

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique**  
**Université SAAD DAHLEB De Blida**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de mécanique**



**PROJET DE FIN D'ÉTUDE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME DE MASTER EN**  
**MECANIQUE**

**Spécialité : Génie mécanique**  
**Option : systèmes énergétiques et thermiques appliqués**

**THEME**

**Simulation des phénomènes thermiques engendrés lors**  
**d'une opération de soudage TIG**  
**(Application d'alliage d'aluminium 2024)**

**Travail Réalisé Par :**

- CHELBI SALAH.  
- EZZIANIA MEHAMED.

**Encadré par :**

Promoteur : TAHAR CHAOUCH K.  
Co-promoteur: ABADA Mourad.

Devant le jury composé de :

M <sup>r</sup>	U.S.D B	Président
M <sup>r</sup>	U.S.D B	Examineur
M <sup>r</sup>	U.S.D B	Examineur

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A ceux que j'aime le plus au monde*

*A ma mère, à ma mère, à ma mère et mon père*

*A mes chers frères et ma sœur*

*A mes tantes et mes oncles*

*Je dédie aussi ce travail à mes amis Farouk, m'hammed, Hamza, Yousef, DJAMEL,*

*SMAIL, RACHID, ABDELKADER, AZIAZ, EL HADI.....*

*A tous mes amis d'enfance*

*A tous ceux qui ont fait avec nous un mi-chemin*

.....SALAH

## Dédicaces

*Je profite de l'opportunité qui m'est offerte pour dédier  
Le fruit de mes efforts à :*

❖ *Mes parents, à qui je dois ma réussite,*

❖ *Mes frères et sœurs à qui je souhaite tant de succès Dans la vie,*

❖ *Mes oncles et tantes ainsi que toute la famille EZZIANI*

❖ *Enfin à tous mes amis et collègues.*

.....*MOHAMED*

### Résumé:

Le soudage des alliages d'aluminium présente un intérêt particulier dans le cadre de son application dans diverses industries, automobile, aéronautique et autres.

Ce travail, Consistera à évaluer, dans le domaine de soudabilité opératoire, l'influence des paramètres de soudage sur l'alliage 2024 T3, et les caractéristiques de la soudure. Les évolutions des caractéristiques mécaniques et microstructurales à travers le joint seront déterminées et reliées aux cycles thermiques du soudage engendré par le procédé TIG.

### MOTS-CLES :

Soudage, procédé TIG, aluminium, Cycles thermiques, Caractérisation.

### ABSTRACT:

The welding of aluminum alloys has a particular interest within the framework of its application in various aeronautical and automobiles and others industries.

This work will consist in the evaluation, in the field of operational weld ability, the influence of the welding parameters on 2024 T3 alloy, and the weld characteristics. The evolutions of the mechanical and micro structural characteristics of joint will be finding out and will be connected to thermal cycle of welding related to TIG process.

### KEY-WORDS:

Welding, TIG process, Aluminum, Thermals cycles, Characterization

### ملخص :

الحام خلائط الالمنيوم بيدى دورا فعالا في المجالات الصناعية و خاصة السيارات و الطائرات و البواخر...الخ. تهدف هذه الدراسة الى تقييم تأثير عوامل الاحام على خليط 2024T3 وهذا باستنباط الخصائص المميزة في مجال القابلية للالتحام ومعرفة العلاقة بين البنية المجهرية و ما يقابلها كتطورات في المميزات الميكانيكية في مختلف أنحاء الشريط الملحوم وامكانية تحديد هذه المميزات وربطها إلى العقب الحرارية للالحام المولدة من طرف جهاز اللحام TIG.

**الكلمات المفتاحية :** التقنية TIG , الالمنيوم , العقب الحرارية, الخصائص والمميزات .



### Introduction générale :

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

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

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

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

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

L'objectif de ce travail est de qualifier la simulation numérique du procédé de soudage TIG des assemblages en aluminium par la méthode des éléments finis, dans le cas de tests



simplifiés, faisant intervenir des phénomènes représentatifs de ceux qui sont observés lors d'une opération de soudage.

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

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

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

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

Cette étude comporte 4 chapitres, qui sont :

- **Chapitre I** : Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur les alliages d'aluminium en général et sur les alliages d'aluminium 2024 T3 en particulier.
  
- **Chapitre II** : Ce chapitre est une approche générale sur le procédé du soudage TIG, dans lequel on va donner des généralités sur l'opération du soudage, plus particulièrement le procédé **T.I.G.**  
On présente aussi le matériau aéronautique le plus utilisé, ainsi que des exemples sur les différentes formes de cordon de soudure utilisés en industrie aéronautique.



- **Chapitre III** : à partir du bilan énergétique, on va présenter la modélisation mathématique du transfert thermique lors d'une opération du soudage **T.I.G**, tout en tenant compte des conditions aux limites et des hypothèses appropriées.
- **Chapitre IV** : Ce chapitre présente les différentes étapes, et les règles à suivre pour discrétiser l'équation de chaleurs régissant le problème avec la méthode des éléments finis pour différents types de maillages utilisés et consacré à l'interprétation des résultats obtenus numériquement par comsol.

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

**TABLE DES MATIERES**

RESUME

REMERCIEMENTS

DEDICACE

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....1

**CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES**

**INTRODUCTION**

1. Obtention de l'aluminium.....	4
2. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium.....	5
2.1. Propriétés physiques.....	5
2.2. Propriétés thermiques.....	6
2.3. Propriétés mécaniques.....	7
2.4. Propriétés électriques et magnétiques.....	10
3. Familles et désignation des alliages d'aluminium.....	11
3.1. Les alliages d'aluminium de fonderie.....	12
3.2. Les alliages d'aluminium corroyés.....	13
4. Les alliages à durcissement structural.....	15
4.1. Les alliages à durcissement structural.....	15
4.1.1. Les alliages d'aluminium de la série 7000 (aluminium zinc).....	15
4.1.2. Les alliages d'aluminium de la série 6000 (aluminium magnésium silicium).....	16
4.1.3. Les alliages d'aluminium de la série 2000 (aluminium cuivre).....	16
4.2. L'alliage d'aluminium 2024 T3.....	17
4.3. Diagramme d'équilibre d'aluminium 2024 T3.....	18
5. Quelques applications de l'aluminium et ses alliages.....	19



## **Chapitre II : Maîtrise des procédés de soudage TIG**

1. Le soudage.....	21
2. Le procédé tungstène inerte gaz (TIG).....	22
2.1. Principe du soudage TIG.....	22
2.2. Le procédé de soudage.....	23
3. La définition de soudage tungstène inerte gaz.....	23
3.1. Le tungsten inert gas(TIG).....	23
3.2. Principe et paramètres technologique de soudage TIG.....	26
4. Caractéristique de la soudure.....	34
5. Formation du bain de fusion.....	36
6. phénomènes physiques associés au soudage TIG.....	37
6.1. Phénomènes propres à la zone fondue.....	37
6.1.1. Mouvement de convection de la zone fondue (l'effet Marangoni).....	39
6.1.2. Influence de la pression d'arc.....	40
6.1.3. Phénomènes électromagnétiques (forces de Lorentz).....	40
6.2. Phénomènes influençant à la zone solide.....	41
6.2.1. Couplage thermomécanique.....	42
6.2.2. Couplage métallurgie – mécanique.....	44
6.2.3. Couplage thermique – métallurgie.....	44
7. Cycles thermiques.....	44

## **Chapitre III : hypothèses mathématiques du transfert thermique**

1. modélisation thermique.....	46
1.1. Bilan d'énergie.....	46

1.2. Les éventuels cas de la conductivité.....	48
1.3. L'équation qui régit le phénomène de la conduction.....	50
1.3.1. Hypothèses principales.....	51
1.3.2. Les conditions aux limites.....	51
1.4. La source de chaleur.....	53
1.4.1. Source de chaleur ponctuelle.....	53
1.4.2. Source de chaleur gaussienne.....	54
1.4.3. Source de chaleur en segments de lignes.....	54
1.4.4. Modélisation du terme source.....	56
1.5 .propriétés physique.....	57
2. conclusion.....	58

## **Chapitre IV : simulation numérique par COMSOL**

1. Description générale de la méthode des éléments finis.....	59
1.1. Introduction.....	59
1.2. Méthodes analytiques .....	59
1.3. Méthode numériques.....	59
1.3.1. Méthode des domaines finis .....	60
1.3.2. Méthode des volumes finis.....	60
1.3.3. Méthode des éléments finis.....	61
1.3.4. La décomposition de la méthode des éléments finis.....	62
2. Présentation du Comsol Multiphasique.....	63
2.1. Conseils et suggestions pour la modélisation par éléments finis (MEF).....	63

2.1.1. Clarification des objectifs de l'étude.....	63
2.1.2. Structure et chargement symétriques.....	64
2.1.3. Type de matériau.....	64
2.1.4. Conditions aux limites.....	64
2.1.5. Taille des éléments. ....	65
3. Présentation générale du logiciel.....	65
4. Problème à étudier.....	66
4.1. Choix du modèle.....	67
4.2. Géométrie.....	67
4.3. Introduction des propriétés des domaines.....	68
4.4. Introduction des conditions aux limites.....	69
4.5. Le maillage.....	69
4.6. Résolution numérique.....	70
5. Application en 2D par consol.....	71
1- introduction.....	79
2- conseils et suggestions pour la modélisation par éléments finis (MEF).....	79
2-1-clarification des objectifs de l'étude.....	79
2-2-structure et chargement symétriques.....	80
2-3-type de matériau.....	80
2-4- conditions aux limites ....	80
2-5-taille des éléments.....	81

3- présentation générale du logiciel.....	82
4- problème à étudier.....	83
4-1 choix du modèle .....	83
4-2- géométrie.....	85
4-3- introduction des propriétés des domaines.....	86
4-4- introduction des conditions aux limites.....	87
5- exemple d'application en 2d par <b>comsol</b> .....	88
5-1- régime stationnaire à 2D.....	88
5-2-régime transitoire à 2D.....	91
6- analyse des résultats.....	95
7-conclusion.....	95
8. exemple d'application par logitille <b>ANSYS</b> .....	96
8.1. Les étapes de la simulation.....	96
8.2. Discussions des résultats.....	109
9. conclusion.....	109
Conclusion générale.....	110
Référence.	



## **INTRODUCTION :**

En 1854: première apparition de l'aluminium lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique.

En 1886: invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA).

Depuis l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique etc....

## **1. OBTENTION DE L'ALUMINIUM :**

### **1.1. La Bauxite :**

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

### **1.2. L'alumine :**

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

### **1.3. L'aluminium :**

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve [1].



## 2. PROPRIETES D'USAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :

### 2.1. Propriétés physiques :

#### a) Propriétés atomique et cristallines :

- Numéro atomique: 13.
  
- Masse atomique: les valeurs actuellement acceptées sont:
  - 26,981 5 (valeur basée sur  $^{12}\text{C}$ ).
  - 26,989 74 (valeur basée sur  $^{16}\text{O}$ ).
  
- Isotopes:
  - Le principal isotope,  $^{27}\text{Al}$ , est stable et comprend 14 neutrons et 13 protons à l'exception de l'isotope  $^{26}\text{Al}$  qui a une demi-durée de vie de l'ordre de 106 années, les autres isotopes, produits artificiellement, ont une demi-durée de vie très courte
  
- Valence de l'aluminium dans les composés chimiques: 3
  
- Structure cubique à faces centrées.
  
- Constante réticulaire:  $4,049\ 596 \times 10^{-10}$  m à 298 K.
  
- Diamètre atomique:  $2,86 \times 10^{-10}$  m.
  
- Volume atomique:  $9,999 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup> [2].

#### b) Masse volumique :

La masse spécifique de l'aluminium et des alliages d'aluminium-magnésium varie de 2.7 (Al pur) à 2.63 selon la teneur en élément d'addition. Cette légèreté est un avantage pour la manutention des ensembles de grande dimension.



## 2.2. Propriétés thermiques :

### a. Température Fusion :

L'aluminium pur fond à 650 °C. Pour les alliages Al-Mg et Al-Cu la température de fusion décroît avec l'augmentation de teneur en Mg et en Cu [3].

### b. Vaporisation :

La température d'ébullition est de 2500 °C environ. la chaleur de vaporisation est de 10780 kJ/kg.

A l'état liquide, l'aluminium liquide a une très faible tension de vapeur à basse température mais qui s'élève très vite avec celle-ci.

### c. Coefficient de Dilatation linéaire :

D'environ  $24 \times 10^{-10}$  m /°C aux températures ordinaire et en moyenne de  $28 \times 10^{-6}$  m /°C près de la température de fusion. il est sensiblement double de l'acier. Les déformations dues à la chaleur de soudage sont cependant bien inférieures à ce que laissent supposer ces valeurs, car les températures de fusion et de soudage de l'aluminium sont très inférieures à celles de l'acier [3].

### d. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est de 237 w / (m × k) à la température ambiante .Elle varie en fonction de la température (**Tableau I.1**).

302 W/ (m.k) à -173 °C
237 W/ (m.k) à +20 °C
208 W/ (m.k) à +660 °C état solide
0.91 W/ (m.k) à +660 °C état liquide

**Tableau I.1** : Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température [4].

Au-dessous de  $-173^{\circ}\text{C}$ , la conductivité thermique de l'aluminium de pureté titre 99,99 et plus, est très sensible au niveau des impuretés.

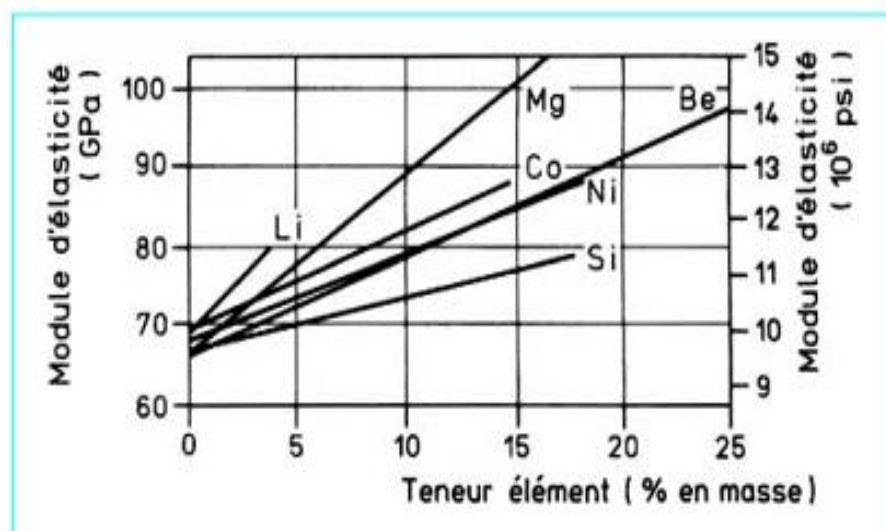
### 2.3. Propriétés mécaniques :

#### I) Module d'élasticité:

La littérature cite pour le module d'élasticité de l'aluminium pur des valeurs comprises entre 63 et 71 (G Pa), avec 66,6 (G Pa) comme valeur la plus probable. Cette valeur varie en fonction de différents paramètres :

1. elle augmente en présence d'éléments étrangers (additions ou impuretés), aussi la valeur de 69 (G Pa) est-elle généralement admise pour l'aluminium dit commercialement (**Figure I.1**).

2. elle diminue lorsque la température augmente (**tableau I.2**).



**Figure I.1:** influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium [2].





Température (°C)	Module d'élasticité(1) (%)
-195	112
-85	105
-29	102
+24	100
100	98
+149	95
+204	90
+260	80

**Tableau I.2** : influence de la température sur le module d'élasticité [2].

## 2) Résistance à la fatigue:

Les courbes de Wöhler des alliages d'aluminium présentent les caractéristiques générales ci-après :

- absence de coude marqué contrairement à la plupart des aciers et alliages de titane ;
- tendance à ne donner une asymptote qu'à partir de  $10^8$  cycles, d'où la nécessité de conduire les essais de fatigue jusqu'à  $10^8$  cycles pour connaître la limite de fatigue ; des essais réalisés par flexion rotative à la fréquence de

3 000 cycles/min ont toutefois montré qu'une légère baisse de la limite de fatigue pouvait être observée si l'expérimentation était conduite jusqu'à  $10^9$  cycles ;



Exemple :

- alliage 2024-T3: Limite de fatigue à  $10^8$  cycles :  $\pm 170$  MPa,

Limite de fatigue à  $10^9$  cycles :  $\pm 165$  MPa ;

- alliage 5056-0 : Limite de fatigue à  $10^8$  cycles :  $\pm 125$  MPa,

Limite de fatigue à  $10^9$  cycles :  $\pm 110$  MPa.

— rapport entre la limite de fatigue à  $10^8$  cycles (en contraintes alternées) et la charge de rupture en traction – ou rapport d'endurance : égal à :

- 0,35 à 0,45 dans le cas des alliages sans durcissement structural (alliages séries 1000, 3000 et 5000).

- 0,25 à 0,35 dans le cas des alliages avec durcissement structural.

(Alliages séries 2000, 6000 et 7000) ; d'une façon générale, ce rapport diminue lorsque la charge de rupture augmente.

Différents facteurs conditionnent l'initiation des fissures de fatigue et, par suite, la limite de fatigue [5].

### 3) Résistance à la corrosion :

L'aluminium présente en pratique une excellente résistance à la corrosion puisqu'on peut souvent l'utiliser sans revêtement. Convenablement choisi, l'aluminium – ou l'alliage d'aluminium – non protégé résiste notamment aux intempéries, à l'eau douce, à l'eau de mer et à de nombreux produits alimentaires et chimiques [5].

- Corrosion généralisée ou uniforme :

L'aluminium mis à nu se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde de 5 à 10 nm d'épaisseur et sa résistance à la corrosion dépend de la stabilité de cette couche d'oxyde vis-à-vis du milieu corrosif.



La corrosion généralisée se caractérise par une diminution d'épaisseur uniforme sur toute la surface du métal : la couche d'oxyde étant dissoute d'une façon régulière par l'agent corrosif. Dans une atmosphère naturelle, rurale ou marine, la vitesse de corrosion de l'aluminium est extrêmement faible, et ne dépasse pas 5  $\mu\text{m}/\text{an}$ . Elle est, par exemple, de 1  $\mu\text{m}/\text{an}$  pour l'aluminium nuance 1050-H24 exposé durant 8 ans en atmosphère marine, elle est de 5  $\mu\text{m}/\text{an}$  pour l'alliage 5052 immergé sans protection durant 20 ans dans de l'eau de mer.

D'une façon générale, la résistance à la corrosion généralisée de l'aluminium dépend du pH du milieu corrosif, la corrosion ne pouvant pratiquement se produire que dans les milieux acides avec  $\text{pH} < 4$  et dans les milieux basiques avec  $\text{pH} > 9$ . Mais en fait, pour un pH donné, la vitesse de corrosion dépend beaucoup des ions présents dans la solution et il existe des exceptions aux limites de pH à l'intérieur desquelles on peut utiliser l'aluminium : ainsi l'aluminium résiste à la corrosion dans l'acide nitrique concentré ( $\text{pH} = 1$ ) et dans l'ammoniaque ( $\text{pH} = 13$ ).

Une autre exception à cette règle qui lie l'agressivité du milieu au pH est la bonne résistance de l'aluminium au béton dont le pH peut atteindre 10 à 12. L'expérience montre que les contacts avec les ciments ne sont pas nuisibles à condition de veiller à ce qu'il n'y ait pas, dans le scellement, de l'acier en contact avec l'aluminium [2].

#### **2.4. Propriétés électriques et magnétiques :**

##### *a) Résistivité électrique :*

Elle passe de 2.8  $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$  pour l'aluminium à 99.5 % à valeur qui varie de 4.5 à 6.5 pour les alliages au magnésium. Dans le cas de l'aluminium, elle est sensiblement le tiers de celle de l'acier qui varie d'environ 12 à 19  $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ .

Cette caractéristique, ainsi que la conductibilité thermique élevée, ont pour conséquence que les machines de soudage par résistance doivent être considérablement plus puissantes que pour le soudage de l'acier mais déterminent un soudage plus rapide [3].



b) Coefficient de Hall. Résistivité magnétique :

La valeur généralement admise pour le coefficient de Hall est :

$$R_H = -3,5 \times 10^{-2} \text{ mm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ à la température ambiante [2].}$$

### 3. FAMILLES ET DESIGNATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM :

Bien que la plupart des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'aluminium des solutions, les alliages l'aluminium sont en fait basés sur quelque système seulement :

- Aluminium – cuivre
- Aluminium – manganèse
- Aluminium – magnésium
- Aluminium – silicium
- Aluminium – zinc

Les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. Ces quatre chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage. Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale.

Suivant le mode de transformation des alliages, on distingue :

- les alliages de moulage : sont utilisés en fonderie pour la fabrication de pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules ensable, c'est la coulée en sable, ou des moules en acier ou en fonte, c'est la coulée en coquille. Par ce procédé, on élabore des pièces aux formes plus ou moins complexes : poignées de portes, blocs moteurs...etc.
- les alliages de corroyage : sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits : tôles, profilés,..., par laminage ou par filage, les demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction



mécanique où ils sont assemblés par soudage, rivetage, vissage, ..., dans le bâtiment, dans l'électricité, ...etc. [6].

### 3.1. Les alliages d'aluminium de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.
- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Un bon état de surfaces lustré et peu ou pas de défauts [7].

#### 3.1.1. Classification des alliages d'aluminium de fonderie :

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0). L'élément d'alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique s'il s'agit d'une pièce moulée (.0) ou d'un lingot (.1 Ou .2) voir le **tableau I.3 [9]**.



Séries d'alliages	Eléments d'alliages principaux
1xx.x	99%d'aluminium minimum
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium
4xx.x	Silicium+cuivre et/ou magnésium
5xx.x	magnésium
6xx.x	N'existe pas
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

**Tableau I.3** : classification d'alliages d'aluminium de fonderie [8].

### 3.2. Les alliages d'aluminium corroyés :

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusqu'à 8000 le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par ex. pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx.

La seule exception dans la série est la série 1xxx (l'aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au-dessus de 99%. L'alliage 1350 contient donc au moins 99.50% d'aluminium (voir **tableau I.4**) [8].



Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al <sub>2</sub> Cu - Al <sub>2</sub> CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al <sub>6</sub> Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg <sub>2</sub> Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn <sub>2</sub>
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-

Tableau I.4 : représente la signification des désignations [9].

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus, on distingue pour les alliages de corroyage :

- les alliages à durcissement structural ou << trempant >> dans lesquels le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante.
- Les alliages non susceptibles de durcissement structural (ou non trempant) dans lesquels le niveau de caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, filage...) ou par des recuits [6].



#### **4. Les alliages à durcissement structural :**

##### **Introduction :**

Le durcissement d'un alliage lors de la maturation ou du revenu est dû à l'interaction des dislocations avec les zones GP et les phases précipitées, en ce sens que la présence de ces particules précipitées tend à bloquer le mouvement des dislocations, rendant ainsi plus difficile la propagation de la déformation et augmentant, par conséquent, la résistance mécanique de l'alliage.

##### **4.1. Les alliages à durcissement structural :**

Les alliages d'aluminium à durcissement structural (série 2000, 6000 et 7000) sont utilisés dans le cadre de l'allègement des structures de transport aérien, naval et terrestre.

Cependant, ces alliages sont difficilement soudables par voie classique et le principal moyen d'assemblage reste le rivetage dans le cas aéronautique. Ce processus présente de nombreux désavantages comme une jonction hétérogène entre les deux tôles, le surcroît de masse ainsi que la concentration de contraintes au niveau des trous, particulièrement dommageable pour la tenue en fatigue.

##### **4.1.1. Série 7000 (aluminium zinc) :**

L'élément d'alliage de cette série est le zinc. Globalement, ils ont de très bonnes caractéristiques mécaniques ; ce sont les alliages d'aluminium à haute résistance. Malheureusement ces très bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion.

Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double palier (T7). Ce traitement se paie par une baisse des caractéristiques mécaniques.





Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre.

#### **4.1.1.1. Les alliages 7000 avec cuivre :**

Ce sont eux qui ont les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %.

L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en aéronautique, armement, sport.

#### **4.1.1.2. Les alliages 7000 sans cuivre :**

En les comparant avec les alliages avec cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques mais une meilleure résistance à la corrosion. Certains comme le 7020 présentent également de bonnes aptitudes à la soudure [9].

#### **4.1.2. Série 6000 (aluminium magnésium silicium) :**

Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). Cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Elle est très utilisée pour les profilés.

Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être augmentées par addition de silicium qui donnera le précipité durcissant  $Mg_2Si$ . Ils ont une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage).

#### **4.1.3. Série 2000 (aluminium cuivre) :**

L'élément d'alliage de la famille 2000 est le cuivre (Cu). Ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par durcissement structural. Ils sont caractérisés par de bonnes caractéristiques mécaniques notamment à l'état trempé revenu ou mûri. C'est grâce à ces caractéristiques mécaniques qu'ils ont été choisis pour les applications aéronautiques. Ils présentent également de bonnes aptitudes de tenue à chaud et pour le décolletage. En



revanche, ils ont une résistance à la corrosion faible en atmosphère corrosive du fait de la présence de cuivre.

Ces alliages ont de nombreuses applications en aéronautique et en mécanique. En général, ils sont utilisés pour des pièces soumises à des contraintes [9].

#### 4.2. L'alliage d'aluminium 2024 T3 :

L'alliage 2024 est un alliage d'Al-Cu voire Al-Cu-Mg de composition chimique et de propriétés physiques et mécaniques données par les tableaux 1,2et 3 respectivement.

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autres
90.7-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<0.5	<0.5	<0.25	<0.15	<0.1	<0.15

**Tableau I.5:** Composition chimique de l'alliage 2024 (%massique) [10].

Etat	Re (2%) (MPa)	Rr (MPa)	A% L <sub>0</sub> =50mm 5.65√S <sub>0</sub>	Resistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D <sup>2</sup> )	Contrainte de fatigue(MPa) 500MHz
T3	345	485	18	285	120	140
T6	396	475	10	/	/	/

**Tableau I.6:** Propriétés physiques [11].

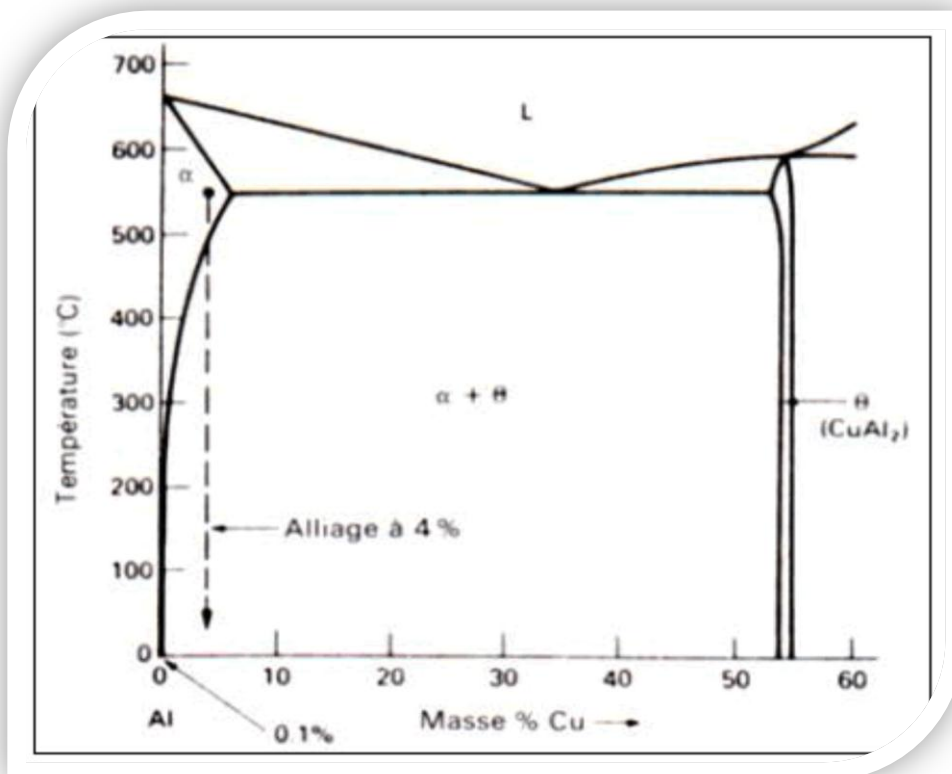
Etat	Re (2%) (MPa)	Rr (MPa)	A% L <sub>0</sub> =50mm 5.65√S <sub>0</sub>	Resistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D <sup>2</sup> )	Contrainte de fatigue(MPa) 500MHz
T3	345	485	18	285	120	140
T6	396	475	10	/	/	/

**Tableau I.7:** Propriétés mécaniques [11].

### 4.3. Diagramme d'équilibre Al-Cu :

Le diagramme de phases Al-Cu est donné sur la **figure I.3**. Il nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al—4%Cu est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution. En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé  $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ .

Au fur et à mesure que la température diminue, la proportion d' $\text{Al}_2\text{Cu}$  augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase  $\alpha$  de 7% d' $\text{Al}_2\text{Cu}$  [12].



**Figure I.2** : le côté riche en aluminium du diagramme Al-Cu [12].



## 5. Quelques applications de l'aluminium et ses alliages :

Aluminium dans les transports La nécessité de réduire le poids des véhicules en vue de diminuer leur consommation de carburant, ou d'augmenter leur charge utile ou leur rayon d'action, conduit la plupart des constructeurs à substituer de plus en plus d'aluminium à d'autres matériaux lourds, notamment à la fonte, l'acier, les métaux cuivreux.

### a) Automobile :

Dans le domaine de l'automobile où la bataille entre matériaux est la plus spectaculaire, l'aluminium est en compétition avec la fonte sur les blocs moteurs, avec les céramiques sur les pistons, avec l'acier, les plastiques, le magnésium sur les carters, avec le cuivre sur les échangeurs, avec l'acier, les plastiques, les composites sur la carrosserie.

### b) Transports aérospatiaux :

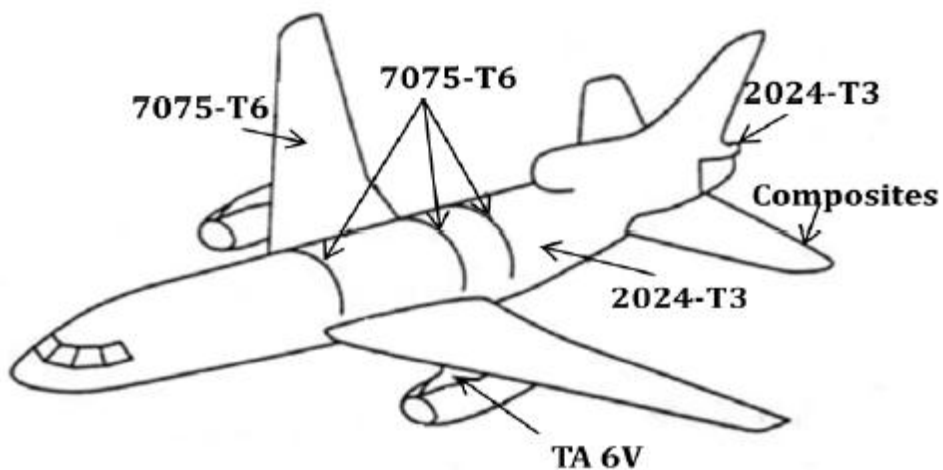
Aluminium et aéronautique ont toujours été, et sont encore, étroitement liés. Si l'aéronautique put commencer avec les appareils dont les structures en bois, son véritable démarrage ne fut rendu possible que grâce à l'invention en 1903 d'un alliage aluminium-cuivre- magnésium, commercialisé sous le nom de duralumin, aujourd'hui alliage 2017 ; dont les premières applications furent en 1914 les structures des dirigeables Zeppelin et, en 1917, les structures des avions militaires Breguet 14 construits en 12 000 exemplaires. La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés ; aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80% de la masse à vide des structures des avions modernes.

### c) Aluminium dans l'armement et les équipements militaires :

L'aluminium occupe une place importante dans ce domaine ; citons :

- Les chars et véhicules blindés : roues ou galets en alliage 2014 matricé, blindage (à égalité de poids, les alliages du type 7020 présentent des propriétés balistiques voisines de celles de l'acier de blindage).

- Les véhicules amphibies.
- Les obusiers (exemple : M-102 la légèreté de l'aluminium permet le transport par hélicoptère).
- Les munitions.
- Les pièces balistiques : fonds et corps de propulseurs en alliages 2014, 7049,7075.
- Les tubes (bazookas), les lance- rockets.
- Les matériels de génie militaire : engins de franchissement en alliage 7020 soudé.



**Figure I.3 :** Exemple d'utilisation des alliages d'aluminium en aéronautique [13].



## 1. LE SOUDAGE :

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques [17]. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même.

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue le soudage autogène du brasage, ainsi que le métal de base (matériau constituant les pièces à assembler) du métal d'apport (matériau étranger qui intervient dans l'opération d'assemblage). On distingue ainsi le soudage dont « les pièces à assembler participent à la construction du joint » du brasage dont « la constitution du joint est réalisé par l'intervention du seul métal d'apport ». Trois techniques d'assemblages peuvent être ainsi clairement définies :

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

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

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

Le brasage et le soudobrasage cherchent à bénéficier des effets de mouillage du métal d'apport sur les pièces. Nous verrons que de tels effets existent en soudage mais sont



---

préjudiciables à la morphologie optimale des joints soudés et ne sont pas systématiquement recherchés.

Nous nous contenterons ici de présenter les différentes techniques de soudage, par le biais des sources thermiques, en détaillant particulièrement le procédé TIG (Tungstène Inerte Gas) qui fait l'objet de cette étude [13].

## **2. LE PROCEDE TUNGSTEN INERT GAS (TIG) :**

### **2.1. PRINCIPE DU SOUDAGE TIG :**

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

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

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

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

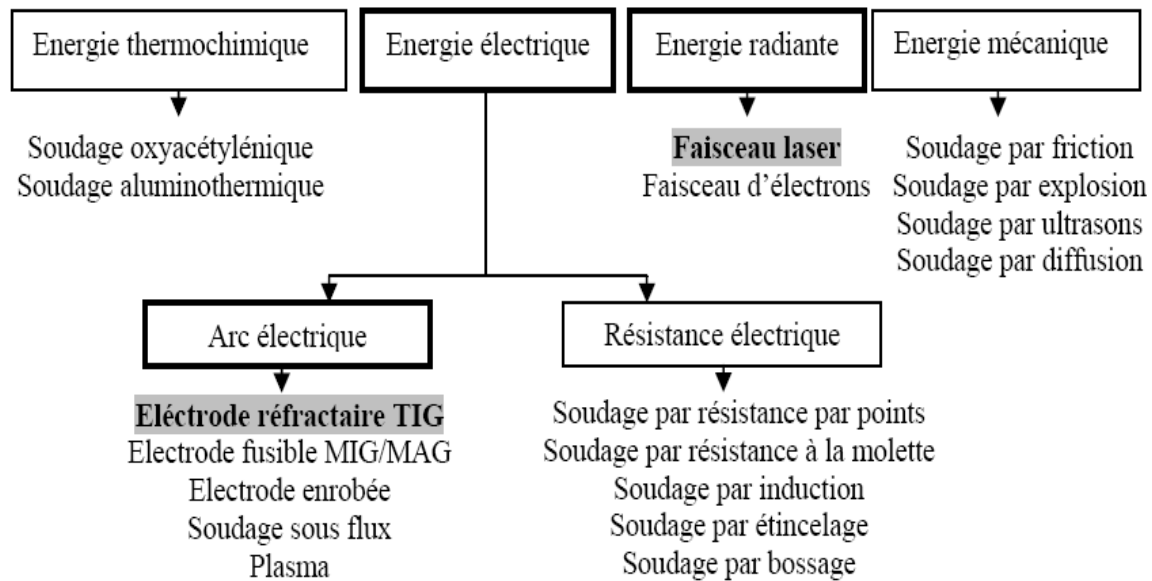
Le TIG est un procédé facilement mécanisable. Il est très utilisé, entre autre, dans l'industrie nucléaire pour la réalisation des tuyauteries de circuit primaire des centrales nucléaires de type REP. Le TIG est en effet bien adapté pour la fabrication de tubes roulés soudés en acier inoxydable austénitique. Dans ce cas on utilise le courant continu avec pôle



positif relié à la pièce à souder (polarité directe), qui permet de localiser le plus grand apport de chaleur sur le métal à fondre [13].

## 2.2. PROCÉDES DE SOUDAGE :

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mise en œuvre (figure II.1).



**Figure II.1** : Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie [13].

## 3. LA DIFINITION DE SOUDAGE TUNGSTEN INERT GAS (TIG):

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

### 3.1. LE TUNGSTEN INERT GAS (TIG) :

Signifie "*Tungsten Inert Gas*" où le mot "*Tungsten*" (Tungstène) désigne l'électrode et les mots "*Inert Gas*" (Gaz inerte) désignent le type de gaz plasmagène utilisé. Ce procédé de soudage rentre dans la catégorie des procédés de soudage à l'arc avec une électrode non





fusible. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire (- du générateur) et la pièce (+ du générateur) sous un flux gazeux ; de façon générale, il s'agit d'un gaz ou d'un mélange de gaz rares.

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



**Figure. II.2:** Application et influence de la vitesse de soudage TIG [13].

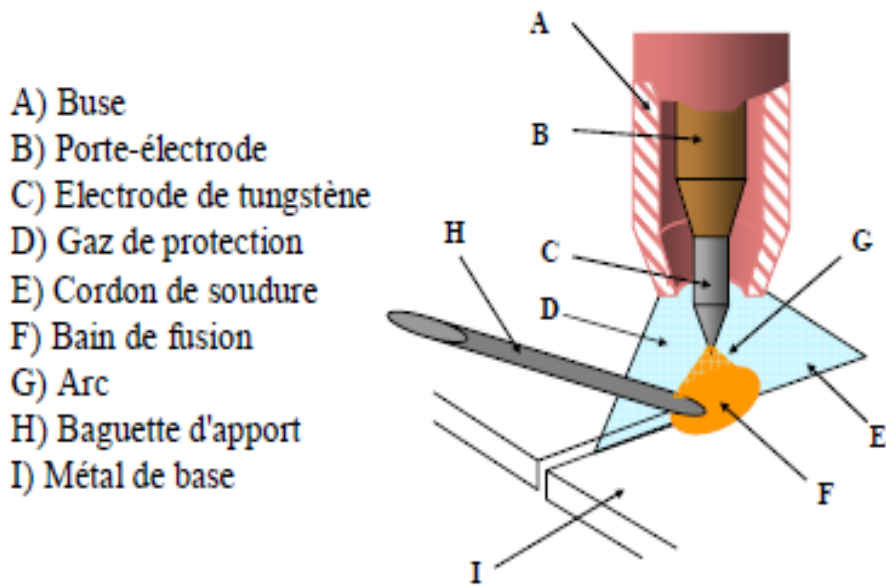


Figure II.3 : Description du procédé TIG [9].

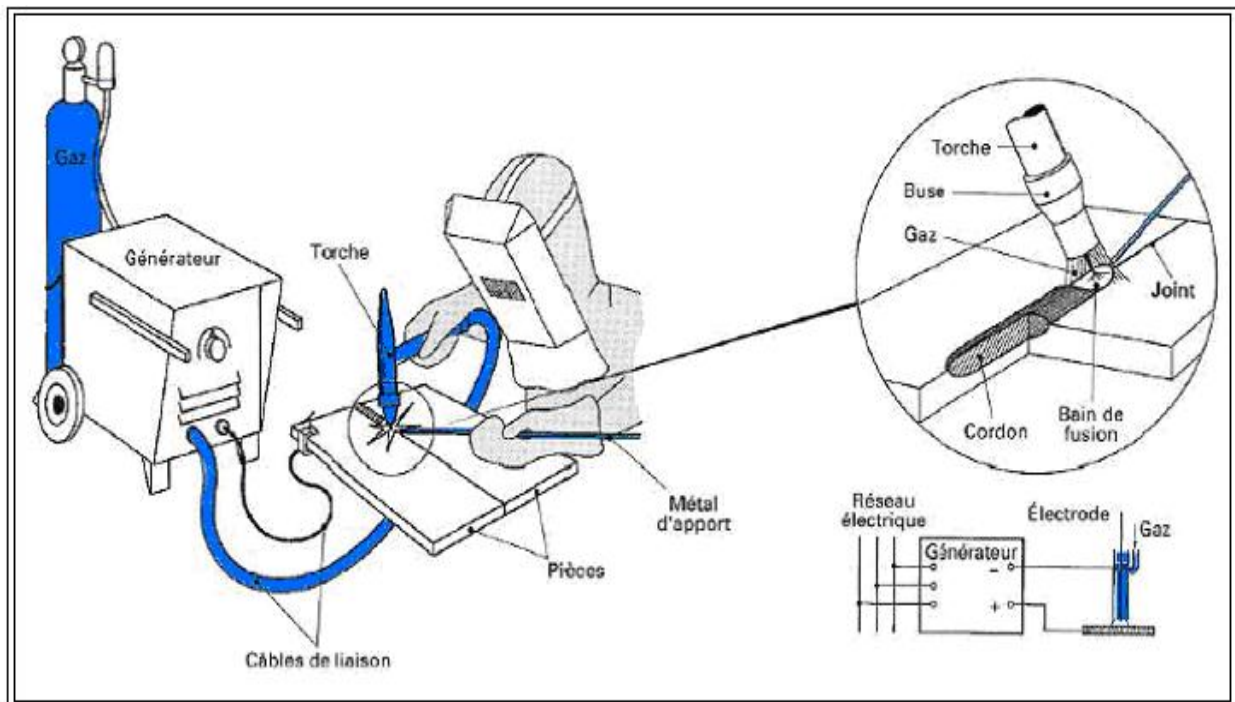


Figure II.4: Schéma du procédé TIG [9].



### 3.2. Principe et paramètres technologiques du soudage TIG :

Lors de l'application du procédé de soudage TIG, on fait jaillir de l'argon (arc électrique) entre une électrode infusible de tungstène et la pièce à souder opposée. Un champ magnétique auto induit est engendré et crée à son tour des forces de Lorentz. Celles-ci vont entraîner le gaz en protection vers la surface de la pièce à souder. Cette énergie calorifique permet de faire fondre localement la pièce à souder formant ainsi le joint soudé après refroidissement. La forme de la pointe de l'électrode peut affecter la forme du bain de fusion. Généralement, les pointes des électrodes utilisées, comme pour le cas du courant direct, sont ragréées sous une forme conique.

En pratique, l'intensité et la vitesse de soudage sont les paramètres les plus importants à contrôler du fait qu'ils sont directement liés à la profondeur de pénétration, à la largeur du bain de fusion et à la qualité du joint soudé. L'intensité affecte également la tension si la longueur de l'arc (distance entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder) est fixée. Aussi, l'augmentation de l'intensité du courant favorise une pénétration et une largeur du cordon plus importante, alors qu'une augmentation de la vitesse de soudage aura une influence inverse.

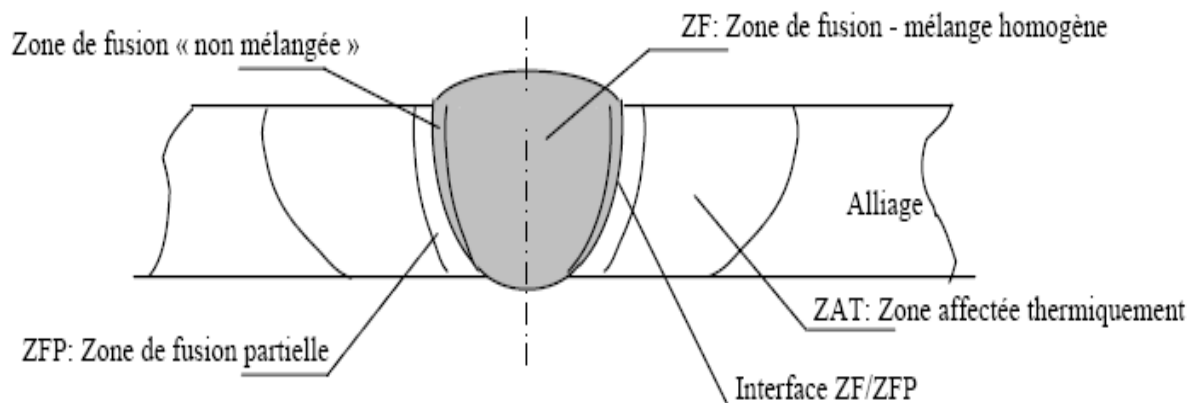
Le tableau suivant représenté les paramètres de soudage utilisés lors de notre expérience :

<b>Epaisseur de l'échantillon (mm)</b>	<b>Courant utilisé (V)</b>	<b>Intensité (A)</b>	<b>Diamètre électrode (mm)</b>
<b>2</b>	<b>12-18</b>	<b>85-140</b>	<b>1.5</b>
<b>2.5</b>	<b>12-18</b>	<b>100-140</b>	<b>2</b>

**Tableau II-1** : Paramètres de soudage [13].

## 4. CARACTERISTIQUES DE LA SOUDURE :

Le soudage TIG est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quelle que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (figure II.5).



**Figure II.5:** Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG

(Coupe transversale).

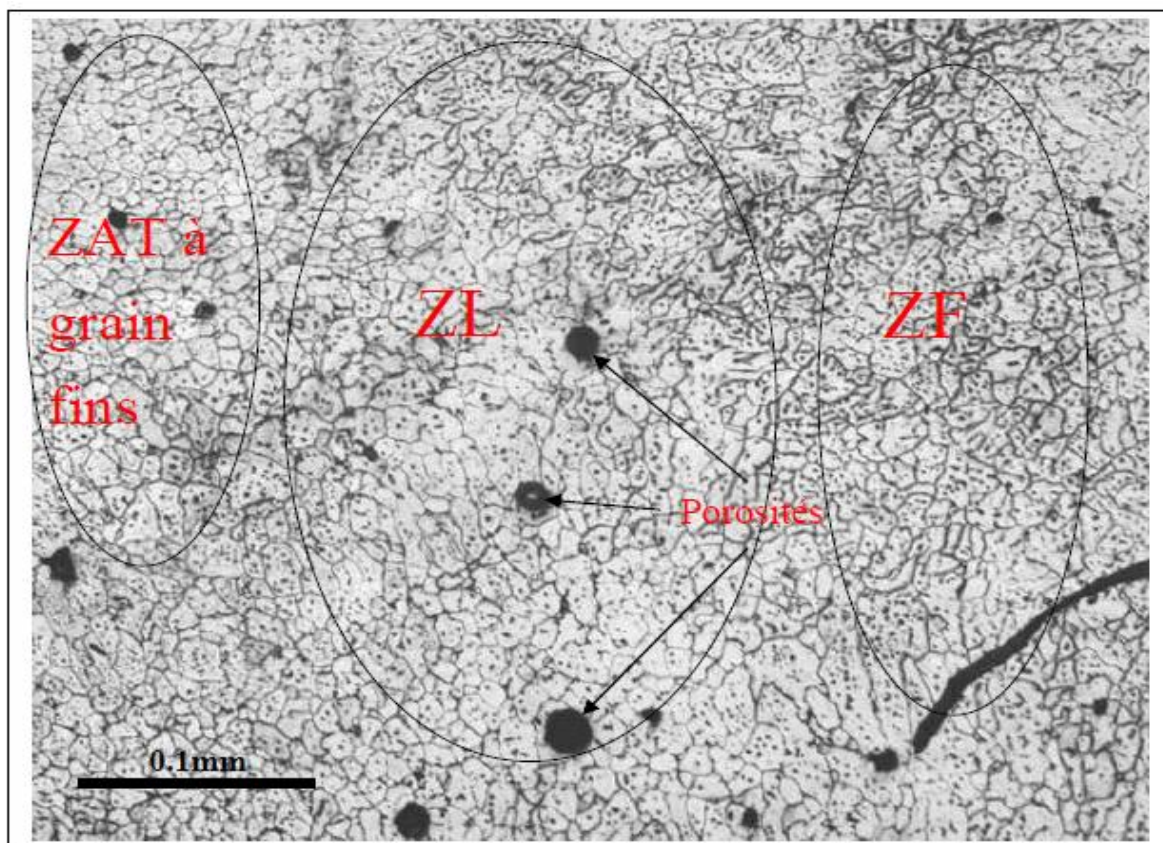
**a) La zone fondue :** (nommée **ZF**) Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration de la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

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

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

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

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



**Figure II.6 :** Les différentes zones de transformation structurales (ZF-ZL-ZAT) de l'aluminium 2024[9].

---

---

## 5. FORMATION DU BAIN DE FUSION :

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

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

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

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

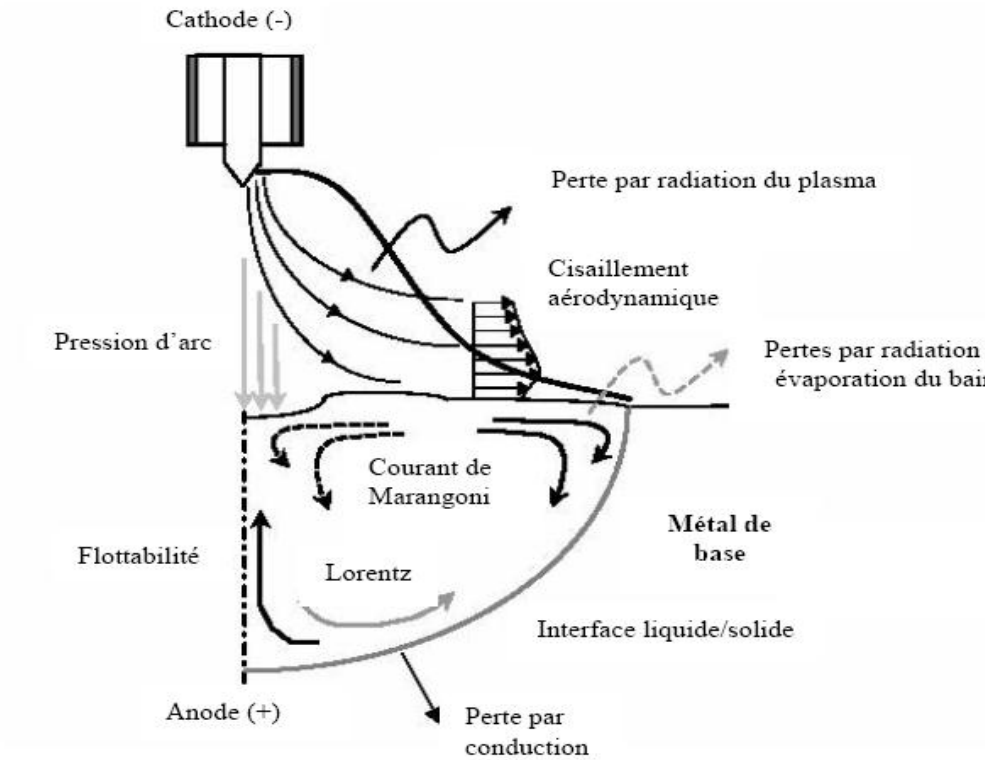
La figure (II.7) présente les forces agissant sur la forme du bain de fusion par procédé de soudage TIG. Une partie seulement de l'énergie calorifique produite par l'arc sert au soudage, le reste étant perdu par rayonnement, convection et conduction dans le métal adjacent.

## 6. PHENOMENES PHYSIQUES ASSOCIES AU SOUDAGE TIG :

La modélisation du procédé de soudage TIG nécessite la connaissance des phénomènes physiques liés à l'apport de chaleur, la fusion du matériau et des couplages existants. Dans le paragraphe suivant, nous détaillerons ces phénomènes en distinguant ceux prenant place au sein de la zone fondue de ceux intervenant dans la zone solide de la pièce.

**6.1 PHENOMENES PROPRES A LA ZONE FONDUE :**

Le soudage TIG est un procédé entraînant la fusion partielle des pièces de l'assemblage. La zone fondue est le siège de réactions thermo physiques complexes où sont mis en jeu des phénomènes électromagnétiques, thermiques, convectifs et métallurgiques (Figure II-7etII-8).



**Figure II.7 :** Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG.

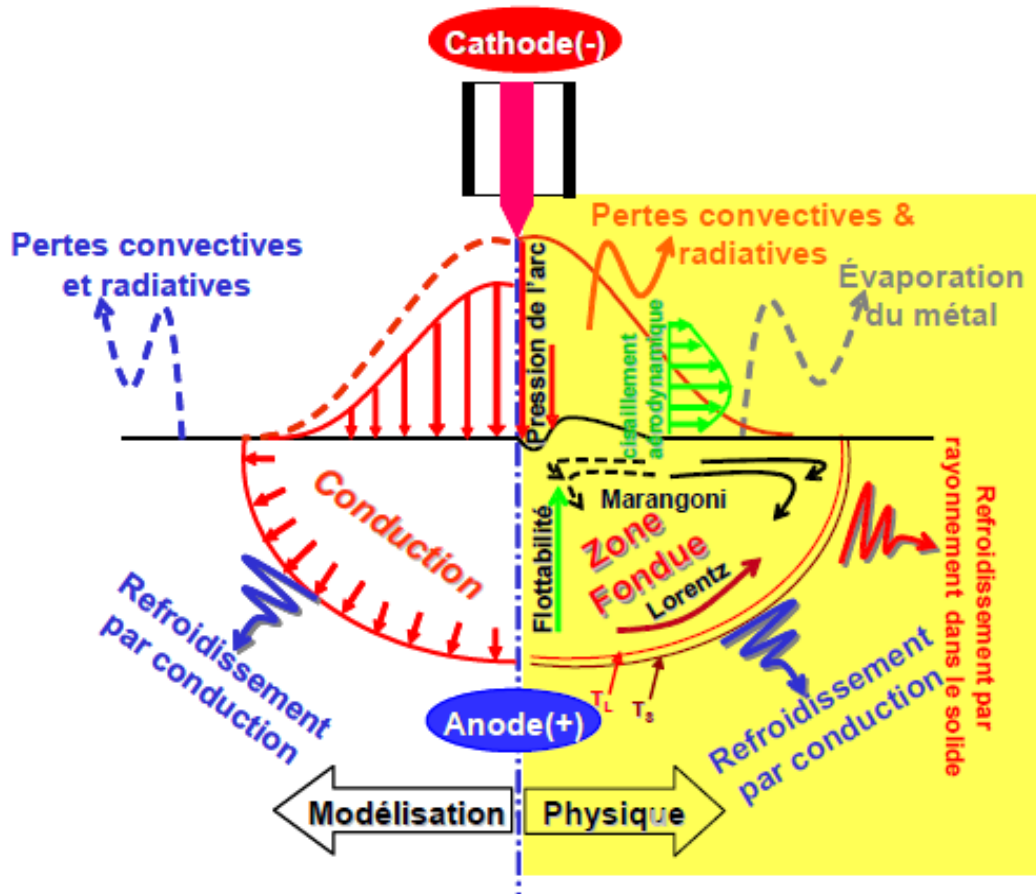


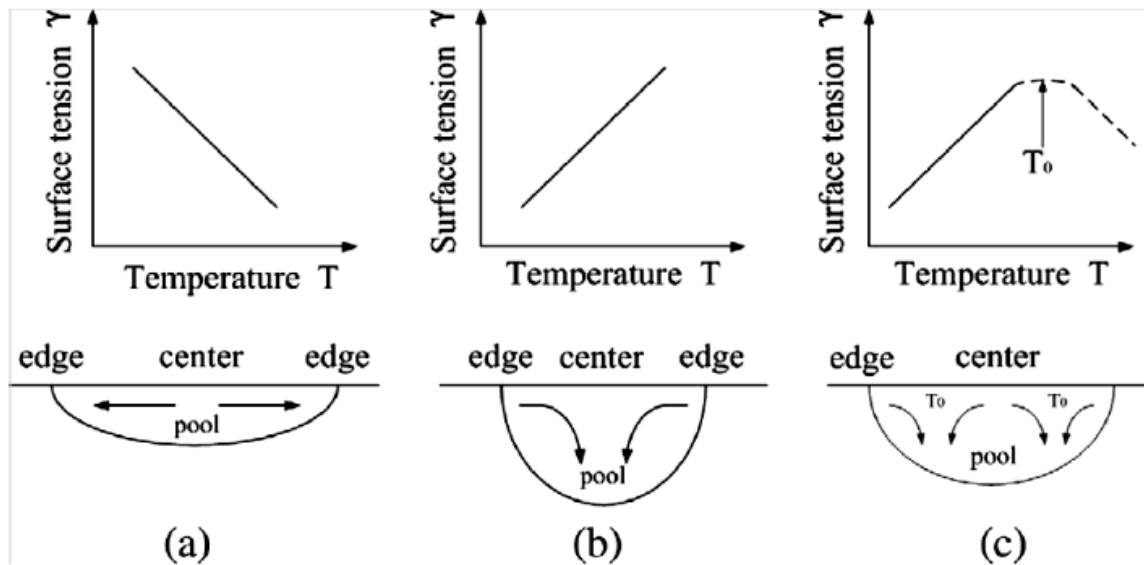
Figure II.8 : les phénomènes thermiques du soudage TIG [18].

De nombreuses études proposent de modéliser ces divers phénomènes, depuis la création de l'arc électrique et du plasma jusqu'aux mouvements fluides de la zone fondue.

### 6.1.1. MOUVEMENTS DE CONVECTION DANS LA ZF :

Le comportement thermodynamique de l'arc conduit à la formation de courants de convection au sein de la zone fondue. Il s'agit de l'effet Marangoni qui dépend à la fois de la tension de surface et de la profondeur du bain fondu. La tension de surface est fonction de la température du liquide mais également de la teneur du bain en éléments tensio-actifs (soufre, oxygène...). D'autre part, le sens des gradients de tension de surface  $\gamma$  détermine le sens d'écoulement du fluide (Figure II-9).





**Figure II-9** : Effets de la tension de surface sur les mouvements de convection dans la zone fondue [18].

En effet, si la température au centre du bain est plus importante que celle en périphérie, cela signifie que  $d\gamma/dT > 0$ , entraînant un mouvement du fluide vers l'intérieur de la ZF. Dans le cas contraire, le sens d'écoulement est inversé (Figure II-9). Il convient également de prendre en compte la gravité et les efforts dus à la dilatation des fluides au sein du liquide.

Le transport de matière engendré par ces courants favorise les transferts de chaleur et limite les gradients thermiques au sein de la zone fondue. Par ailleurs, ce brassage du aux mouvements de convection tend à homogénéiser la composition chimique dans la ZF. On peut donc considérer qu'il existe une interaction établie entre thermique, métallurgie et mécanique des fluides.

### 6.1.2. INFLUENCE DE LA PRESSION D'ARC :

Le centre de la surface du bain liquide est le siège d'un bombardement électronique intense duquel résulte une pression appelée pression d'arc (Figure II-10). Cela entraîne une déformation de la surface libre du bain pouvant influencer sur les courants de convection et donc la forme de la zone fondue



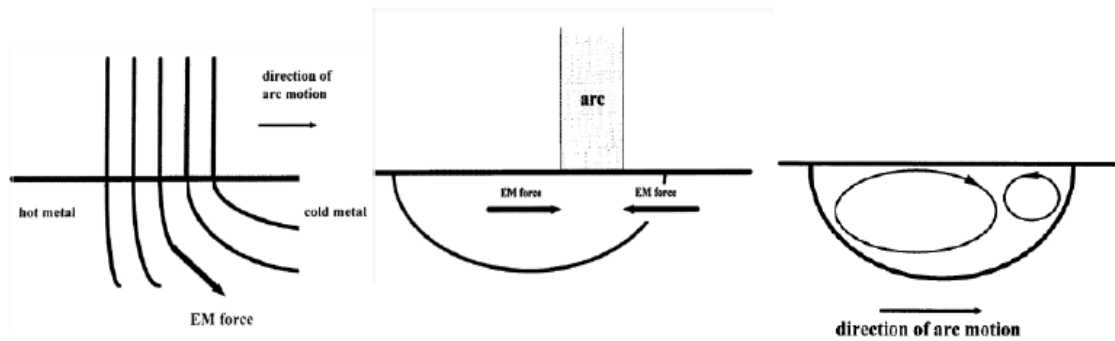
**Figure II-10** : Déformation résiduelle de la surface soumise à la pression d'arc observée lors d'un essai TIG sans déplacement de la torche.

### 6.1.3. PHENOMENES ELECTROMAGNETIQUES :

La forme du bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage qui influence la cinétique de solidification par le contrôle de la vitesse de croissance du front de solidification. Cette vitesse est décrite sur la figure (II .8) et s'exprime par la relation suivante :

$$\vec{F} = \vec{J} \wedge \vec{B}$$

Où  $\vec{F}$  est la force électromagnétique,  $\vec{J}$  la densité de courant et  $\vec{B}$  le champ magnétique. Ces efforts ont une influence sur la forme du bain fondu et sont non négligeables. De nombreux auteurs ont caractérisé leurs effets sur la zone fondue. Par exemple, dans le cas d'un soudage sans vitesse d'avance, les efforts de Lorentz favorisent la pénétration du bain de fusion et rétrécissent sa largeur en surface. Nemchinsky précise que dans le cas d'un déplacement de l'arc, la direction prédominante des efforts électromagnétiques coïncide avec la trajectoire de soudage (Figure II-11).



**Figure II-11** : Influence des forces de Lorentz sur les mouvements fluides dans le bain fondu [18].

Le courant est conduit principalement vers le métal « froid » situé devant la zone fondue au cours du déplacement, dont la conductivité électrique est élevée en comparaison avec celle de la ZF.

Les phénomènes électromagnétiques de Lorentz sont donc à prendre en compte dans le cadre d'une modélisation complète du bain fondu.

## 6.2 .PHENOMENES INFLUENÇANT LA ZONE SOLIDE :

Dans le paragraphe précédent, nous avons évoqué les couplages électromagnétiques – thermique - mécanique des fluides qui interviennent au sein du bain de fusion. On peut également limiter cette analyse aux couplages mécanique - thermique - métallurgie.

Au cours du procédé, l'apport de chaleur provoque la fusion et génère ainsi des modifications de l'état métallurgique du métal de base, par exemple des transformations allotropiques. Le soudage TIG met en jeu des couplages entre thermique, mécanique et métallurgie.

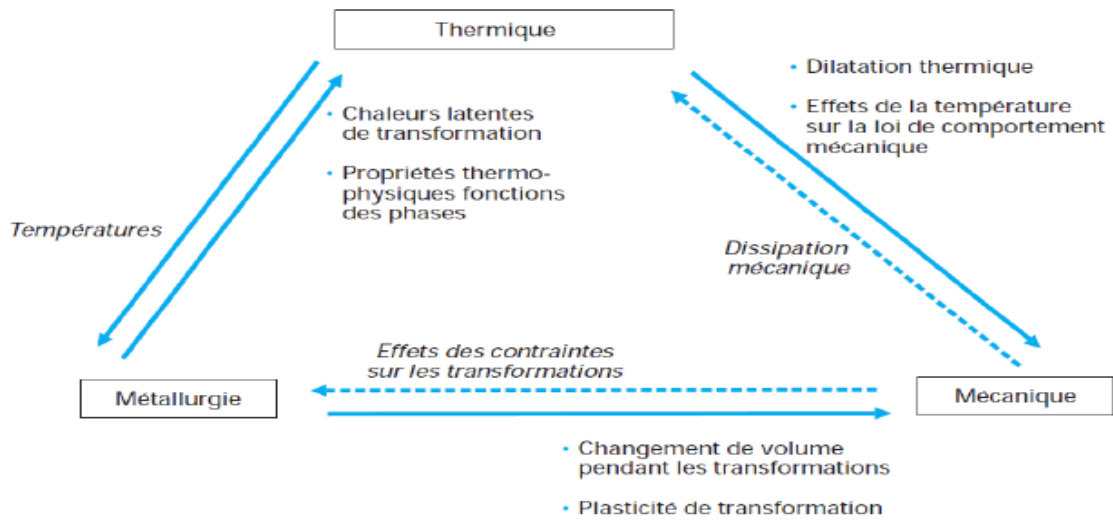


Figure II-12 : Couplages intervenant dans une opération de soudage [13].

### 6.2.1. COUPLAGE THERMOMECHANIQUE :

Les gradients thermiques engendrés par l'opération de soudage provoquent une dilatation locale de l'assemblage. En raison des propriétés mécaniques du matériau en phase liquide, la dilatation de la ZF a peu d'effets mécaniques. En revanche, la zone affectée thermiquement (ZAT), est soumise à des températures élevées et cherche à se dilater. La matière environnante empêche la dilatation de la ZAT engendrant ainsi des contraintes de compression. A l'inverse, lors du refroidissement, elle limite le retrait thermique et génère des contraintes de tension dans la ZAT et la ZF (Figure II-1). Ces déformations thermiques sont à l'origine des contraintes résiduelles liées au procédé de soudage.

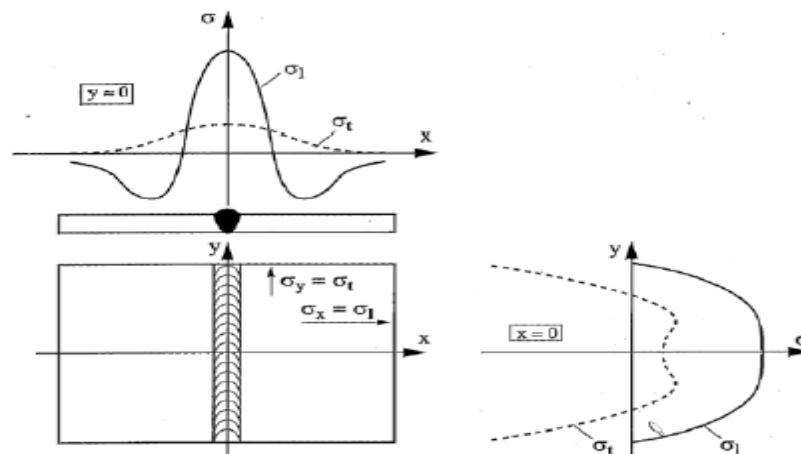
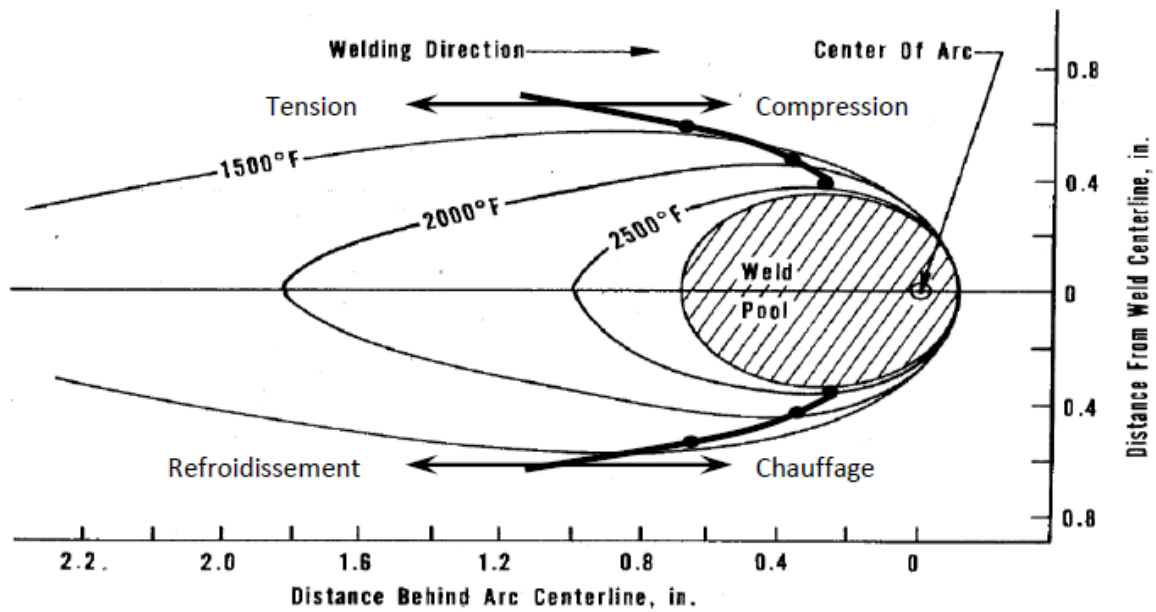


Figure II-13 : Représentation des contraintes résiduelles longitudinales et transversales au sein d'un joint soudé [18].

En considérant les maximums des isothermes représentés ci-dessous (Figure II-22), on peut établir une courbe délimitant les zones en tension et les zones en compression lors de l'avance de la torche. Elles sont identifiées aux zones respectivement soumises au chauffage et au refroidissement [18].



**Figure II-14 :** Limitations des zones en tension et en compression en soudage avec torche mobile.

Les déformations thermiques générées sont parfois irréversibles et s'accompagnent d'une plastification du matériau. L'énergie de déformation est alors dissipée sous forme de chaleur. L'ajout d'un terme source dans l'équation de la chaleur permet de prendre en compte ce phénomène. Cependant, selon Kerrouault, l'élévation de température due à une déformation plastique de 1% sous une contrainte de 400 MPa, en tenant compte de l'hypothèse d'adiabaticité est de l'ordre du degré [11]. Elle est négligeable devant l'apport de chaleur du à la torche [1]. De ce fait, on considère donc un couplage faible entre la thermique et la mécanique.

**6.2.2. COUPLAGE METALLURGIE - MECANIQUE :**

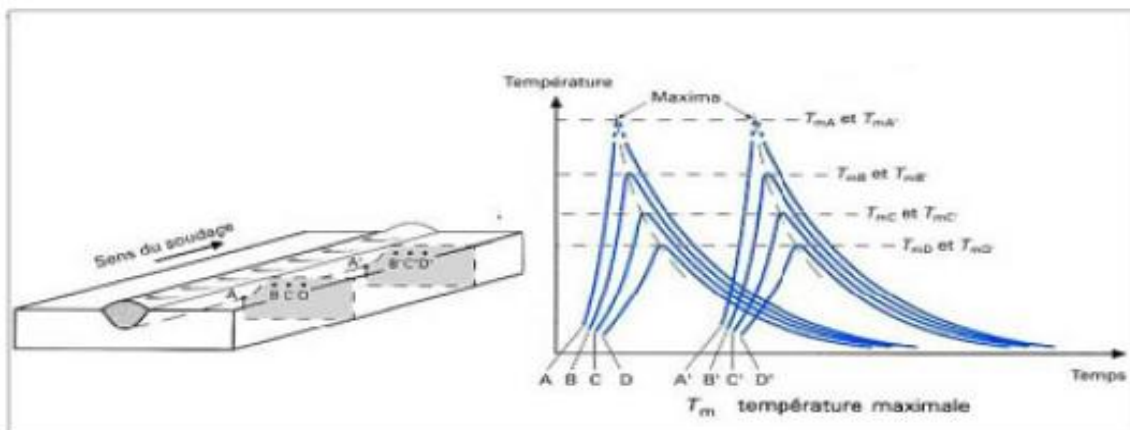
Le chargement thermique localisé en soudage peut provoquer des transformations allotropiques au cours de l'opération et modifier la structure cristalline des métaux.

**6.2.3. COUPLAGE THERMIQUE - METALLURGIE :**

Lors du soudage, une zone localisée de la pièce ou de l'assemblage est soumise à un chargement thermique intense engendrant des phénomènes de changement de phases (fusion et solidification) et conduisant à des modifications des propriétés thermiques du matériau.

**7. Cycles thermiques :**

L'apport localisé et, souvent, brutal de chaleur qui est mis en œuvre pour réaliser une soudure crée un champ thermique dont on peut apprécier simplement les effets en enregistrant les évolutions de la température en fonction du temps, enregistré à partir de chacun d'eux la courbe Température = f (temps), c'est-à-dire la courbe que l'on appelle le cycle thermique de soudage » qui correspond au volume de métal voisin de la soudure chaude.



**Figure II-15 :** schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [9].



## 1. INTRODUCTION:

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

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

## 2. FORMULATION MATHÉMATIQUE :

### 2.1. SOURCE DE CHALEUR :

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

#### a. SOURCE DE CHALEUR PONCTUELLE : [13]

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

$$Q = \eta UI \quad (3.1)$$

Ou :

$\eta$  : Rendement thermique de l'arc

$U$  : Tension de soudage (V)

$I$  : Courant de soudage (A)

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

#### b. SOURCE DE CHALEUR GAUSSIENNE :

On propose deux formulations de la répartition d'énergie :

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



$$q = q_{\max} e^{\left(-\frac{1}{2\sigma^2}r^2\right)} \quad (3.2)$$

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

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

$$q(x, y, z) = \frac{3\sqrt{3}}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (3.3)$$

### C. SOURCE DE CHALEUR EN SEGMENTS DE LIGNES :

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



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

Figure III.1: exemple de modèles de source volumiques [18].

## 2.2. HYPOTHESES PRINCIPALES :

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

- Le régime est transitoire et bidimensionnel  $(x, y, t)$ .
- La direction de soudage s'effectue selon l'axe 'y'.
- Les propriétés thermiques ( $K$  et  $\rho C_p$ ) du matériau sont constantes.
- Considération du changement de phases dans les métaux à souder est négligeable.
- L'écoulement du bain de fusion est négligeable.
- Les déperditions calorifiques par rayonnement à travers les surfaces libres et les frontières de la pièce sont négligeables.
- La source de chaleur est mobile
- Soudage à modéliser sans métal d'apport.

## 2.3. LES CONDITIONS AUX LIMITES :

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

- Au niveau des frontières [16];



Le flux  $q_n$  égale à : 
$$q_n = h_\infty (T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (3.4)$$

Avec

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

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

$T_\infty$  : Température ambiante.

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

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

D'après les hypothèses, le rayonnement à travers les surfaces libres et les frontières de la pièce sont négligeables.

Alors l'équation (3.1) devient comme suit :

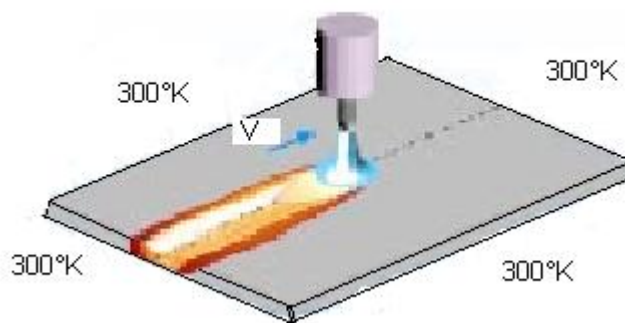
$$q_n = h_\infty (T - T_\infty)$$

➤ Au plan symétrique d'assemblage

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

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

➤ La température initiale du matériau est supposée égale à la température ambiante



$T_0 = 300 K^\circ$ .

**Figure III.2** : Schéma du processus de soudage de deux tôles.



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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K \cdot \partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K \cdot \partial T}{\partial y} \right) + S(x, y, t) \quad (3.5)$$

**Avec :**

T : la température. [K]

t: le temps. [S]

$\rho$  : la densité du matériau à souder. [Kg/m<sup>3</sup>]

Cp : la chaleur spécifique du matériau. [J/Kg.K]

K : la conductivité thermique du matériau [W/m.K]

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

- On a situé deux cas dans les deux régimes (stationnaire, transitoire) pour les conditions aux limites à travers la surface de la tôle  $\Omega_s$ .

❖ 1<sup>ère</sup> cas :

Avec un échange convective et conductive

Tel que :

$$T_\infty = 300 \text{ K}$$

$$h_\infty = 12 \text{ w/m}^2 \text{ K}$$

$$Q = \eta UI$$

$$\eta : 0.82.$$

$$U : 12 \text{ (V)}$$

$$I : 85 \text{ (A)}$$

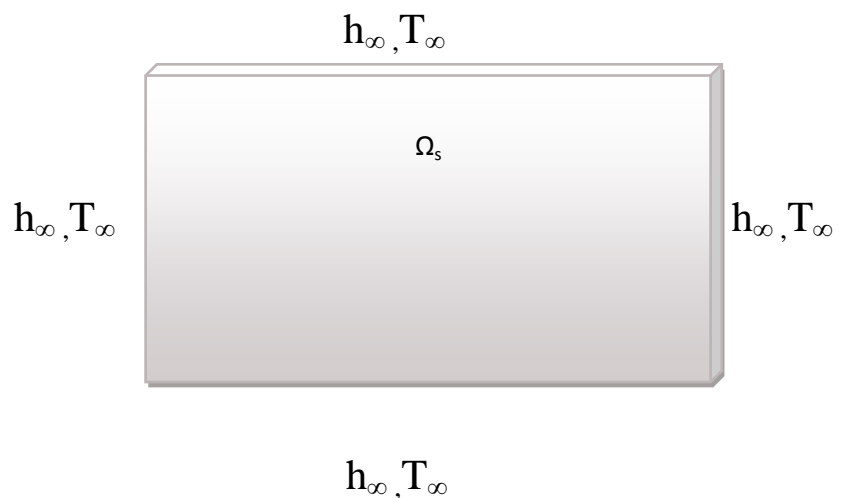


fig III.3: échange thermique convective, conductive.



❖ 2<sup>ème</sup> cas :

Avec un échange conductive

Tel que :

$$T=T_a=300k$$

$$h_{\infty}=0$$

$$Q = \eta UI$$

$$\eta : 0.82 .$$

$$U : 12(V)$$

$$I : 85 (A)$$

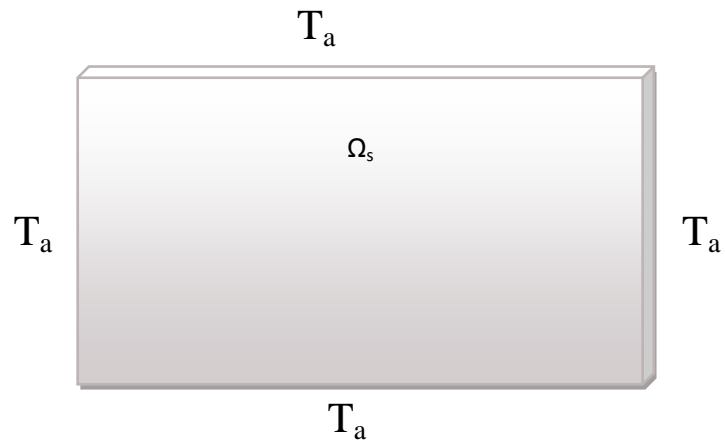


Fig III.4 : échange thermique conductive.

### Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de poser les hypothèses et les équations mathématiques qui régissent le phénomène thermique travers une plaque mince d'alliage d'aluminium 2024, afin de la résoudre par la méthode de simulation numérique avec le logiciel COMSOL qui fait l'objet du prochain chapitre.



## 1. INTRODUCTION :

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

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

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

## 2. RAPPEL SUR LA METHODE DES VOLUMES FINIS :

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

### 2.1 PRINCIPE:

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour



obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

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

La méthode des volumes finis, comporte essentiellement :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle ;
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;
- Le choix d’un schéma représentant la variation de la quantité physique et l’assemblage des diverses équations ;
- Le modèle doit être stable et convergent ;

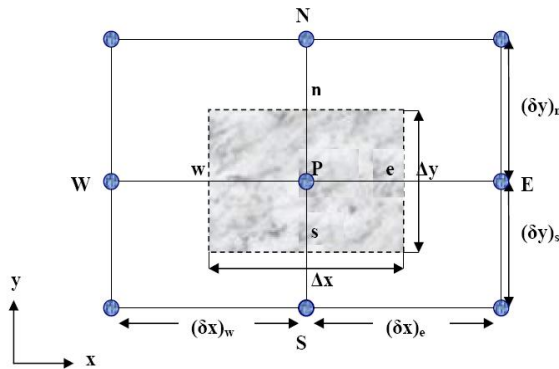


Figure IV.1 : Le volume de contrôle.

Le volume de contrôle est représenté par la figure (IV-1) pour un nœud principal **P**, les points E et W (E = Est, W = Ouest) sont des voisins dans la direction (x) tandis



que N et S (N= Nord, S = Sud) sont ceux dans la direction (y). Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction (x), n et s dans la direction y.

## 2.2 CONDUCTION THERMIQUE INSTATIONNAIRE EN DEUX DIMENSIONS (2D) :

### 2.2.a . FORME GENERALE DE L'EQUATION DISCRETISEE :

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

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

Avec le terme source S donné par :

$$S(T, x, y, t) = S_C + S_p T_p \quad (\text{IV.2})$$

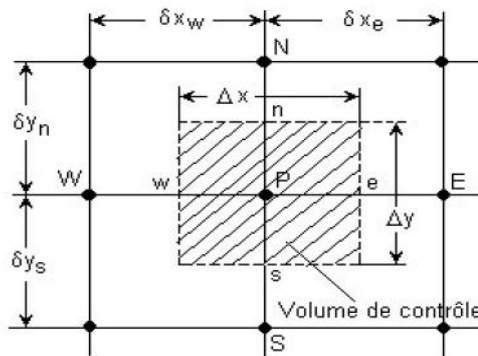


Figure IV.2 : Volume de contrôle en deux dimensions.





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

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

Avec

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

Tel que :

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

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

D'après la référence [26] :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [f \cdot T_p - (1-f) T_p^0] \Delta t \quad (\text{IV.5})$$

En remplaçant les gradients de température on obtient :



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

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

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

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

Et

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{K_n (T_N - T_P)}{(\delta y)_n} - \frac{K_s (T_P - T_S)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x dt \quad (\text{IV.9})$$

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

Et

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S(T, x, y, t) dx dy dt = \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} (S_C + S_P T_P) dx dy dt \quad (\text{IV.11})$$

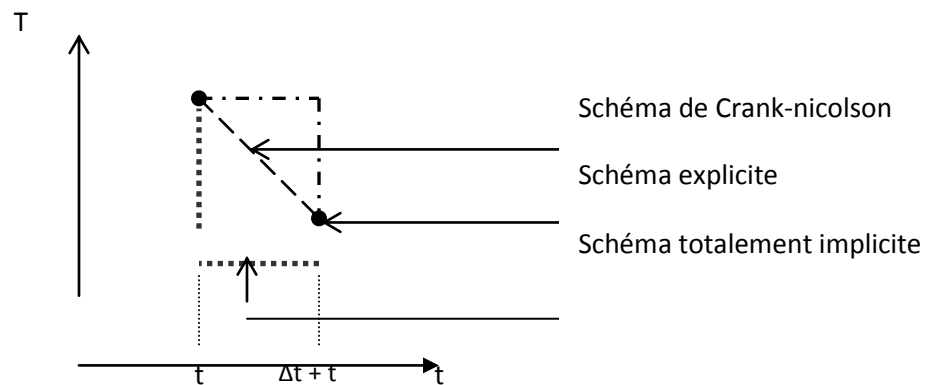


Tel que :

$$\int_w \int_s \int_t^{e, n, t+\Delta t} S_C dx dy dt = S_C \Delta x \Delta y \Delta t \quad (\text{IV.12})$$

$$\int_w \int_s \int_t^{e, n, t+\Delta t} (S_p T_p) dx dy dt = S_p [f T_p + (1-f) T_p^0] \Delta x \Delta y \Delta t \quad (\text{IV.13})$$

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



**Figure IV.3 :** Loi de variation locale de «T» pour la discrétisation en temps

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



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

En utilisant le schéma totalement implicite, on obtient :

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

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

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

Où

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

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



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

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

$$a_P^* = \frac{\rho C_P \Delta X \Delta Y}{\Delta t}$$

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

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^* - S_P \Delta X \Delta Y$$

**REMARQUE :**

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

**2.2. b. CONDITIONS AUX LIMITES :**

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

$$q_n = h_\infty (T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (\text{IV-16})$$

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

$$q_n = h_\infty (T_P^* - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T_P^{*4} - T_\infty^4) \quad (\text{IV-17})$$

Avec :

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

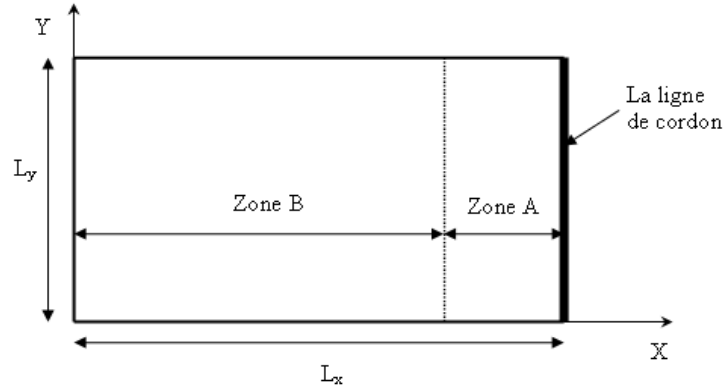


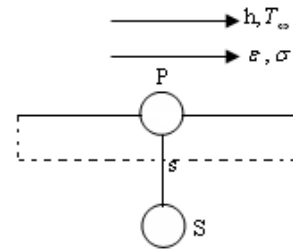
Figure IV.4 : Illustration des zones A et B.

Face supérieure :

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

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

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



On peut écrire :

$$a_p T_p = a_s T_s + b$$

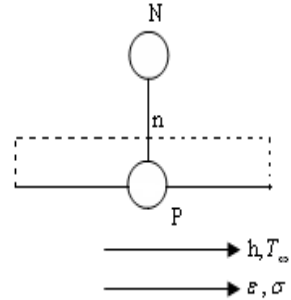
$$a_p = a_s = \frac{k_s}{\Delta Y}$$

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

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



Face inférieure :



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

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

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

On peut écrire :

$$a_P T_P = a_N T_N + b$$

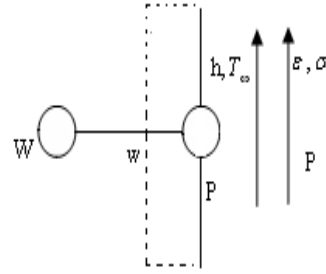
$$a_P = a_N = \frac{k_n}{\Delta Y}$$

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

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



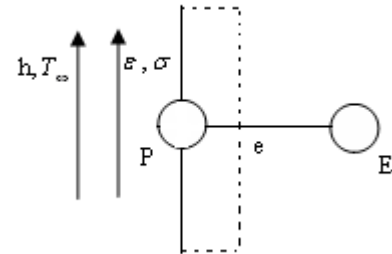
Face droite :



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

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

Face gauche :



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

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

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

On peut écrire :





$$a_p T_p = a_E T_E + b$$

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

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

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

### 3. GENERATION DU MAILLAGE :

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

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

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

### 4. CONDUCTIVITE THERMIQUE VARIABLE:

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



Le flux à l'interface  $q_e$  :

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

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

Une analyse sans terme source donne :

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

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

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

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

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

Le coefficient  $a_E$  représente la conductance de  $P$  et  $E$ , et donnée par la relation :



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

Ou :

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

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

Le flux de chaleur s'exprime alors par :

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

En éliminant «  $T_e$  » on aura :

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

Car :



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

Et

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

Nous aurons alors :

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

### REMARQUE 1 :

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

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

### REMARQUE 2 :

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

1. donner les valeurs estimées de « T » en chaque point du maillage (choix initial).
2. De ces valeurs, seront déduits les différents coefficients des équations discrétisées.



3. Résoudre les équations discrétisées pour avoir «  $T$  ».
4. Avec ces nouvelles valeurs, reprendre l'étape (b) et recommencer jusqu'à ce que les valeurs de «  $T$  » ne varient plus. On dit alors qu'on a atteint la convergence.

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

**REGLE N°1 :** (la consistance).

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

**REGLE N°2 :** (coefficients positifs).

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

**REGLE N°3 :** (pente négative).

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

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



---

**REGLE N°4 :** (somme des coefficients voisins).

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

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

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

$$\frac{d}{dx} \left( K \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad \text{(IV.24)}$$

Où  $K$  est la conductivité thermique,  $T$  la température et  $S$  un terme source représentant la création ou l'absorption d'énergie par unité de volume. Nous appliquons la méthode pour le volume de contrôle construit autour du point  $\mathbf{P}$  (Figure IV.6).

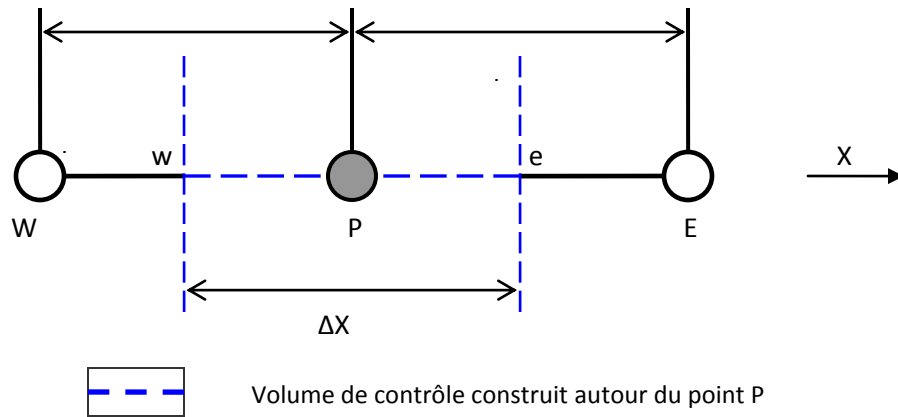


Figure IV.5 : Volume de contrôle dans le cas unidimensionnel.

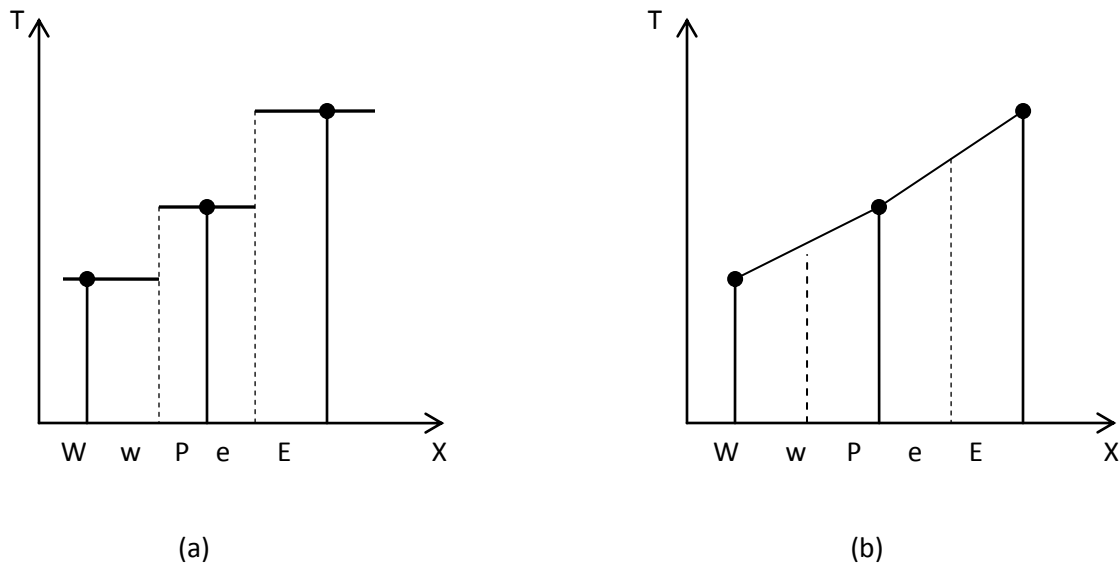
Nous appelons East le premier voisin du point **P** dans la direction des «X» croissant et West le premier voisin dans la direction des «X» décroissants. Les deux traits verticaux en pointillé (bleu) délimitent le volume de contrôle approprié du point **P**. les frontières du volume de contrôle sont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

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

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

**a. Fonction d'interpolation :**

Il est nécessaire de choisir une loi de variation locale de la température  $T$ , pour poursuivre la discrétisation de l'équation (IV.24). Deux lois de variation de  $T$  sont Possible voir (Figure IV.7).



**Figure IV.6:** types de loi de variation pour  $T$ .

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

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

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





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

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

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

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

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

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

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

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

### Conclusion :

Dans ce chapitre, on a démontré dans les détails les principes de modélisation dans les cas thermiques comme la conduction par la méthode de volume fini.

Dans ce qui suit, il nous reste à résoudre numériquement le problème pour déterminer les paramètres thermiques et mécaniques.



### Conclusion générale

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

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

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

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

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



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

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

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

# Bibliographie

- [1] Raymond Loewy, L'Aluminium. Série de technologie ,2009.
- [2] Roger Develay. Données numériques sur l'Aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [3] Institut international de soudure. Recommandation concernant les structures soudées en Aluminium et alliage Al-Mg.2eme édition .1980
- [4] Christian Vargel,. Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur M.4661. Année 2008.
- [5] Roger Develay. Aluminium et alliages d'Aluminium corroyés, propriétés mécaniques. Techniques de l'ingénieur (M 134), 2008.
- [6] Christian.Vargel. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Edition dunod (Paris), 1979.
- [7] Sébastien Morin. Effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur Les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression a380.1. Université du Québec à Chicoutimi. Juillet 2002. Mémoire d'Ingénieur.
- [8] Revue Métallerie 49-Spécial soudage, Classification des alliages d'Aluminium, Avril2003
- [9] <http://www.wikipédia.org/aluminium>, 2009.
- [10] J. R. Kissell, Aluminum and Its Alloys, Handbook of Materials for Product Design, TGB Partnership, Hillsborough, North Carolina, Third Edition McGraw-Hill, Inc 2001 b, P .104
- [11] E.A. Brandes, G.B. Brook, Smithells , Light Metals Handbook, Butterworth-Heinemann (1998) pp. 8-28.
- [12] MF. Ashby DRH. Jones, Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, DUNOD.1991

[13] Mustapha TEMMAR, étude des effets des traitements thermiques sur les propriétés structurales et mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075 t6 soudé par le procédé de soudage TIG, université de Blida, thèse de doctorat janvier 2012.

[15] R. Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur M1290, p 17.

[16] ASSAINI MOULOUD, Y. BENKEDDA & D. H. BASSIR ,étude thermique comparative de deux nuances d'aluminium soudées par le procédé TIG, SNS2008, Paris 27/03/2008.

[17] MAKLOUF HAMID, Modélisation numérique de soudage à l'arc des aciers, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, thèse de doctorat 2008

[18] Walid EL AHMAR, Robustesse de la Simulation Numérique du Soudage TIG de Structures 3D en acier 316L, école doctorale des sciences de l'ingénieur de Lyon , thèse de doctorat le 24 avril 2007.