pour T

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.2) devient :

$$K_e \frac{(T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - K_w \frac{(T_P - T_W)}{(\delta x)_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (\text{III.3})$$

Où K_e et K_w sont les valeurs de la conductivité thermique sur les 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.3) sous la forme :

$$a_p T_P = a_e T_E + a_w T_W + b \quad (\text{III.4})$$

Par identification de l'équation (III.4) et (III.3) on obtient les coefficients et la constante b :

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

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

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

III.3 CONDUCTIVITE THERMIQUE VARIABLE : [12]

Dans l'exemple précédent, on a supposé que la conductivité thermique « K » est constante dans tout le volume de contrôle. Or qu'en réalité elle est en fonction de la température.

Le moyen le plus direct est de prendre un comportement linéaire :

$$K_e = \frac{K_P + K_E}{2} \quad (\text{III.5})$$

Tel que : $(\delta x)_{e^+} = (\delta x)_{e^-}$, se choix n'est pas excellent. Représentons 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 :

$$q_e = \frac{T_P + T_E}{\frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E}} \quad (\text{III.6})$$

$$q_e = \frac{K_P}{(\delta x)_{e^-}} (T_P - T_e) = -\frac{K_E}{(\delta x)_{e^+}} (T_e - T_E) \quad (\text{III.7})$$

Comme il est pratiquement impossible d'avoir une relation mathématique $K=K(x, y, z)$, on doit donc déterminer les coefficients a_E et a_W en termes 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 séparant les 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 :

$$a_E = \frac{K_e}{(\delta x)_e} \left[\frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right]^{-1} \quad (\text{III.8})$$

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

Une relation identique peut être obtenue pour a_W l'équation (III.8) implique que pour chaque volume de contrôle nous aurons un profil de température linéaire avec des pentes différents.

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 :

$$K_e = \left(\frac{1}{(\delta x)_e} \left(\frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right) \right)^{-1} \quad (\text{III.9})$$

Car :

$$\frac{q_e}{T_P - T_E} = \frac{K_e}{(\delta x)_e} = \left(\frac{(\delta x)_{e^-}}{K_P} + \frac{(\delta x)_{e^+}}{K_E} \right)^{-1} \quad (\text{III.10})$$

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

Nous aurons alors :

$$K_e = \frac{2K_E K_P}{K_E + K_P} \quad (\text{III.11})$$

Remarquons que 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 :

- Si K_E tend vers 0, cela donne bien un flux nul, alors que la formulation arithmétique n'aurait pas donné un flux nul.
- 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 est normal car la grande conductivité du matériau autour de point « P » offre peu de résistance par rapport à celle autour de E , cette formulation peut être établie pour d'autres dimensions.

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

- donner les valeurs estimées de « T » en chaque point du maillage (choix initial).
- De ces valeurs, seront déduits les différents coefficients des équations discrétisées.
- Résoudre les équations discrétisées pour avoir « T ».
- 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.4 DISCRETISATION DE L'EQUATION DE CHLAEUR REGISSANT **LE PROBLEM :**

III.4.1 Représentation du volume de contrôle bidimensionnel :

Après avoir représenté la discrétisation de l'équation de chaleur, par la méthode des volumes finis dans le cas unidimensionnel en régime permanent (voir III.2.1), et en tenant compte de la variation de la conductivité, on va procéder à la discrétisation de l'équation de chaleur, dans le cas bidimensionnel et en régime instationnaire, par la (M.V.F).

On considère un maillage bidirectionnel tel que les surfaces des volumes de contrôle seront placées dans le milieu des deux points du maillage (Nœud) voir (Figure III .8). le point P du maillage a deux voisins (W et E) dans la direction des abscisses et deux autres (N et S) dans la direction des ordonnées. Vu que le volume de contrôle est bidimensionnel, donc son épaisseur suivant la troisième direction est égale à l'unité.

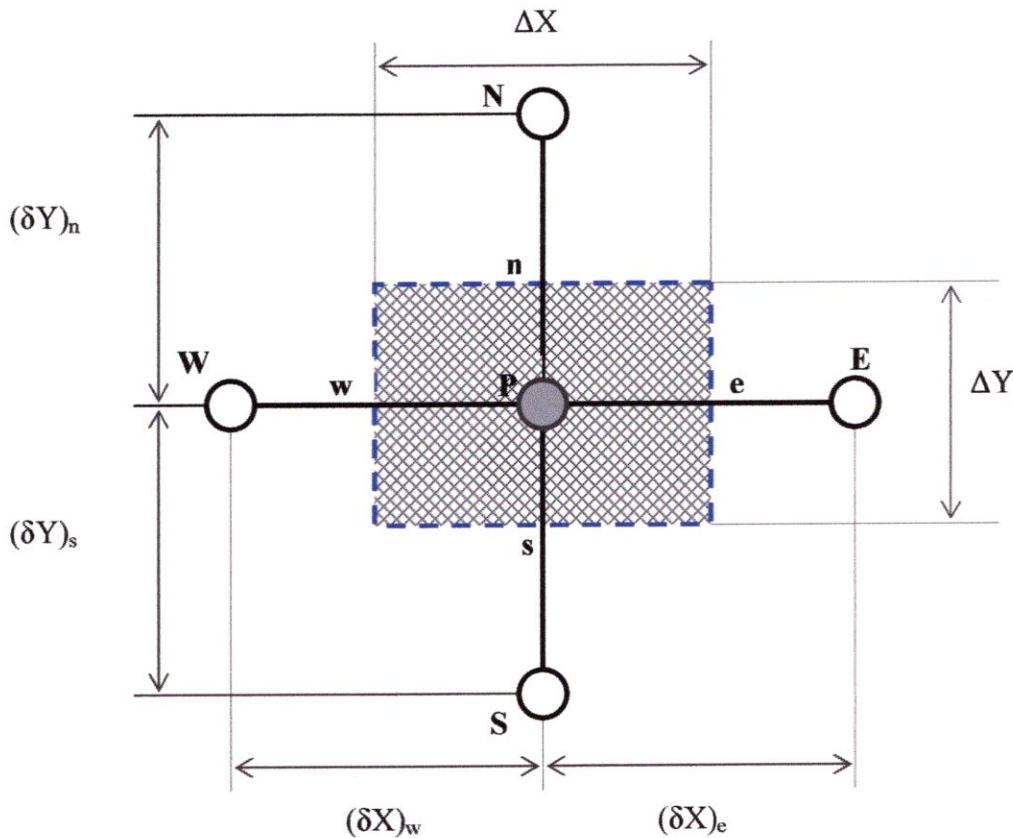


FIG.III.3 – Volume de contrôle bidimensionnel

III.4.2 Intégration de l'équation de chaleur :

L'équation de chaleur régissant le problème à étudier, dans le cas bidirectionnel instationnaire est donnée par :

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) + S(T, x, y, t) \quad (\text{III.12})$$

Avec le terme source S donné par :

$$S(T, x, y, t) = S_C + S_P T_P \quad (\text{III.13})$$

Nous allons intégrer à travers le volume de contrôle (figure III.3), et par rapport au temps aussi :

$$\left\{ \begin{aligned} \int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt &= \int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K(T) \cdot \partial T}{\partial y} \right) dx dy dt \\ &+ \int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} (S_C + S_P T_P) dx dy dt \end{aligned} \right. \quad (\text{III.14})$$

➤ L'intégration du membre gauche de l'équation (III.14) donne :

$$\int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = (\rho C_p T_P - \rho^0 C_p^0 T_P^0) \Delta x \Delta y \quad (\text{III.15})$$

Avec :

ρ^0 , C_p^0 et T_P^0 sont respectivement, la masse volumique, la chaleur spécifique et la température du nœud considéré à l'instant «t».

ρ , C_p et T_P sont respectivement, la masse volumique, la chaleur spécifique et la température du nœud considéré à l'instant «t+ Δt».

D'après la référence [12] :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P - (1-f) T_P^0] \Delta t \quad (\text{III.16})$$

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

➤ L'intégration du premier terme de membre droite de l'équation (III.14) donne :

$$\int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \int_s^e \int_t^n \left[\frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dy dt \quad (\text{III.17})$$

$$\int_{w,s}^e \int_{s,t}^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{K_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y dt \quad (\text{III.18})$$

En tenant compte de l'équation (III.9) l'équation (III.11) devient:

$$\iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt = \left[f \left[\frac{K_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{K_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] \right] \Delta y \Delta t \quad (III.19)$$

➤ L'intégration du second terme de membre droite de l'équation (III.14) donne :

De même pour le second terme du membre droit de l'équation (III.7), on obtient :

$$\iiint_{w n l}^{e s t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{K_n (T_N - T_p)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_p - T_s)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x dt \quad (III.20)$$

$$\iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \left[f \left[\frac{K_n (T_N - T_p)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_p - T_s)}{(\delta y)_s} \right] + (1-f) \left[\frac{K_n (T_N^0 - T_p^0)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_p^0 - T_s^0)}{(\delta y)_s} \right] \right] \Delta x \Delta t \quad (III.21)$$

➤ L'intégration du troisième terme de membre droite de l'équation (III.14) donne :

$$\iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} S(T, x, y, t) dx dy dt = \iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} (S_C + S_p T_p) dx dy dt \quad (III.22)$$

Tel que :

$$\iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} S_C dx dy dt = S_C \Delta x \Delta y \Delta t \quad (III.23)$$

$$\iiint_{w s l}^{e n t+\Delta t} (S_p T_p) dx dy dt = S_p [f T_p + (1-f) T_p^0] \Delta x \Delta y \Delta t \quad (III.24)$$

On remarque que les équations (III.19), (III.21) et (III.24) sont en fonction du facteur de pondération f . selon la valeur de f , le développement du schéma numérique peut se faire de trois manières.[11]

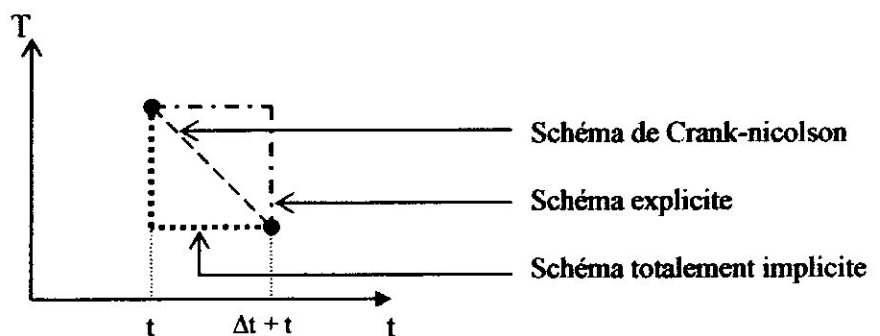


FIG III.4-Loi de variation locale de «T» pour la discrétisation en temps

- 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 totalement implicite.
- Si $f = 0.5$, le schéma est dit schéma de Crank-Nicolson.

Dans notre travail, on va prendre le schéma totalement implicite car il présente une meilleure stabilité comparant aux autres schémas, il tient compte des valeurs calculées et il traduit une réalité physique.

$$\left\{ \begin{aligned} (\rho C_p T_p - \rho^0 C_p^0 T_p^0) \Delta x \Delta y = & \left[\frac{K_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{K_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta t + \left[\frac{K_n (T_N - T_p)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_p - T_s)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta t + \\ & + S_p T_p \Delta x \Delta y \Delta t + S_c \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \right. \quad (\text{III.25})$$

On peut écrire l'équation (III.25) sous la forme suivante :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (\text{III.26})$$

Par analogie entre (III.25) et (III.26) on peut définir les coefficients comme suit :

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

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

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

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

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

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

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

III.5 CONDITIONS AUX LIMITES :

Les conditions aux frontières de la plaque à souder sont donnée par :

$$q_n = h_\infty (T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \tag{III.27}$$

On va appliquer l'équation (III.27) sur une demi plaque (Figure-III.5) :

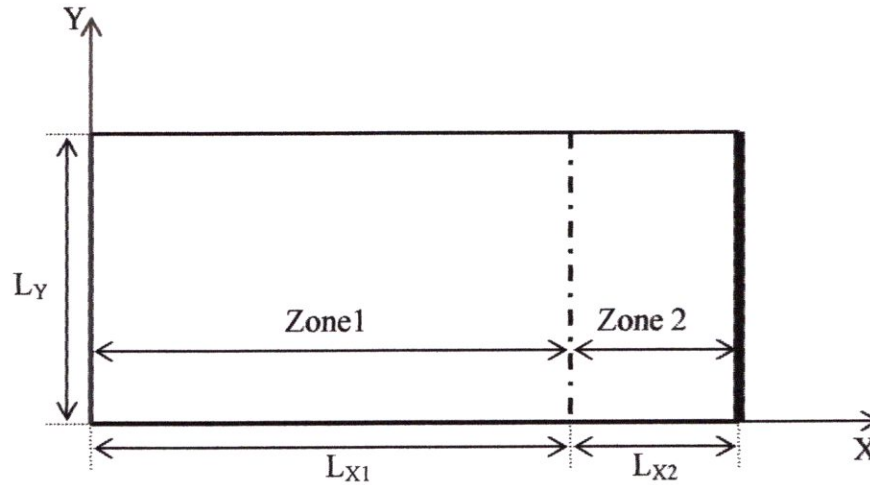


FIG.III.5-Illustration des Frontières du demi plaque pour un cordon rectiligne

On prend un point «P» dans chaque faces des frontières de la demi plaque, l'équation (III.27) devient alors :

$$q_n = h_\infty (T_p^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_p^{*4} - T_\infty^4) \tag{III.28}$$

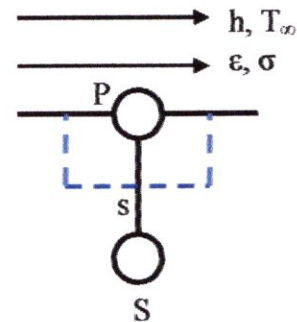
Maintenant, On va appliquer l'équation (III.28) sur chaque face de la plaque :

Face supérieure :

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

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

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



On peut écrire :

$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

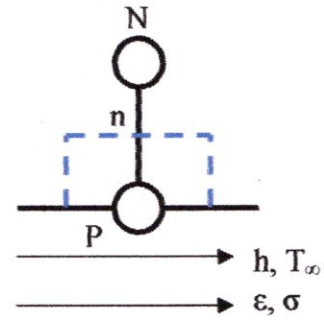
Avec : $a_p = a_s = \frac{k_s}{\Delta Y}$, $b = h_\infty (T_\infty - T_p^*) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^{*4})$ Et $a_E = a_N = a_W = 0$.

Face inférieure :

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

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

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



On peut écrire :

$$a_p T_P = a_N T_N + b$$

Avec :

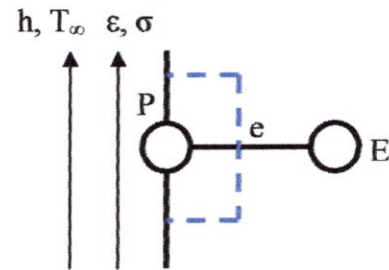
$$a_p = a_N = \frac{k_n}{\Delta Y}, \quad b = h_\infty (T_\infty - T_P^*) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_P^{*4}) \quad \text{Et } a_E = a_S = a_W = 0.$$

Face gauche :

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

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

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



On peut écrire :

$$a_p T_P = a_E T_E + b$$

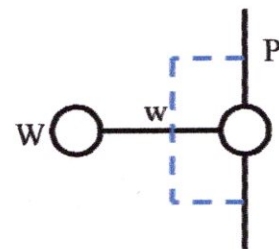
Avec :

$$a_p = a_E = \frac{k_e}{\Delta X}, \quad b = h_\infty (T_\infty - T_P^*) + \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_P^{*4}) \quad \text{Et } a_N = a_S = a_W = 0.$$

Face droite :

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

$$-k_e \frac{(T_P - T_W)}{\Delta X} = 0 \quad \Rightarrow T_P = T_W$$



III.6 REGLES DE BASE D'APPLICATION DE LA METHODE DES VOLUMES FINIS :

Les règles de base pour l'application de la (M.V.F) sont comme suit :

Règle N°1 : la consistance.

Lorsque 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.

Règle N°2 : coefficients positifs.

Si on a 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.

Règle N°3 : pente négative.

Pour la linéarisation du terme source, le coefficient a_p peut devenir négatif, il faut donc que S_p soit négatif pour ne pas courir se risque.

$$\bar{S} = S_C + S_p T_p$$

Règle N°4 : somme des coefficients voisins

Lorsque le terme source est constant, le coefficient a_p doit être égale à la somme des coefficients des voisins $a_p = \sum a_{nb}$.

III.7 GENERATION DE MAILLAGE :

III.7.1 Introduction :

La génération de 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 : [13]

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

Dans notre étude on va utiliser deux types de maillage, un maillage rectiligne type « H » (dans le cas d'un cordon rectiligne) et un maillage courber, simplement connexe, (dans le cas d'un cordon courber).

III.7.2 Génération de maillage pour un cordon rectiligne :

Vue la forme de la plaque, on a choisi le maillage type **H**. Pour cela, on a procédé comme suit :

- Choisir le nombre des volumes de contrôles de chaque zone suivant (**X**).
- Choisir le nombre des volumes de contrôles suivant (**Y**).
- Construire les vecteurs facettes sur les deux axes.
- Placer les nœuds du maillage.

La stratégie pour lequel nous avons opté, consiste à partager la plaque en deux zones selon la direction de la longueur de la pièce (suivant l'axe des **X**), où la deuxième zone qui englobe le cordon de soudure. Pour cette zone, un maillage fin est utilisé vu l'importance du gradient de température au niveau du cordon de soudure, alors que pour le reste de l'assemblage, un maillage plus grossier est opté.

Dans la direction de déplacement de l'arc (suivant l'axe des **Y**), un maillage fin et régulier est utilisé.

On passe en suite à l'optimisation du pas temporel « Δt » par le biais du pas Δy liés par la relation :

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

III.7.3 Génération de maillage pour un cordon courbé : [13]

Dans le cas d'un cordon courber, la géométrie à mailler est une région simplement connexe (Figure III.6), c'est-à-dire, que toutes les courbes reliant deux points quelconques sont conciliables (ou réductible) par variation continue. Ou bien en d'autre terme, tout contour fermé dans cette région peut être réduit à un point par déformation continue sans jamais quitter la région.

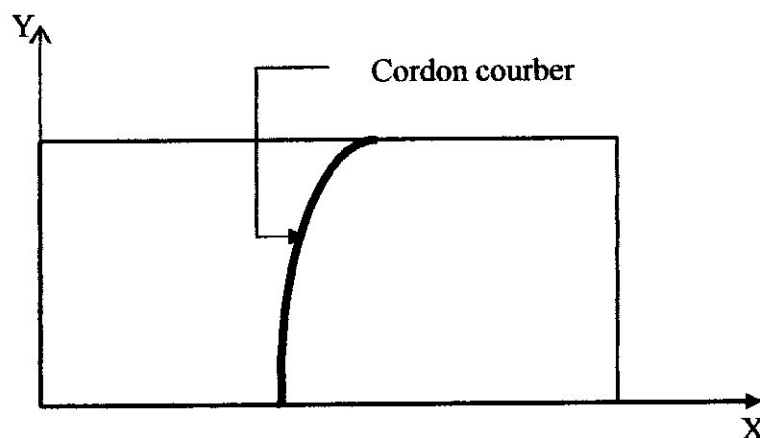


FIG.III.6- Illustration du domaine à mailler dans le cas d'un cordon rectiligne

Pour faire la génération de maillage d'un domaine simplement connexe dont la forme générale est donnée par (Figure III.6), il est intéressant d'appliquer l'idée de génération de maillage dans les régions rectangulaires (Figure III.7).

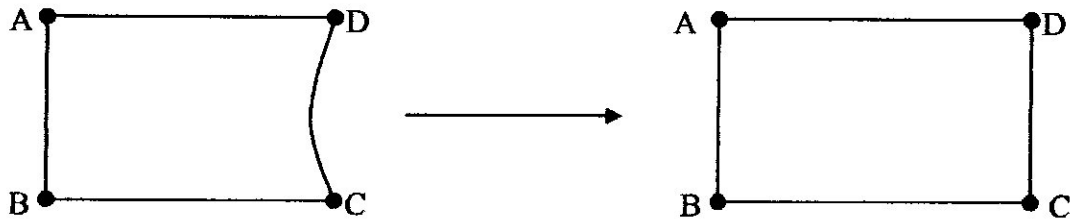


FIG.III.7 Transformation d'un domaine simplement connexe à un rectangle

On obtient après transformation du domaine quatre cotés qui sont respectivement AB, BC, CD et DA, en faisant des transformations continue à le côté CD, on peut la rendre une ligne droite comme la montre la figure précédente.

Pour le rectangle dans la (Figure III.7), considérons la subdivision par N_x et N_y nœuds sur l'axe horizontal des x et vertical des y respectivement. Par analogie, les cotés AB et CD du domaine seront subdivisés en N_y nœuds et les cotés AD et BC seront subdivisés en N_x nœuds. Le procédé de génération de maillage se fait suivant deux étapes principales, la première étape c'est la génération des nœuds de frontière de chaque cotés puis l'étapes de génération de nœuds internes.

III.7.3.a. Génération des nœuds sur le contour du domaine :

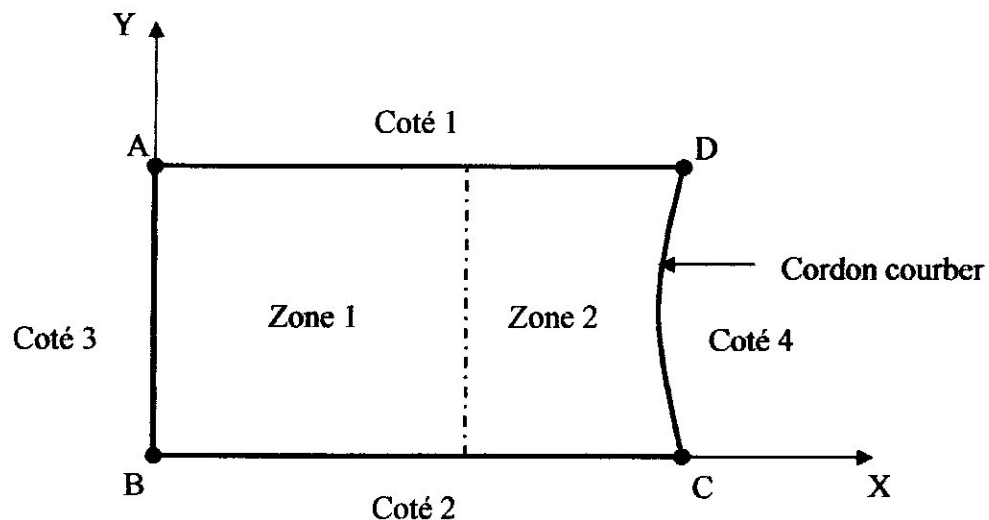


FIG.III.8- Illustration des frontières du demi plaque pour un cordon courber

D'après le domaine à mailler (Figure.III.8), on a un seul coté qui est courbé donc la génération des nœuds sur le contour se fait comme suit :

- Pour les cotés 1 et 2, c'est-à-dire BC et AD, on remarque que Y_A et Y_D sont égal, donc on va divisé le segment $[X_A, X_D]$ en N_x nœuds dont les points A et D sont inclus voir (Figure.III.9.a).

- De même, on remarque que Y_B et Y_C sont égal, donc on va divisé le segment $[X_B, X_C]$ en N_X nœuds dont les points B et C sont inclus voir (Figure.III.9.b).

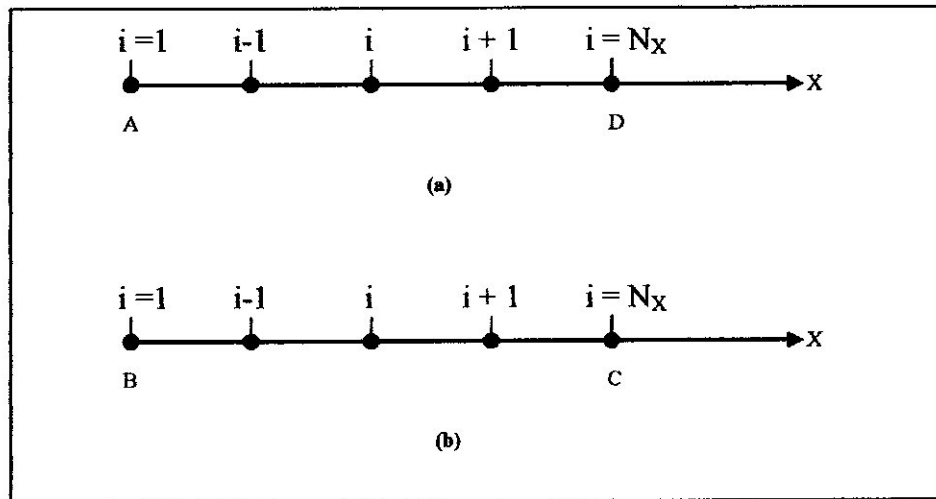


FIG.III.9 - Génération des nœuds sur les cotés 1 et 2.

- De même pour le côté AB, on remarque que X_A et Y_B sont égal, donc on va divisé le segment $[Y_A, Y_B]$ en N_Y nœuds dont les points A et B sont inclus voir (Figure.III.10).

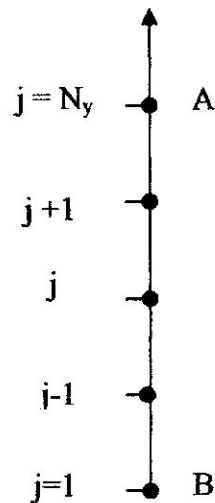


FIG.III.10 - Génération des nœuds sur le côté 3.

- Pour le côté 4, on suppose que les fonction du côté CD choisie est univoque en y , c'est-à-dire, pour chaque valeur de « y » il y a une image sur les cotés AB et BC.

La génération des nœuds sur ce côté se fait, soit en choisissant les X_i et déterminer les Y_i , soit en choisissant les Y_i et déterminer par la suite les X_i . Pour cela, on calcule les deux valeurs, $X_{dis} = |x_A - x_B|$ et $Y_{dis} = |y_A - y_B|$, on calcule par la suite le $\text{Max}(X_{dis}, Y_{dis})$, si il est égal a Y_{dis} , on choisi les Y_i ensuite on détermine les X_i en utilisant la fonction qui passe par les deux point C et D.

Exemple :

On prend une fonction quelconque $f(y)$ pour le coté CD, mais à condition qu'elle soit univoque (Figure.III.11).

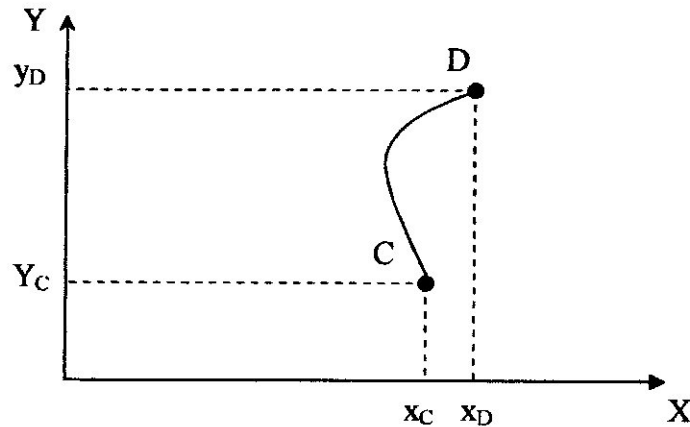


FIG.III.11- Discrétisation sur le coté AD

Les coordonnées de chaque nœuds sur le coté 3 est donnée par :

$$\begin{cases} y_{CD}(j) = y_C + (j-1)\Delta y_{CD} \\ x_{CD}(j) = F_{Cd}^{-1}(y_{CD}(j)) \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_y$$

Ou : F_{CD}^{-1} la fonction inverse du coté CD, $\Delta y_{CD} = \frac{|y_D - y_C|}{(N_y - 1)}$ et N_y : nombres de nœuds sur CD.

III.7.3.b. Génération des nœuds intérieurs du domaine :

Après la détermination des nœuds dans le contour du domaine, on va citer la procédure à suivre pour la génération des nœuds internes du domaine.

Chaque nœud est caractérisé par deux valeurs (x, y) qui permettent de déterminer sa position dans le domaine.

La procédure qu'on a suivie, est divisée en deux étapes :

- La première étape consiste à déterminer les ordonnées y_i de tout les points, et cela part une interpolation entre les cotés haut et bas du domaine.
- La seconde étape consiste à déterminer les abscisses x_i de ces nœuds par une interpolation entre les cotés gauche et droite du domaine.

Comme le nombre de nœuds sur le coté haut et bas égal à N_x nœuds, alors, chaque nœuds d'un coté sera relié avec un nœud de l'autre coté par une courbe qui contient N_y nœuds dont les extrémités sont inclus, et ainsi de suite jusqu'à la génération complète de grille de maillage, (voir chapitre V, résultats partie maillage).

Chapitre IV

Résolution Numérique

- ❖ METHODES DE RESOLUTION DES SYSTEMES ALGEBRIQUES.
- ❖ ALGORITHME DE THOMAS.
- ❖ METHODE DE RESOLUTION UTILISEE DANS LE CODE DE CALCUL.
- ❖ ORGANIGRAMME DU PROGRAMME PRINCIPAL.

```

Données: Δt, TEMPSMAX, Tinit, ω, MAXIT

Pour I = 1, NI
  Pour J = 1, NJ
    T(L) = Tinit; T'(j) = Tinit;
    SQ(I,J), Sp(I,J), ae(I,J); aw(I,J); an(I,J); as(I,J); dV = dx*dy, ap0;
    ap(I,J) = an(I,J) + aw(I,J) + an(I,J) + as(I,J) - sp(I,J) * dV + ap0;
  Fait
Fait
Tantque (TEMPS < TEMPSMAX) (Marche dans le temps)
  T* = T; SOMRES = 1; K = 0;
  Itération jusqu'à convergence :
  Tantque (SOMRES > MAXRESET & K < MAXIT)
    Balayage dans la direction J :
    Pour I = 2, NI-1
      P(I) = 0
      Q(I) = T(I)
      Pour J = 2, NI-1
        A = Ap(I,J) / ω; B = An(I,J); C = As(I,J);
        D = An(I,J) * T(I+1,J) + Aw(I,J) * T(I-1,J) + Sq(I,J) * dV + ap0 * T'(L)
          + (1-ω) * A * T(L)
        P(J) = B / (A - C * T(L))
        Q(J) = C * Q(I-1) + D / (A - C * P(J-1))
      Fait
    Fait
  
```

IV.1 METHODES DE RESOLUTION DES SYSTEMES ALGEBRIQUE :

IV.1.1 Introduction :

Il existe plusieurs méthodes de résolution des modèles mathématiques (exemple : équations différentielles), qui sont issus de la modélisation des problèmes physiques réels, dans notre cas la modélisation du problème de soudage. Généralement, après la modélisation et la discrétisation on obtient les systèmes linéaires ou non linéaires.

Comme on l'a déjà cité dans le chapitre III, la résolution doit être faite numériquement, pour cela, on a le choix entre deux méthodes, la méthode directe et la **méthode itérative**. Il n'existe pas de règles bien déterminer pour le choix entre les méthodes directes et les méthodes itératives. Toutefois, les méthodes itératives sont rarement utilisées pour la résolution des systèmes à matrice pleine et de faible dimension et les méthodes itératives sont généralement préférées pour résoudre les systèmes de grande taille. En grande partie, la matrice n'étant pas transformée au cours des calculs, le problème de l'accumulation des erreurs devient moins crucial.

Soit un système matricielle suivant :

$$\begin{cases} [A].\{T\} = \{B\} \\ T \in R^N \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Avec : $[A]$: matrice, $\{B\}$: vecteur, $\{T\}$: vecteur des inconnus (températures).

Les problèmes sont généralement classés suivant les caractéristiques de la matrice $[A]$, soit :

- La matrice A est épars (creuse) et de grande taille. De grande taille : c'est-à-dire, des matrices d'ordres égaux à plusieurs centaines ou plusieurs milliers. Creuse : c'est-à-dire comporte beaucoup d'éléments nuls.
- La matrice A est de taille réduite et pleine. Taille réduite : c'est-à-dire, les matrice dont la taille est d'ordre inférieur a 100. Pleine : c'est-à-dire, la matrice comporte peu ou pas d'éléments nuls.

IV.1.2 Méthode Directe : []

L'équation matricielle (IV-1) peut se réécrire sous la forme :

$$\{T\} = ([I] - [A])^{-1} \{B\} \quad (\text{IV-2})$$

En fait, ceci ne marche rigoureusement que si les coefficients a_p et a_{nb} , qui forment la matrice $[A]$, sont indépendants de (T) , c'est-à-dire Si le système est réellement linéaire.

Dans le cas contraire, quelques itérations sont théoriquement nécessaires, en actualisant les coefficients à partir des valeurs nouvellement calculées.

L'inversion de la matrice à partir du calcul de la matrice des cofacteurs est bien entendu une méthode à proscrire absolument. On a pu évaluer qu'elle n'était rentable, en terme de temps de calcul, que pour des valeurs de N inférieures ou égales à 5. Les seules méthodes directes classiques susceptibles de permettre la résolution de l'équation (IV.2) sans impliquer le temps de calcul prohibitif sont les techniques d'élimination de Gauss ou méthodes du pivot.

Il en existe un certain nombre de variantes (pivot maximum, méthode de Gauss-Jordan, réduction de Crout, méthode de Cholesky). En effet, bien que la matrice $([I] - [A])$ soit très creuse, ses dimensions, dès que le maillage n'est pas particulièrement grossier, rendent ces méthodes très lourdes d'utilisation.

Pour fixer les idées, notons qu'une méthode itérative est généralement préférable lorsque le nombre de noeuds du maillage dépasse environ 200, ce qui est extrêmement faible si on a affaire à un problème bi- ou tri-dimensionnel. En outre, la nécessité d'actualiser les coefficients dépendants de T c'est-à-dire les non-linéarités, joue également contre l'emploi des méthodes directes.

IV.1.3 Méthodes itératives :

Dans le cadre de la méthode des volumes finis, qui permet de traiter des phénomènes de transfert de chaleurs souvent couplés et fortement non linéaires, notre préférence va nettement aux méthodes itératives. Les méthodes itératives sont appliquées :

- Dans tous les problèmes 3-D.
- Dans tous les problèmes fortement non linéaires (transport convectif de Quantité de mouvement en particulier),
- Dans les problèmes 2-D en régime permanent (à moins d'un maillage très grossier, méthode d'élimination de Gauss) ou en régime transitoire (la concurrence avec le schéma A.D.I. est alors très forte).

IV.1.3. a. Méthode de Jacobi :

La méthode de Jacobi, également appelée méthode de Liebmann ou méthode des déplacements simultanés, est la plus évidente des méthodes itératives.

A partir de l'équation matricielle (IV-1), qui est en fait la représentation condensée d'un système d'équations algébriques de forme générale.

On procède par itérations successives, en commençant par une valeur supposée du résultat que nous noterons T_0 . Dans le cas d'un problème en régime permanent, seules des considérations physiques permettent de choisir un champ thermique T_0 pas trop éloigné de la solution réelle, afin de réduire le nombre total d'itérations nécessaires.

La méthode de Jacobi est une méthode particulièrement facile à comprendre. Son intérêt est en fait surtout pédagogique car sa vitesse de convergence est généralement très faible. Elle a été totalement supplantée dans la pratique par la méthode voisine de Gauss-Seidel.

IV.1.3.b Méthode de Gauss Seidel :

Cette méthode, aussi appelée méthode des déplacements successifs ou méthode point par point, se présente comme une variante de la précédente. De la même manière, on part d'une valeur supposée pour l'ensemble du champ thermique $(T)_0$ puis, sans garder deux vecteurs en mémoire, on calcule, en balayant le maillage tout entier, les valeurs de $(T)_1$ par:

$$T_p = \sum_{nb} \frac{a_{nb}}{a_p} T_{nb}^* + \frac{b}{a_p} \quad (\text{VI-4})$$

Si le point voisin nb a déjà été traité lors du balayage, on a $T_{nb}^* = T_{nb,1}$. Dans le cas contraire, $T_{nb}^* = T_{nb,0}$. De toute manière, on utilise la valeur de T_{nb} disponible au moment du calcul. Une itération consiste en un balayage complet du maillage. Comme pour la méthode de Jacobi, on répète les itérations jusqu'à convergence. La résolution d'équations couplées s'effectue de la même manière que pour la méthode de Jacobi.

La méthode de Gauss-Seidel s'avère en général bien plus rapide que celle de Jacobi. En outre, elle demande moins de stockage-mémoire.

De plus, la confusion mentale entre itérations et pas de temps (Ces deux notions sont tout de même différentes. Une méthode itérative peut parfaitement être utilisée en régime permanent.

Cette méthode réunit à première vue tous les qualités. Toutefois, elle reste encore souvent trop lente, et de plus sujette à divergence.

IV.1.5 Comparaison des deux Méthodes :

| | Avantages | Inconvénients |
|--------------------------|---|--|
| Méthode directe | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Conduit à une solution en un nombre fini d'étape ➤ pas des erreurs d'arrondi. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Nécessite une assez grande place mémoire. ➤ Employées pour la résolution des petits et moyens systèmes. |
| Méthode itérative | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Préférées pour les grands systèmes non linéaires. ➤ Ne nécessite pas une grande place mémoire. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Problème de convergence (dépend de l'estimation initiale) |

Dans le programme [17] de calculs qu'on a traduit en langage FORTRAN avec quelques modifications, on utilise une méthode itérative (GAUSS-SIEDEL) en association avec la méthode ligne par ligne (THOMAS), une méthode qui a été utilisée par PATHANCARD, pour la résolution des équation de même type que la notre (voir Eq-IV.5).

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (\text{IV.5})$$

IV.2 ALGORITHME DE THOMAS :

L'algorithme de THOMAS qu'on appelle aussi la méthode T.D.M.A (par extension algorithme de la matrice tri diagonale).

L'algorithme de thomas est utilisé pour la résolution des matrices tri diagonale.

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & a_n & b_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix}$$

Si le vecteur $\begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}$ est la solution recherchée on va trouver, En passant par les étapes

suivante :

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{c_1}{b_1} \\ \gamma_i = \frac{c_i}{b_i - a_i \gamma_{i-1}} \quad i = 2 \rightarrow (n-1) \end{cases} \quad \begin{cases} B_1 = Y_1 \\ B_i = \frac{b_i - a_i b_{i-1}}{b_i - a_i \gamma_{i-1}} \quad i = 2 \Rightarrow n \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_n = B_n \\ X_i = B_i - \gamma_i X_{i+1} \quad i = (n-1) \rightarrow 1 \text{ par un pas } -1 \end{cases}$$

et on va trouver la dernière solution du vecteur X_n jusqu'à la première solution X_1 .

IV.2.1 Exemple illustratif de la T.D.M.A :

Soit un problème unidimensionnel :

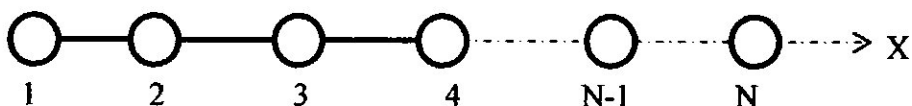


FIG. IV.1- Numération des nœuds du réseau.

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

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (\text{IV.6})$$

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

a_p, a_E, a_W et b (voir § III.2.2)

Pour les nœuds externe 1 et N, nous aurons :

$$a_1 T_1 = b_1 T_2 + d_1 \quad (\text{IV.7})$$

$$a_N T_N = c_N T_{N-1} + d_N \quad (\text{IV.8})$$

Posons $c_1 = 0$ et $b_N = 0$, les équations (IV.7) et (IV.8) ont été obtenues pour le cas d'un flux de chaleur pris comme condition aux limites. Lorsque la température qui est connue, ces équations restent toujours valables en faisant un choix approprié des coefficients.

Par exemple, si on connaît la température sur la frontière gauche du domaine, on aura :

$$a_i = 0; b_i = 0 \text{ et } d_i = \text{la valeur numérique de } T_i.$$

Mettons l'équation (IV.6) sous la forme :

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i} \text{ et } Q_i = \frac{d_i}{a_i} \quad (\text{IV.10})$$

Si on injecte cette dernière équation dans l'équation (IV.6) pour $i=2$ on obtiendra :

$$T_2 = P_2 T_3 + Q_2 \quad (\text{IV.11})$$

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

$$T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (\text{IV.12})$$

En remplaçons l'équation :

$$T_{i-1} = P_{i-1}T_i + Q_{i-1} \quad (\text{IV.13})$$

Dans l'équation (IV. 6) on obtient :

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i (P_{i-1} + Q_{i-1}) + d_i \quad (\text{IV.14})$$

La relation aussi obtenue sera arrangée pour devenir :

$$T_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} T_{i+1} + \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (\text{IV.15})$$

Avec :

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

Notons aussi que P_i et Q_i ont la même dénominateur et qu'il dépend des valeurs de P_{i-1} et Q_{i-1} , ce processus récursif nécessite la connaissance d'un point de départ. Celui-ci a été précédemment déterminé par la relation (IV. 10).

Au point « n » nous aurons :

$$P_N = 0 \quad \text{Car} \quad b_N = 0 \quad \rightarrow \quad Q_N = T_N$$

La valeur de T_N étant désormais connue nous pourrions alors calculer les autres valeurs de température par un processus substitution inverse.

IV.3 METHODE DE RESOLUTION UTILISEE DANS LE PROGRAMME DE CALCUL :

Comme on l'a déjà cité auparavant la méthode qu'on a utilisé pour la résolution du système (IV.5) est la méthode ligne par ligne qui est inspirée, de la combinaison entre la méthode GAUSS SIEDEL et l'algorithme de THOMAS.

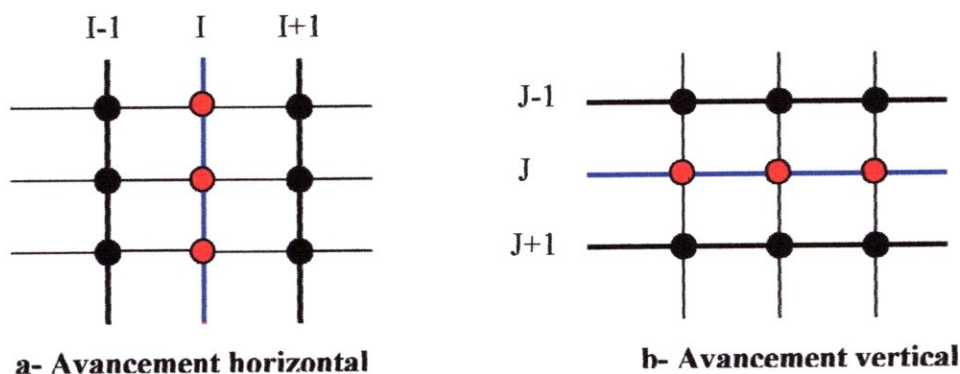


FIG.IV.2- illustration des modes d'avancement de la méthode ligne par ligne.

L'application de la méthode ligne par ligne se fait comme suit :

- 1^{ère} étape : Choisir les conditions initiales de la variable « T » pour tout le domaine d'étude.
- 2nd étape : Choisir une direction du domaine par exemple Y , (voir Figure IV.2.b), et considérer l'autre direction comme constante notée (*), on obtient :

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

- 3^{ème} étape : Résoudre les matrices tri diagonales obtenues à l'aide de l'algorithme T.D.M.A pour chaque ligne du domaine d'étude.
- 4^{ème} étape : Répéter à partir de la 2^{ème} étape les mêmes opérations pour l'autre direction X , (voir Figure IV.2.a).
- 5^{ème} étape : Poser les valeurs obtenues comme choix de départ.
- 6^{ème} étape : Retourner à la 2^{ème} étape jusqu'à la convergence.

Maintenant, on va représenter l'algorithme de résolution utilisée dans notre code de calcul :

| Algorithme ligne par ligne SOR. |
|---|
| <p>Données : Δt, TEMPSMAX, Tinit, ω, MAXIT</p> <pre style="margin: 0; padding-left: 20px;"> Pour I = 1, NI Pour J = 1, NJ T(I,J) = Tinit ; T*(i,j) = Tinit ; SC(i,j); Sp(i,j); ae(i,j) ; aw(i,j) ; an(i,j) ; as(i,j); dV=dx*dy; ap0; ap(i,j) = ae(i,j)+aw(i,j)+an(i,j)+as(i,j)-sp(i,j)*dV+ap0; Fait Fait Tantque (TEMPS < TEMPSMAX) (Marche dans le temps:) T* = T ; SOMRES = 1 ; K = 0 ; Itération jusqu'à convergence : Tantque (SOMRES > MAXRES ET K < MAXIT) Balayage dans la direction J : Pour I = 2, NI-1 P(1) = 0 Q(1) = T(1) Pour J = 2 , NJ-1 A= Ap(i,j) / ω ; B = An(i,j) ; C = As(i,j) ; D = Ae(i,j) * T(I+1,j) + Aw(L,J)* T(I-1,J) + Sc(L,J) * dV + ap0 * T*(I,J) + (1-ω) * A * T(I,J) P(J) = B / (A - C * T(I,J)) Q(J) = C*Q(J-1) + D) / (A-C*P(J-1)) Fait </pre> |

```

    Pour J = NJ-1,2,-1
      T(i,j) = P(J) * T(I,J+1) + Q(J)
    Fait

    Balayage dans la direction I :

    Pour J = 2, NJ-1
      P(1) = 0
      Q(1) = T(1)
      Pour I = 2, NI-1
        A = Ap(I, J) / ω ; B = A(I,J) ; C = Aw(I,J)
        D = An(I,J) * T(I,j+1) + As(I,J) * T(I,J-1) + Sc(I,J) * dV + Ap0 * T'(I,J)
          + (1-ω) * A * T(I,J)
        P(1) = b / (A-C*P(I-1))
        Q(1) = (C * Q(I-1) + D) / (A-C*P(I-1))
      Fait
    Pour I = NI - 1,2,-1
      T(I,J) = P(I) * T (I+1,J) + Q(I)
    Fait
  Fait

  Calcul du résiduel:

  SOMRES = 0;
  Pour I = 2, NI-1
    Pour J = 2, NJ-1
      RES = ABS[ Ap(I,J) * T(I,J) - (Ae(I,J) * T(I+1,J) + Aw(I,J) * T(I-1,J) +
        An(i,j) * T(i,j+1) + As(i,j) * T(i,j-1) + Sc(i,j) * dV + Ap0 * T'(i,j))]
      SOMRES = SOMRES + RES
    Fait
  Fait

  SOMRES = SOMRES

  K = K + 1

  Fin tantque (Fin de boucle des itérations)

  TEMPS = TEMPS + Δt

  Fin tantque (Fin de boucle dans le temps)

```

Mis à part l'algorithme ligne par ligne sore , il existe d'autres algorithmes qui permettent la résolution numérique (méthodes itératives), qui sont, la méthode SOR et la Combinaison entre SOR et ADI (voir annexe D).

IV.4 ORGANIGRAMME DU PROGRAMME PRICIPAL :

Dans cette partie, on va expliquer le programme principal du code de calcul, dans lequel on a utilisé le fortran comme langage informatique. Le programme principale c'est la partie la plus importante dans le code de calcul.

Le programme principale qu'on a développé est structuré comme suit :

- **Partie Déclaration** : Tout d'abord, on alloue les blocs communs pour les différentes variables et données qui seront utilisé par les différentes sousroutines du programme. Ensuite, on déclare les différent matrices, vecteurs et variables.

Après la partie déclaration, on fait appel aux sousroutines en utilisant la commande **CALL** par l'ordre suivant :

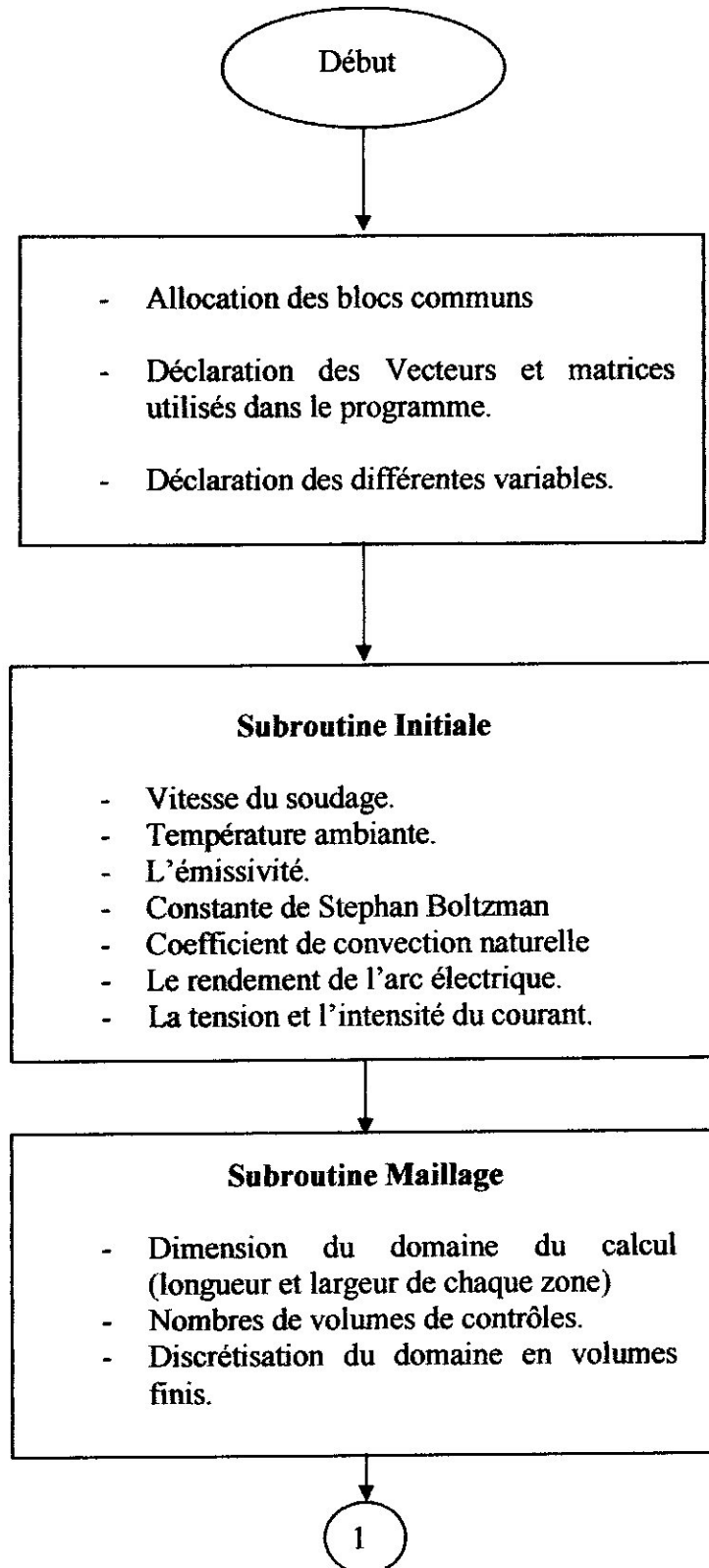
- **Subroutine Initiale** : dans lequel on a introduit toutes les différents paramètres caractérisant le problème: la température initiale ; la température ambiante ; coefficient de convection h ; l'émissivité thermique ; la constante de Stephan Boltzman ; vitesse de soudage ; rendement de l'arc électrique ; la tension et l'intensité du courant.
- **Subroutine Maillage** : dans lequel on introduit les dimensions des différentes zones du domaine de calcul, ainsi que le nombre de volumes de contrôles de chaque une des zones. La subroutine maillage c'est elle qui discrétise le domaine en volumes finis.
- **Subroutine Long_Facette** : c'est la subroutine qui limite la longueur de chaque facettes du volumes de contrôle suivant les deux direction X et Y.
- **Subroutine Cord_noeud** : c'est la subroutine qui donne les coordonnées de chaque nœuds du maillage, c'est-à-dire, le calcul des abscisses et des ordonnés de chaque nœuds.
- **Subroutine init_Vect_temp1** : c'est la subroutine qui initialise la température de chaque point du maillage.
- **Subroutine Model_bain** : c'est la subroutine qui donne les caractéristiques du modèle de bain de fusion. (dans notre travail le bain de fusion est bi elliptique).

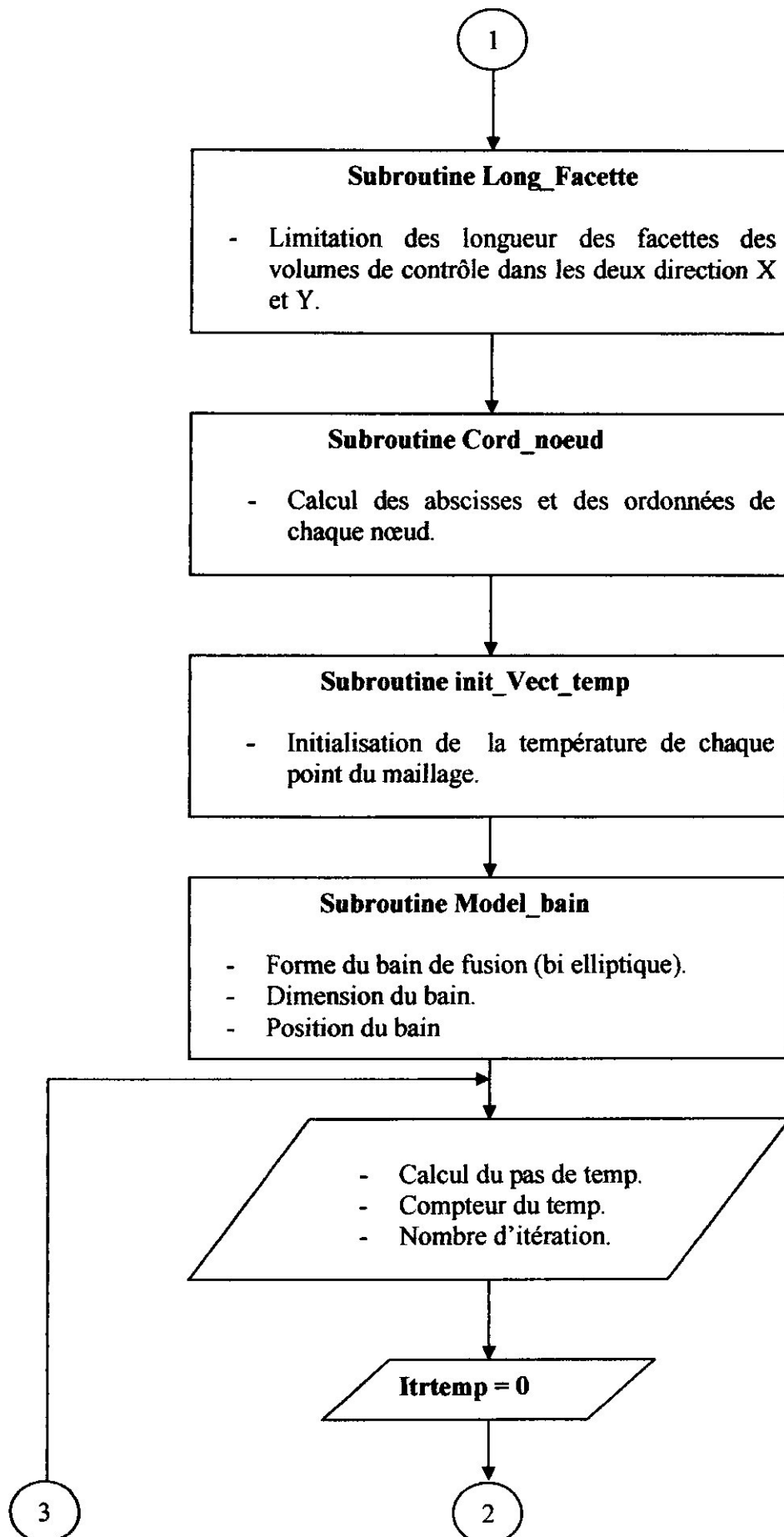
Maintenant on procède a la résolution du système algébrique, comme on l'a expliqué précédemment (Algorithme Ligne par ligne SOR).

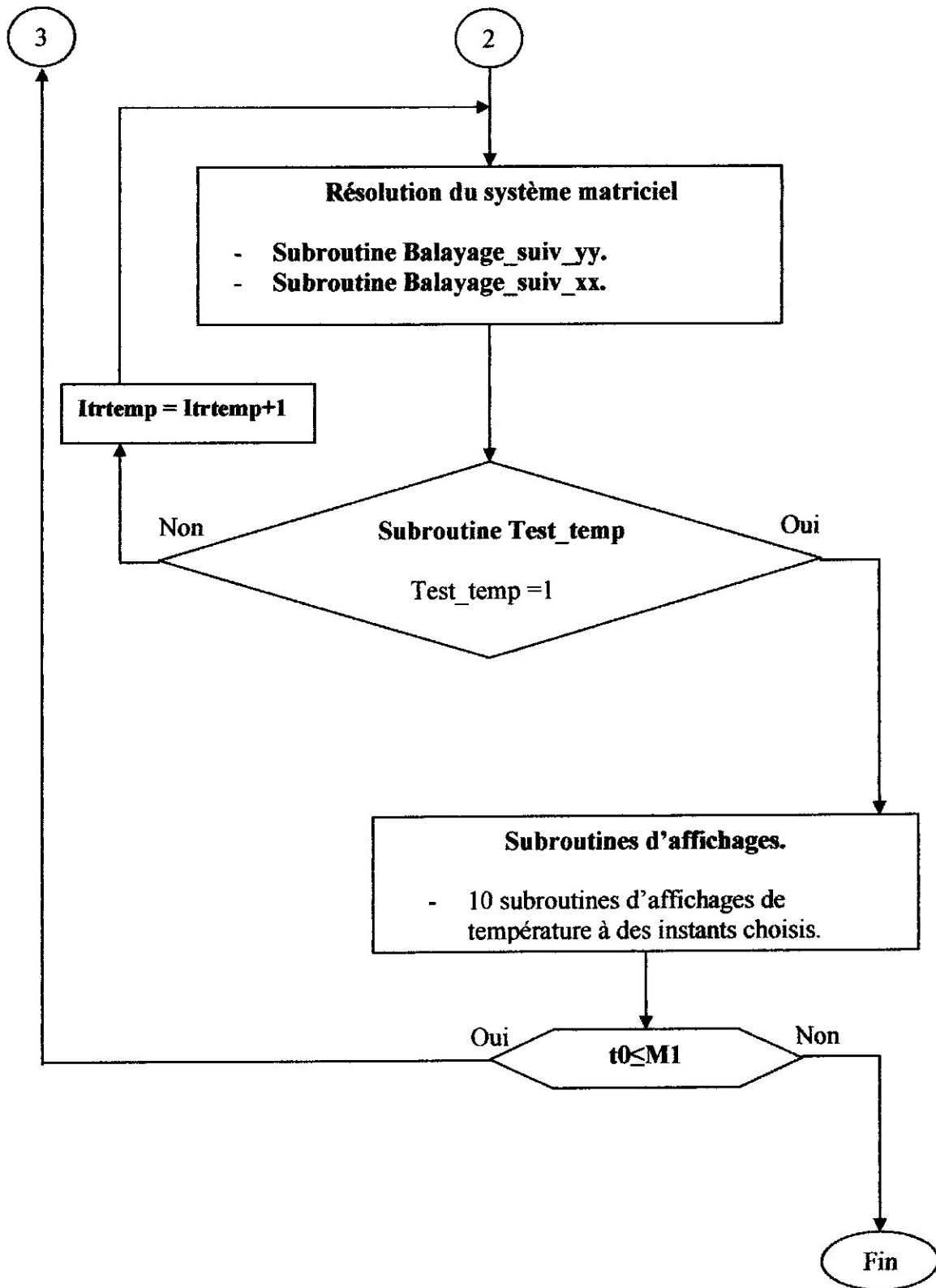
- **Subroutine Balayage_suiv_yy** : c'est la subroutine fait le balayage des lignes de la matrice selon l'axe (OY).
- **Subroutine Balayage_suiv_xx** : c'est la subroutine fait le balayage des lignes de la matrice selon l'axe (OX).
- **Subroutine Test_temp** : c'est la subroutine qui teste la convergence du vecteur solution (la température cherchée). Si y a pas, convergence on refait l'itération à partir de la subroutine **Balayage_suiv_yy**.

Après, 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-routines d'affichages qui affichent le cycle thermique et le champ thermique de la plaque à chaque instant.

Dans ce qui suit, un résumé de notre code illustré dans un organigramme (Figure.IV.3)







Chapitre V

Résultats et discussion

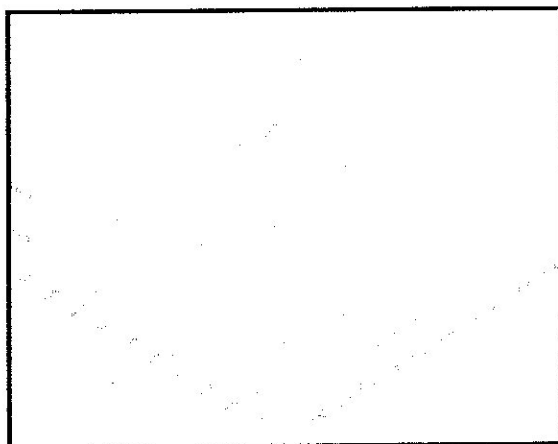
❖ INTRODUCTION

A. CORDON RECTILIGNE

- ❖ DONNEES DU PROGRAMME
- ❖ RESULTATS NUMERIQUES
- ❖ COMPARAISON DES RESULTATS

B. CORDON INCLINE

- ❖ DONNEES DU PROGRAMME
- ❖ RESULTATS NUMERIQUES



V.1 INTRODUCTION :

Après exécution de notre programme et avoir la convergence à une précision désirée sur plusieurs tests, on présente les résultats dans ce chapitre, tel que, on prend deux formes différentes de cordon de soudure, rectiligne et incliné. Dans les deux formes, on compare les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux.

A. CORDON RECTILIGNE

V.A.1 DONNEES DU PROGRAMME :

Les données de la 1^{ère} exécution sont tabulées dans le tableau ci-dessous, le matériau des deux plaques à assembler est l'aluminium série 2024 T3, dont les propriétés physiques sont supposées constantes comme premier cas, ensuite on considère la conductivité thermique dépendante de la température (voir II.8).

| Tension du courant (volts) | Intensité du courant (Ampère) | Temps du soudage (secondes) | Débit du gaz de protection (l/min) | Gaz utilisé |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------|
| 15 | 36 | 165 | 9 | Argon |

FIG.V.1- Données d'exécution.

- Les dimensions de la demi plaque sont : $L_y = 154$ mm (largeur), $L_x = 150$ mm (longueur), $L_{xc} = 4.5$ mm (largeur du cordon expérimental), $E_p = 1.16$ mm (épaisseur de la pièce).
- Les conditions initiales et le rendement de l'arc sont : $T_\infty = 300$ °K, $\eta = 0.65$

V.A.2 RESULTATS NUMERIQUES :

Après avoir introduit les différentes données citées ci-dessus, on procède à l'affichage des résultats obtenus.

V.A.2.1 Résultats du maillage :

Suivant l'axe X : il y a deux zones, la 1^{ère} zone : 100 mm ; 50 volumes de contrôle et la 2^{ème} zone : 50 mm ; 50 volumes de contrôle.

Suivant l'axe Y : il y a une seule zone ; 154 mm ; 100 volumes de contrôle.

La figure V.2 représente le maillage qu'on a opté (40 + 60) x 100 pour la détermination des champs thermiques dans la demi plaque à chaque instant.

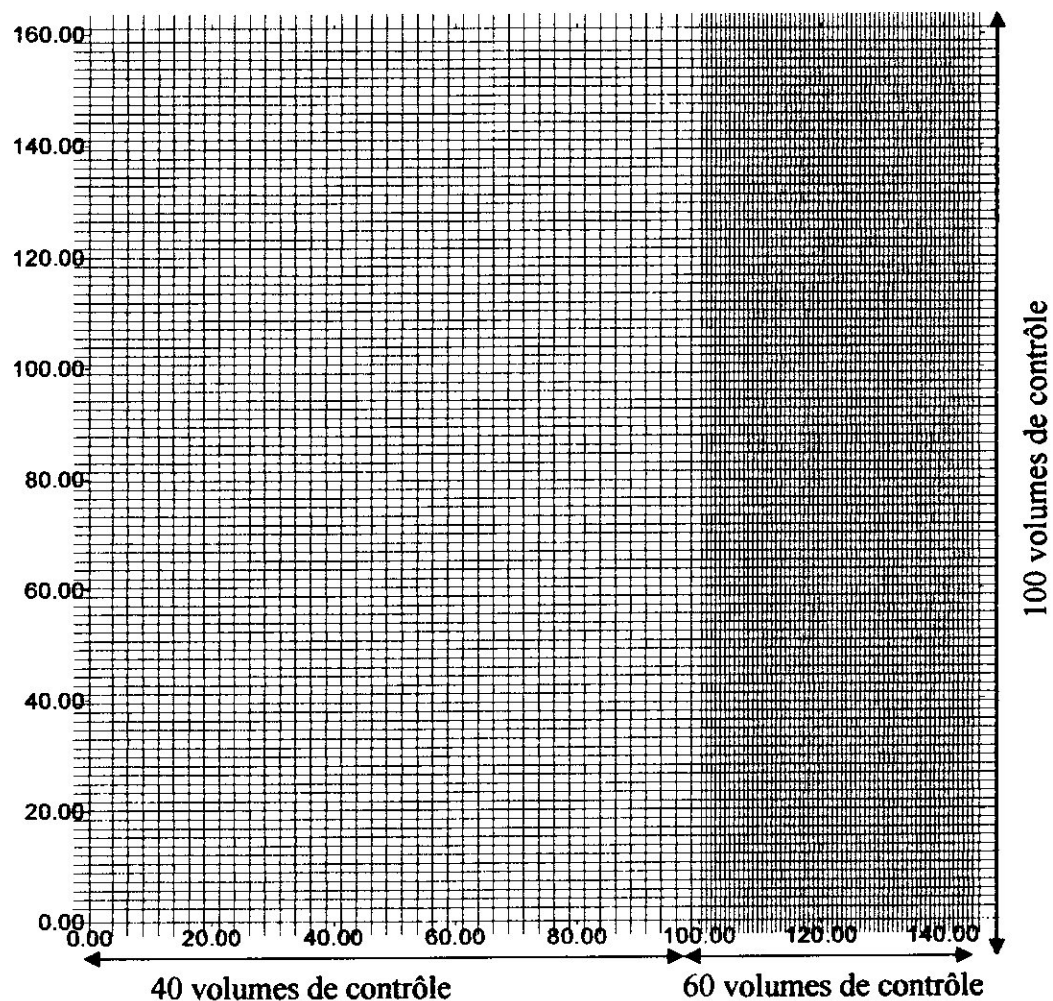


FIG.V.2- Représentation du maillage

V.A2.2 Résultats des champs thermiques :

Après avoir tracer le maillage, on procède maintenant à la représentation des champs thermique à des instants différents.

Les figures (V.3), (V.5), (V.7) et (V.9) représentent la répartition de la température sur les champs de surfaces dans la demi plaque, elles représente (simulent) aussi le déplacement de la source de chaleur (déplacement de l'arc électrique). Les figures (V.4), (V.6), (V.8) et (V.10) représente la répartition de la température pas les contours isothermes, la première chose qu'on observe, est que le réseaux de ces isothermes est plus dense en amont de la source de chaleur et elles sont de plus en plus dispersive au fur et à mesure qu'on s'éloigne en aval de l'arc. Ceci peut être justifier par le fait que la chaleur a eu suffisamment de temps pour ce propager par conduction dans les différentes directions de l'assemblage, mais pas suffisant vers l'avant vu que l'arc électrique déplace en avant (OY).

On peut à partir de la figure (V.10.b) déterminer la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT), elle sont délimité respectivement par les températures de fusion (933°k) et de solidification (775°k). Ces zones sont de l'ordre de 2 mm pour une demi ZF et de 3 mm pour la ZAT .

a) conductivité thermique constante :

$t_0 = 5$

temps = 4s

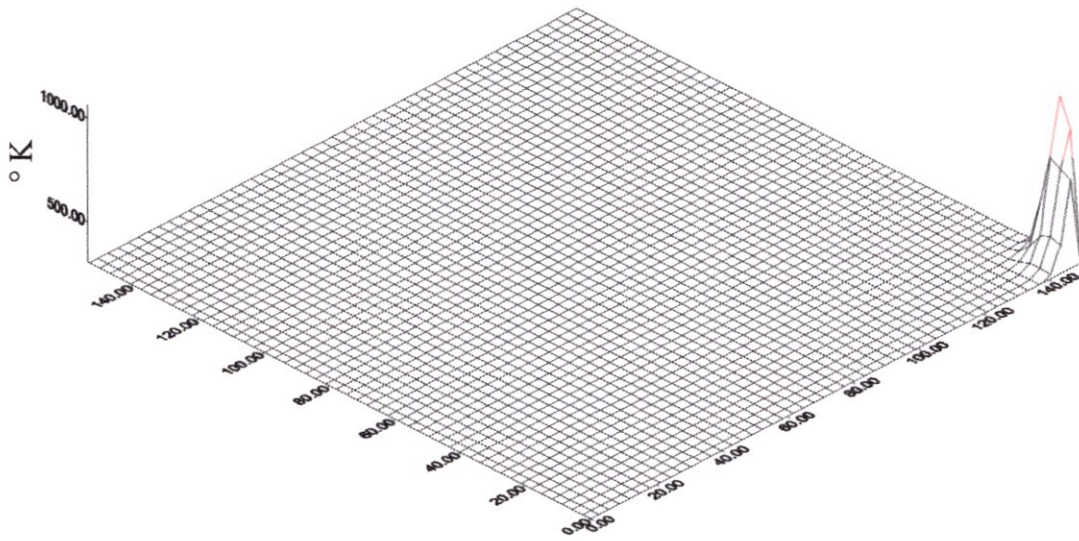


FIG.V.3.a- Répartition de champs thermique a $t_0 = 5$.

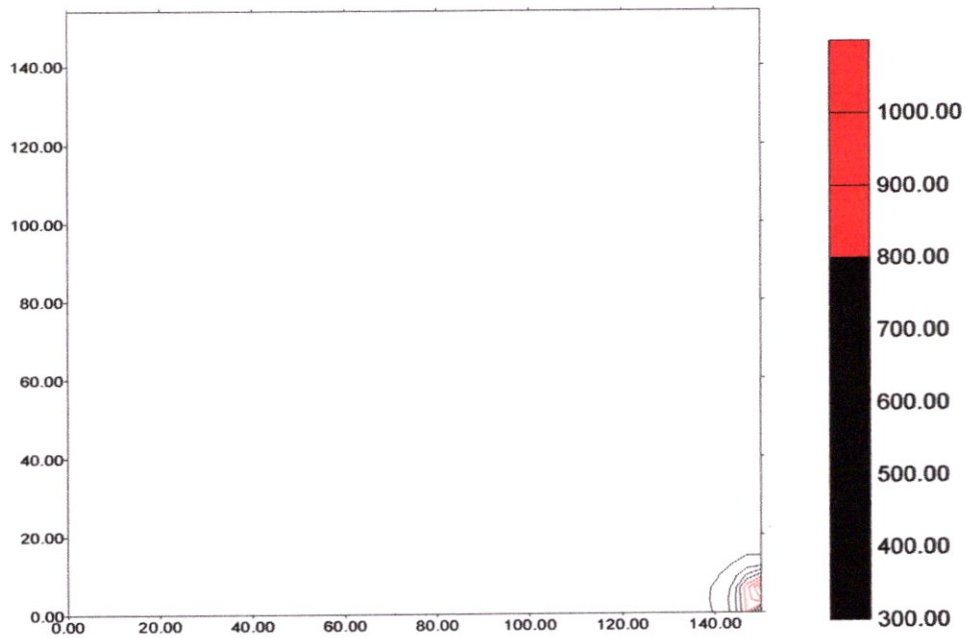


FIG.V.4.a- Représentation des isothermes a $t_0 = 5$.

$t_0 = 20$

temps=13s

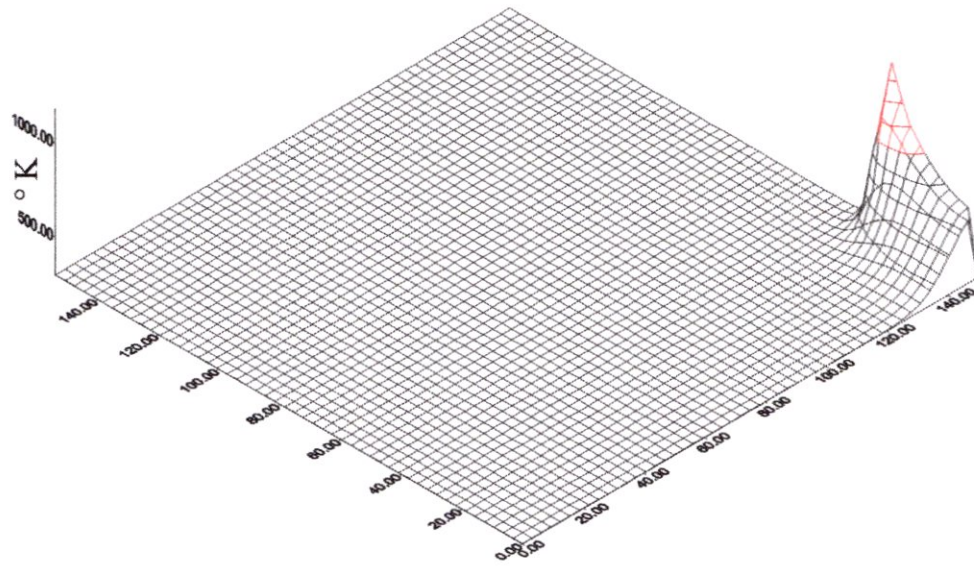


FIG.V.5.a- Répartition de champs thermique a $t_0 = 20$.

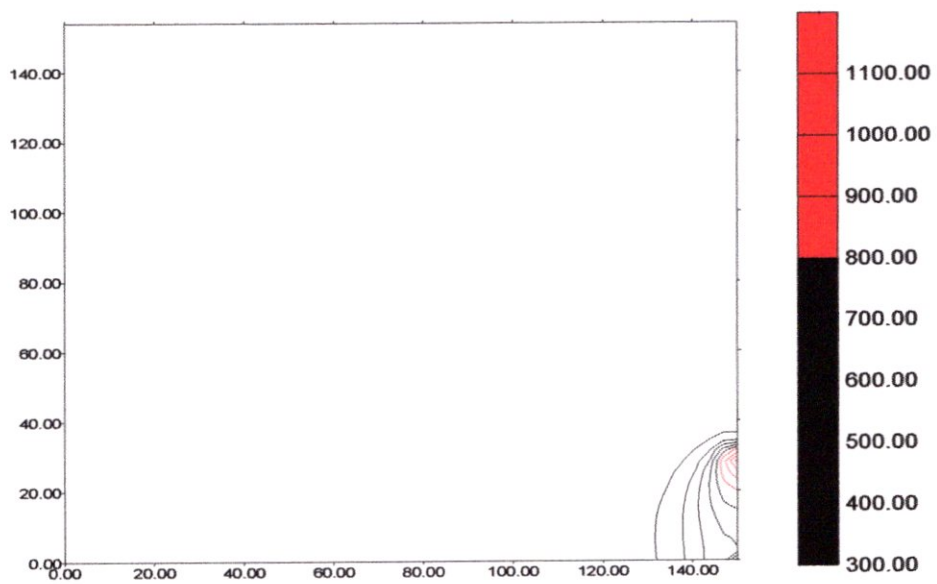


FIG.V.6.a- Représentation des isothermes a $t_0 = 20$.

$t_0 = 60$

temps=39s

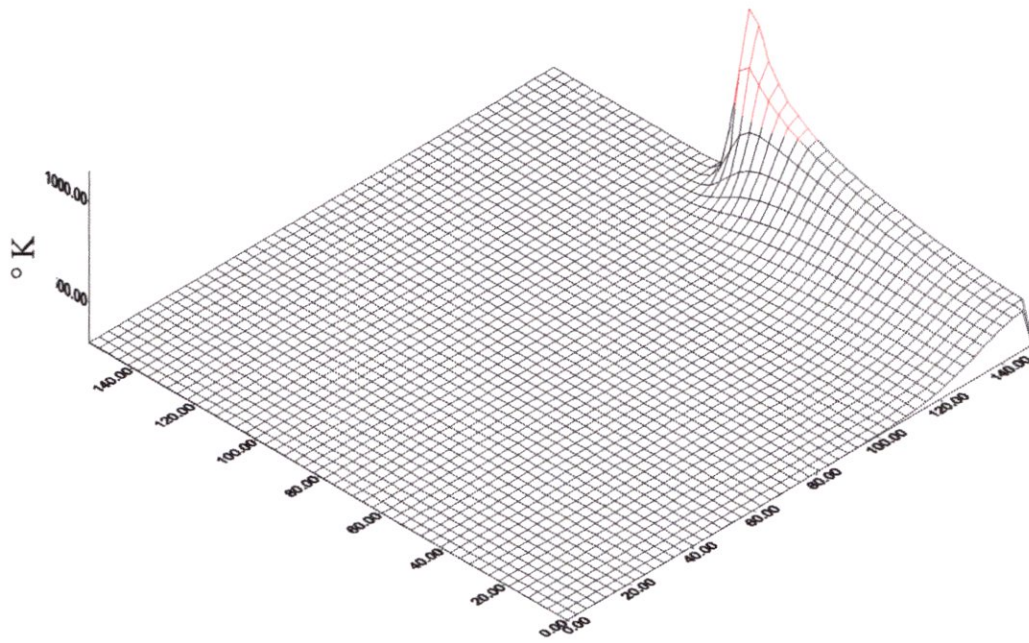


FIG.V.7.a- Répartition de champs thermique a $t_0 = 60$.

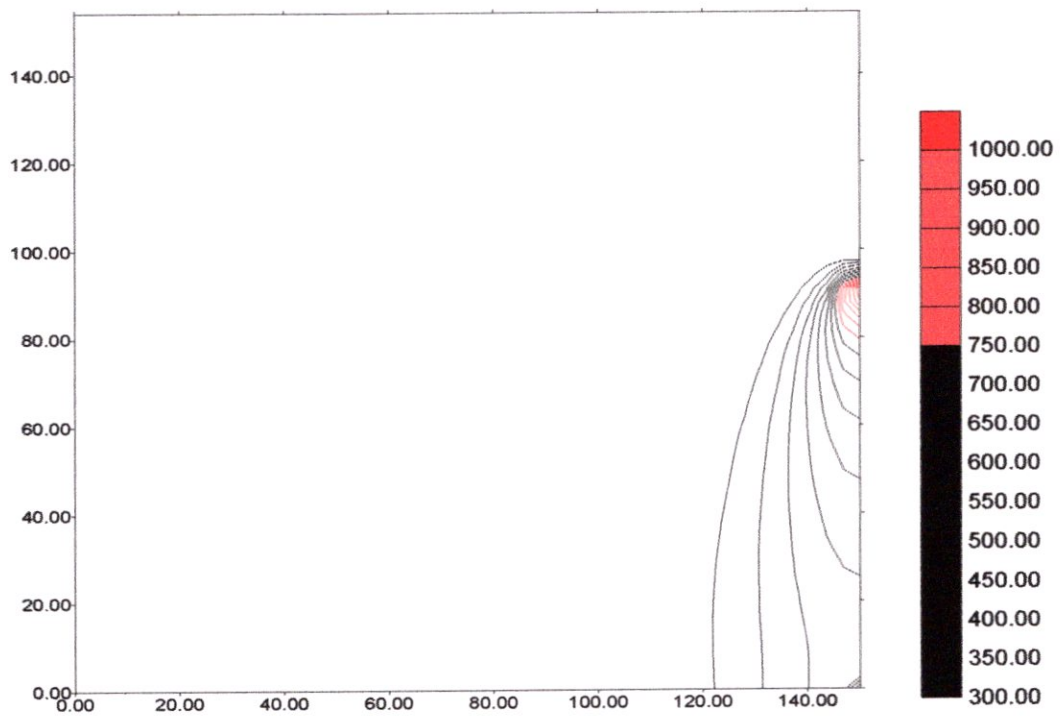


FIG.V.8.a- Représentation des isothermes a $t_0 = 60$.

$t_0 = 80$

temps = 52s

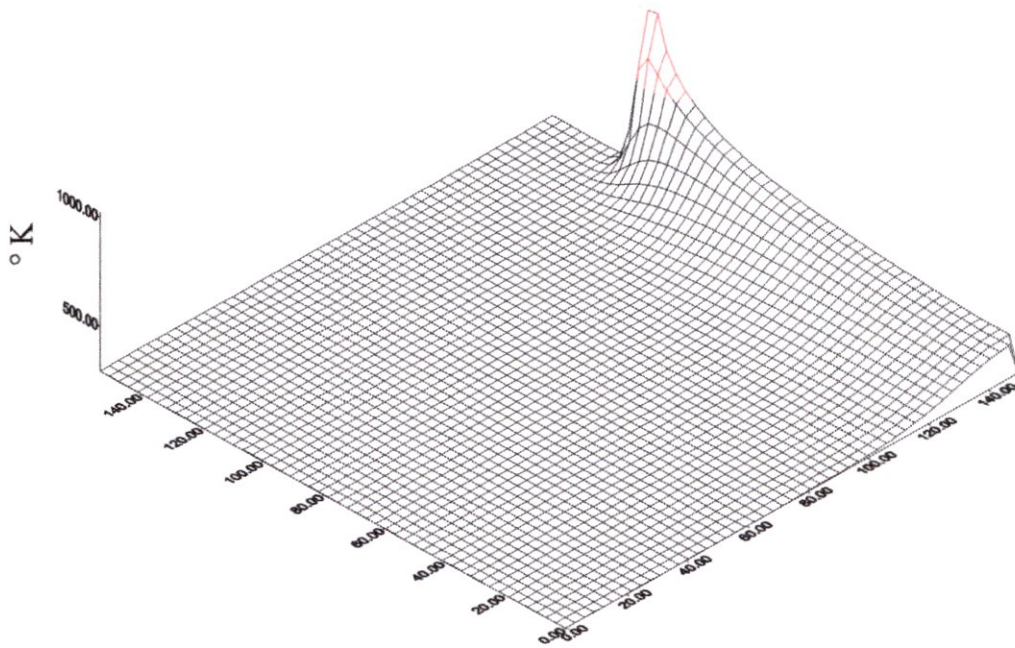


FIG.V.9.a- Répartition de champs thermique a $t_0 = 80$.

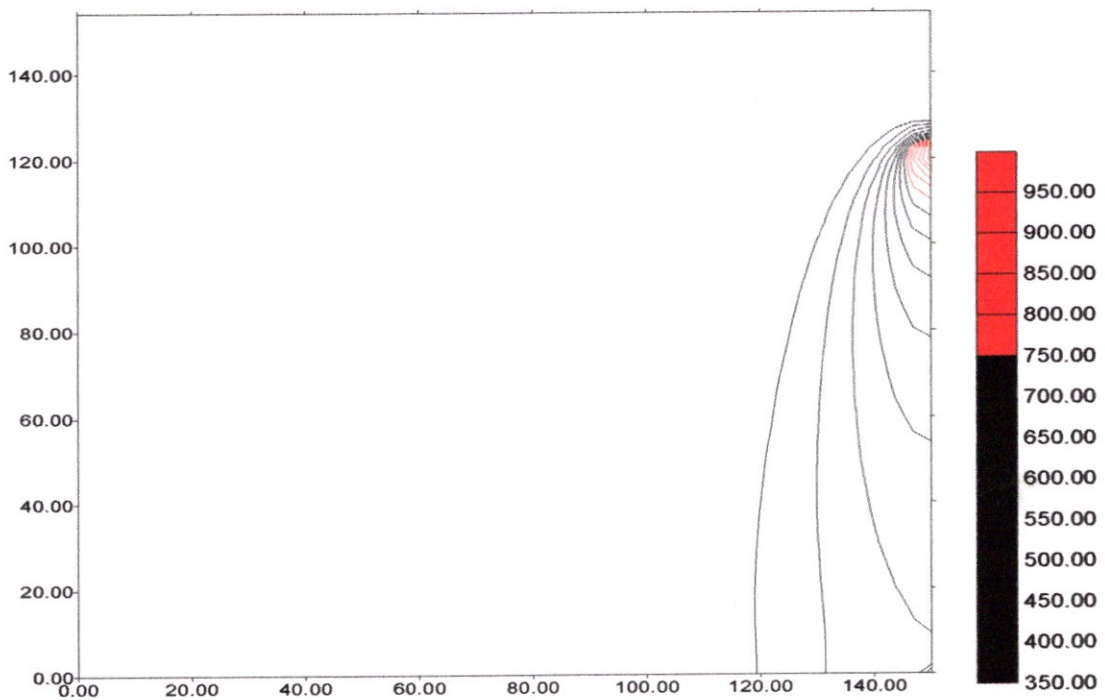


FIG.V.10.a- Représentation des isothermes a $t_0 = 80$.

b) conductivité variable :

$t_0 = 5$

temps = 4s

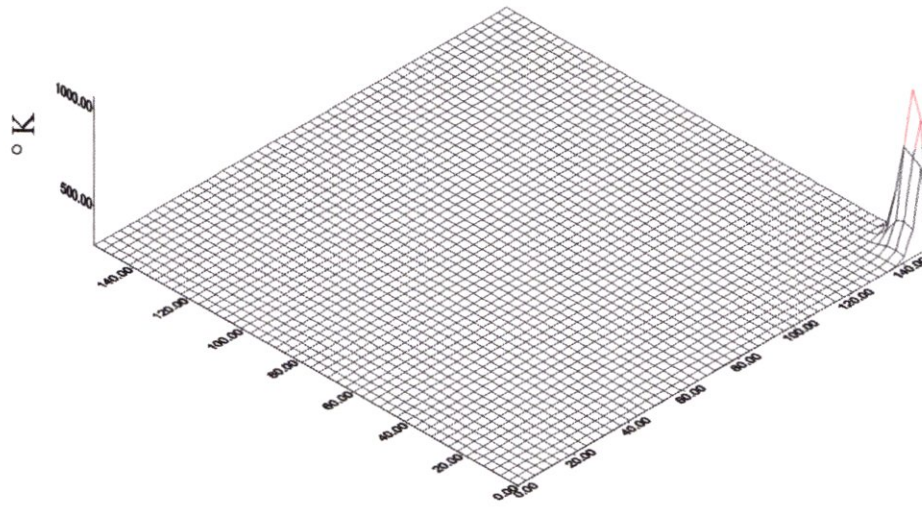


FIG.V.3.b- Répartition de champs thermique a $t_0 = 5$.

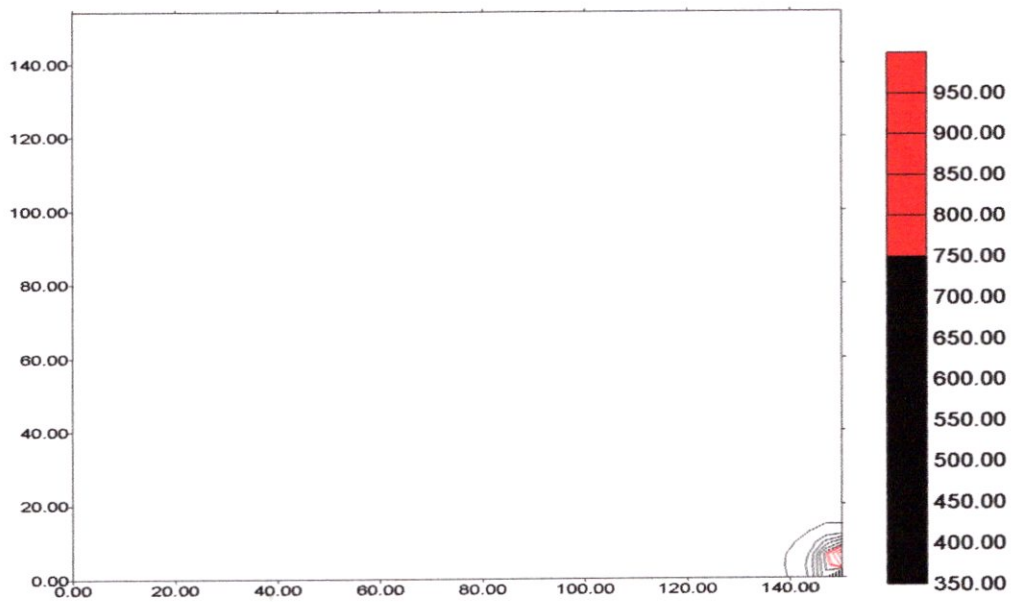


FIG.V.4.b- Représentation des isothermes a $t_0 = 5$.

$t_0=20$

temps = 13s

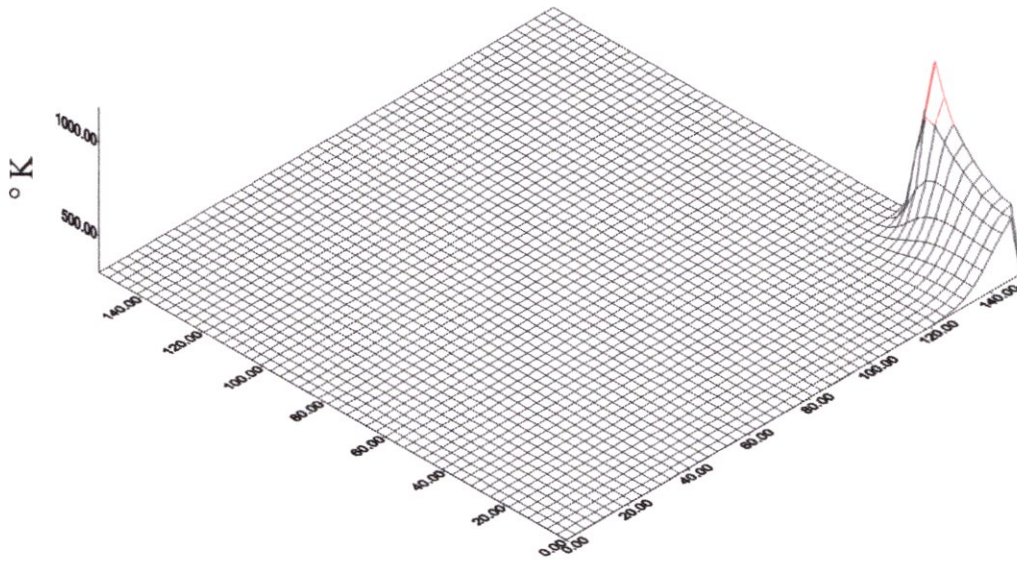


FIG.V.5.b- Répartition de champs thermique a $t_0 = 20$.

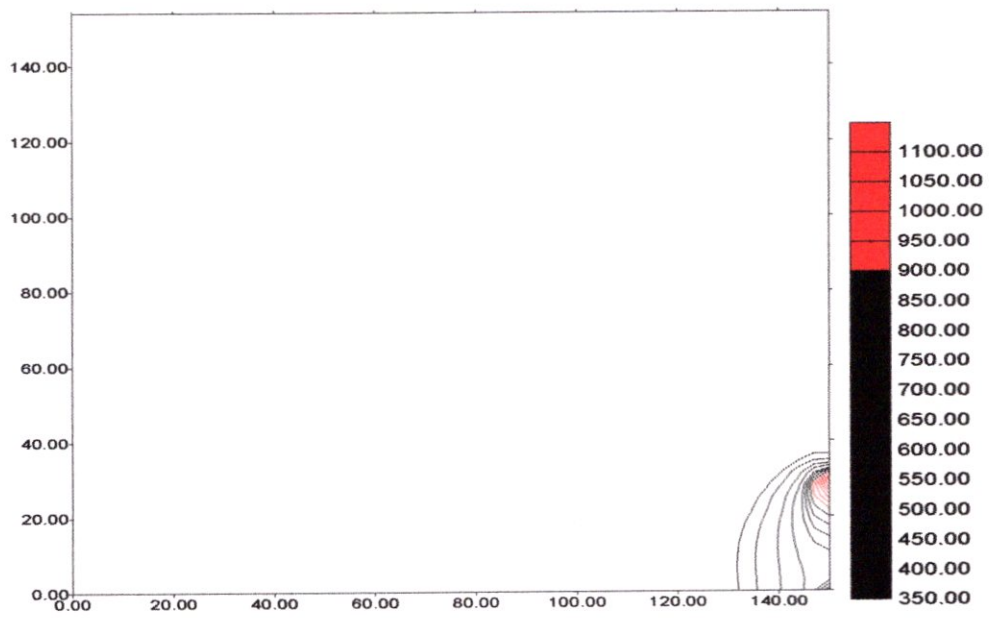


FIG.V.6.b- Représentation des isothermes a $t_0 = 20$.

$t_0=60$

temps = 39s

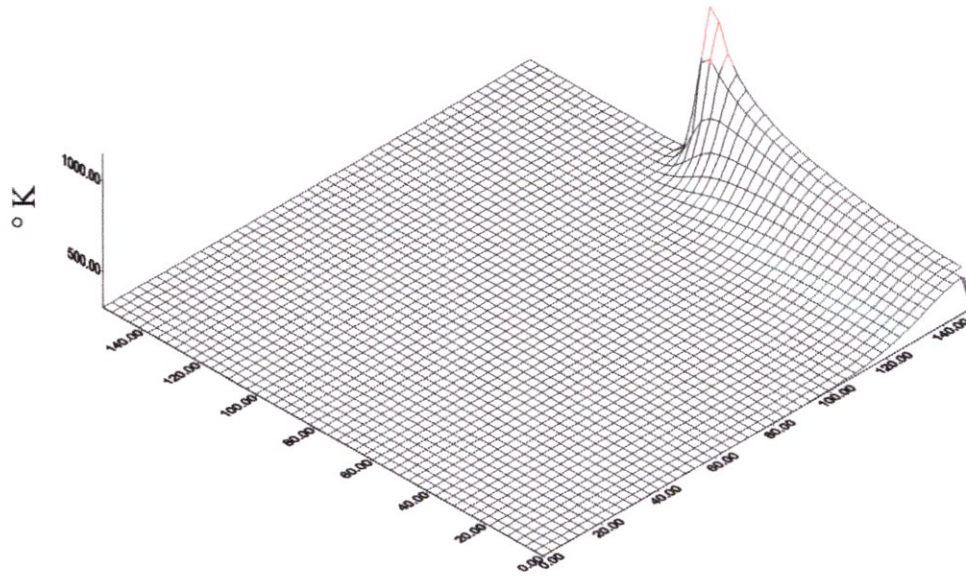


FIG.V.7.b- Répartition de champs thermique a $t_0 = 60$.

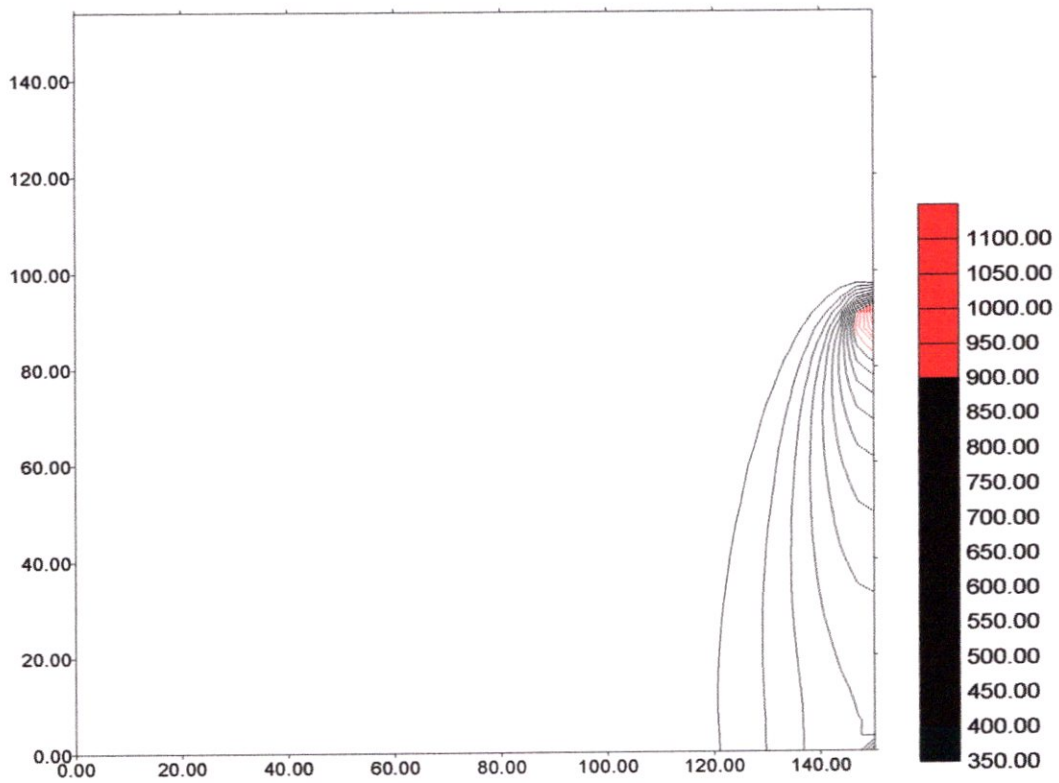


FIG.V.8.b- Représentation des isothermes a $t_0 = 60$.

$t_0=80$

temps = 52s

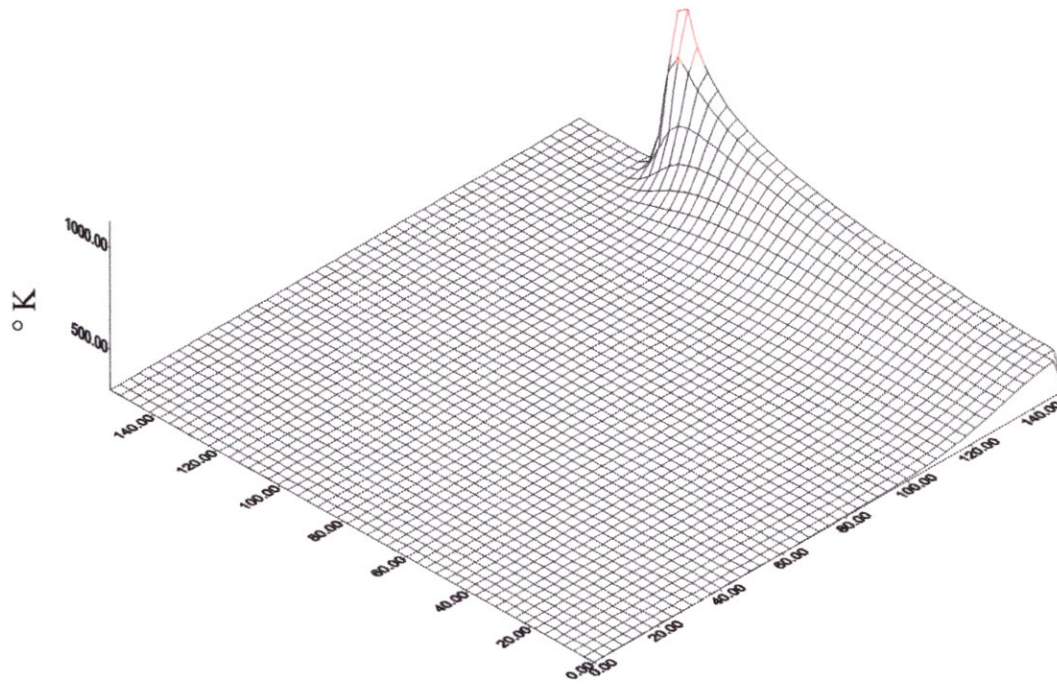


FIG.V.9.b- Répartition de champs thermique a $t_0 = 80$.

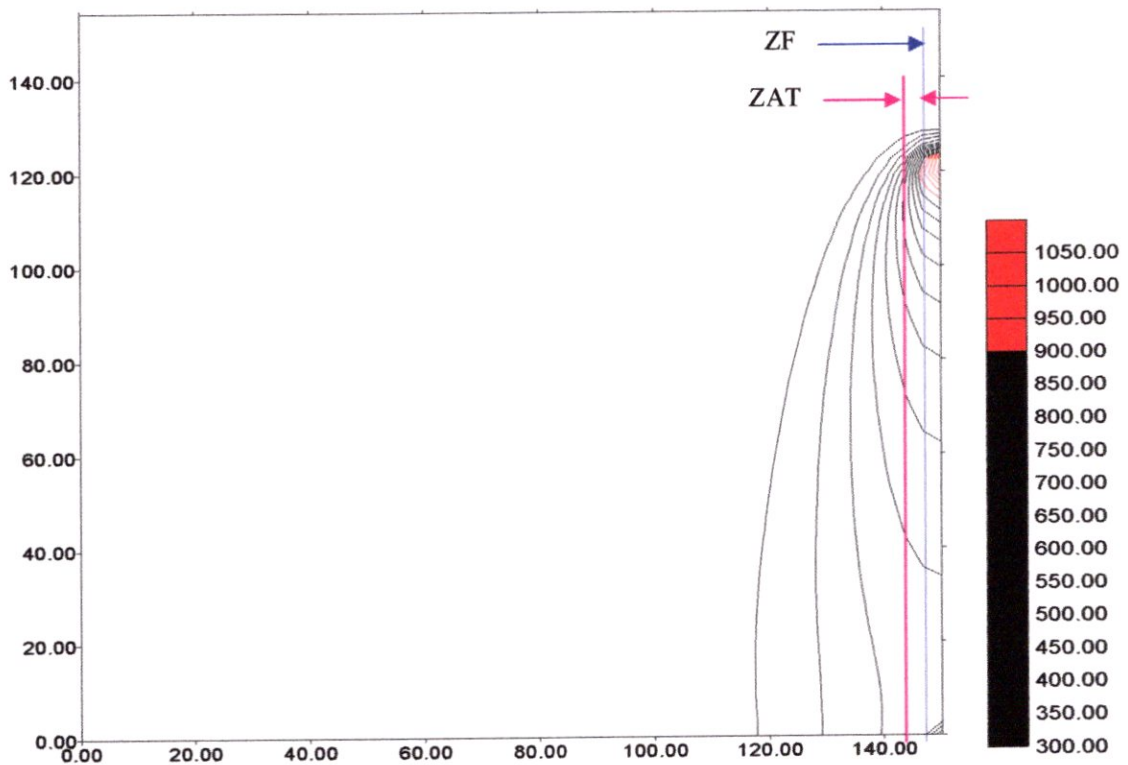


FIG.V.10.b- Représentation des isothermes a $t_0 = 80$.

V.A.2 COMPARAISON DES RESULTATS :

Après avoir représenté les champs thermiques obtenus numériquement, maintenant on va donner les résultats qui ont été enregistrés expérimentalement, par une équipe de chercheurs dans le centre de soudage et contrôle (CSC, Alger, 2006).

La figure V.11 et la figure représentent respectivement, les thermocouples collés à la plaque A1 et l'appareil utilisé pour l'enregistrement de la température captée par chaque thermocouple.

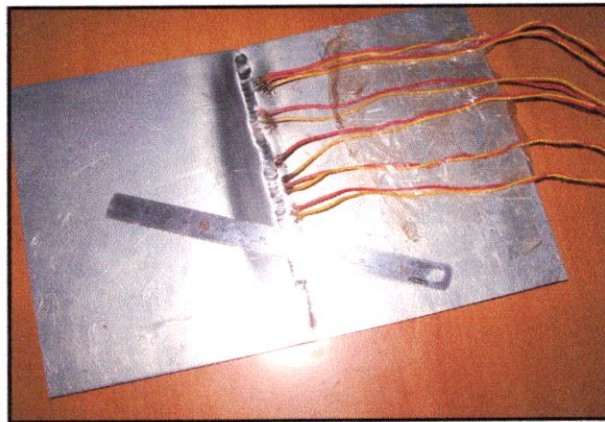


Fig.V.11 - Les thermocouples collés à la plaque.



Fig.V.12 - L' appareil d'enregistrement des températures.

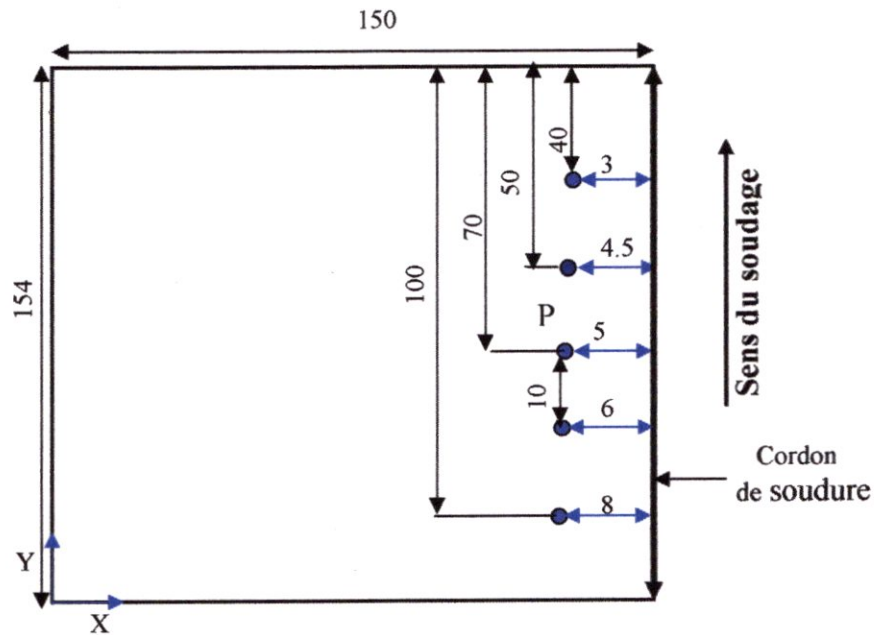


FIG.V.13 – Position d’implantation des thermocouples de la tôle A1.

Pour comparer les résultats, on va afficher le cycle thermique capté par le thermocouple 3 (point P), et on le compare avec celui qui est donné par le noeud qui le correspond dans le maillage qu’on a opté. La figure (V.13) représente les coordonnées de chaque thermocouple implanté dans la plaque. Les température captés par chaque thermocouples sont tracés sur le graphe ci-dessous (figure V. 14).

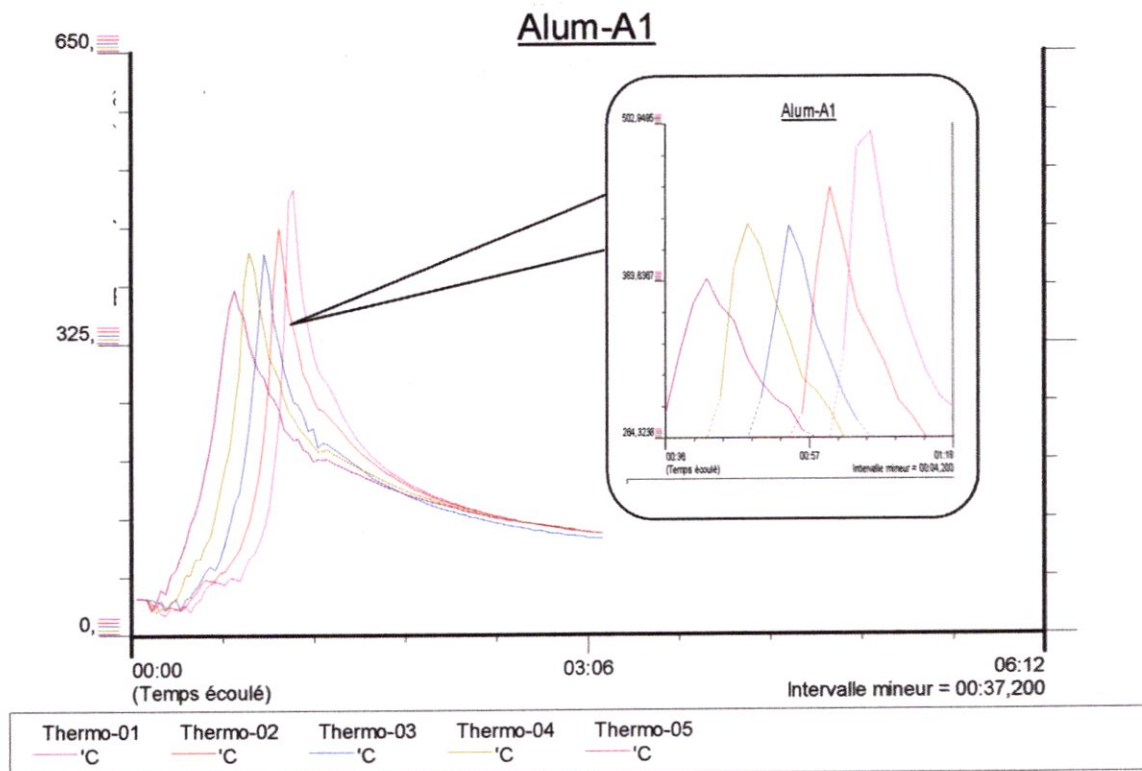


FIG.V.14 – Cycle thermique capté par chaque thermocouple.

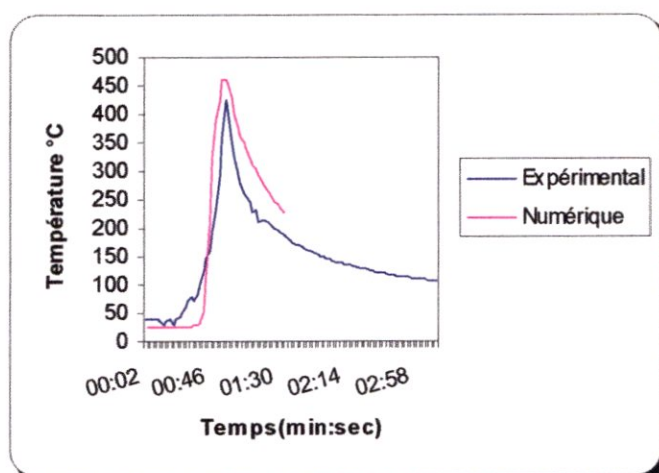


FIG.V.15 – Cycles thermiques, numérique et expérimental du point P.

La figure (V.15) montre une comparaison entre le cycle thermique du thermocouple numéro 3 obtenu expérimentalement, et le cycle thermique obtenus numériquement du point de maillage qui a comme coordonnées les mêmes que celles du thermocouple 3 (FIG.V.12).

La première chose qu'on constate, c'est qu'il y a une certaine différence entre les deux cycles, cette différence est beaucoup plus dans la seconde partie (refroidissement), on remarque qu'elle est plus rapide dans le cycles expérimental, un chute rapide de la température, par contre y a un très bon accord dans la première partie.

La température maximale est presque la même, ceci est dû essentiellement à la position réelle de l'emplacement de thermocouple sur la plaque. De plus, le procédé étant manuel, le contrôle parfait du déplacement de la source de chaleur étant impossible.

Donc, on peut conclure que la région de pique est soumise à des gradients très élevés, où un très petit déplacement induit des variations importantes sur les résultats expérimentaux. Alors il faut faire attention lors de collage des thermocouples dans leurs positions exactes, et qu'adapter au mieux les paramètres du modèle numérique concernent les rayons du bain de fusion pour le modèle source.

En ce qui concerne les champs thermiques et la répartition des isothermes, on constate que pour une valeur constante de la conductivité thermique, que la région du pique (température maximal) est inférieure a celle qui obtenus en variant la conductivité thermique par une interpolation (voir II.6). Par exemple la température max a $t_0=80$ (52sec) est de 1023.05 °k pour une conductivité thermique constante (FIG.10.a), et elle est de 1130.33°k pour une conductivité thermique variable (FIG.10.b). On constate de ces valeurs l'intérêt de l'hypothèse concernant la variation des propriétés physiques en fonction de la température.

B. CORDON INCLINE

V.B.1 DONNEES DU PROGRAMME :

Les données de la 2^{ème} exécution sont tabulées dans le tableau ci-dessous, le matériau des deux plaques à assembler est 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 |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------|
| 16 | 63 | 102 | 12 | Argon |

FIG.V.15- 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 : $T_\alpha = 300$ °K, $\eta = 0.4$.

Comme pour le premier cas, on va simuler l'opération du soudage sur une demi plaque avec un cordon incliné.

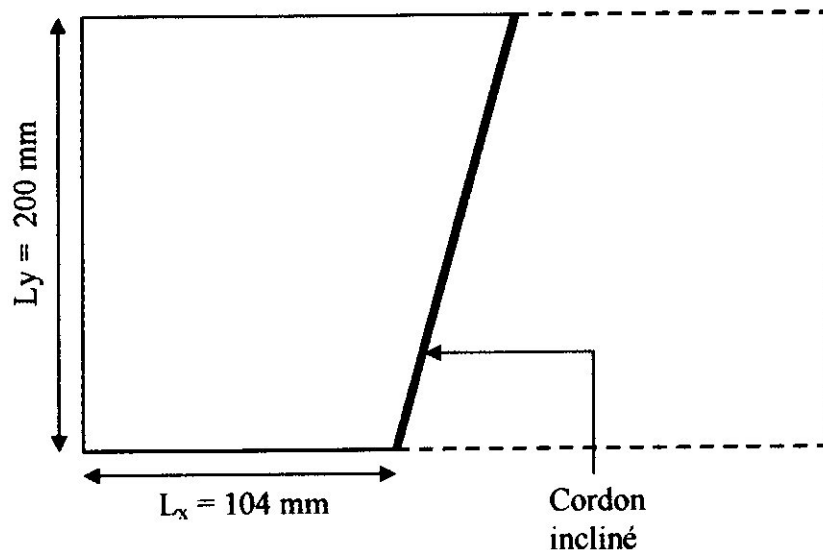


FIG.V.16- Forme de la demi plaque à souder (cordon incliné).

V.B.2 RESULTATS NUMERIQUES :

Comme pour le 1^{er} cas (cordon rectiligne), on va introduire les données dans le programme et on affichera les résultats suivants :

V.B.2.1 Résultats du maillage :

Suivant l'axe X : Il y a deux zones, la 1^{ère} zone : 84 mm ; 50 volumes de contrôle et la 2^{ème} zone : 20 mm ; 20 volumes de contrôle.

Suivant l'axe Y : Il y a une seule zone ; 200 mm ; 70 volumes de contrôle.

La figure V.17 représente le maillage qu'on a opté (50 + 20) x 70 pour la détermination des champs thermique dans la demi plaque à chaque instant.

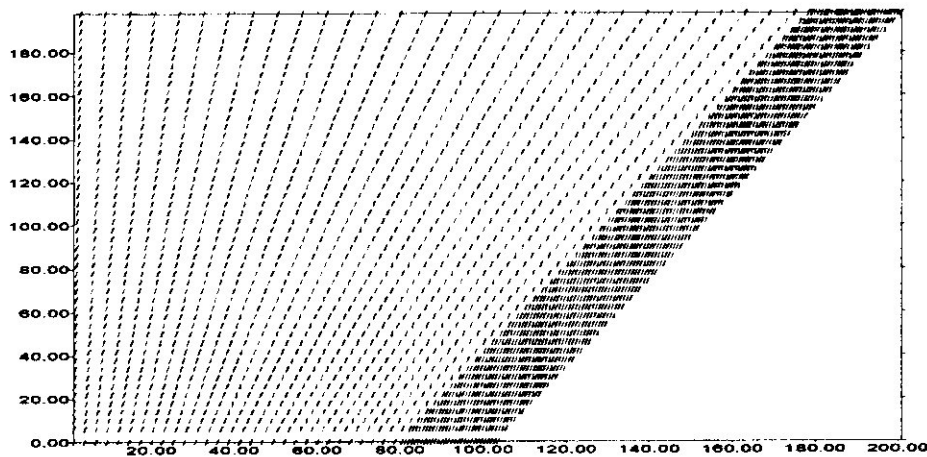


FIG.V.17- Représentation du maillage de la demi plaque.

La figure V.18 représente le maillage qu'on a opté (20 +10+ 20) x 30 pour la détermination des champs thermique dans la plaque à chaque instant.

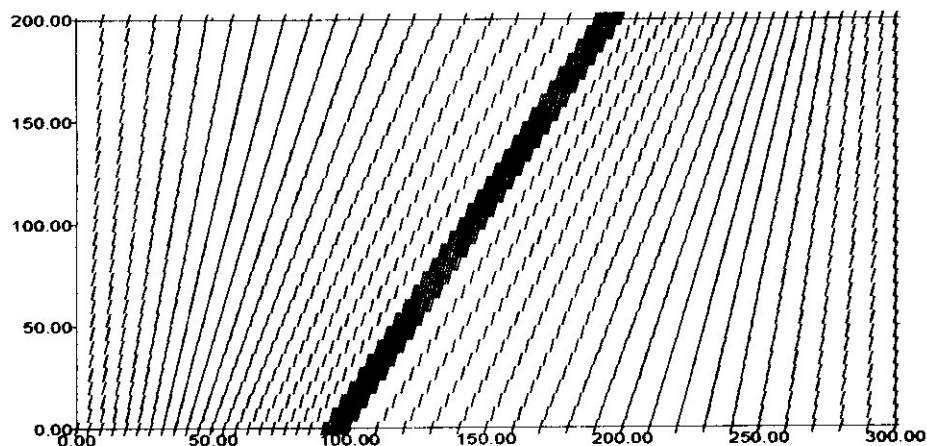


FIG.V.18- Représentation du maillage de la plaque.

V.B.2.2 Résultats des champs thermiques :

Les figures (V.19), (V.20), (V.21) et (V.22) représentent la répartition de la température par les contours isothermes dans la demi plaque, elles représentent (simulent) aussi le déplacement de la source de chaleur, en suivant la fonction de la ligne du soudage (inclinaison).

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. Ceci peut être justifier par le fait que la chaleur a eu suffisamment de temps pour ce propager par conduction dans les différentes directions de l'assemblage.

Comme pour le premier cas (FIG.10-b) ; on peut à partir de la figure V.22, limiter la zone fondue (ZF) ainsi que la zone affecté thermiquement (ZAT) , qui sont limités respectivement par la température de fusion (933°k), et la température de solidification (775°k).

La zone fondue est de l'ordre de 2.5 mm pour un demi cordon, et la zone affectée thermiquement est de l'ordre 3 mm.

On remarque que pour la même nuance de matériau, et avec le même procédé (T.I.G) la largeur de la ZF et de la ZAT est différente, ceci est expliqué par la différences de l'épaisseur, plus l'épaisseur est grand plus l'énergie nécessaire pour souder la tôle et plus grande.

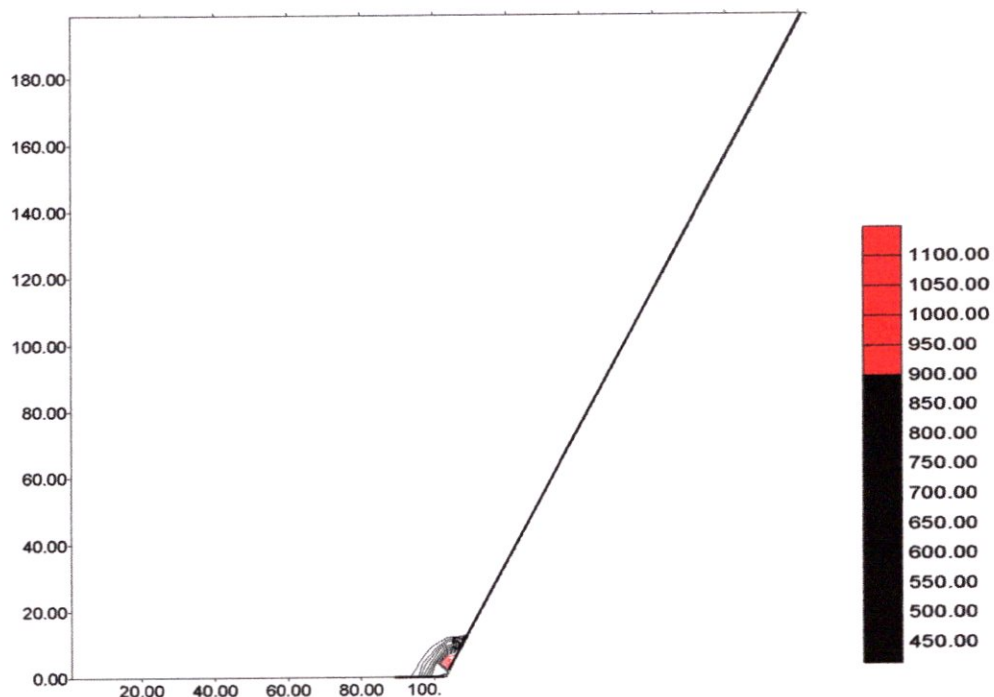


FIG.V.19- Représentation des isothermes a $t_0 = 05$ (6 sec).

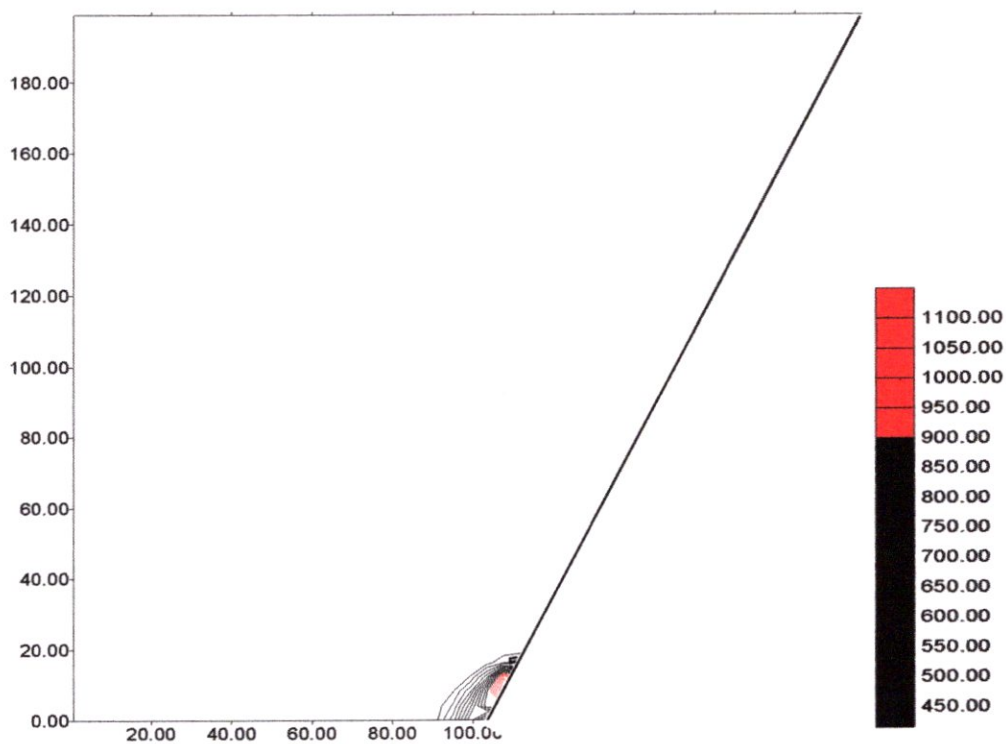


FIG.V.20- Représentation des isothermes a $t_0 = 10$ (13 sec)

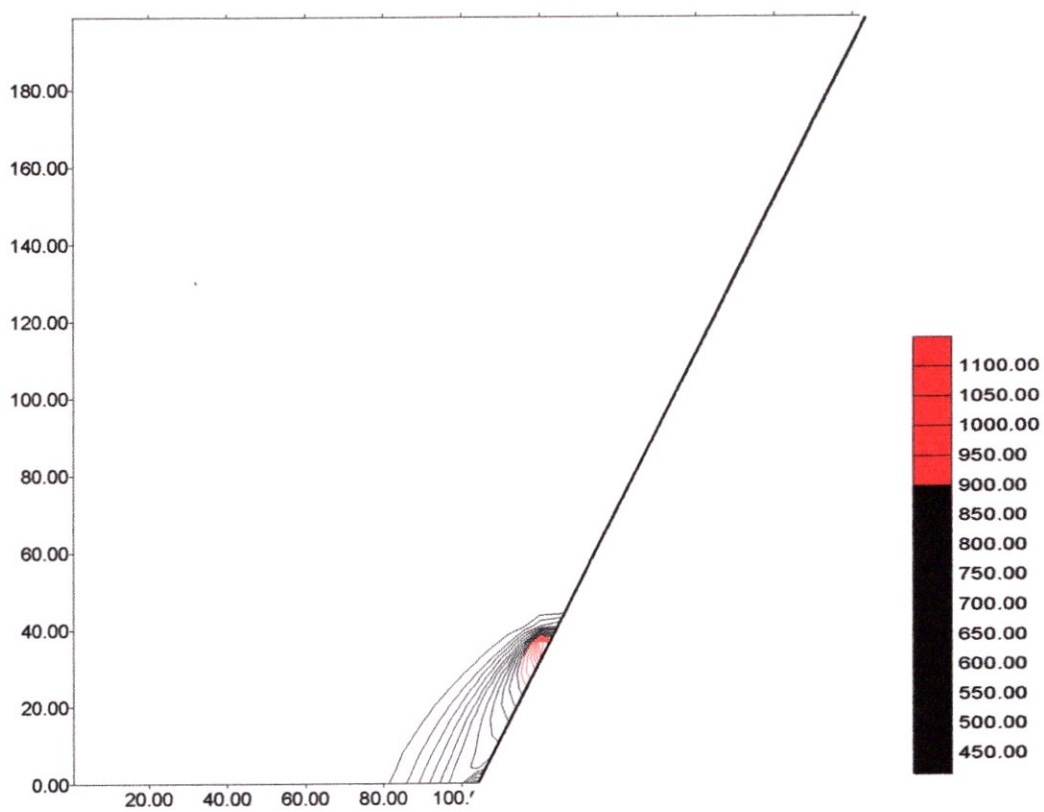


FIG.V.21- Représentation des isothermes a $t_0 = 15$ (19 sec)

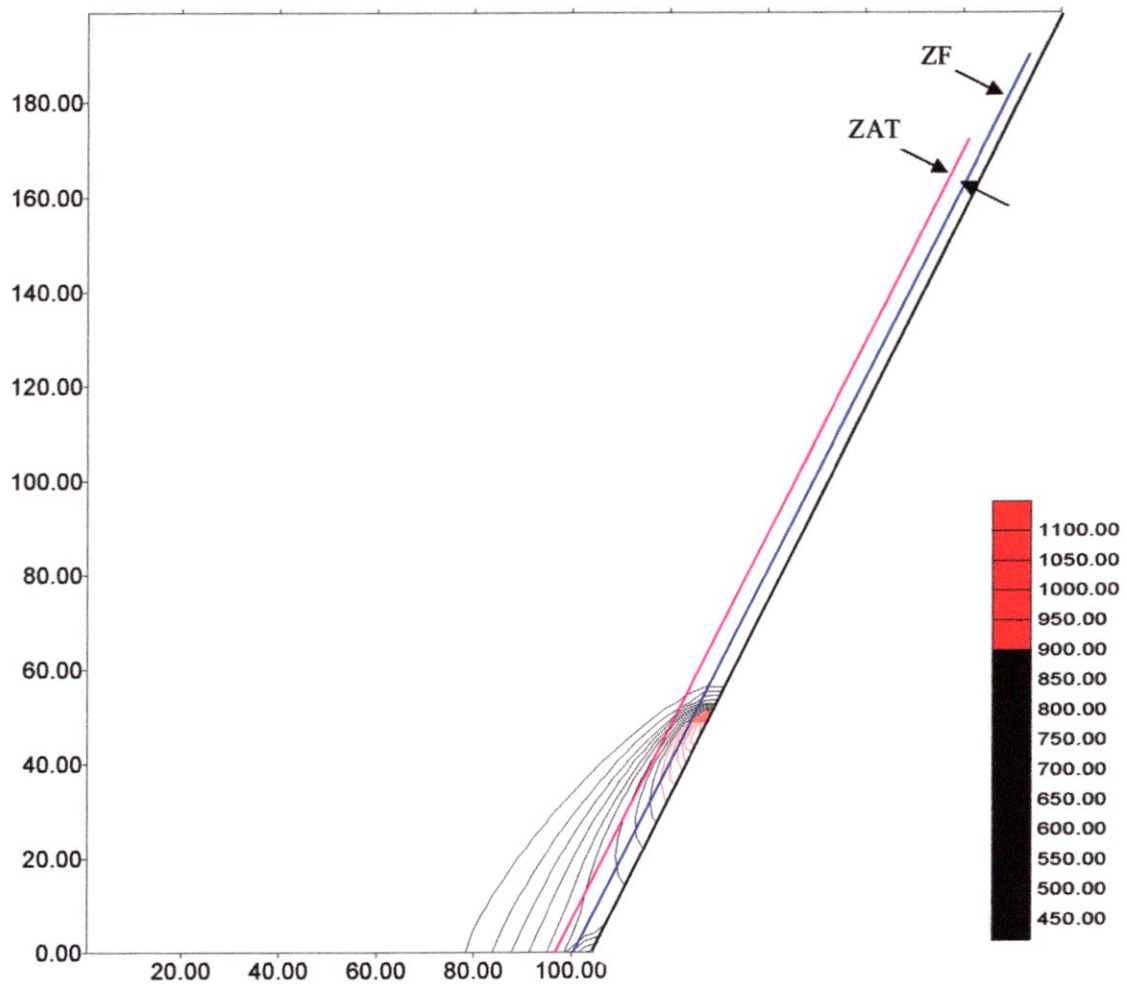


FIG.V.22- Représentation des isothermes a $t_0 = 20$ (25 sec)

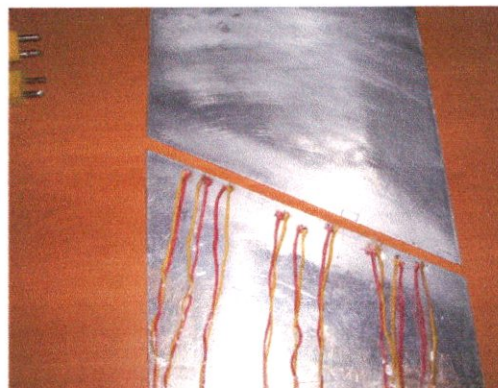


FIG.V.23 Les thermocouples collés a la plaque A10.

La figure V.23 représente les thermocouples collés à la plaque à souder.

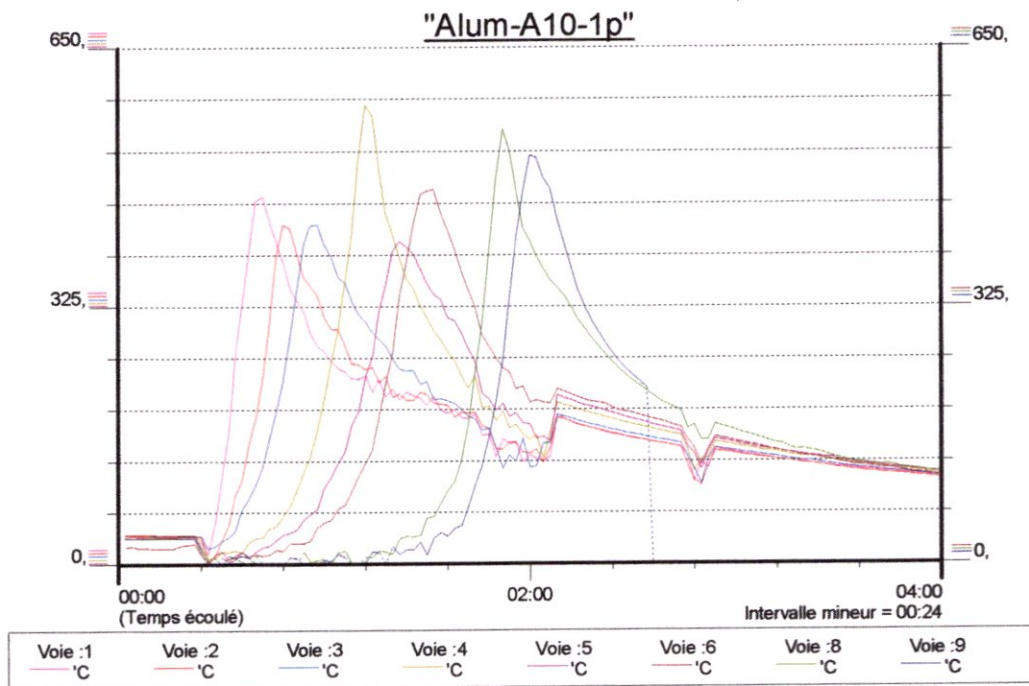


FIG.V.24– Cycle thermique capté par chaque thermocouple.

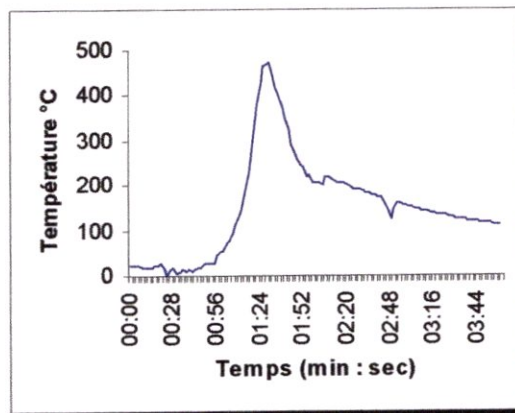


FIG.V.25– Cycle thermique capté par le thermocouple 5.

La figure V.24 et la figure V.25 représentent respectivement les cycles thermiques captés par les 9 thermocouples et le cycle thermique capté par le thermocouple numéros 5. On remarque un pique de température au alentour de 450°C (723.15°k); et un refroidissement plus au moins lent.

Suite à un manque du temps, notre travail n’as pas pu être achever, et malheureusement les résultats complètes de notre dernière exécution. , n’ont pas permis d’avoir le cycle thermique (numérique) du point de maillage qui correspond au thermocouple 5 numéros. Ceci est du à des problèmes techniques qui apparaissent au cours d’exécution.

Conclusion Générale

L'objectif de ce présent travail était la simulation numérique du procédé de soudage T.I.G, pour deux formes de cordon de soudure pour des tôles en aluminium séries 2024-T3, par la méthode des volumes finis. On a pris dans notre modélisation une distribution gaussienne de la source de chaleur, avec un modèle de bain de fusion bi-elliptique et avec des propriétés physique indépendante et dépendante de la température.

En matière procédé, On a pu constater après notre étude bibliographique que, le soudage TIG réalise des assemblages de qualité, exempts de défauts et de pollution de bain, grâce à une très bonne protection gazeuse de la zone fondue et de l'arc, ainsi qu'à l'absence de transfert de métal. 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 sa productivité et de cordons soudés fortement pénétrants. Ceci conduit, dans de nombreux cas, à usiner les bords à souder et à effectuer plusieurs passes avec métal d'apport pour réaliser le cordon souhaité.

Suite à un grand effort en collaboration avec notre promoteur, le programme qu'on exécuté, après avoir modifier et optimiser le maillage selon la trajectoire de la source de chaleurs dans les deux cas (cordon incliné et rectiligne), nous a données des résultats avec un bon accord en comparant à celles obtenues par l'expérience.

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 a 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 prouver par le cycle thermique.

En fin, on peut dire que ce travail était très bénéfique pour nous, il nous a permet de comprendre et modélisé un problème physique par la méthode des volumes finis ainsi que sa programmation. On a pu aussi élargir nos connaissances du langage de programmation FORTRAN, et avoir des bonnes connaissances sur langage de programmation en C++ ainsi que d'autre logiciels utilisés au cours de ce travail.

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

On propose aussi, une simulation du même procédé en utilisant la méthode de volumes finis, et une méthode directe pour la résolution du système algébrique.

Conclusion

On peut proposer aussi une simulation du même procédé, avec un cordon courbé dans un milieu multiconnexe.

On peut aussi proposé la simulation du même procédé, appliquer sur d'autres nuances de matériaux aéronautique avec différent forme de cordon.

Enfin, on peut proposer la simulation d'autres procédés de soudages appliqués en aéronautique avec différentes formes de cordon.



ANNEXES

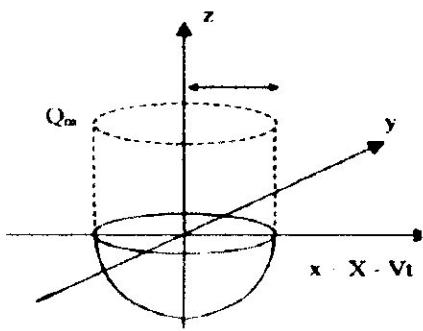
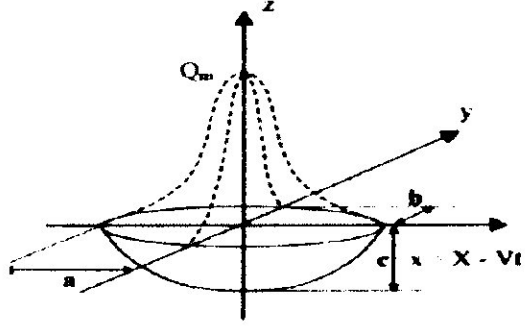
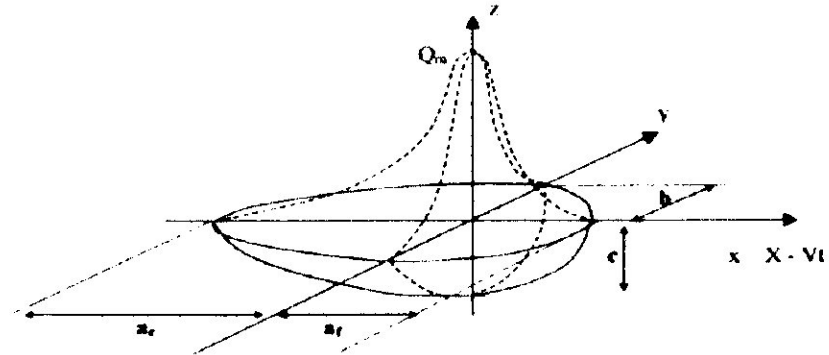
ANNEXE A :
LES GAZ DE PROTECTION RECOMMANDER EN FONCTION DE
MATERIAUX A SOUDER

Le tableau ci-dessous résume les gaz de protection recommandés pour l'utilisation en fonction des matériaux à souder :

| | |
|---|---|
| Alliages d'aluminium | <p>Argon avec CA haute fréquence : est préférée donne un arc stable et un bon effet de nettoyage.</p> <p>Argon et hélium avec CA : donnent un arc moins stable, une plus grande vitesse, une meilleure pénétration.</p> <p>Hélium avec CCPN: donne un arc stable et une grande vitesse de soudage sur du matériel chimiquement propre.</p> |
| Aluminium bronze | L'argon diminue la pénétration sur le métal de base lors d'un surfaçage. C'est à cela qu'est destiné cet alliage. |
| Laiton | L'argon donne un arc stable et peu de fumée se dégage. |
| Alliages à base de cobalt | L'argon donne un arc bien stable et de contrôle facile |
| Cuivre pur | On préfère l'hélium; donne une grande valeur pour contrecarrer la conductibilité thermique du cuivre. Un mélange de 75% d'hélium et de 25% d'argon donne un arc stable, une moins grande chaleur de l'arc que l'hélium seul; on le recommande pour le métal de 1,6 mm et moins d'épaisseur. |
| Inconel (alliage Ni73% Cr17% Fe 10%) | L'argon donne une bonne stabilité de l'arc. l'hélium est recommandé pour de grandes vitesses en soudage automatique. |
| Acier doux | Pour le soudage manuel, on recommande l'argon. Le succès dépend de l'habileté du soudeur. On préfère l'hélium pour de grandes vitesses en soudage automatique; donne une meilleure pénétration que l'argon. |

ANNEXE B :

EXPEMPE DE SOURCE VOLUMIQUE

| Source Volumique : $q(x, y, z) = Q_0 \cdot g(x, y, z) / B = Q_m \cdot g(x, y, z) \text{ W/m}^3$ | |
|---|---|
|  |  |
| Constante sur une sphère de rayon R_{sp} | Gaussienne 3D à répartition finie sur ellipsoïde de rayon a, b, c |
| $q(x, y, z) = Q_m$ | $q(x, y, z) = Q_0 \cdot \frac{6\sqrt{3}}{a \cdot b \cdot c \cdot x^{3/2}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$ |
|  | |
| Gaussienne 3D à répartition fine sur double ellipsoïde de rayon a_x, a_y, b, c | |
| $q(x, y, z) = Q_0 \cdot \frac{6\sqrt{3}}{a_x \cdot b \cdot c \cdot x^{3/2}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-3z^2}{c^2}\right)$ | |

ANNEXE C : PROPRIETES PHYSIQUES DE L'ACIER INOX L304

Les propriétés qui varient en fonction de la température, sont comme suit :

➤ **La chaleur spécifique :**

- Pour $T < 1700^{\circ}\text{k}$: $\rho C_p (T) = 3561240.8 + 010022.3072.T$ $(\text{J}/\text{m}^3 \text{k})$
- Pour $T > 1700^{\circ}\text{k}$: $\rho C_p (T) = 5407942.2$ $(\text{J}/\text{m}^3 \text{k})$

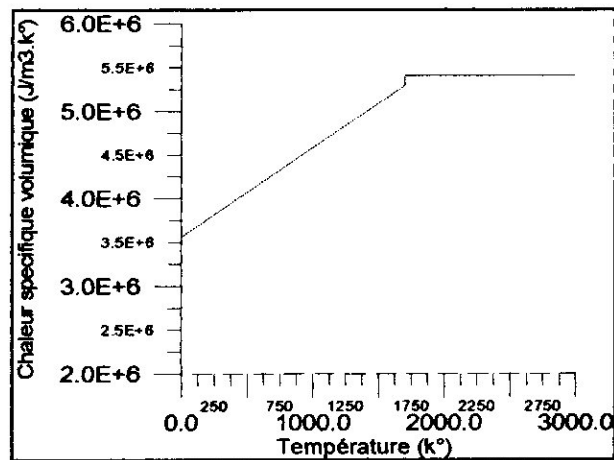


FIG.II.5- La variation de la chaleur spécifique en fonction de la température.

➤ **La conductivité Thermique :**

- Pour $T < 1700^{\circ}\text{k}$: $K (T) = 8.116 + 0.01618.T$ $(\text{W}/\text{m.k})$
- Pour $T > 1700^{\circ}\text{k}$: $K (T) = 12.29 + 0.003248.T$ $(\text{W}/\text{m.k})$

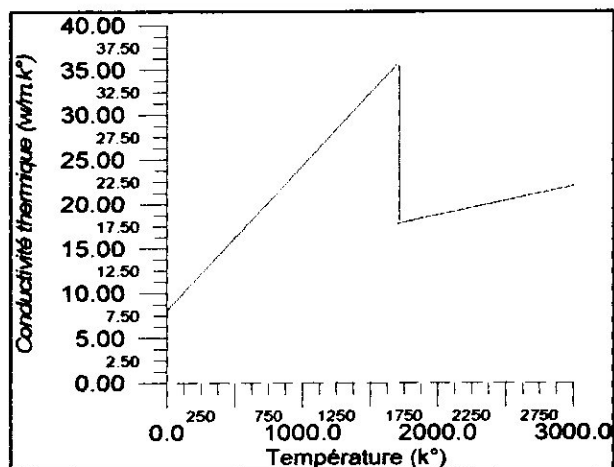


FIG.II.6- La variation de conductivité en fonction de la température.

ANNEXE D :
ALGORITHMES DE RESOLUTION DES SYSTEMES ALGEBRIQUE

Méthode SOR

Donnés : Δt ; maxres ; maxit ; temps = 0 ; maxtemps ; ω

1) Calcul des valeurs initiales et coefficients :

Pour $i=1, NI$

 Pour $j=1, NJ$

- a) Calcul des temperature Initiales : $T(i,j)=Tinit$; $Told(i,j)=Tinit$;
- b) Valeur Initiale du terme source indépendant de T : $Sc(i,j)$;
- c) Valeur Initiale du terme source dépendant de T : $Sp(i,j)$;
- d) Calcul des coefficients : $Ae(i,j)$; $Aw(i,j)$; $An(i,j)$; $As(i,j)$; $dV = dx*dy$; $Ap0$;
- e) Traitement des conditions limites
- f) Calcul des coefficients : $Ap(I, J)$
 $Ap(i,j)=Ae(i,j)+Aw(i,j)+An(i,j)+as(i,j)-Sp(i,j)*dV+ap0$;

 Fait

Fait

Marche dans le temps

Tantque (TEMPS < Maxtemps)

$T^* =$; Somes = 1 ; K=0 ;

 Faire des Itérations jusqu'à convergence

 Tantque (SOMRES > MAXRES ET K < MAXIT)

 SOMES = 0

 Pour $i=2, ni-1$

 Pour $j = 2, nj-1$

$T(i,j) = \omega * (Ae(i,j)*T(i+1,j) + Aw(i,j)* T(i-1,j) + An(I,j) * T(i,j+1)$
 $+ As(i,j) * T(i,j-1) + Sc(i,j)*dV + Ap0 * T^*(i,j))/Ap(i,j) + (1-\omega) * T(i,j)$
 $RES = ABS (ap(i,j) * T(i,j) -(Ae(i,j) * T(i+1,j) + Aw(i,j)*T(i-1,j) +$
 $An(i,j)*T(i,j+1) + As(i,j) * T(i,j-1) + Sc(i,j) * dV + Ap0 * T^*(i,j)))$
 $SOMRES = SOMES + RES$

 Fait

 Fait

 Calcul du résiduel RES:

 Pour $i= 2, NI -1$

 Pour $j =2, NJ - 1$

$RES = ABS (ap(i,j) * T(i,j) -(Ae(i,j) * T(i+1,j) + Aw(i,j)*T(i-1,j) +$
 $An(i,j)*T(i,j+1) + As(i,j) * T(i,j-1) + Sc(i,j) * dV + Ap0 * T^*(i,j)))$
 $SOMRES = SOMES + RES$

 Fait

 Fait

 SOMERR= SOMRES

 K = K+1

 Fin tantque

 TEMPS = TEMPS + dt

FinTantque

Méthode ADI (Alternating direction implicite) avec SOR :

La méthode est basée sur la division du pas de temps sur 2, dans le premier demi pas, le schéma est totalement implicite dans une direction et totalement explicite dans l'autre direction, dans le deuxième pas de temps, la direction implicite est changée, cette alternance rend le schéma ADI, donc ce schéma permet d'utiliser deux fois la TDMA par pas de temps.

Algorithme ADI AVEC SOR

```

LES DONNEES : M, N, L, TOL, MAXIT, D, U, LL, UU
MN = M * N
MM1 = M - 1
ITER = 0
RES = 10.0
10 SI ((RES > TOL) ET (ITER < MAXIT)) ALORS
    K = 0
    Balayage dans la direction I :

        Pour J = 1, MN-MM1, M FAIRE
            K = k+1
            KK = 0
            Pour I = J, K * M FAIRE
                KK = KK+1
                LO(KK) = ω*L(I)
                DI(KK) = D (I)
                UP(KK) = ω*U(I)
                CO(KK) = ω*(C(I)-LL(I)*X(I-M) - UU(I) * X(I+M)) + (1.-ω)*D(I)*X(I)
            Fait
            CALL TDMA (M, LO, DI ,UP ,CO, XX)
            KK = 0
            Pour I = J, K*M FAIRE
                KK = KK + 1
                X (I) = XX(KK)
            Fait
        Fait

    Balayage dans la direction J:

        Pour J = 1,M FAIRE
            KK = 0
            Pour I= J, MN-MM1+N ,M FAIRE
                KK = KK+1
                LO(KK) = ω*LL(I)
                DI(KK) = D (I)
                UP(KK) = ω*UU(I)
                CO(KK) = ω*(C(I)-L(I)*X(I-1) - U(I) * X(I+1)) + (1.-ω)*D(I)*X(I)
            Fait
            CALL TDMA (N, LO, DI ,UP ,CO, XX)
            KK = 0

```

Annexe D.

```
      Pour I = J , MN-MM1+N ,M
      |   KK = KK + 1
      |   X (I) = XX(KK)
      |
      |   Fait
      |
      |   Fait
      |
      |   Calcul du résiduel :
      |
      |   RES = 0.0
      |   Pour I = 1, MN FAIRE
      |   |   TERM = C(i) - (LL(i)*X(i-m) + L(i)*X(i-1) + D(i)*X(i)
      |   |   |   + U(i)*X(i+1) + UU(i)*(i+m))
      |   |   RES = RES + TERM**2
      |   |
      |   |   FAIT
      |   |   RES = SQRT (RES) / MN
      |   |   ITER = ITER + 1
      |
      |   ALLER A 10
      |
      |   FINSI
```

Liste des références

- [1]. Internet : Site web : www.soudeur.com.
- [2]. Le procédé T.I.G ; PIERRE DAIGLE, Centre de formation professionnelle de l'outawais.
- [3]. Simulation du soudage-Acier316L.validation sur cas testes de complexité croissante ; loinel Depradeux, INSA Lyon 2003.
- [4]. R.Varizllag « Soudage : élément de conception et de réalisation».
- [5]. 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.
- [6]. Technique d'ingénieur- section Aéronautique- Chapitre IV Matériaux.
- [7]. R.BAUS, W.Chapeau «Application du soudage à la construction».
- [8]. 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 "2nd International Symposium On hydrocarbons And Chimistry" mars, 2004.
- [9]. ROSENTHAL.D:"Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", Welding Journal (1947), 20May, PP.220_s to 234_s.
- [10]. 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^{eme} journée de mécanique D'EMP Le 23-28/03/2006.(Bordjel-Bahri. Alger).
- [11]. A.JARDY et H.COMBEAU : " Simulation numérique des phénomènes de transport"2002.
- [12]. S.V.Pathancar, « numerical heat tranfer and fluid flow» Mac graw hill book company, 1989.
- [13]. Mouloud Aissani, calcule des paramètre d'écoulement dans les conduites à section complexes par la méthode des éléments finis, 03/07/2002.
- [14]. Internet : Site web ; www.Wikipédia.com.
- [15]. Internet : Site web ; www.engineersedge.com
- [16]. Atelier de propulsion, département d'aéronautique de Blida.
- [17]. Mr Aissani M, programme en Cpp, simulation du soudage TIG, 2004-2005