

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

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT D'AERONAUTIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Aéronautique
Option : Structure

THEME :

CALCUL NUMERIQUE DU TRANSFERT DE CHALEUR
LORS DE SOUDAGE (T.I.G) DES TOLES MINCES A
USAGE AERONAUTIQUE, PAR LA METHODE DES
ELEMENTS FINIS

Etudié par :
MAKHOUF SARAH

Dirigé par :
M.M. AISSANI

Promotion 2004

ملخص
تهدف هذه الدراسة إلى تحديد السلوك الحراري لوصلة تلميح بقوس كهربائي، وذلك باستعمال طريقة العناصر المنتهية و عن طريق التجارب.
هذه الدراسة سمحت لنا بتحديد كل من المنطقة المنصهرة و المنطقة المتوترة حراريا اللتان تمثلان المناطق الهشة في التركيب.
الكلمات المفتاحية
انتشار الحرارة- التلميح- طريقة العناصر المنتهية- المنطقة المنصهرة- المنطقة المؤثر عليها حراريا.

Résumé :

L'objectif de cette étude, est la détermination du comportement thermique d'un joint soudé, en utilisant la méthode des éléments finis et par l'expérimentale.

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

Mots clés : transfert de chaleur, soudage, méthode des éléments finis, ZAT, ZF

Abstract :

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

The evaluation of risky zones, fusion zone (FZ) and heat affected zone (HAZ) has been made on the of the results obtained by numerical simulation and the experimental.

Key words: Heat transfer, welding, finite element method, HAZ, FZ

REMERCIEMENTS

*Ce travail a été effectué au centre de recherche scientifique et technique en soudage et de contrôle, de Chéraga, dans le laboratoire de mécanique, sous la Direction de mon promoteur **MAISSANI MOULOUD** chercheur au C.S.C, à qui je tiens à exprimer mes profonde reconnaissance et pour la confiance dont Il a fait preuve à mes égard.*

Enfin, je présente mes remerciements les plus distingués et mes salutations Les plus chaleureuses à l'ensemble des enseignants de mon institut, Spécialement aux Membres de jury, et tous mes amis pour leurs soutien moral et leurs conseils Bénéfiques.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma chère mère, mon père.*
- *Mes frères, et mes sœurs.*
- *Ma famille et mes proches.*
- *Mes amis.*

MAKHLOUF Sarah

Nomenclature :

E_n : Energie nominale.	(J/m)
U : la tension d'arc en Volts.	(V)
I : l'intensité du courant électrique en Ampère.	(A)
V_s : vitesse du soudage.	(m/s)
E_d : Energie dissipée dans le cordon de soudure.	(J/m)
η : le rendement d'arc.	
Q_p : la chaleur émise par convection et par rayonnement par la colonne d'arc.	(w/m ²)
Q_a : celle transmise à la pièce à souder.	(w/m ²)
n : la proportion de la chaleur produite par la colonne.	
m : la proportion de la chaleur perdue par rayonnement.	
Q_{arc} : la chaleur produit par l'arc.	(w/m ²)
t : temps.	(s)
ρ : densité du matériau à souder.	(kg/m ³)
C_p : chaleur spécifique du matériau.	(J/kg.°C)
K : conductivité thermique.	(w/m.°C)
S : chaleur générée ou absorbé par unité de temps.	(w/m ³)
h : coefficient d'échange par convection.	(w/m ²)
T : température sur les plaques.	(°K)
T_∞ : température ambiante.	(°K)
ϵ : émissivité thermique.	
σ : constante de STEPHAN – BOLTZMAN.	(w/m ² .k ⁴)
S_c : partie constante de la linéarisation du terme source.	(w/m ³)
S_p : coefficient de T dans l'expression du terme source.	(w/m ³ .k)
q_0 : coefficient de l'expression de terme source.	(w/m ²)
Q : la chaleur produit par l'arc.	(w)
Δt : la variation du température.	(°k)
T^0 : est la température à l'instant précédente.	(°k)
$N(x,y)$: la fonction d'interpolation.	
Ω : domaine de calcul	
Γ : la frontière.	
ds : la longueur d'arc infinitésimale le long du contour Γ .	
Ω_e : domaine de calcul d'élément.	
Γ_e : la frontière d'élément.	
$K_{ij}^{(e)}$: matrice de rigidité d'élément.	
$F_1^{(e)}$: le vecteur force.	
I_{mn} : intégrale d'inertie.	
L_x : la longueur de la plaque.	(mm)
L_y : la largeur de la plaque.	(mm)
E_p : épaisseur de la plaque.	(mm)
N_x : nombre des nœuds sur l'axe X.	
N_y : nombre des nœuds sur l'axe Y.	
V_k : vecteur de stockage.	
NN : dimension du vecteur V_k .	
B : la longueur de la demi bonde.	

SOMMAIRE :

	Page
RESUMEE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
DEDICACES.....	III
Liste des symboles.....	IV
SOMMAIRE.....	V
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOUDAGE

I-1/ HISTORIQUE DU SOUDAGE.....	2
I-2/ DEFINITION DE SOUDAGE.....	2
I-3/ DIFFERENTES PROCEDES DE SOUDAGE.....	2
I-4/ SOUDAGE A L'ARC.....	3
I-4-1/ INTRODUCTION.....	3
I-4-2/ DEFINITION.....	3
I-4-3/ LES PRINCIPAUX PROCEDES DE L'ARC.....	3
I-4-3-1/ SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE ENROBE.....	4
I-4-3-2/ PROCEDE A ELECTRODE DE REFRACTAIRE T.I.G.....	4
I-4-3-3/ LE PROCEDE M.I.G/ M.A.G.....	5
I-4-4/ PROPRIETES ENERGITIQUE DE L'ARC.....	6
I-4-4-1/ ENERGIE NOMINALE.....	6
I-4-4-2/ ENERGIE DISSIPÉE DANS LE JOINT SOUDE.....	6
I-4-4-3/ RENDEMENT DE L'ARC.....	7
I-4-4-4/ TEMPERATURES DANS LA COLONNE D'ARC.....	8
I-4-5/ LES CYCLES THERMIQUES DU SOUDAGE.....	8
I-4-5-1/ DEFINITION.....	8
I-4-5-2/ CARACTERE DU CYCLE THERMIQUE ET DE LA REPARTITION.....	8
I-5/ QUELQUES APPLICATIONS DE SOUDAGE EN AERONAUTIQUE.....	10

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II-1/ INTRODUCTION.....	12
II-2/ ETUDE DU PHENOMENE DE SOUDAGE.....	12
II-2-1/ HYPOTHESES PRINCIPALE.....	12
II-2-2/ EQUATION REGISSANT LA CHALEUR.....	12
II-2-3/ LES CONDITIONS AUX LIMITES.....	13
II-3/ LES DIFFERENTES MODELES DE SOURCE DE CHALEUR.....	13
II-3-1/ SOURCE DE CHALEUR PONCTUELLE.....	14
II-3-2/ SOURCE DE CHALEUR GAUSSIENNE.....	14
II-3-3/ SOURCE DE CHALEUR EN SEGMENTS DE LIGNES.....	14
II-4/ TRAITEMENT DU TERME SOURCE.....	15

CHAPITRE III : FORMULATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS ET GENERATION DU MAILLAGE

III-1/INTRODUCTION.....	17
III-2/ FORMULATION VARIATIONNELLE (INTEGRALE).....	17
III-3/ FORMULATION EN ELEMENT FINI.....	19
III-4/ FONCTIONS D'INTERPOLATION.....	20
III-4-1/ SERIE POLYNOMIALE.....	20
III-4-2/ FONCTION D'INTERPOLATION POUR UN ELEMENT QUADRILATERE A QUATRE NŒUDS.....	21
III-5/ CALCUL DES MATRICES D'ELEMENTS.....	22
III-6/ ASSEMBLAGE DES MATRICES D'ELEMENTS.....	23
III-7/ GENERATION DU MAILLAGE.....	24
III-7-1/ ASPECT DE LA GENERATION DE MAILLAGE.....	24
III-7-2/ GENERATION DES NŒUDS DE FRONTIERE ET LES NŒUDS INTERNE.....	25
III-7-3/ CONNEXION DES ELEMENTS DU MAILLAGE.....	27

CHAPITRE IV : ANALYSES EXPERIMENTALE

IV-1/ INTRODUCTION.....	29
IV-2/ PARAMETRES D'EXPERIENCE.....	30
IV-3/ QUELQUE RESULTATS OBTENUS PAR L'EXPERIMENTALE.....	30

CHAPITRE V : RESOLUTION NUMERIQUE ET PROGRAMMATION

V-1/ INTRODUCTION.....	33
V-2/ METHODE DE STOCKAGE DES MATRICES BANDES SOUS FORME DE VECTEUR.....	33
V-2-1/ STOCKAGE EN COLONNE.....	33
V-3/ EVALUATION DE LA DEMI BANDE D'UNE MATRICE BANDE.....	35
V-4/ METHODE DE RESOLUTION D'UN SYSTEME D'EQUATIONS LINEAIRE (DECOMPOSITION DE KHALESTKI).....	35
V-5/ PROCEDURE DE CALCUL.....	38

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

VI-1/ INTRODUCTION.....	42
VI-2/ DONNEES DU PROGRAMME.....	42
VI-3/ INTERPRETATION DES RESULTATS NUMERIQUES.....	43
VI-4/ INTERPRETATIONS DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET COMPARAISON AVEC NUMERIQUES.....	46
VI-4-1/ L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS.....	46
CONCLUSION GENERALE.....	48

BIBLIOGRAPHIES

INTRODUCTION GENERALE

Malgré le développement remarquable de la construction soudée, on observe toujours une méfiance chez le grand public et même chez certains ingénieurs, vis-à-vis de la technique de soudage, car l'histoire de la soudure a enregistré un certain nombre d'accidents, rappelons seulement les ruptures de ponts soudés qui se sont produits en Allemagne et en Belgique juste avant la deuxième guerre mondiale, suivies des ruptures produites au niveau des navires soudés aux Etats-Unis pendant la guerre, mais quelle que soit le nombre d'accidents produits, il reste extrêmement faible devant les constructions qui sont bien comportées.

Vu la particularité des caractéristiques locales de la fusion, l'assemblage soudé est soumis à des traitements thermiques à des températures élevées, et subit des retraits qui sont le siège de contraintes résiduelles. La connaissance de ces sollicitations qui sont engendrées par l'opération de soudage, nous permet de déterminer les caractéristiques finales de cordon de soudure au point de vue métallurgiques et mécaniques. Par conséquent, la première étape critique dans l'analyse précise de comportement physique de la soudure, est l'évaluation d'une carte thermique qui détermine le champ de 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).

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

Notre travail consiste à définir la ZAT et ZF, expérimentalement et numériquement en étudiant la répartition de la température lors de l'opération de soudage T.I.G de deux plaques métalliques minces, en tenant compte de variations des propriétés physiques en fonctions de température et de matériaux, et en assimilant la source de chaleur à une source gaussienne mobile.

Le problème posé est un problème bidimensionnel instationnaire, dont la formulation mathématique donne des équations assez complexes. Donc la résolution du problème nécessite l'utilisation d'une méthode numérique (on a choisie la méthode des éléments finis).

Ce présent mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le chapitre (I), comporte des généralités sur le soudage.
 - Le chapitre (II), expose l'étude thermique et la modélisation mathématique du problème de soudage.
 - Le chapitre (III), on a présenté la méthode numérique utilisée (MEF) pour la discrétisation de l'équation de la conduction de chaleur pour un système de coordonnées cartésiennes.
 - Le chapitre (IV), a été consacré pour l'expérimental.
 - Dans le chapitre (V), on fait la résolution numérique et programmation.
 - Dans le dernier chapitre, on a présenté les résultats obtenus et leurs interprétations pour les différentes applications : la simulation numérique et expérimental.
- Enfin, une conclusion générale clôtura le travail.

CHAPITRE I
GENERALITES
sur
LE SOUDAGE

CHAPITRE I:**GENERALITE SUR LE SOUDAGE****I-1/HISTORIQUE DU SOUDAGE :**

Depuis l'apparition de l'être humain sur terre, ce dernier a toujours essayé de faciliter son existence. Delà, a travers les ères des techniques ont été inventées, pour éliminer les problèmes qui s'imposaient, citant parmi eux la technique d'assemblage qui était un impact à résoudre, et cela on part par des éléments plus ou moins disperses apparition et cela date du II^e siècle avant Jésus – Christ en commençant par l'âge du bronze (brasage) suivit par l'âge du fer (forgeage) jusqu'à l'actuel.

Le soudage est passé par plusieurs périodes, mais la plus riche est celle des derniers siècles précisément de la fin du XIX^e siècle et début du XX^e siècle car a cette époque on a inventé : le soudage avec électrode fusible nue, le soudage par électrode enrobée, le soudage par résistance, le soudage par gaz (chalumeau), le soudage par électrode de carbone.

Au temps actuel, on estime que 60% à 80% de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés, la technique s'est bien développée car maintenant on peut souder presque tous les métaux et alliages utilisés dans l'industrie moderne de différentes épaisseurs même les plus faible.

I-2 / DEFINITION DE SOUDAGE :

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

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

I-3/ LES DIFFERENTES PROCEDES DE SOUDAGE :

En général, nous pouvons classer les différentes procédés de soudage par leur modes (fusion, sans fusion) ou, bien par un classement basé sur les sources d'énergie (comme : arc électrique, résistance électrique) et sur les moyens de protection mis en œuvre contre la contamination atmosphérique. [1]

Voir Annexe « A » pour savoir plus sur les différents procédé de soudage qui existe.

I-4/ SOUDAGE A L'ARC :**I-4-1/INTRODUCTION :**

La première application de l'arc électrique pour le soudage est sans conteste celle qui correspond au brevet pris par CHARLES DE MERITENS en 1881 qui concerne « un mode de soudure autogène par l'électricité ». Ce n'est que quatre années après que de BERNADOS et OLSZEWSKI déposent le leur. Le procédé avait pour l'objectif le travail des métaux et des métalloïdes par application directe du courant électrique et permettait de bien contrôler le courant de soudage et de stabiliser l'arc. BERNADOS en 1887, puis KJELLBERG en 1914 ont été les premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateur et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue.[2]

I-4-2/ DEFINITION :

L'arc électrique est établi entre une électrode réfractaire en tungstène et la pièce à souder. L'arc et le bain de fusion sont protégés par une atmosphère inerte(argon ou argon-hélium avec contrôle du débit). La polarité négative à l'électrode(pour ménager sa dégradation par le bombardement d'électrons) est utilisée pour le soudage des aciers. Le courant alternatif (favorable à la destruction de la couche d'alumine) est utilisé pour le soudage de l'aluminium et ses alliages. [2]

Ce procédé est bien adapté à l'assemblage des pièces en alliage d'aluminium et acier inoxydable. Cependant, son caractère manuel et les soins à apporter à la préparation des bords à assembler limitent ses possibilités.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source d'énergie diffèrent dans leur principe en fonction d'un certain nombre de critères :

- Le type d'arc utilisé.
- Le mode protection du bain de fusion (flux solide ou gaz).
- Type d'électrode (fusible ou non fusible).
- La mise en œuvre opératoire(manuelle, automatique, semi-automatique).

Le choix d'un procédé, en vue de l'exécution d'un joint soudé, nécessite la connaissance des principaux procédés et leurs applications générales, celui-ci doit répondre aux exigences d'ordre mécanique, métallurgique, économique,....etc.

I-4-3/ LES PRINCIPAUX PROCEDES DE L'ARC :

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

- Nature de l'électrode : baguette, fil fusible ou réfractaire.
- Nature du milieu : gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrice vis-à-vis de l'atmosphère ambiante. [2]

I-4-3-1/ SOUDAGE A L'ARC AVEC ELECTRODE ENROBEE:

Dans ce procédé, une électrode métallique est enrobée de fondant et reliée à un générateur alternatif ou continu. Le métal à souder est relié à l'autre borne de cette même source de courant. En plaçant la pointe de l'électrode sur le métal puis en retirant, un arc électrique se forme. [4]

La chaleur intense de l'arc fait fondre les deux parties à souder, ainsi que la pointe de l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport pour la soudure (figure I-1), de là la vitesse de soudage est relative élevée et le refroidissement est assez brutal.

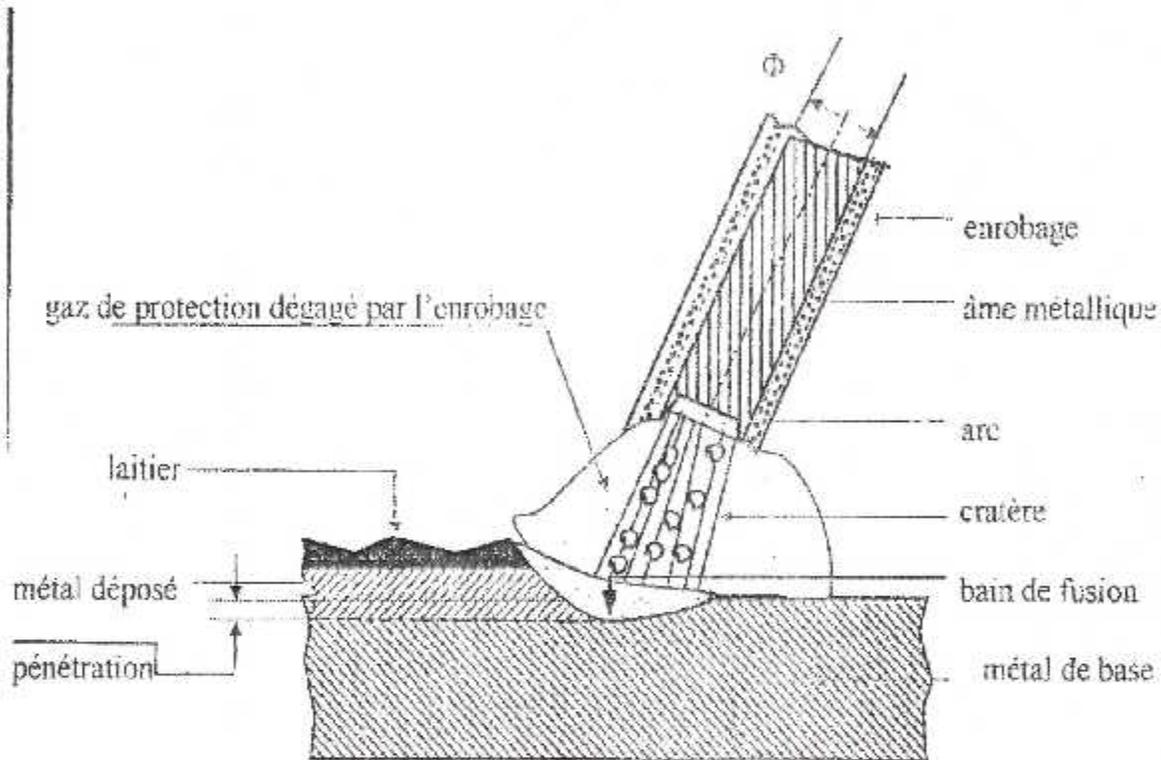


Fig.I.1 . Soudage à l'arc avec électrode enrobée

I-4-3-2/ PROCEDE A ELECTRODE REFRACTAIRE T.I.G. :

Dans le procédé T.I.G. (tungsten inert gas), l'arc est établi au sein d'une atmosphère neutre (argon ou hélium) entre la pièce à souder et une électrode métallique réfractaire non consommable en tungstène pur. Le flux de gaz inerte protège de l'air environnant l'électrode, le bain de fusion et, le cas échéant, l'extrémité du fil d'apport (figure I-2). Utilisé de façon courante dans les industries nucléaire, aérospatiale, alimentaire, chimique ou pétrochimique, le procédé T.I.G. permet le soudage de tous les métaux et alliages, même les plus délicats, tels que le titane, le zirconium, etc. la simplicité des paramètres et la faible usure de l'électrode ont permis la mise au point d'installations automatiques pour le soudage en toutes positions (AUTOMATISATION, ROBOTS), mais, du fait de la limitation des énergies mises en jeu, sa productivité n'atteint pas d'autre procédé. Les

principales variantes du procédé sont le T.I.G. pulsé, le T.I.G. multicathode, le T.I.G. avec fil chaud et le T.I.G. double flux. [3]

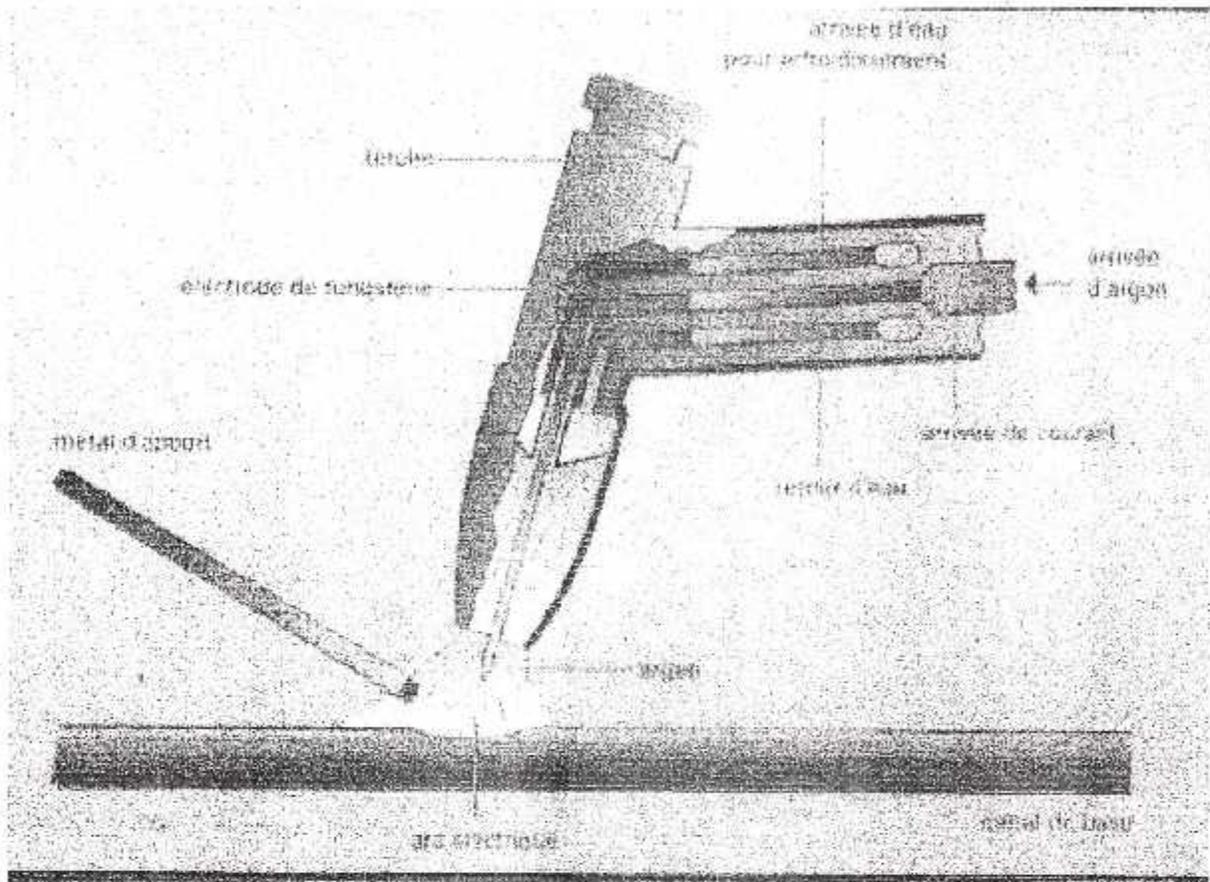


Fig. 1.1. Procédé T.I.G.

1-4-3-3/ LE PROCÉDE M.I.G/M.A.G :

L'emploi d'un fil électrode fusible dévidé automatiquement en remplacement de l'électrode réfractaire dans le procédé T.I.G. a donné naissance au procédé M.I.G/M.A.G dans le procédé M.I.G. (métal inerte gaz) l'atmosphère de protection est inerte ; dans le procédé M.A.G (métal active gaz) elle est active. Les principaux gaz ou mélanges de gaz utilisés sont l'argon et l'hélium en soudage M.I.G et le CO₂ ou l'argon-CO₂ en soudage M.A.G. La fusion du fil, ou plus exactement le transfert du métal dans l'arc, peut se faire de trois manières : avec courts-circuits, en grosses gouttes, ou en pulvérisation axiale (voir figure I-3), le mode de transfert dépendant principalement de la nature du gaz utilisé et de la densité du courant de soudage.

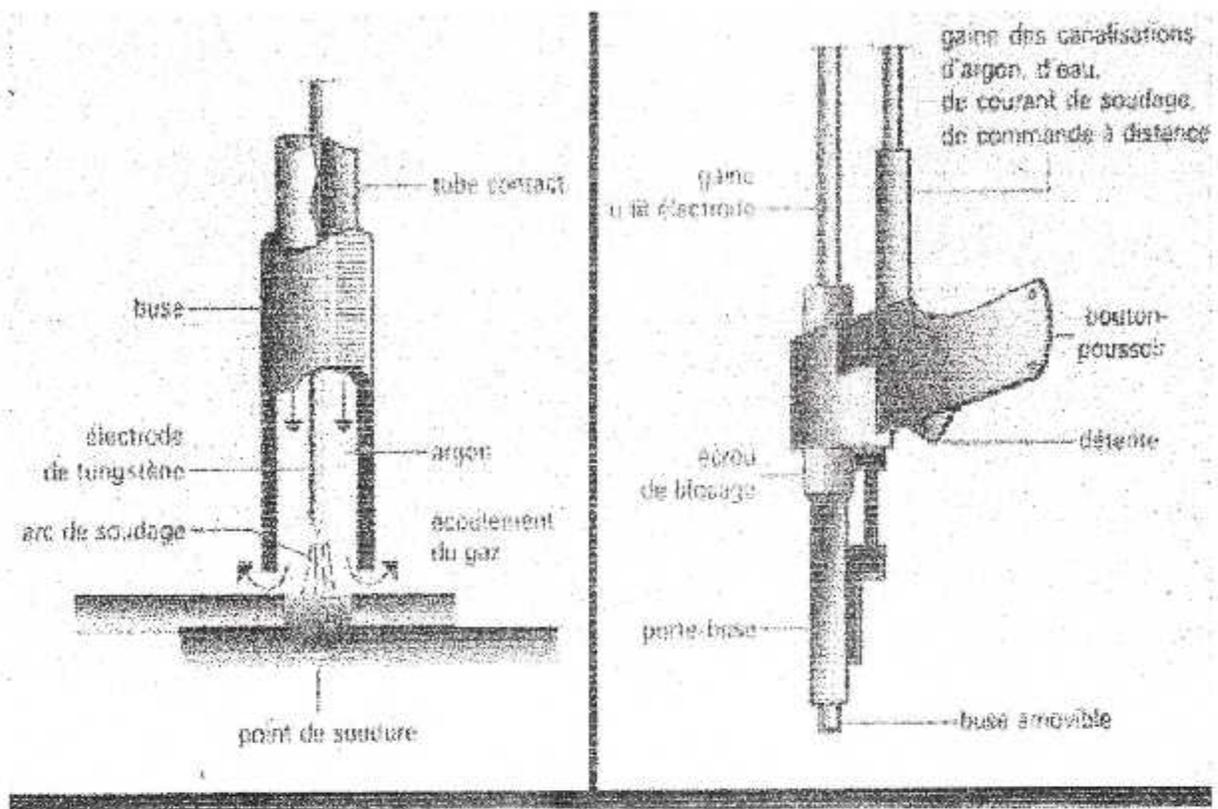


Fig. I.5. Procédé M.I.G

I-4-4/ PROPRIETES ENERGETIQUES DE L'ARC :

I-4-4-1/ ENERGIE NOMINALE :

C'est l'énergie (E_n) fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure. Nous pouvons la calculer avec la formule suivante :

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

Ou :

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

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

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

I-4-4-2/ ENERGIE DISSIPÉE DANS LE JOINT SOUDE :

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. [4]

Pour l'énergie dissipée dans un cordon de soudure (E_d), on aura :

$$E_d = E_a \cdot \eta \quad (I-2)$$

Avec η : le rendement d'arc.

I-4-4-3/ LE RENDEMENT DE L'ARC :

Dans le but de calculer le taux de chaleur consommée, par les pièces à souder, qui est basé sur les valeurs mesurées de tension et du courant, il est nécessaire de connaître la proportion de l'énergie d'arc qui est transférée à la pièce. Cette quantité est connue par « le rendement d'arc ' η ' » que nous pouvons le calculer comme suite :

- Dans le cas d'électrode fusible : $\eta = 1 - [(1-n)Q_p + mQ_a] / U.I$
- Dans le cas d'électrode non fusible : $\eta = 1 - [Q_r + (1-n)Q_p + mQ_a] / U.I$

Ou :

Q_i : la chaleur transmise à l'électrode.

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

Q_a : celle transmise à la pièce à souder.

n : la proportion de la chaleur produite par la colonne.

m : la proportion de la chaleur perdue par rayonnement.

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

Le rendement énergétique de l'arc varie en fonction :

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

Delà CHRISTENSEN et Al(1965), ont pu déterminer les différents rendements d'arc (Figure I-4).

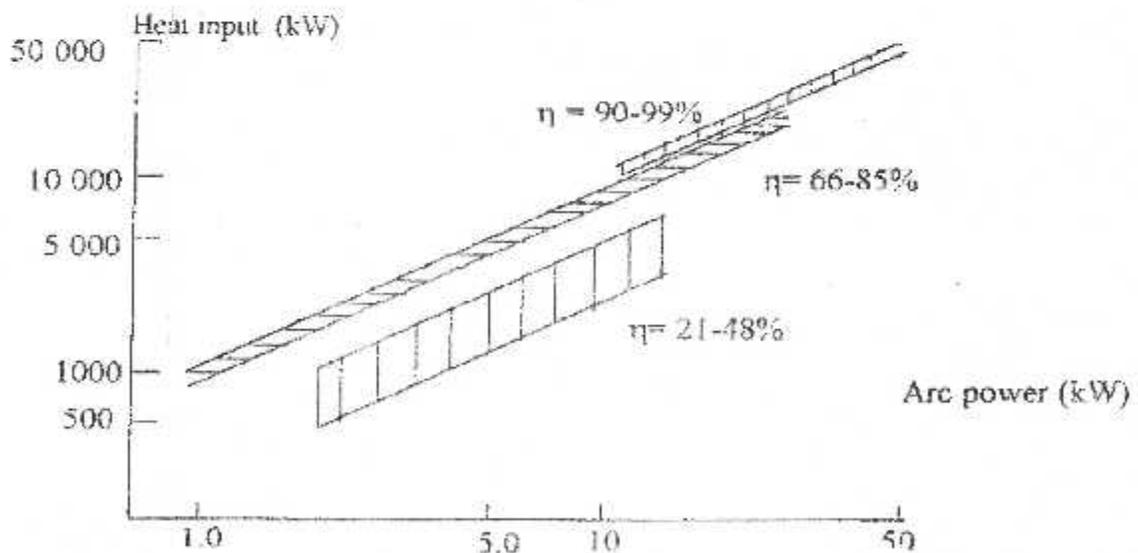


Fig. I.4. Les différents rendements d'arc

I-4-4/ TEMPERATURES DANS LA COLONNE D'ARC :

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

La température au voisinage de la cathode est d'environ $2 \cdot 10^4$ K et ne varie pas beaucoup même avec un courant de soudage allant jusqu'à 400 A (d'après KO BAYASHI et SUGA 1979 et JACKSON 1960).

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

I-4-5/ LES CYCLES THERMIQUES DU SOUDAGE :I-4-5-1/ DEFINITION :

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

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

I-4-5-2/ CARACTERES GENERAUX DU CYCLE THERMIQUE ET DE LA REPARTITION :A)- Notion d'état quasi- stationnaire :

Si nous relevons au moyen thermocouples, les courbes $\theta = f(t)$ en des points A1, A2...etc, situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé amorcé en plaine tôle, nous obtenons pour chaque parcours expérimenté, par rapport à l'origine O du cordon, la disposition décrite par figure (I-5) qui conduit aux remarques suivantes :

- La température maximale atteinte θ_m croit avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme (l'énergie demeurant uniforme).
- En même temps, les lois de refroidissement mesurées par le temps de refroidissement entre deux températures deviennent identiques.

Autrement dit, les courbes $\theta = f(t)$ deviennent superposables dès que la source de chaleur a franchi un certain parcours (q).

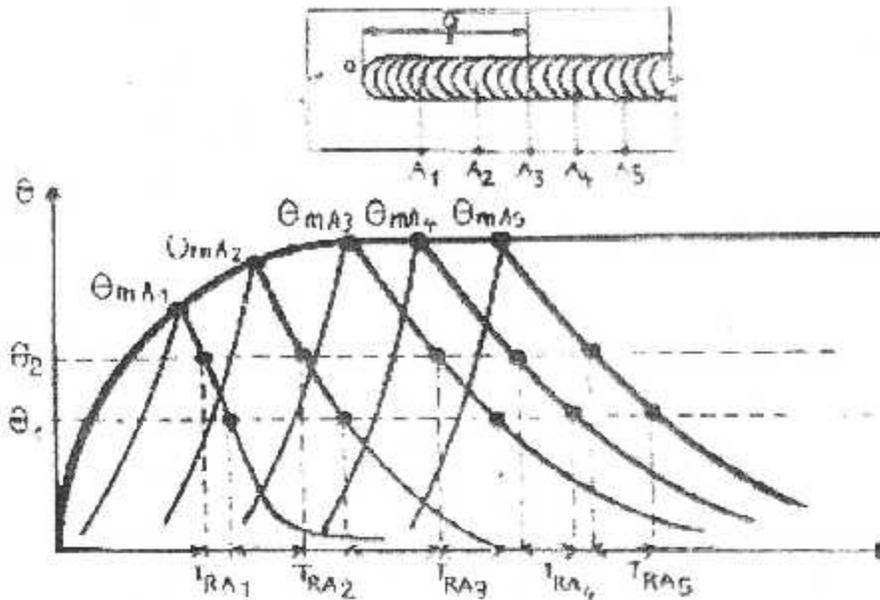


Figure I-5 : cycles thermiques le long du cordon de soudure.

B)- Facteurs influençant la répartition thermique :

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

Les conditions de soudage : l'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu durant l'opération, d'autres part, l'environnement et ses paramètres ont un important impact sur la répartition thermique (la pression et la composition de l'entourage direct de l'arc électrique).

C)- Différentes zones dans une soudure :

On définit la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone fondue (ZF) et le métal de base la figure I-6 montre ces trois zones.

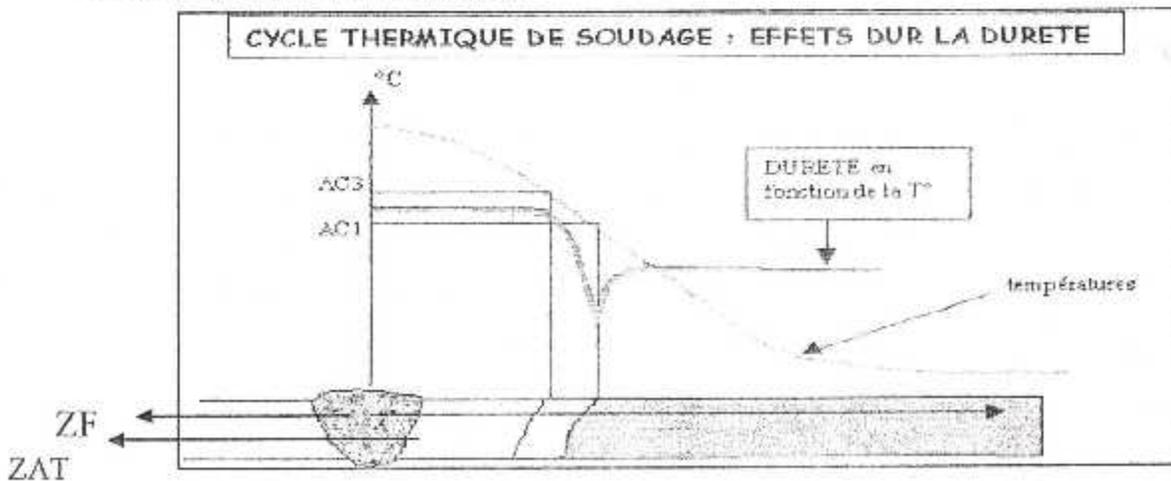


Figure I-6 : les différentes zones dans une soudure avec le cycle thermique et la dureté.

* zone fondue :

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

*zone affectée thermiquement :

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

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

* Effet de soudage sur la dureté :

Durant le soudage, l'abond de la zone fondue est à des températures intermédiaires entre T° fusion et T° métal de base.

Cette zone affectée par la chaleur est divisible en deux zones différentes.

- Une partie partiellement transformée très dure du fait de sa forte teneur en carbone. (Le SP300 possédant moins de carbone a donc une dureté inférieure au 23.11)
- Une partie adoucie (soudo-revenue) qui voit sa dureté chuter de part le cycle de soudage

Si on chevauche les passes de manière appropriées, on peut donc adoucir une ZAT en profitant de ce soudo-revenue et obtenir par la même un effet de détente après soudage.

Limiter la dureté en ZAT permet de :

- Réduire les risques de fissuration
- Eliminer les points durs si la soudure est conservée à l'état brut de soudage.

I-5- / QUELQUES APPLICATIONS DE SOUDAGE EN AERONAUTIQUE :

Parmi les domaines industriels où on trouve des applications interne des soudures, est l'aéronautique, (qui nous intéresse dans notre formation et dans notre recherche).

Alors, on cite à titre d'exemple des zones soudés dans l'avion : composantes structurelles et dans le moteurs.

- Avion (plancher, jambes des trains d'atterrissage...)



Figure I-7 : soudage du carter de l'avion



Figure 1-8 : soudage de la voilure d'une maquette avec le fuselage.

CHAPITRE II

MODELISATION

MATHEMATIQUE

CHAPITRE II :**MODELISATION MATHEMATIQUE****II-1/ INTRODUCTION :**

Ce chapitre sera consacré à l'étude de transfert thermique lors d'une opération de soudage (TIG), tel que en considérant le cas bidimensionnel instationnaire d'un assemblage de deux plaques métalliques minces, de l'acier inoxydable 304L.

En effet, notre modèle mathématique est obtenu à partir d'un bilan énergétique, effectué sur un volume de contrôle élémentaire de la plaque métallique considéré.

II-2/ ETUDE DU PHENOMENE DE SOUDAGE :**II-2-1/ Hypothèses principales :**

Compte tenu de l'importance que revêt l'analyse thermique dans toute étude préventive du soudage, la répartition de la température en cours de soudage est basé sur la résolution de l'équation fondamentale régissant l'écoulement de la chaleur par conduction dans un solide. Pour modéliser le processus, il est important de noter et d'évoquer les hypothèses suivantes :

- Le régime est transitoire et bidimensionnelle (x,y,t).
- La direction de soudage s'effectue selon l'axe 'y'.
- Les propriétés thermiques (K et ρC_p) du matériau sont fonction de la température.
- Considération du changement de phases dans les métaux à souder.
- L'écoulement du bain de fusion est négligeable.
- Les déperditions calorifiques par convection et rayonnement à travers les surfaces libres et les frontières de la pièce sont considérées.
- La source de chaleur est mobile et répartit selon une distribution surfacique Gaussienne de la forme $S(x,y,t)$, où nous verrons par la suite sa configuration géométrique et la méthode de sa linéarisation.

II-2-2/ Equation régissant la chaleur :

L'équation de conduction de la chaleur dans les plaques métalliques 1 et 2 à souder s'écrit, après avoir effectué le bilan énergétique et les calculs nécessaires [9] :

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

ou T : température

t : temps

ρ : densité du matériau à souder

C_p : chaleur spécifique du matériau

K : conductivité thermique

S : chaleur générée ou absorbé par unité de temps.

La résolution de cette équation différentielle (II-1) nécessite la détermination des conditions aux limites et initiale, pour bien poser le problème et avoir une solution unique.

II-2-3/ Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont déterminées à partir des équations d'échange du flux de chaleur par convection et rayonnement avec le milieu environnant.

Alors, elles se résument comme suit :

- Au niveau des frontières, on a le flux q_n égale à :

$$q_n = h_o(T - T_\infty) + \sigma \epsilon (T^4 - T_\infty^4) \tag{II-2}$$

h : coefficient d'échange par convection $h=10 \text{ w/m}^2$.

T : température de bord de l'assemblage.

T_∞ : température ambiante.

ϵ : émissivité thermique égal à 0.82

σ : constante de STEPHAN – BOLTZMAN égal à $5,66 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}^4$.

- Au plan symétrique d'assemblage, le flux de chaleur est nul donc :

$$q_n = 0 \tag{II-3}$$

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 $T_0=300 \text{ k}^\circ$.

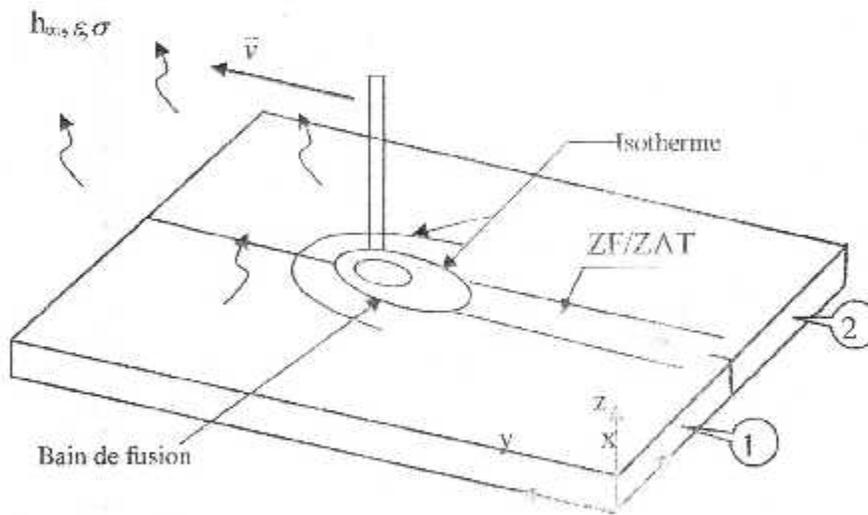


Figure II-1 : Schéma du processus de soudage de deux tôles minces

La résolution du système d'équations différentielles (II-1,II-2,II-3) est très complexes (non linéarité des paramètres, forme de source de chaleur compliqué) donc le recours aux méthodes numériques de résolution et à la modélisation de source de chaleur est indispensable.

II-3/ LES DIFFERENTES MODELES DE SOURCE DE CHALEUR :

D'après notre recherche bibliographique, on compte trois modèles de représentation de la source de chaleur.

II-3-1/ Source de chaleur ponctuelle :

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

$$q = \eta \cdot U \cdot I \quad (\text{II-4})$$

Où : η : rendement thermique de l'arc : U : tension de soudage : I : courant de soudage

Bien que, ce modèle peut prédire la vitesse de refroidissement du métal, le modèle de source ponctuelle ne fournit pas de renseignements quantitatifs au sujet de la dimension ou la forme du bain fondu.[6]

II-3-2/ Source de chaleur Gaussienne :

La bibliographie propose deux formulations de la répartition d'énergie : (voir figure II-2)

- La première formulation est un volume gaussien de révolution de type : $q = q_{\max} e^{-kr^2}$ lorsque k tend vers 0 on retrouve le cas de source point.
- La seconde formulation est basée sur la considération d'une distribution volumique de la source de la chaleur dans le joint soudé. Cette source de chaleur s'apparente à la forme du bain de fusion qui se déplace sous l'électrode et nous considérons qu'il s'agit d'une forme ellipsoïdale [7].

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

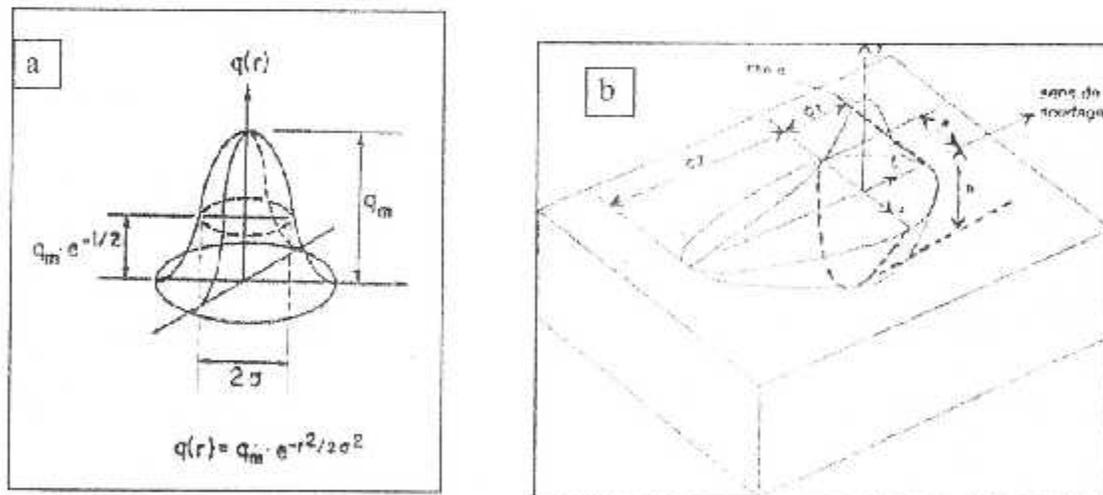


Figure II-2. a-b : modèles de source de chaleur Gaussiennes

II-3-3/ Source de chaleur en segments de lignes :

Dans ce modèle la source de chaleur est composée de segments de lignes [8], 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/ TRAITEMENT DU TERME SOURCE :

Le terme 'S' source de la chaleur s'écrit [9]:

- Pour le métal de base, (zone de bain de fusion) c'est l'énergie interne générée :

$$S = 2h_{\infty}(T - T_{\infty}) + 2\sigma\epsilon(T^4 - T_{\infty}^4) \quad \sim f(x)$$

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

$$S = h_{\infty}(T - T_{\infty}) + \sigma\epsilon(T^4 - T_{\infty}^4) + q_0 e^{-f(x,y,t)}$$

Ce terme S doit être représenté sous la forme linéaire :

$$S = S_c + S_p \cdot T \tag{II-6}$$

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

$$S = \overline{S} + \left(\frac{dS}{dT}\right)^* (T - T^*) \Rightarrow SC = \overline{S} - \left(\frac{dS}{dT}\right)^* T^* ; \quad SP = \left(\frac{dS}{dT}\right)^*$$

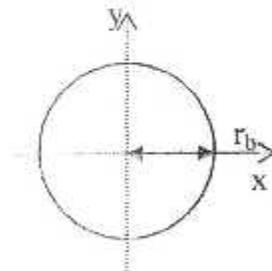
Tel que, l'indice '*' indique que le paramètre calculé au cours de l'itération précédente. Nous trouvons donc :

- Au niveau du métal de base :
$$\begin{cases} SC = 2.0(h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\epsilon T^{*4} + \sigma\epsilon T_{\infty}^4) \\ SP = -2.0(h_{\infty} + 4\sigma\epsilon T^{*3}) \end{cases} \tag{II-7a}$$

- Au niveau du cordon de soudure :
$$\begin{cases} SC = (h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\epsilon T^{*4} + \sigma\epsilon T_{\infty}^4) + q_0 e^{-f(x,y,t)} \\ SP = -(h_{\infty} + 4\sigma\epsilon T^{*3}) \end{cases}$$

Rappelons la fonction $f(x,y,t)$ qui se définit pour le modèle du bain de fusion circulaire comme suit [9] :

Figure II-3 : Le modèle circulaire du bain de fusion



$$f(x,y,t) = -3 \left(\frac{x^2 + (y - v \cdot t)^2}{r_b^2} \right) \tag{II-7b}$$

où $r_b = 4.5$ rayon de l'électrode, et défini de tel sort que 95% de la chaleur soit déposé [14].
 v : vitesse de soudage ; t : temps de soudage

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

$$q_0 = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot r_c \cdot (r_{yov} + r_{ov}) / 2} \quad \text{où } Q = \eta \cdot U \cdot I \tag{II-7c}$$

CHITRE III

FORMION DE LA

LEFT MERATION

WILLAGE

CHAPITRE III :**FORMULATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS ET
GENERATION DU MAILLAGE****III-1/ INTRODUCTION :**

Les techniques de calcul de transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement ont connu un développement très considérable dans ces dernières décennies, depuis l'évolution des modèles théorique appliqués au transfert de la chaleur et l'outil informatique.

Vu que la résolution analytique de l'équation de chaleur est très complexe, donc le recoure à des méthodes numériques est nécessaire. Delà on a opté à utiliser la méthode des éléments finis qui permette une bonne représentation de la géométrie.

Dans la suite, on entame le développement de cette méthode, tel qu'en traitant l'élément fini quadrilatère (4 nœuds) et les fonctions d'interpolation en passant par la formulation variationnelle.

III-2/ FORMULATIONS VARIATIONNELLE (INTEGRALE) :

Le problème que nous allons considérer, dans cette formulation après l'étude mathématique effectuée, c'est la résolution d'une équation différentielle partielle de transfert de chaleur en 2D avec un terme de source sous une fonction gaussienne et avec des conditions aux limites du 3^{ème} type (de *Cauchy*) c. à. d la loi d'échange est connue et non linéaire.

Alors, l'équation du problème thermique s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S = 0 \quad (\text{III-1})$$

Réécrivant le terme de dérivation de Température par rapport au temps en différence fini [9] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{i+1} = \frac{T(i+1) - T(i)}{\Delta t} \text{ Et sera abrégé par : } \frac{T - T^0}{\Delta t}$$

tel que :

- T : est la température à l'instant actuelle.
- T⁰ : est la température à l'instant précédente.

Donc (III-1) devient :

$$\rho \frac{C_p}{\Delta t} T - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) - (S + T^0 \cdot \rho \frac{C_p}{\Delta t}) = 0 \quad (\text{III-2})$$

En multipliant l'équation (III-2) par une fonction test N (x,y) et puis intégrant sur un domaine (Ω) qui a la frontière (Γ), (l'axe y est la direction de soudage).

Choissant les fonctions $N(x,y)$ de tel sort qu'elle a le nombre de terme égale au nombre de nœuds du domaine (Ω). (Puisque le degré de liberté égale à 1 par nœud). [11]

On aura :

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho C_p}{\Delta t} T \cdot N_i \cdot d\Omega - \iint_{\Omega} N_i \left[(k T_x)_x + (k T_y)_y \right] d\Omega - \iint_{\Omega} \left[S + \frac{\rho C_p}{\Delta t} T^n \right] N_i \cdot d\Omega = 0 \quad (III-3)$$

On note : $F_1 = K \frac{\partial T}{\partial X} = (KT_x)$

$F_2 = K \frac{\partial T}{\partial y} = (KT_y)$

Nous développons le deuxième terme de l'équation (III-3), en utilisant les identités suivantes :

$$\begin{cases} N_i \cdot \frac{\partial(F_1)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (N_i \cdot F_1) - \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot F_1 \\ N_i \cdot \frac{\partial(F_2)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (N_i \cdot F_2) - \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot F_2 \end{cases} \quad (III-4)$$

Puis, appliquant le théorème de « Green » sur les composantes de l'opérateur gradient pour un contour fermé, on trouve :

$$\left\{ \iint_{\Omega^e} \frac{\partial}{\partial x} (N_i \cdot F_1) dx \cdot dy = \oint_{\Gamma^e} N_i \cdot F_1 \cdot n_x \cdot ds \right. \quad (III-5a)$$

$$\left. \iint_{\Omega^e} \frac{\partial}{\partial y} (N_i \cdot F_2) dx \cdot dy = \oint_{\Gamma^e} N_i \cdot F_2 \cdot n_y \cdot ds \right. \quad (III-5b)$$

Tel que : « ds » est la longueur d'arc infinitésimale le long du contour Γ .

Et n_x et n_y sont les composantes du vecteur unité normale \vec{n} sur la frontière Γ .

$$\vec{n} = n_x \cdot \vec{i} + n_y \cdot \vec{j} \quad (III-6)$$

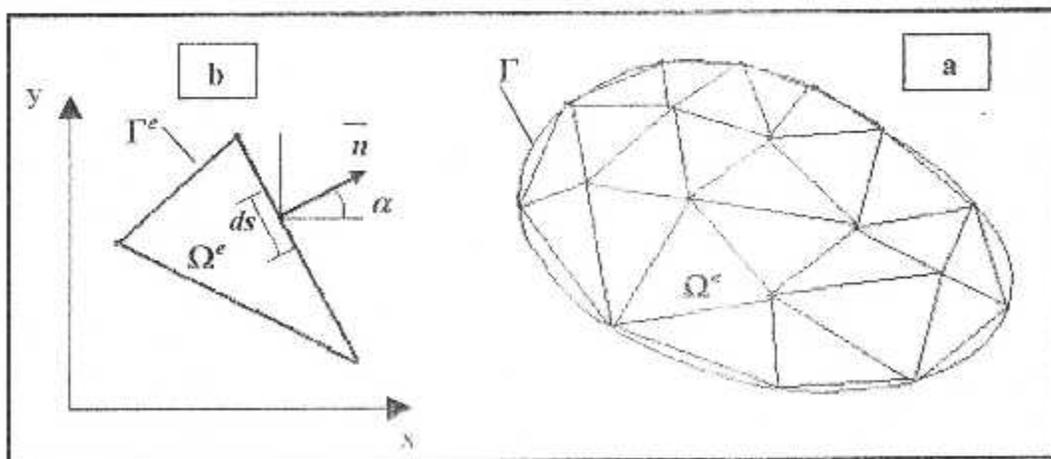


Fig. III-1 : Discrétisation d'un domaine irrégulier en élément fini typique.

En suite, en substituant les équations (III-5a) et (III-5b) dans l'équation (III-3) on obtient :

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T.N_i.d\Omega - \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x}(F_1) + \frac{\partial N_i}{\partial y}(F_2) \right] N_i.d\Omega - \iint_{\Omega} \left(S + \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T^0 \right) N_i.d\Omega - \int_{\Gamma} N_i.(n_x.F_1 + n_y.F_2).ds = 0 \quad (III-7)$$

Notant d'après (III-6) $q_n = n_x.F_1 + n_y.F_2$ (III-8)

La forme variationnelle devient :

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T.N_i.d\Omega - \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x}(F_1) + \frac{\partial N_i}{\partial y}(F_2) \right] N_i.d\Omega - \iint_{\Omega} \left(S + \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T^0 \right) N_i.d\Omega - \int_{\Gamma} N_i.q_n.ds = 0 \quad (III-9)$$

Cette équation variationnelle forme la base du modèle de l'élément fini de l'équation (III-1).

III-3/ FORMULATION EN ELEMENT FINI :

Supposant que (T) est approximée par l'expression dans un domaine (Ωe) avec 'n' noeuds

[11] :

$$T(x,y,t) = \sum_{j=1}^n N_j(x,y)T_j(t) = [N]\{T\} \quad (III-10)$$

ou N_j sont les valeurs de (N) au point (x_j,y_j) tel que la fonction 'N' a la propriété :

$N(x_j,y_j) = \delta_{ij}$ Avec : δ_{ij} est le symbole de Kronecher.

Et T_j sont les valeurs des températures inconnues aux noeuds considérées tel que il dépend du temps (t).

Substituant l'équation (III-10) dans la forme variationnelle (III-9) en tenant compte la forme linéaire de la source S (c-à-d l'équation II-6). Nous obtenons :

$$\sum_{j=1}^n \iint_{\Omega_e} \left(\frac{\rho.C_p}{\Delta t} - S_p \right) T_j.N_j.N_i.d\Omega - \sum_{j=1}^n \left\{ \iint_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] d\Omega \right\} k T_j - \iint_{\Omega_e} \left(S_c + \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T^0 \right) N_i.d\Omega - \int_{\Gamma_e} N_i.q \quad (III-11)$$

Avec : $i=1, \dots, n$ (n = 4 pour notre cas)

autrement : $\sum_{j=1}^n K_{ij}^{(e)}.T_j^{(e)} = F_i^{(e)}$

tel que :

$$\begin{cases} k_{ij}^{(e)} = - \iint_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] k.d\Omega + \iint_{\Omega_e} N_i.N_j \left(\frac{\rho.C_p}{\Delta t} - S_p \right) d\Omega \\ F_i^{(e)} = - \iint_{\Omega_e} N_i \left(S_c + \frac{\rho.C_p}{\Delta t} T^0 \right) d\Omega - \int_{\Gamma_e} N_i.q_n ds \end{cases} \quad (III-12)$$

Avec Le second terme de $F_i^{(e)}$ dans l'équation (III-12) qui représente l'intégrale sur la frontière Γ_e .

Calcul du 2^{ème} terme du membre $F_i^{(e)}$:

On a :
$$\oint_{\Gamma_e} N_i q_n ds = \oint_{\Gamma_e} k \frac{\partial T}{\partial n} N_i ds$$

La frontière Γ_e se compose par des cotes (AB) qui sont des cotes internes, donc leur sommes s'annulent entre chacun deux éléments adjacents et les cotes (CD) sont des cotes qui coïncident avec les frontières globales du domaine, donc le gradient $\frac{\partial T}{\partial n}$ est imposé par les conditions aux limites.

Avec $q_n = h(T_\infty - T_i) + \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T_i^4)$

on néglige le flux de chaleur sortit par rayonnement on aura :

$$q_n = h(T_\infty - T_i)$$

$$\oint_{\Gamma_e} q_n N_i ds = \oint_{\Gamma_e} k \frac{\partial T}{\partial n} N_i ds = L_{CD} h(T_\infty - T_i) N_i \quad (\text{III-13})$$

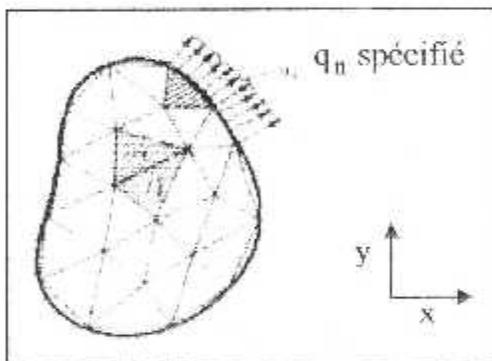


Fig. III-2 : Equilibre interne entre les différents éléments du domaine et effet du frontière

III-4/ FONCTIONS D'INTERPOLATION :**III-4-1/ SERIE POLYNOMIALE :**

Dans notre problème, l'examen de l'équation formant le modèle de l'élément fini (III-11) et les matrices d'éléments finis (III-12), montre que T doit être au moins une fonction bilinéaire en x et y et linéaire en temps, comme elle est approximée dans l'expression (III-10).

Donc l'écriture de cette expression sous forme polynomiale sera : [11]

$$T(x, y, t) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 xy \quad (\text{III-14})$$

Avec les « C_i » dépend du temps.

On donne des valeurs à « C_i » à chaque instant.

Calcul du 2^{ème} terme du membre $I_1^{(e)}$:

On a :
$$\int_{\Gamma_e} N_i q_n ds = \int_{\Gamma_e} k \frac{\partial T}{\partial n} N_i ds$$

La frontière Γ_e se compose par des cotes (AB) qui sont des cotes internes, donc leur sommes s'annulent entre chacun deux éléments adjacents et les cotes (CD) sont des cotes qui coïncident avec les frontières globales du domaine, donc le gradient $\frac{\partial T}{\partial n}$ est imposé par les conditions aux limites.

Avec $q_n = h(T_x - T_i) + \varepsilon \sigma (T_x^4 - T_i^4)$

on néglige le flux de chaleur sortie par rayonnement on aura :

$$q_n = h(T_x - T_i)$$

$$\int_{\Gamma_e} q_n N_i ds = \int_{\Gamma_e} k \frac{\partial T}{\partial n} N_i ds = T_{CD} h (T_i - T_x) N_i \quad (III-13)$$

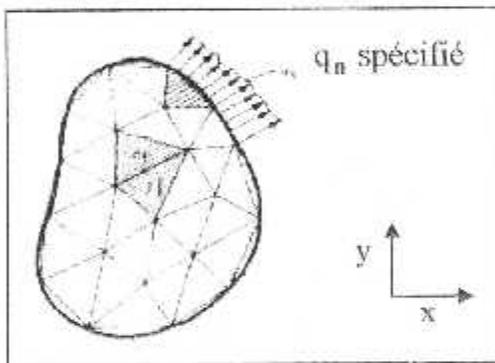


Fig. III-2 : Equilibre interne entre les différents éléments du domaine et effet du frontière

III-4/ FONCTIONS D'INTERPOLATION :**III-4-1/ SERIE POLYNOMIALE :**

Dans notre problème, l'examen de l'équation formant le modèle de l'élément fini (III-11) et les matrices d'éléments finis (III-12), montre que T doit être au moins une fonction bilinéaire en x et y et linéaire en temps, comme elle est approximée dans l'expression (III-10).

Donc l'écriture de cette expression sous forme polynomiale sera : [11]

$$T(x, y, t) = c_1 + c_2 x + c_3 y + c_4 xy \quad (III-14)$$

Avec les « C_i » dépend du temps.

III-4.2/ FONCTIONS D'INTERPOLATIONS POUR UN ELEMENT QUADRILATERE A QUATRE NŒUDS

En utilisant l'approximation polynomiale bilinéaire (III-14) pour la variable T , on obtient le système suivant (III-15) pour un élément quadrilatère à quatre nœuds.

$$\text{On a } \begin{cases} T_1 = T(x_1, y_1, t) = C_1 + C_2x_1 + C_3y_1 + C_4x_1y_1 \\ T_2 = T(x_2, y_2, t) = C_1 + C_2x_2 + C_3y_2 + C_4x_2y_2 \\ T_3 = T(x_3, y_3, t) = C_1 + C_2x_3 + C_3y_3 + C_4x_3y_3 \\ T_4 = T(x_4, y_4, t) = C_1 + C_2x_4 + C_3y_4 + C_4x_4y_4 \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

$$\text{En posant : } \{T\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} ; \{C\} = \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} ; [H] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{On aura : } \{T\} = [H]\{C\}$$

$$\text{alors : } \{C\} = [H]^{-1}\{T\}$$

$$\text{Ainsi qu'en posant : } [L] = [H]^{-1} \text{ tel que : } [L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix}$$

$$\text{On aura : } \{C\} = [L]\{T\}$$

Alors, l'équation (III-15) dans la forme générale (x, y, t) sera :

$$T(x, y, t) = [g][L]\{T\} \quad \text{Tel que, on note : } [T \ x \ y \ xy]^T = [g] \quad (\text{III-16})$$

De la, en utilisant l'équation (III-10) et (III-16) on obtient les fonctions d'interpolations N_i :

$$[N] = [g][L]$$

Elles peuvent s'écrire donc sous la forme :

$$[N(x, y)] = [1 \ x \ y \ xy] \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{III-17})$$

$$\text{Où : } \begin{Bmatrix} N_1(x, y) \\ N_2(x, y) \\ N_3(x, y) \\ N_4(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_{11} + L_{12}x + L_{13}y + L_{14}xy \\ L_{21} + L_{22}x + L_{23}y + L_{24}xy \\ L_{31} + L_{32}x + L_{33}y + L_{34}xy \\ L_{41} + L_{42}x + L_{43}y + L_{44}xy \end{Bmatrix} \quad (\text{III-18})$$

III-5/ CALCUL DES MATRICES D'ELEMENTS :

Le calcul de la matrice de rigidité de l'élément $[k_{ij}^{(e)}]$ et le vecteur force $\{F_i^{(e)}\}$ dans l'équation (III-11) par la méthode conventionnelle (par l'intégration exacte) est en général difficile.

Cependant, dans notre problème et avec les hypothèses optées, la valeur du variable SF : $\left[S_c - \frac{\rho C_p}{\Delta t} T^0 \right]$ de l'équation (III-12) est constante. Donc, il est possible d'évaluer les intégrales de surface dans les expressions de $[k_{ij}^{(e)}]$ et $\{F_i^{(e)}\}$.

Pour une raison de simplicité, nous réécrivons $[k_{ij}^{(e)}]$ comme étant la somme des trois matrices de base : $[S^{11}]$, $[S^{22}]$ et $[S^{33}]$

$$\text{c.à.d :} \quad [K_{ij}^{(e)}] = [S^{11}] + [S^{22}] + [S^{33}] \quad (\text{III-19a})$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} S_{ij}^{11} = \iint_{\Omega_e} \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} dx dy \\ S_{ij}^{22} = \iint_{\Omega_e} \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} dx dy \\ S_{ij}^{33} = \iint_{\Omega_e} N_i \cdot N_j \cdot \left(\frac{\rho C_p}{\Delta t} - S_p \right) dx dy \end{cases} \quad (\text{III-19b})$$

Ainsi que, nous avons :

$$F_i^{(e)} = - \iint_{\Omega_e} N_i \left[S_c - \frac{\rho C_p}{\Delta t} T^0 \right] dx dy + \iint_{\Gamma_e} N_i \cdot q_n ds \quad (\text{III-20})$$

Le calcul des matrices dans les équations (III-19) et (III-20) donne en utilisant la fonctions d'interpolation développée dans le paragraphe précédent :

$$\begin{cases} S_{ij}^{11} = L_{2i} L_{2j} \int_{\Omega} dx dy + (L_{2i} L_{4j} + L_{2j} L_{4i}) \int_{\Omega} y dx dy + L_{4i} L_{4j} \int_{\Omega} y^2 dx dy \\ S_{ij}^{22} = L_{3i} L_{3j} \int_{\Omega} dx dy + (L_{3i} L_{4j} + L_{3j} L_{4i}) \int_{\Omega} x dx dy + L_{4i} L_{4j} \int_{\Omega} x^2 dx dy \\ S_{ij}^{33} = \frac{\rho C_p}{\Delta t} (L_{1i} L_{1j} \int_{\Omega} dx dy + L_{2i} L_{2j} \int_{\Omega} x dx dy + L_{3i} L_{3j} \int_{\Omega} y dx dy + L_{4i} L_{4j} \int_{\Omega} x y dx dy) \end{cases} \quad (\text{III-21a})$$

Et notant $I_{mn} = \int x^m \cdot y^n dx dy$ qui seront calculer par la suite

De l'équation (III-19a), on aura :

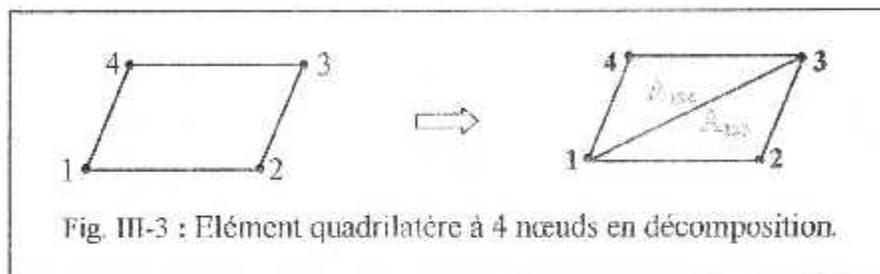
$$K_{ij} = (L_{2i} L_{2j} + L_{3i} L_{3j} + I_{1i} \cdot I_{1j}) I_{10} + (L_{2i} L_{4j} + L_{2j} L_{4i} + L_{3i} L_{3j}) I_{01} + (L_{3i} L_{4j} + L_{4i} L_{3j} + L_{1i} L_{1j}) I_{10} + (L_{4i} L_{4j}) I_{02} + (L_{4i} L_{4j}) I_{20} + (L_{1i} L_{1j}) I_{11} \quad (\text{III-22a})$$

et :

$$F_i^{(e)} = -\left(S - \frac{\rho C_p}{\Delta t} T^0\right) \cdot \left[L_{i1} \iint_{\Omega_e} dx dy + L_{i2} \iint_{\Omega_e} x dx dy + L_{i3} \iint_{\Omega_e} y dx dy + L_{i4} \iint_{\Omega_e} x y dx dy \right] + L_{i1} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i2} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i3} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i4} \int_{\Gamma_e} q_n ds \quad \text{(III-22b)}$$

$$F_i^{(e)} = -\left(S - \frac{\rho C_p}{\Delta t} T^0\right) \cdot \left[L_{i1} I_{00} + L_{i2} I_{10} + L_{i3} I_{01} + L_{i4} I_{11} \right] + L_{i1} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i2} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i3} \int_{\Gamma_e} q_n ds + L_{i4} \int_{\Gamma_e} q_n ds \quad \text{(III-22c)}$$

Pour calculer les intégrales I_{mm} on divise l'élément quadrilatère à quatre nœuds en deux éléments triangulaires comme l'indique la figure ci-dessous [Figure III-3] pour simplifier les calculs[11] .



Donc, les intégrales concernant l'élément quadrilatère sont comme :

$$\begin{aligned} I_{00} &= \int_{\Omega} dx dy = A_{123} + A_{134} \\ I_{10} &= \int_{\Omega} x dx dy = A_{123} \bar{x}_{123} + A_{134} \bar{x}_{134} \\ I_{01} &= \int_{\Omega} y dx dy = A_{123} \bar{y}_{123} + A_{134} \bar{y}_{134} \\ I_{20} &= \int_{\Omega} x^2 dx dy = \frac{A_{123}}{12} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + 9 \bar{x}_{123}^2) + \frac{A_{134}}{12} (x_1^2 + x_3^2 + x_4^2 + 9 \bar{x}_{134}^2) \\ I_{02} &= \int_{\Omega} y^2 dx dy = \frac{A_{123}}{12} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + 9 \bar{y}_{123}^2) + \frac{A_{134}}{12} (y_1^2 + y_3^2 + y_4^2 + 9 \bar{y}_{134}^2) \\ I_{11} &= \int_{\Omega} xy dx dy = \frac{A_{123}}{12} (x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + 9 \bar{x}_{123} \bar{y}_{123}) + \frac{A_{134}}{12} (x_1 y_1 + x_3 y_3 + x_4 y_4 + 9 \bar{x}_{134} \bar{y}_{134}) \end{aligned} \quad \text{(III-23)}$$

* Ω_e : surface limitée par un quadrilatère.

III-6/ ASSEMBLAGE DES MATRICES D'ELEMENTS :

L'assemblage est l'opération qui consiste à construire la matrice globale $[K]$ et le vecteur global $\{F\}$ à partir des matrices élémentaires $[K^{(e)}]$ et des vecteurs élémentaires $\{F^{(e)}\}$ des éléments finis du domaine complet.

Pour représenter l'assemblage des matrices d'éléments finis, nous illustrons la procédure par un exemple en considérant que le maillage est construis par deux éléments quadrilatère. (voir figure III-5)

Soient $K_{ij}^{(1)}$ et $K_{ij}^{(2)}$ ($i, j = 1,2,3,4$) les coefficients des matrices de rigidité correspondant à ces éléments.

A partir de maillage, nous notons la correspondance entre les valeurs globales et les valeurs nodales d'éléments.

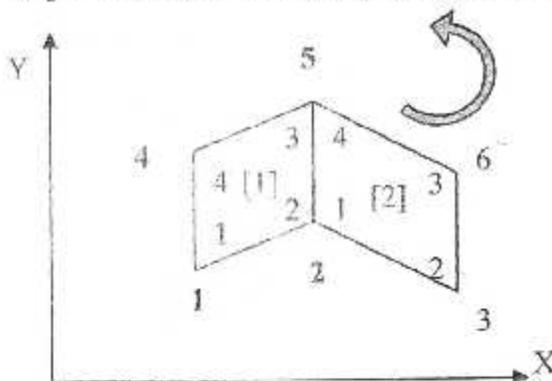


Fig. III-5 : Assemblage de deux éléments quadrilatères

Pour l'élément (1) :

$$[K^{(1)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & k_{13}^{(1)} & k_{14}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} & k_{23}^{(1)} & k_{24}^{(1)} \\ k_{31}^{(1)} & k_{32}^{(1)} & k_{33}^{(1)} & k_{34}^{(1)} \\ k_{41}^{(1)} & k_{42}^{(1)} & k_{43}^{(1)} & k_{44}^{(1)} \end{bmatrix}$$

pour l'élément (2) :

$$[K^{(2)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} & k_{13}^{(2)} & k_{14}^{(2)} \\ k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} & k_{24}^{(2)} \\ k_{31}^{(2)} & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} & k_{34}^{(2)} \\ k_{41}^{(2)} & k_{42}^{(2)} & k_{43}^{(2)} & k_{44}^{(2)} \end{bmatrix}$$

La matrice assemblée sera :

	1	2	3	4	5	6
1	$k_{11}^{(1)}$	$k_{12}^{(1)}$	0	$k_{14}^{(1)}$	$k_{13}^{(1)}$	0
2	$k_{21}^{(1)}$	$k_{22}^{(1)} + k_{11}^{(2)}$	$k_{12}^{(2)}$	$k_{21}^{(1)}$	$k_{23}^{(1)} + k_{14}^{(2)}$	$k_{13}^{(2)}$
3	0	$k_{21}^{(2)}$	$k_{22}^{(2)}$	0	$k_{24}^{(2)}$	$k_{23}^{(2)}$
4	$k_{41}^{(1)}$	$k_{42}^{(1)}$	0	$k_{41}^{(1)}$	$k_{43}^{(1)}$	0
5	$k_{31}^{(1)}$	$k_{32}^{(1)} + k_{41}^{(2)}$	$k_{42}^{(2)}$	$k_{31}^{(1)}$	$k_{33}^{(1)} + k_{44}^{(2)}$	$k_{43}^{(2)}$
6	0	$k_{31}^{(2)}$	$k_{32}^{(2)}$	0	$k_{31}^{(2)}$	$k_{33}^{(2)}$

III-7/ GENERATION DE MAILLAGE :

III-7-1/ ASPECT DE LA GENERATION DE MAILLAGE :

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

Alors, il existe plusieurs types du domaine selon la forme de sa frontière, ainsi qu'il existe plusieurs méthodes ou techniques de génération de maillage, selon le degré de complexité du même domaine, mais le maillage doit toujours vérifier les conditions suivantes Une adaptation aux frontières, et aux conditions aux limites.

- Une adaptation aux propriétés des différentes régions du domaine physique.
- Une bonne régularité.

Pour cela, on va adapter une technique, qui sera décrite dans les paragraphes suivants, ainsi que la procédure de connexion.

III-7-2/ GENERATION DES NŒUDS DE FRONTIERE ET LES NŒUDS INTERNE :

Dans notre problème de soudage on a 2 plaques rectangulaires, comme cité en paravent, on va appliquer la discrétisation géométrique sur une seule plaque vue la symétrie.

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

Les dimensions de chaque plaque de 304L (acier inoxydable) sont :

- La longueur : $L_x = 100\text{mm}$ - La largeur : $L_y = 120\text{mm}$
- Epaisseur : $E_p = 1.47\text{mm}$

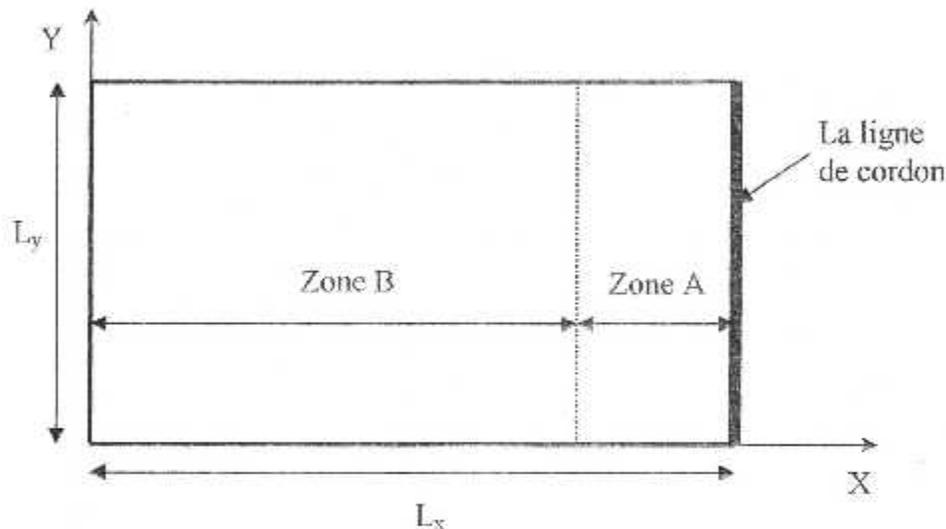


Figure III-6 : Illustration des zones A et B

Pour faire la génération de maillage d'un domaine rectangulaire donné par la (figure III-7) pour la première zone puis pour l'autre zone c'est la même chose. Donc on suit les étapes suivantes : [11]

On a quatre cotés qui sont respectivement AB, CD, BD et AC. Alors le coté AB du domaine joue le rôle de la partie basse du rectangle. Le coté CD est celui de la partie haute du rectangle. Les cotés AC et BD sont ceux de la partie gauche et droite du rectangle.

Pour ce rectangle, 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_x nœuds et les cotés AC et BD seront subdivisés en N_y nœuds. Pour cela, on procède à la génération suivant deux étapes principales. La première étape c'est la génération des nœuds de frontière de chaque cotés puis l'étape de génération des nœuds internes.

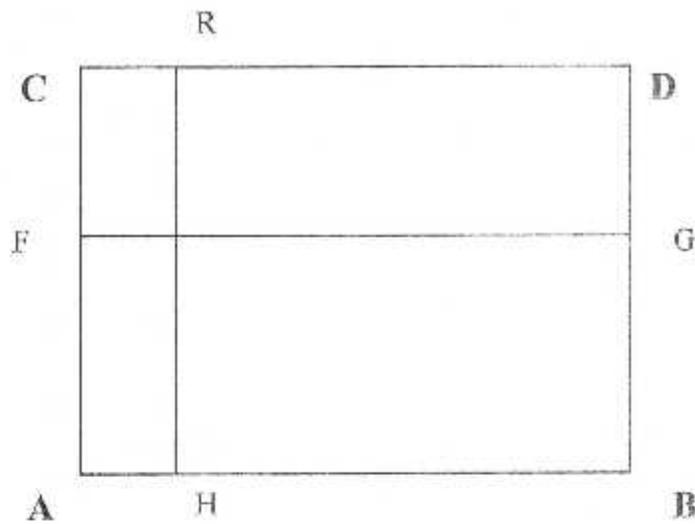


Figure III-7: procédure de discrétisation

Pour simplifier, on choisit un pas constant de subdivision sur les cotés AB et CD. On obtient, par conséquent $(N_x - 1)$ sous intervalles. La longueur de chaque intervalle est donnée par :

$$\Delta x_{AB} = \frac{|x_B - x_A|}{(N_x - 1)} \quad (\text{III-24})$$

Les abscisses des points de ce côté sont données par :

$$x_{AB}(i) = x_A + (i-1)\Delta x_{AB} \quad i=1, 2, 3, \dots, N_x \quad (\text{III-25})$$

avec : $i=1$; $x_{AB}(i=1) = x_A$

$i=N_x$; $x_{AB}(i=N_x) = x_B$

Les ordonnées des points sont données par :

$$y_{AB}(i) = f_{AB}(x_{AB}(i)) = 0 \quad i=1, 2, 3, \dots, N_x \quad (\text{III-26})$$

Où $f_{AB}(x)$: La fonction du côté AB supposée donner en coordonnées cartésiennes.

Concernons maintenant le côté CD et par analogie avec le côté AB, on aura le suivant en changeons uniquement A par C, B par D et $f_{AB}(x)$ par $f_{CD}(x)$.

La génération des nœuds sur les contours AC et BD se fait de la même démarche que celle des cotés AB et DC. On peut suivre exactement la démarche précédente pour les cotés AB et DC. On aura :

$$\Delta y_{AC} = \frac{|y_C - y_A|}{(N_y - 1)} \quad (\text{III-27})$$

$$\left. \begin{aligned} y_{AC}(j) &= y_A + (j-1)\Delta y_{AC} \\ x_{AC}(j) &= F_{AC}^{-1}(y_{AC}(j)) = 0 \end{aligned} \right\} \quad j=1, 2, 3, \dots, N_y \quad (\text{III-28})$$

avec : $F_{AC}^{-1}(y)$: la fonction inverse du coté AC.

Dans la génération des nœuds interne du domaine on consiste a deux étapes :

- La première étape consiste à déterminer les abscisses des nœuds internes, en divisant le coté AB en N_x points dont ceux des extrémités sont inclus, on obtient par conséquent (N_x-1) intervalle égal, l'abscisse de chaque point sur cet intervalle est obtenu par :

$$x_i = x_F + (i-1)\Delta x \quad i=1,2,3,\dots,N_x \text{ avec } \Delta x = \frac{x_A - x_B}{(N_x - 1)} \quad (III-29)$$

En faisant varier le point F sur le coté AB et de même pour le point G du coté CD. Les abscisses des nœuds internes sont données par :

$$\left. \begin{aligned} \Delta x(j) &= \frac{x_{coté AB}(j) - x_{coté CD}(j)}{(N_x - 1)} \\ x(i) &= x_{coté AB}(j) + (i-1)\Delta x(j) \quad i=1,2,3,\dots,N_x \end{aligned} \right\} \quad j=1,2,3,\dots,N_y \quad (III-30)$$

- La deuxième étape consiste à déterminer les ordonnées des nœuds internes, en divisant le coté AC en N_y points on obtient par conséquent (N_y-1) intervalle, l'ordonnée de chaque nœuds est donné par :

$$y_j = y_R + (j-1)\Delta y \quad j=1, 2, 3, \dots, N_y \quad \Delta y = \frac{y_H - y_R}{(N_y - 1)} \quad (III-31)$$

En faisant varier maintenant le point R sur le coté AC et le point H sur le coté BD. Les ordonnées du nœuds internes sont données par :

$$\Delta y(i) = \frac{y_{coté AC}(i) - y_{coté BD}(i)}{(N_y - 1)} \quad i=1, 2, 3, \dots, N_x \quad (III-32)$$

$$y(j) = y_{coté AB}(i) + (j-1) \cdot \Delta y(i) \quad j=1, 2, 3, \dots, N_y$$

Finalement, les relations (III-30) et (III-32) déterminent rapidement les positions des nœuds internes du maillage qui représentent les sommets des éléments finis obtenus.

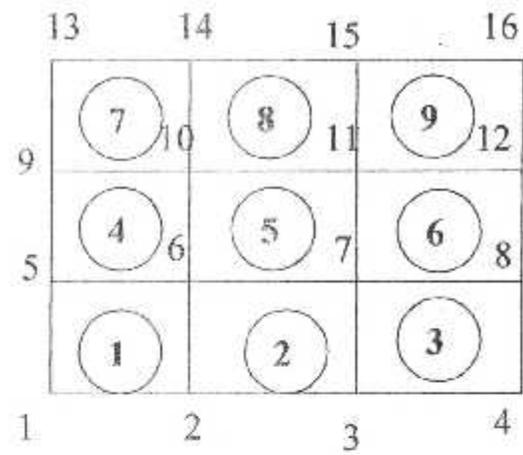
III-7-3/ CONNEXION DES ELEMENTS DU MAILLAGE :

Après avoir faire la discrétisation du domaine en petits éléments, on obtient un ensemble de nœuds et d'éléments finis quadrilatères. Pour faire l'assemblage des matrices élémentaires, on doit avoir préalablement une connexion entre ces différents éléments finis c.à.d la correspondance entre les numéros globaux des nœuds et les numéros locaux de chaque élément.

Pour cela, on donne dans la suite, un exemple de numérotation d'un maillage rectangulaire de dimensions $N_x \cdot N_y = 4 \times 4$; qui a des éléments quadrilatères en totale '9', où la numérotation interne des éléments est faite dans la direction anti-horaire [11].

Numéros locaux :	1	2	3	4
Numéros globaux :				
Élément 1 :	1	2	6	5
Élément 2 :	2	3	7	6

Figure III-8 : Discrétisation en éléments quadrilatère et numérotation des éléments



CHA P T R E I V

A N A L Y S E

E X P E R I M E N T A L E

CHAPITRE IV :
ANALYSE EXPERIMENTALE



IV-1/INTRODUCTION :

Deux essais ont été effectués à l'atelier du C.S.C (chéraga) par un soudeur homologué, tel que le procédé était le soudage TIG sans métal d'apport sur des tôles minces d'acier inox 304L, voir annexe pour leurs propriétés.

Le premier essai de soudage avait le but de vérifier la faisabilité de soudage de nos pièces. Tandis que par le deuxième essai, on a pris les résultats pour parvenir à l'étude comparative avec les résultats de la simulation numérique.

Les paramètres de soudage d'acier 304L sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : paramètre de soudage

Essai	Gaz de protection	Débit du gaz L/mn	Vitesse cm/mn	Tension (V)	Intensité (A)	Polarité
-1-	Argon	10.0	6.42	10	35	inverse
-2-	Argon	08.5	7.14	9	36	inverse

Afin d'enregistrer la variation de température en fonction du temps (cycles thermiques), on a collé sur la première plaque de nos tôles, par une résistance électrique, des thermocouples (chromel-alumelle) supportant des températures jusqu'à 1200°C, où on les a couverts avec une patte isolante thermiquement. Le positionnement de ces thermocouples est illustré sur les figures (IV-1) et (IV-2) avec leurs nomenclatures ainsi que leurs dimensions en millimètres (mm).

Le dispositif d'enregistrement était l'instrument ABB Commander SR250, montré par la figure (IV-3).

Ces dimensions de chaque plaque à soudées sont identique et égale à : Longueur 100 mm, largeur 120 mm, épaisseur 1.47mm.

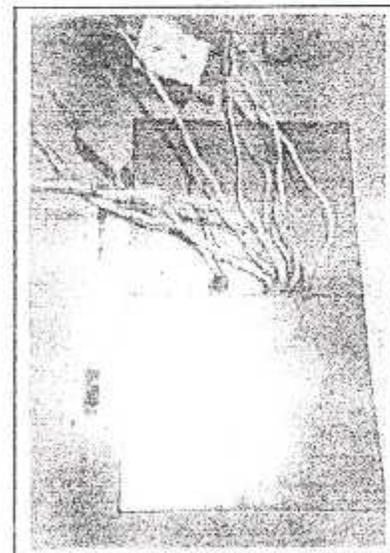
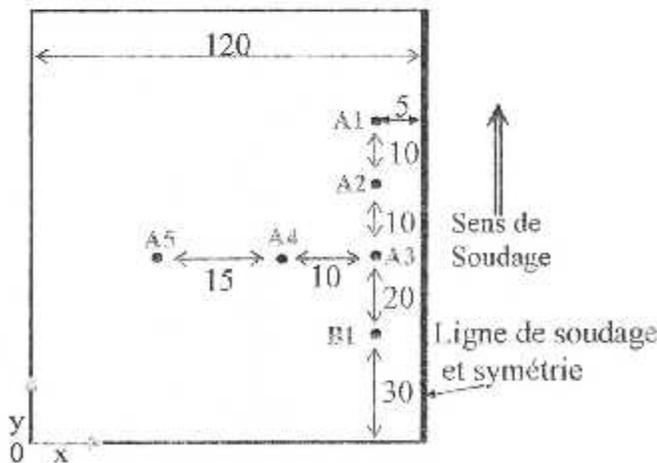


Figure IV-1 : La position des thermocouples sur la plaque I avec les dimensions.

Figure IV-2 : Les thermocouples collés sur la plaque I

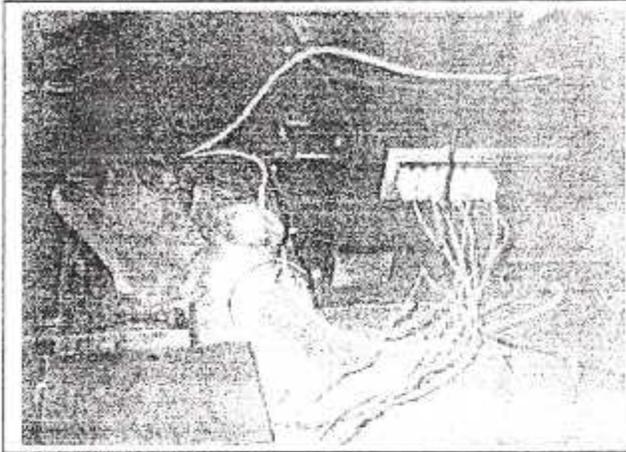


Figure IV-3 : Dispositif d'enregistrement des cycles thermiques branché avec les thermocouples et les plaques à soudées.

Remarque : Les plaques sont placées bout à bout sur un support par points, afin de minimiser le contact avec la table métallique lors le soudage, sinon il aura une déperdition thermique par conduction à travers les surfaces inférieures, et ce phénomène n'est pris en compte.

IV-2/ PARAMETRES D'EXPERIENCE :

Données

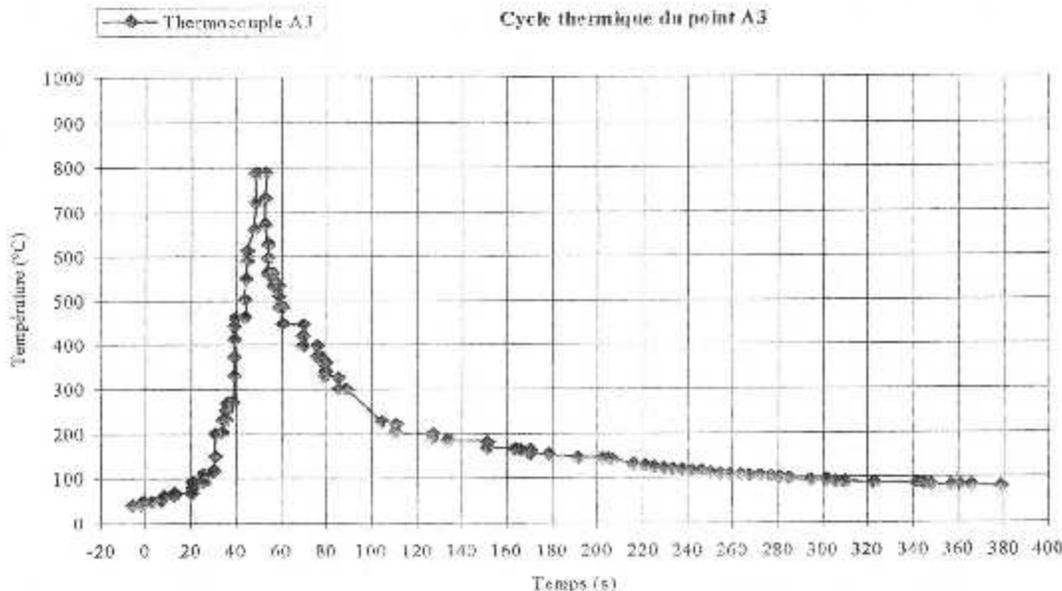
Le procédé de soudage TIG, sans métal d'apport de deux tôles minces bout à bout, est simulé par les paramètres de soudage indiqué au tableau précédent (la partie expérimentale), tels que :

$I = 36 \text{ A}$, $U = 9 \text{ Volts}$, $\eta = 0.65$ et $v = 7.14 \text{ cm/mn}$. ($\approx 1.16 \text{ mm/s}$).

VI-3/ QUELQUES RESULTATS OBTENUS PAR L'EXPERIMENTALE :

Après l'obtention des résultats par l'enregistreur sous forme de graphes superposés, et par un logiciel approprié (c'est WINDIG), on les a séparés et tracé chacun dans un graphe seul. Dans la suite, on présente quelques-uns, où on a opté pour les points de thermocouple A3 et A4.

Remarque : le soudage a débuté à l'instant (-10 sec) sur l'enregistreur, ce qui correspond à '0' seconde sur nos résultats de simulation numérique.



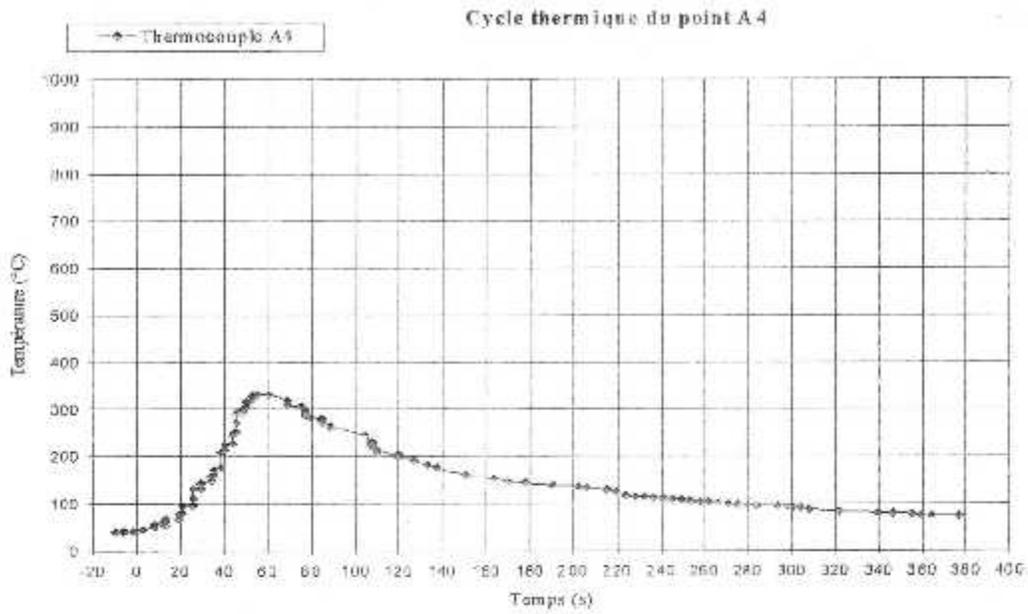


Figure IV-4 : cycles thermiques expérimentaux des points A3 et A4 des thermocouples.

Résultat expérimental du point A5 :

Time	C°
29,2586	16,9492
29,2083	21,3559
29,2083	21,3559
28,4653	26,4407
29,0767	32,8814
29,0303	36,9492
28,9180	46,7797
28,8639	51,5254
28,0745	60,6780
29,3476	69,1525
30,6130	78,3051
40,6044	103,0508
48,1116	105,4237
64,5500	105,4237
65,8386	112,5424
151,4589	112,2034
238,4452	112,2034
329,5449	111,8644
330,1912	115,2542
470,6021	115,2542
620,6060	114,9153
652,1167	114,5763
652,8016	114,5763
656,0522	129,8305
434,6258	146,7797
376,4066	146,7797
376,3331	153,2203
326,3331	153,2203

326,2441	161,0169
308,4359	161,0169
307,0273	164,4068
294,0136	164,4068
296,6914	169,8305
280,2531	169,8305
279,5217	173,8983
264,4532	173,8983
264,2946	187,7966
241,6879	188,1356
238,7857	202,3729
231,9325	202,7119
230,5356	205,0847
227,0916	206,7797
220,2422	206,7797
218,8414	209,4915
211,9341	214,5763
203,7188	214,2373
203,6684	218,6441
198,8739	218,6441
197,4963	219,3220
187,1295	227,4576
180,7639	245,0847
177,2347	254,2373
171,0123	259,3220

CHA P I T R E V

RESOLUTION NUMERIQUE

ET PROXIMATION

CHAPITRE V :***RESOLUTION NUMERIQUE ET PROGRAMMATION*****V-1/ INTRODUCTION :**

Cette partie consiste à résoudre le problème numériquement. Pour cela, on a suivi et appliqué la méthode de stockage bande dans un vecteur $\{V\}$ unicolonne représentant la matrice de rigidité fictive, qui donne l'équivalence de la matrice $[K]$, tel qu'on suit une procédure de récurrence la plus efficace et moins d'opérations pour la programmation. Puisque le travail sur la méthode des éléments finis a été abouté à des matrices $[K]$ symétriques et bande. Ces deux propriétés ont conduit à stocker la partie supérieure (ou inférieure) de la matrice, en éliminant les zéros qui se trouvent à l'extérieur de la bande.

En résumé, à chaque fois qu'on se positionne sur une case de la matrice $K(i,j)$ la méthode donne sa position dans le vecteur $\{V_k\}$ à base d'une formule de stockage sera donné par la suite.

- Si on se trouve au-dessus de la diagonale (partie supérieure) et à l'extérieur de la bande, le calcul sera ignoré puisque cette case est réellement nulle.

Si on se trouve au-dessous de la diagonale (partie inférieure) il suffit uniquement d'utiliser la propriété de la symétrie ($K(i,j) = K(j,i)$) et le traitement se fait comme étant une case $K(i,j)$.

On passe à la résolution du système d'équations obtenu en utilisant une méthode directe : de *Khalestki*, où on l'a adaptée pour des matrices bandes et symétriques en gagnant assez de mémoire et d'opérations de calcul.

En fin, la procédure générale de calcul et les étapes principales du programme sont exposées à la fin du chapitre.

V-2/ METHODE DE STOCKAGE DES MATRICES BANDES SOUS FORME DE VECTEUR :

Considérons une matrice $[K]$ d'ordre $(N \times N)$ symétrique et bande avec la largeur de la demi-bande est B . Le problème est de savoir stocker les cases de cette matrice dans un vecteur $\{V_k\}$. Il est parfois difficile de faire une équivalence entre une case de la matrice $[K]$ et la case du vecteur, ce qui a supposé plusieurs formes de stockages sous forme de vecteur. Ces formes de stockages sont différentes suivant la manière de stockage et la formule de récurrence convenable.

Alors, on va utiliser une forme de stockage qui est stockage en colonne, en prenant une matrice $[K]$ d'ordre (7×7) symétrique et sa bande B est égale à 4, et cela pour fixer les idées. Ils existent plusieurs formes de stockage sont : le stockage en colonne, en diagonal, en ligne, en ligne de serpent, en escalier... (existe d'autres) [12].

V-2-1/ STOCKAGE EN COLONNE :

La méthode de stockage choisie est représentée par la direction des flèches. C'est-à-dire colonne par colonne, comme le montre la figure (V-1) :

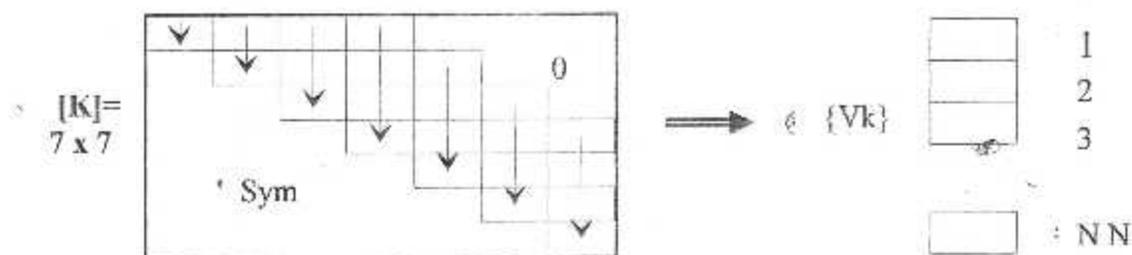


Fig. V-1 : Illustration de stockage en colonne

Tel que :

$V_k(1) = K(1,1)$	$V_k(2) = K(1,2)$	$V_k(3) = K(2,2)$	$V_k(4) = K(1,3)$
$V_k(5) = K(2,3)$	$V_k(6) = K(3,3)$	$V_k(7) = K(1,4)$	$V_k(8) = K(2,4)$
$V_k(9) = K(3,4)$	$V_k(10) = K(4,4)$	$V_k(11) = K(2,5)$	$V_k(12) = K(3,5)$
$V_k(13) = K(4,5)$	$V_k(14) = K(5,5)$	$V_k(15) = K(3,6)$	$V_k(16) = K(4,6)$
$V_k(17) = K(5,6)$	$V_k(18) = K(6,6)$	$V_k(19) = K(4,7)$	$V_k(20) = K(5,7)$
$V_k(21) = K(6,7)$	$V_k(22) = K(7,7)$		

On, peut remarquer pour cet exemple, que la dimension nécessaire du vecteur $\{V_k\}$ est égal à 22, c'est-à-dire $NN=22$.

Si on veut généraliser à une matrice $[K]$ d'ordre $(N \times N)$ symétrique, la dimension du vecteur $\{V_k\}$ doit être égale à :

$$NN = 1 + 2 + 3 + \dots + B + (N - B)B = \sum_{i=1}^{i=B} i + B(N - B)$$

Comme $\sum_{i=1}^{i=B} i = \frac{B(B+1)}{2}$ somme d'une suite arithmétique de raison unité ! Donc :

$$NN = \frac{B(2N - B + 1)}{2} \tag{V-1}$$

On peut vérifier cette formule pour l'exemple précédent :

$$\begin{cases} N = 7 \\ B = 4 \end{cases} \rightarrow NN = \frac{4(2 \times 7 - 4 + 1)}{2} = 22.$$

On procède maintenant à la détermination de la formule de récurrence de stockage des éléments de la matrice $[K]$ (les éléments de la bande uniquement) dans le vecteur $\{V_k\}$.

Pour cela on divise la matrice $[K]$ en deux blocs.

A°/ Pour une case $K(i,j)$ telle que $j \leq B$, son équivalence en position dans le vecteur $V_k(L)$ est :

$$\text{avec : } L = 1 + 2 + 3 + \dots + (j-1) + i = \frac{(j-1)j}{2} + i$$

$$\text{Alors } L = \frac{j(j-1)}{2} + i \quad \text{si } j \leq B \tag{V-2}$$

On peut remarquer que le nombre $(j-1)j$ est un nombre pair.

B°/ Pour une case $K(i,j)$ telle que $j > B$, son équivalence en position dans le vecteur $V_k(L)$ est :

avec :
$$L = 1 + 2 + 3 + \dots + B + (j - B - 1)B + i - (j - B) = i - j + \frac{B(1 - B + 2j)}{2}$$

Alors :
$$L = i - j + \frac{B(1 - B + 2j)}{2} \quad \text{si } j > B \tag{V-3}$$

Remarques :

- Pour la formule (V-2), le compteur 'i' varie de $1 \leq i \leq j$.
- Pour la formule (V-3), le compteur 'i' varie de $j - (B - 1) \leq i \leq j$.
- La fonction $L(i, j)$ est continue au point $j = B$. Donc pour ce point, on peut appliquer n'importe quelles formules (V-2) ou (V-3).

V-3/ EVALUATION DE LA DEMI-BANDE D'UNE MATRICE BANDE :

L'évaluation de la demi largeur de la bande est donnée par la différence maximale entre les numéros de deux nœuds d'un même élément, multiplié par le nombre de degré de liberté des noeudes (notre cas, chaque noeude contient un degré de liberté) et en ajoutant 1 (problème des intervalles).

Si on a un domaine plan, formé par 'NEL' éléments quadrilatères à quatres noeuds, la valeur de la demi-bande 'B' est donnée comme suit :

- Soit B_L la bande donnée par l'élément numéro 'L' :

Alors
$$B_L = \text{Max}(i, j, k, l) - \text{Min}(i, j, k, l) + 1 \tag{V-4}$$

Avec i, j, k et l les numéros globaux (non locaux) des quatres nœuds de l'élément L .

Par suite la valeur de B est donnée par :

$$B = \text{Max}(B_1, B_2, \dots, B_1, \dots, B_{NEL}) \tag{V-5}$$

Avec NEL : Nombre d'Eléments finis.

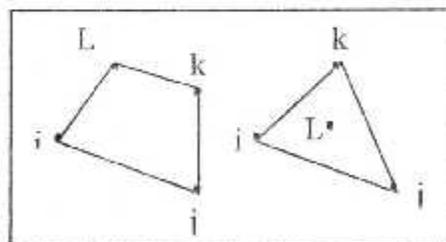


Fig.V-1: Eléments typiques à 4 nœuds

V-4/ METHODE DE RESOLUTION D'UN SYSTEME D'EQUATIONS LINEAIRE (DECOMPOSITION DE KHALESTKI) :

Après avoir remplie et stocké la matrice de rigidité $[K]$ globale et le vecteur $\{F\}$, et afin de déterminer le vecteur solution $\{T\}$, on est amené à résoudre le système d'équations suivant :

$$[K] \{T\} = \{F\} \tag{V-6}$$

On a adapté une méthode principale pour la résolution numérique du système (V-6).

c' est une méthode directe caractérisée par un nombre d'opérations fini et limité donc résolvant des systèmes à taille modérée.

Supposons dans la première étape que la matrice $[K]$ est quelconque mais carrée et pleine. Nous présenterons l'algorithme de résolution de cette matrice [12], ensuite nous déduirons l'algorithme de résolution pour une matrice symétrique et Bande.

Pour cela, on a choisi la méthode de *KHALESTKI* comme méthode de résolution.

1°) Matrice carrée pleine et quelconque :

Mettons la matrice $[K]$ sous la forme d'un produit de deux matrices, l'une triangulaire inférieure $[L] = [L_{ij}]$ et l'autre triangulaire supérieure $[H] = [H_{ij}]$ à diagonale unité.

C'est à dire que: $[K] = [L] [H]$

$$\text{Où : } [L] = \begin{bmatrix} L_{11} & & & & & \\ L_{21} & L_{22} & & & & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ L_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & L_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{et } [H] = \begin{bmatrix} 1 & H_{12} & H_{13} & \cdot & \cdot & H_{1n} \\ & 1 & H_{23} & \cdot & \cdot & H_{2n} \\ & & 1 & \cdot & \cdot & H_{3n} \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & 0 & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

Les éléments L_{ij} et H_{ij} se calculent par les formules suivantes :

$$\left. \begin{aligned} L_{11} &= K_{11} \quad , \quad H_{1j} = K_{1j}/L_{11} \quad j = 2, 3, \dots, n \\ L_{ij} &= K_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{ik} H_{kj} \quad j = 1, 2, 3, \dots, i \\ H_{ij} &= \frac{1}{L_{ii}} \left(K_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik} H_{kj} \right) \quad j = i+1, i+2, i+3, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (V-7)$$

Donc, on aura deux systèmes d'équations à matrice triangulaire.

$$\text{On pose } \begin{cases} [K] \cdot \{T\} = \{F\} \\ [H] \cdot \{T\} = \{Y\} \end{cases} \Rightarrow [L] \cdot [H] \cdot \{T\} = \{F\} \quad (V-8)$$

$$\text{Alors } [L] \cdot \{Y\} = \{F\} \quad (V-9)$$

La résolution de système (V-10) en suite (V-9) se fait par les procédures suivantes :

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{F_1}{L_{11}} \\ Y_i = \frac{1}{L_{ii}} \left(F_i - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik} Y_k \right) \quad i = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (V-10)$$

$$\text{Et } \begin{cases} T_n = Y_n \\ T_i = Y_i - \sum_{k=i+1}^n H_{ik} T_k \quad i = n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1 \end{cases} \quad (V-11)$$

$$\text{Et} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_n = Y_n \\ T_i = Y_i - \frac{1}{L_n} \sum_{r=i+1}^{r=n} L_n T_r \quad i = n-1, n-2, \dots, n-B+1 \\ T_i = Y_i - \frac{1}{L_n} \sum_{r=i+1}^{r=n-B+1} L_n T_r \quad i = n-B, n-B-1, \dots, 3, 2, 1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(V-15a)} \\ \text{(V-15b)} \end{array}$$

V-5/ PROCEDURE DE CALCUL :

Dans cette partie, on donne une description grossière du programme à partir de l'organigramme de la figure (V-3).

Alors, après la déclaration des différentes variables et constante utilisé dans le programme (partie déclaration), l'appelle au sous programme **INPUT** permet d'introduire les différentes paramètres caractérisant le problème : la température initiale ; la température ambiante ; coefficient de convection h ; émissivité thermique ; constante de STEPHANE BOLTZMAN. les subdivisions N_x et N_y seront entrées à la fin de cette subroutine. Puis l'appelle au sous programme de la géométrie permet de générer le maillage c-à-d de discrétiser le domaine afin d'obtenir les coordonnées géométrique nodales (positions des nœuds).

La subroutine **CONNECT** permet de faire la connexion entre les éléments finis en fonction de leurs numérotation.

Le réarrangement des nœuds du domaine dans un ordre d'affichage convenable permet le traçage et la représentation de maillage grâce au subroutine **MESH**.

Les conditions aux limites qui ferment notre système d'équation, on l'appelle le sous programme **CONDLIMIT** qui permet déterminer les différents arrêts des éléments de la frontière globale qui permettent de calculer le paramètre $F_i^{(e)}$ de l'équation (III-12).

Nous passons à une étape importante dans le programme c'est le remplissage des matrices et des vecteurs élémentaires, ainsi que leurs assemblages dans la matrice globale et du vecteur global. Pour cela, nous appelons la subroutine **ELMQUADRI**.

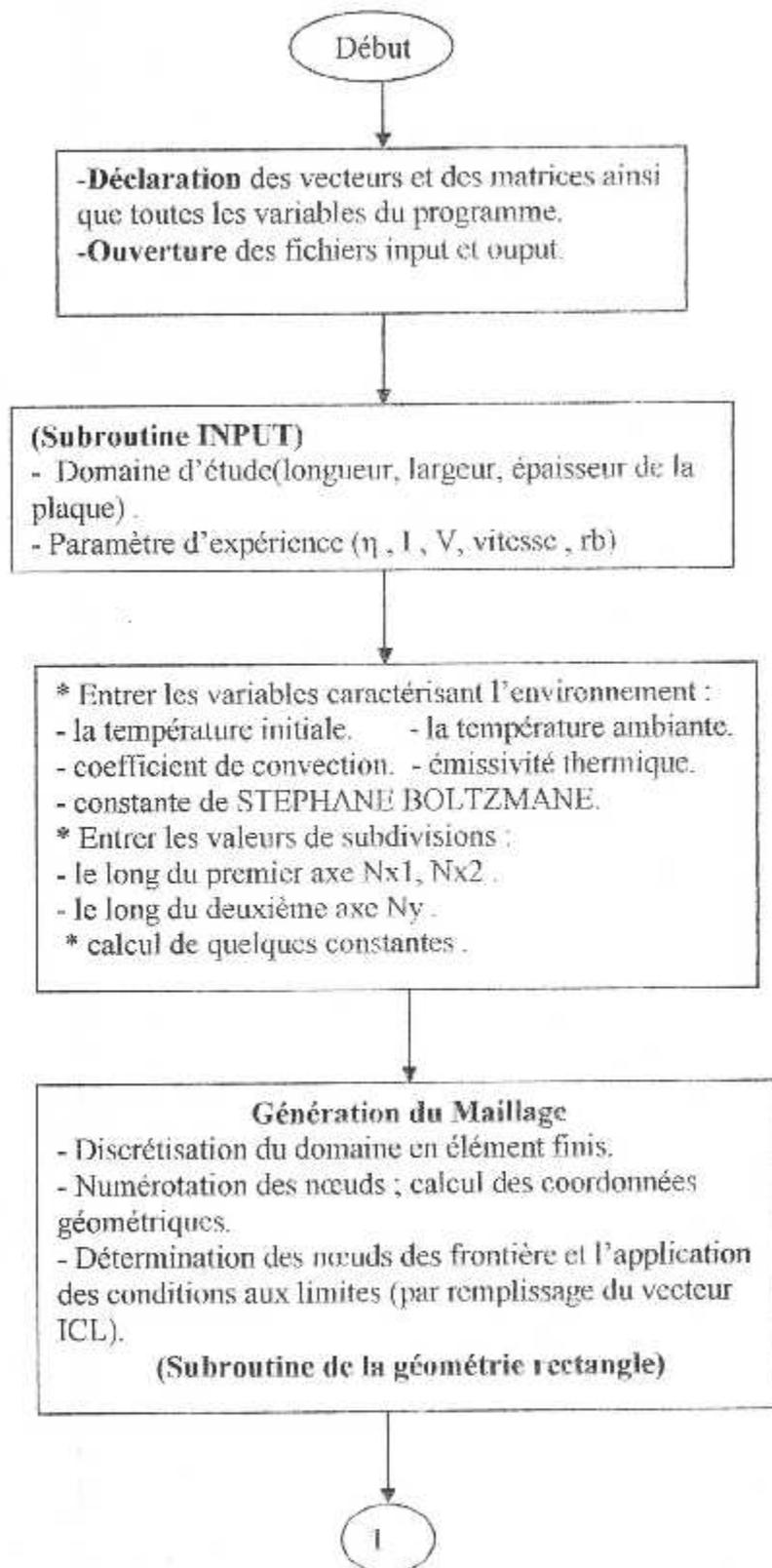
En première lieu le remplissage des matrices élémentaires est fait par la formule du fonction d'interpolation montrée au chapitre III on utilise la subroutine **REMPCOFFH** pour le calcul des coefficients de la matrice $[H]$.

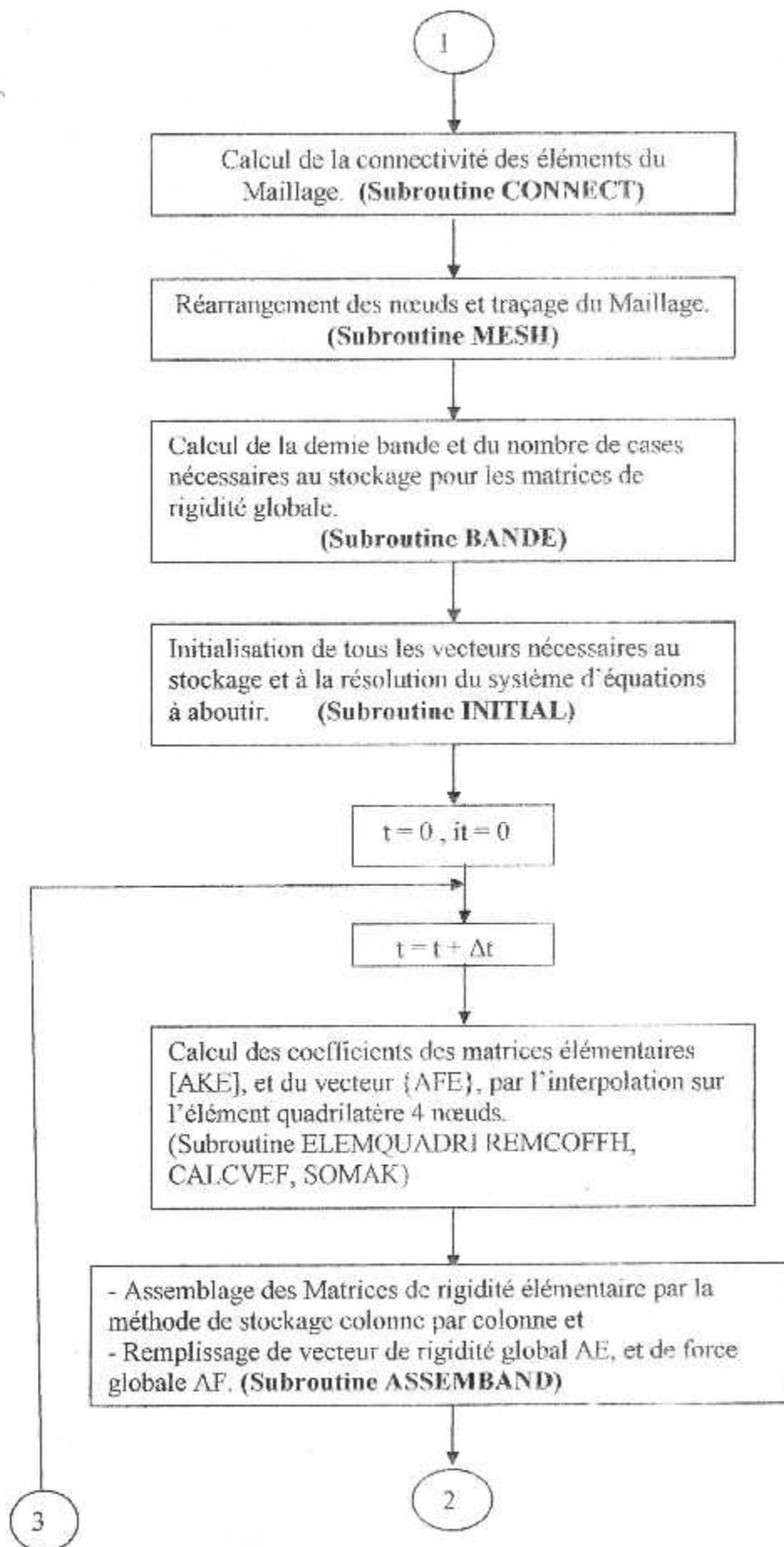
Puis le calcul de son inverse $[L]$ par **INVMAT** ainsi le calcul de L_{mm} et les surfaces élémentaires afin d'avoir les coefficients finaux $k_{\theta}^{(e)}$ et $F_i^{(e)}$ en utilisent deux fois les sous programmes **CALCAFE**, **SOMAK**, **INTGRAL**.

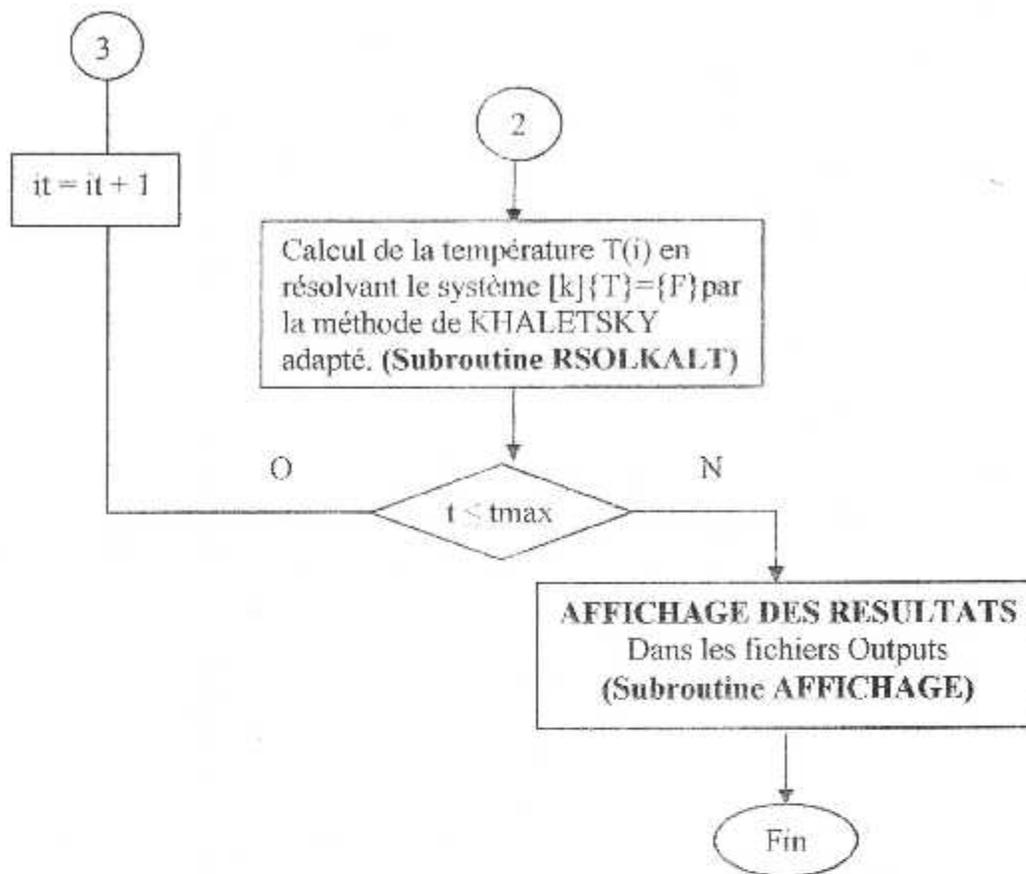
Puis l'appelle au subroutine **ASSEMBAND** permet de remplir les vecteurs qui servent à la résolution du système d'équation du problème suivant le stockage bande.

Une fois la matrice de rigidité globale et le vecteur force globale sont obtenus, nous passons à une phase très importante c'est la résolution du système $[K]\{T\} = \{F\}$, nous obtenons donc les températures dans tous les points du maillage considéré.

ORGANIGRAMME DU PROGRAMME PRINCIPALE







CHAPITRE VI

RESULTATS

ET DISCUSSIONS

CHAPITRE VI :

RESULTATS ET DISCUSSION

VI-1/ INTRODUCTION :

Après l'adaptation du programme de calcul en utilisant la méthode des éléments finis basé sur un élément quadrilatère à 4 nœuds et la technique numérique de khalestski employée pour la résolution du problème nous procédons à l'exécution du programme de calcul.

Les résultats numériques obtenus représentent la distribution de la température dans la plaque au cours du temps .

Afin de valider et interpréter ces résultats, on les compare avec les résultats expérimentaux.

Dans la suite, nous présentons les données du programme, puis les résultats et les interprétations.

VI-2/ DONNEES DU PROGRAMME :

Dans le cadre de l'exécution du programme, les propriétés « des deux plaques de l'acier inoxydable en fonction de la température sont : [13]

Pour $T < 1700^\circ\text{k}$:

$$K(T) = 8,116 + 0,01618 \cdot T \quad (\text{W/m.k})$$

$$\rho C_p(T) = 3561240,8 + 010022,3072 \cdot T \quad (\text{J/m}^3 \text{k})$$

Pour $T > 1700^\circ\text{k}$:

$$K(T) = 12,29 + 0,003248 \cdot T \quad (\text{W/m.k})$$

$$\rho C_p(T) = 5407942,2 \quad (\text{J/m}^3 \text{k})$$

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

- **condition initiale :** $T_0 = 300^\circ\text{k}$
- **conditions aux limites :**

la densité du flux de chaleur est donc par :

$$q_n = h (T_\infty - T) \quad \text{tel que } h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}; T_\infty = 300^\circ\text{k}$$

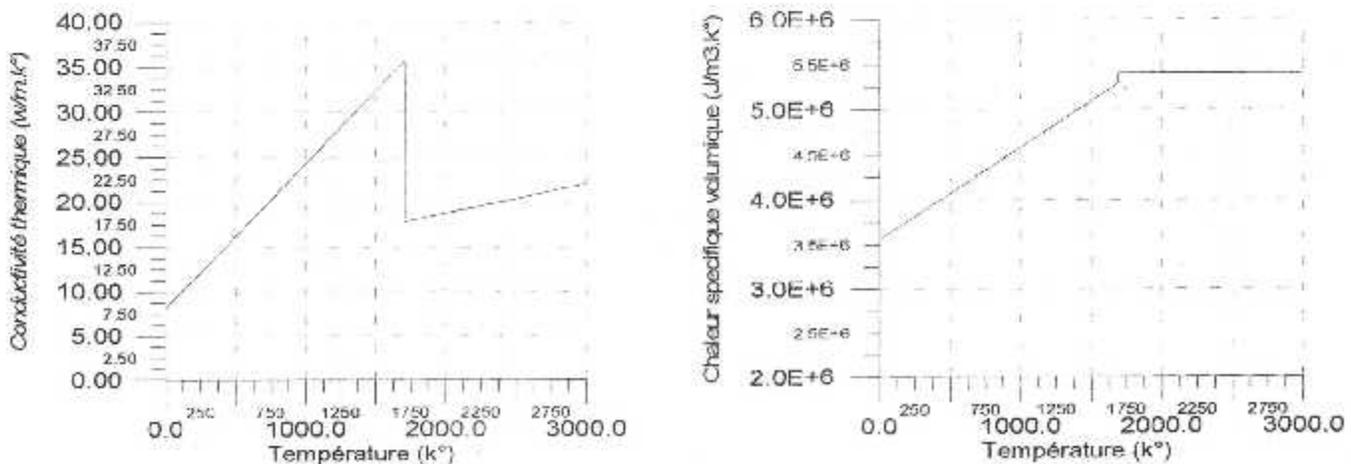


Figure VI-1 : propriétés physiques de l'acier inox

Les paramètres de calcul sont : $\eta = 0.65$, $I = 36\text{A}$, $U = 9\text{volt}$, $V = 1,166\text{mm/s}$

VI-3/ INTERPRETATION DES RESULTATS NUMERIQUES :

Une fois le maillage et le pas temporel sont fixé, on passe à l'exécution du programme problème à résoudre.

Les figures VI-3 et VI-4 représentent la répartition de température par les contours isotherme et les champs de surfaces des températures dans l'assemblage à différents instants qui retraçant la trajectoire de la source de chaleur.

En effet, on observe aussi que le réseau d'isothermes est beaucoup plus dense en amont du passage de la source de chaleur.

Ces même isothermes sont de plus en plus dispersives au fur et à mesure qu'en s'éloigne en aval de l'arc. Ceci du au fait que la chaleur a eu suffisamment de temps pour se propager dans les différentes directions de l'assemblage.

Les pertes de chaleur par rayonnement aux niveaux des parois de l'assemblage sont pratiquement négligeables.

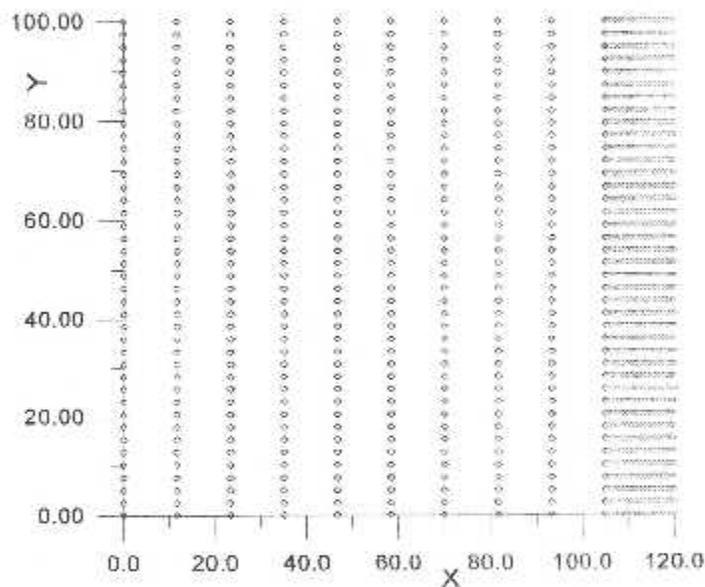
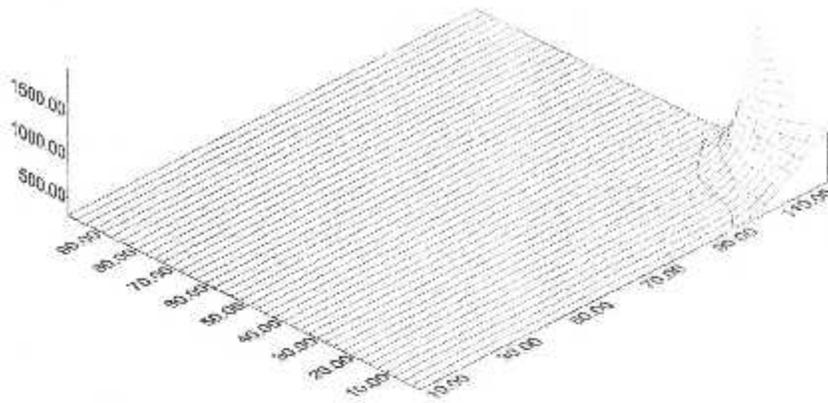
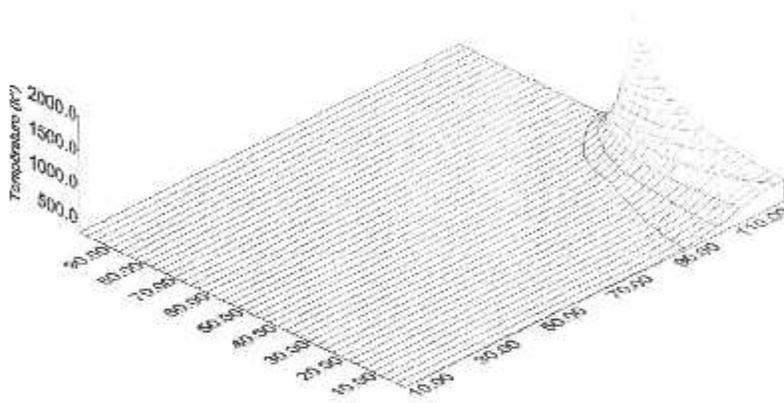


Figure VI-2 : la discrétisation du maillage des deux zones

at = 20.4 s



at = 40.8 s



at = 81.6 s

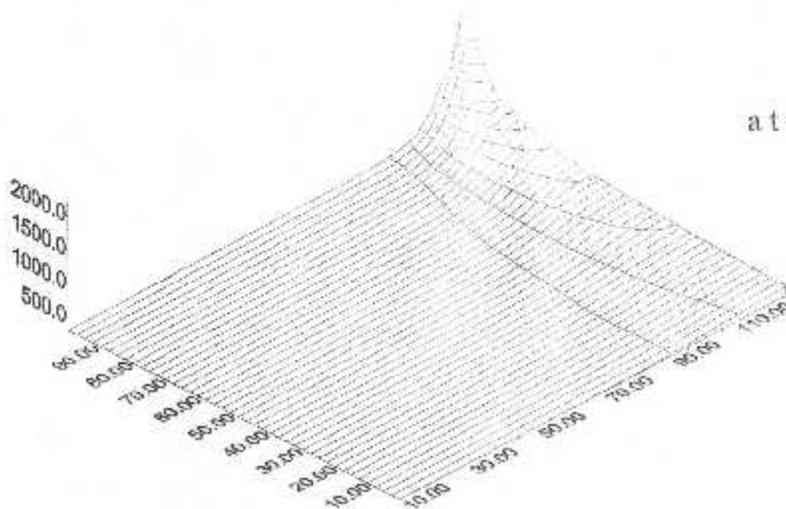


Figure VI-3 : Répartition des champs thermiques à Différents positions.

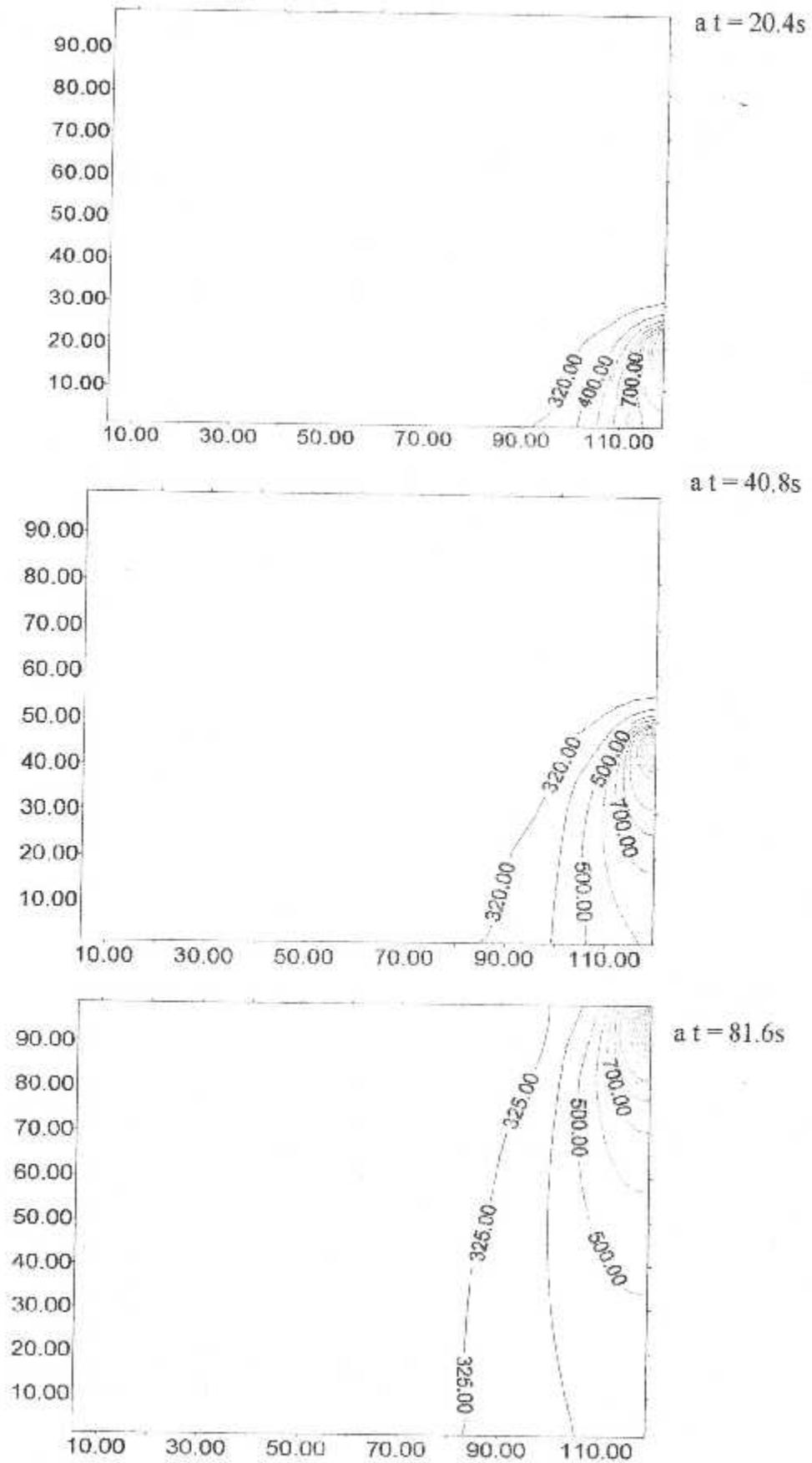


Figure VI-4 : Répartitions des isothermes à Différents Instants.

VI-4/ INTERPRETATIONS DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET COMPARAISON AVEC NUMERIQUES :

Après obtention des courbes température- temps enregistré par l'appareil spécial d'enregistrement sur la plaque 1 (voir figure IV-1), les résultats obtenu par étaient sous forme des courbes superposés, on les a séparé chacun dans un graphe. Quelqu'un sont illustrés ci dessous.

VI-4-1/ L'évolution de la température en fonction du temps :

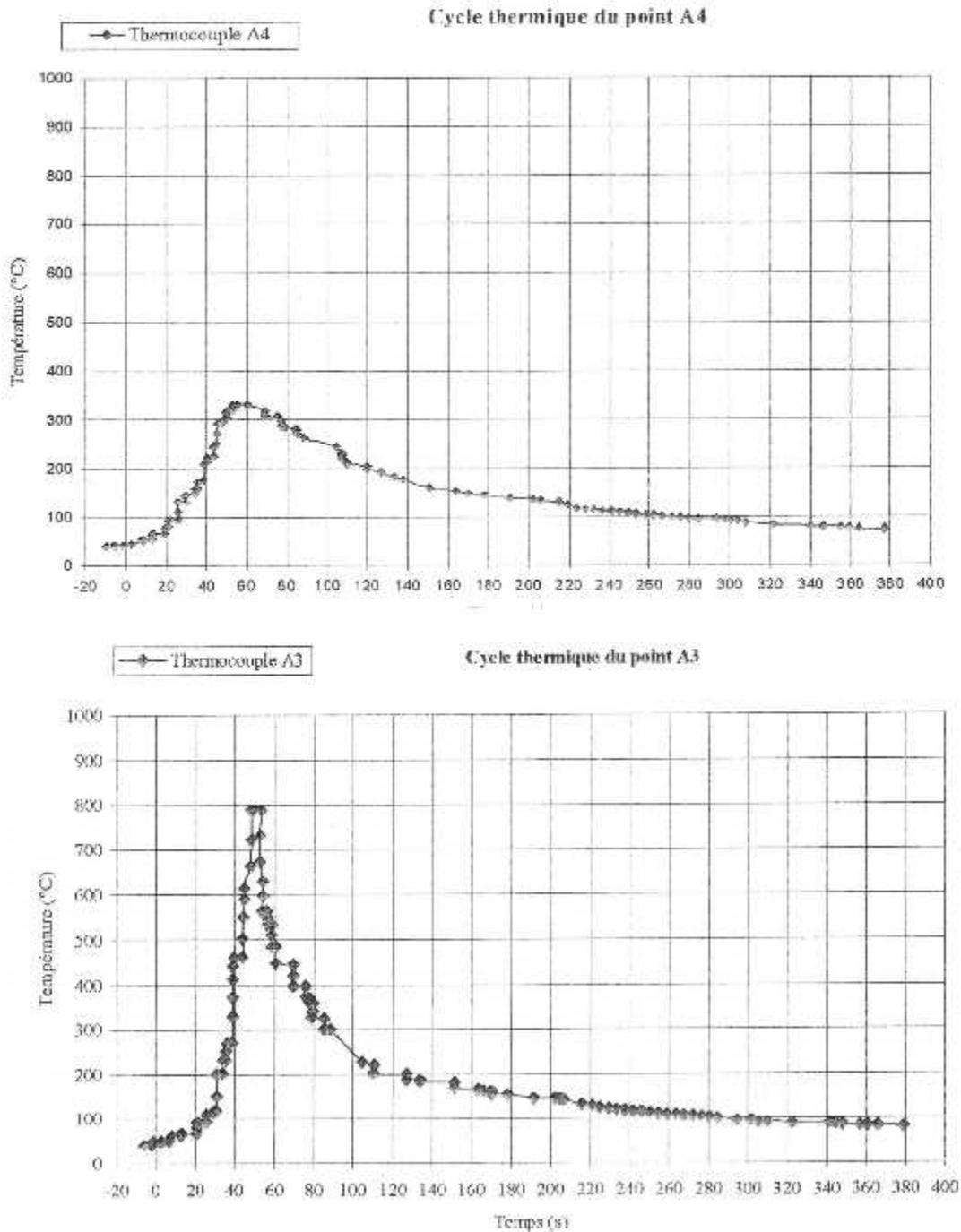


Figure VI-5 : cycles thermiques expérimentaux des points A4 et A3 des thermocouples.

La figure VI-5 montre les relevés de l'enregistrement de température par les thermocouples A4 et A3 en fonction du temps (en seconde) on constat que la température augmente rapidement en passant par un pique entre 700 et 800 °C, équivalent à 1000-1100°k, puis un refroidissement en deux phases où la deuxième est plus lente que la première phase sur les deux graphes de la figure.

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

Les étendue de la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) peuvent aussi être déterminées à partir de la répartition de température celles-ci, elles sont délimitées par leurs températures de fusion et de solidification respectives($T_f = 1700^\circ\text{k}$, $T_s = 996^\circ\text{k}$).

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

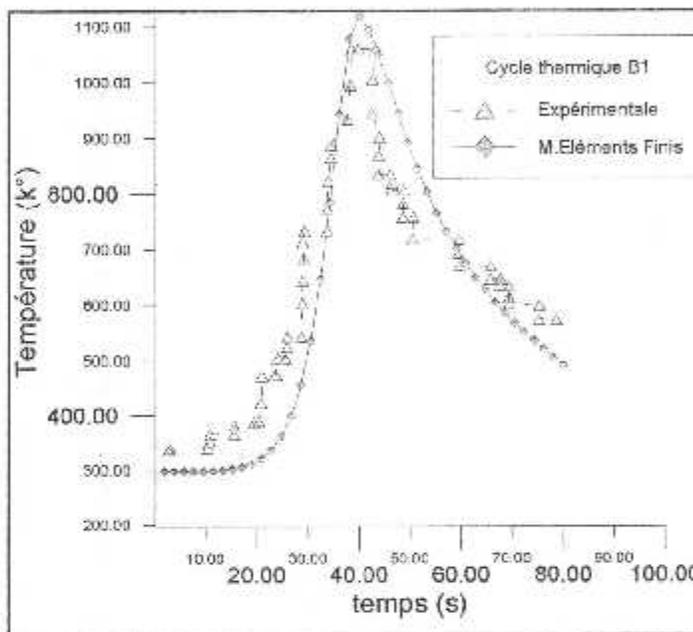


Figure VI-6 : comparaison de numérique avec l'expérimentale d'un cycle thermique.

La figure VI-6 : montre une comparaison entre un cycle thermique expérimental et un autre obtenu par un calcul numérique. On remarque qu'il y a une certaine différence entre ces résultats, et ceci est dû à la position réelle de l'emplacement de thermocouple sur la plaque, et bien ceci soit claire d'après le graphe 1 comparai avec le graphe 2 de la figure VI-6. où il y a une différence d'enregistrement pour le pique.

On conclue que cette région est donc soumit à des gradients très élevés, où un très petit déplacement induit des variations importantes. On conclue aussi il faut faire attention lors le collage des thermocouples dans leurs positions exactes, et qu'adapter au mieux les paramètres du modèle numérique concernent les rayons du bain de fusion de modèle source.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale et Perspectives

L'objectif de ce travail était de procéder à la simulation numérique de source de chaleur lors de soudage des deux plaques minces rectangulaire. En utilisant la méthode des éléments finis pour la détermination du champ de température.

La modélisation et la discrétisation numérique utilisées sont basées sur la méthode des éléments finis, pour la résolution de l'équation différentielle du seconde ordre type parabolique, et nous a permis de prédire la répartition de température transitoire dans l'assemblage soudé et par la suite de caractériser les champs de température les cycles thermiques $T(t)$ en chaque point de soudure et pouvoir délimiter les différentes zones dans une soudure, à savoir les dimensions de la zone affectée (ZF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT).

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis par un programme important de calcul, nous a permet de trouver des solutions numériques pour des surfaces rectangulaire, on a utilisé un type d'élément fini quadrilatère à 4 nœuds dans la génération du maillage. Ce dernier est de type « H ».

Le problème délicat de stockage des cases de la matrice de rigidité globale obtenue après la discrétisation en élément fini, a été traité par un algorithme de stockage bande de type colonne par colonne dans un vecteur, vu la simplicité de ses formules de récurrences, où on a adopté une méthode de résolution numérique du système d'équations algébriques, c'est la méthode de KHALETSKY.

Cependant, les solutions numériques obtenues ont fait l'objet d'une comparaison avec les résultats expérimentaux.

Nous avons montré que les températures obtenue numériquement sont en générale très proche des températures expérimentales. Ces températures augmentent a partir des frontières des plaques jusqu'à la zone où elles atteignent leur maximum. Cette variation (augmentation) est due au passage de la source de chaleur. La diminution de ces températures sont lente passent par deux phases où la deuxième est plus lente que la première phase.

Comme perspective, il y a lieu de compléter cet axe de recherche en incluant notamment la simulation numérique de l'écoulement de chaleur dans des plaques en 3-D. On peut aussi proposer l'étude de multi passe de source de chaleur Gaussienne. Ou encore, étudier le cas où en tenant compte le métal d'apport dans l'opération de soudage à l'arc électrique.

Toute fois, ce projet nous a permis d'exploiter nos connaissances théoriques et d'éclaircir la procédure et la manière de résoudre un tel problème par la méthode des éléments finis, et de s'améliorer dans la programmation de cette méthode. Il nous a permis aussi de voir et d'exploiter les travaux réalisés par des institutions de recherches dans ce domaine.

ANNEXE A

Le tableau I.1 résume les différents procédés de soudage les plus utilisés :

Tableau. I.1. CLASSEMENT DES PROCÉDES.

SOURCE D'ÉNERGIE	Éléments de protection				
	FLUX	Gaz inertes	GAZ ACTIF	VIDE	SANS PROTECTION
<i>Electrique Arc</i>	MANUEL A L'ARC				GOUONS CONTACTEURS
	SEMI-AUTOMATIQUE SOUS PROTECTION GAZEUSE	SEMI-AUTOMATIQUE SOUS PROTECTION GAZEUSE M.I.G.	SEMI-AUTOMATIQUE SOUS PROTECTION GAZEUSE M.A.G.		DECLIAGE DE CONDENSATEUR
	M.I.G., fil fourré	SOUS GAZ INERTE AVEC ELECTRODE DE TUNGSTENE			ARC AVEC ELECTRODE DE CARBONE
	AUTOMATIQUE sous flux solide	T.I.G.			
	ELECTROGAZ	ELECTROGAZ			
<i>ELECTRIQUE RESISTANCE</i>	PLASMA (arc transféré)				
	ELECTROSLAG				PAR POINT RENCIAGE A LA MOLETTE PAR BOSSAGE PAR RESISTANCE
				PRESSION A FROID	FRICTION
<i>MECANIQUE</i>					PRESSION A FROID FORGEAGE ULTRASONS EXPLOSION
					PRESSION A CHAUD LAMINAGE
<i>CHIMIQUE</i>	ALUMINOTHERMIE	PLASMA (arc non transféré)	HYDROGENE ATOMIQUE PROPANE		
<i>OPTIQUE</i>		LASER		BOMBARDEMENT ELECTRONIQUE	LASER

BIBLIOGRAPHIES “”

- [1] : R.BAUS, W.CHAPEAU « Application du soudage aux constructions », éditeur Eyrolles N° 3343, 3^{ème} trimestre 1979.
- [2] : ROLAND. CASES Soudage à l'arc, « *Techniques d'ingénieur 2000* » partie BD3.
- [3] : UNIVERSIALIS « *Encyclopédie 2000* » Mécanosoudage, Cetim, Senlis, 1990.
- [4] : R.VARISLAZ « *Soudage : élément de conception et réalisation* », 2^{ème} édition DUNOD 1987.
- [5] : BOUNDARE .COURS DE 4^{ème} ANNEE Ingénieur Institut Aéronautique « *transfert thermique* » 2002-2003.
- [6] : ROSENTHAL.D: “*Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting*”, *Welding Journal* (1947), 20 may, pp.220_s to 234_s.
- [7] : EGAR.T.W, and Tsai .N.S.J : « *Temperature fields produced by travelling distributed heat sources* » : *Welding Journal* 1983 62/12, pp.346_s to 355_s.
- [8] : JARVIS.I. and Wahab.M.A: “ *A literature review on numerical modeling of the gas metal arc Welding process*”. 1996 Australian Welding Research, CRC.N°15, Welding technology institute of Australia.
- [9] : MAISSANI , H.MAZA et BELKASSA “ *Calcul Thermique de l'effet d'énergie par un modèle Gaussienne du Soudage T.I.G des tôles Minces d'aciers Austénitique 304L par la méthode des éléments fini* ”. article de IX^{ème} journées Maghrébines des sciences des Matériaux, Mai 2004.
- [10] : PANTANKAR.S.V: “*Numerical heat transfer and fluid flow*”; Hemisphere publishing corp. New York, NY, 1980
- [11] : AISSANI mouloud « *Calcul des paramètres d'écoulement dans les conduites de sections complexes par la méthode des éléments finis* », thèses de Magistère Institut Aéronautique ,Blida , ALGERIE , Juillet 2002.
- [12] : ZEBBICHE TOUFIK « *Eléments Finis* » Cours Ingénieur Aéronautique, Option Structure. Institut d'Aéronautique, Université de Blida, ALGERIE, 2002.
- [13] : M.CHOI, R. GREIF and M.SALCUDEAN, “ *A study of the heat transfert during arc welding wich applications to pure metals or alloys and low or high boiling temperature materials*”, *Numerical heat transfert*, vol 11, PP.477-489, 1987.
- [14] : GOLDAK, J, CHAKRAVARTI, A and BIDDY, M., (1984), “ *A New Finite Element Model for Welding Heat Sources*”, *Met . Trans. B*, 15B, 299-305.