



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Filière Génie Mécanique**

Spécialité : **Génie des Matériaux**

Par : **LABIDI OUALID & CHABANA AIMEN**

Sujet

SIMULATION THERMIQUE DU BAIN DE FUSION EN SOUDAGE A L'ARC TIG

Présenté et soutenu publiquement, le 12 / 6 / 2022, devant le jury composé de :

Torchane Lazher
Laouadi Bouzid
Khelifa Houcine

prof
MCB
MAA

Président
Rapporteur
Examineur

Promotion : 2021/2022

Abstract

In our research, we were interested in studying welding in general, and studying the thermal behavior caused by TIG welding, indicating the different welding factors.

The first chapter is devoted to the initial concepts of the welding process, its types and the factors affecting it. In the second chapter, we have given a principle for the process of arc welding, electric TIG and its characteristics and the areas adjacent to the welding joint. In the third chapter, we have developed an appropriate mathematical model to represent the heat transfer and then simulate it digitally by several mathematical methods and several mathematical equations.

The last chapter is devoted to simulating the TIG welding process using the Abaqus program and analyzing the obtained results.

الملخص

في بحثنا هذا اهتمنا بدراسة اللحام عامة, ودراسة السلوك الحراري الناجم عن اللحام بالقوس الكهربائي TIG, مبينا بذلك عوامل اللحام المختلفة.

الفصل الاول خصص للمفاهيم الاولية لعملية اللحام وانواعه والعوامل المؤثرة فيه أما في الفصل الثاني فقد أعطينا مبدأ لعملية اللحام بالقوس, الكهربائي TIG وخصائصه والمناطق المجاورة لوصلة اللحام, وفي الفصل الثالث قمنا بوضع نموذج رياضي مناسب لتمثيل النقل الحراري ثم محاكاته رقميا بعدة طرق حسابية وعدة معادلات رياضية .

الفصل الاخير خصص لمحاكاة عملية اللحام TIG بواسطة برنامج "abaqus" وتحليل النتائج المحصل عليها.

Résumé

Dans nos recherches, nous nous sommes intéressés à l'étude du soudage en général, et à l'étude du comportement thermique provoqué par le soudage TIG, en indiquant les différents facteurs de soudage.

Le premier chapitre est consacré aux concepts initiaux du procédé de soudage, ses types et les facteurs qui l'influencent. Dans le deuxième chapitre, nous avons donné un principe pour le procédé de soudage à l'arc, TIG électrique et ses caractéristiques et les zones adjacentes à la Dans le troisième chapitre, nous avons développé un modèle mathématique approprié pour représenter le transfert de chaleur puis le simuler numériquement par plusieurs méthodes mathématiques et plusieurs équations mathématiques.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation du procédé de soudage TIG à l'aide du programme Abaqus et à l'analyse des résultats obtenus.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à adresser notre remerciements les plus chaleureux et notre profonde gratitude à notre encadreur **Dr .Louadi Bouzid** , à l'Université Elarbi Tebessi- Tébessa pour nos avoir proposé le sujet de ce mémoire. C'est grâce à sa grande disponibilité, ses conseils, ses orientations et ses encouragements que nous avons pu mener à bien ce travail.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait **Dr.Tourchane Lazher** ,en étant président du jury et **Dr.Khlifa Houcine** , d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin.

Enfin, Merci à tous mes amis et tous mes collègues sans exception, nous n'oublions pas de remercier toutes les personnes qui nous ont facilité la tâche.

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	
LISTE DES FIGURES, ET TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERAL.....	1
CHAPITRE I / GENERALITE SUR LE SOUDAGE	
1. Introduction	5
2. Généralités	5
3. Définition de soudage	6
4. Soudabilité	8
4.1. Notion de soudabilité.....	8
5. Caractéristiques thermiques et électriques.....	10
5.1. Dilatation et contraction (ou retrait) thermiques	12
5.2. Point de fusion	12
5.3. Conductivité	12
6. Les différents procédés de soudage	12
7. La classification des procédés de soudage:.....	13
8. Principales technologies de soudage	14
9. quelque types de procèdes de soudage.....	15
9.1. Les procédés de soudage de l'énergie thermochimique:.....	15
9.1.1. Soudage oxyacétylénique	15
9.1.1.1. Définition et principe.....	15
9.1.1.2. Détail du matériel de soudage.....	18
9.1.1.3. La flamme neutre du chalumeau.....	19
9.1.2. Soudage Aluminothermique	20
9.2. Les procédés de soudage de l'énergie Electrique.....	20
9.2.1. Soudage à l'arc électrique.....	20
9.2.2. Soudage en atmosphère inerte (T.I.G)	21
9.2.2.1. Principe.....	21
9.2.2.2. Assemblage soudé.....	23
9.2.3. Le soudage MIG-MAG.....	24
9.2.3.1. Définition.....	24
9.2.4. Soudage par résistance électrique	27

9.2.5. Soudage par points	27
9.2.6. Soudage à la molette	27
9.2.7. Soudage en bout par étincelage	28
9.2.8. Soudage par induction	28
9.3. Les procédés de soudage de l'énergie mécanique	28
9.3.1. Soudage par friction	28
9.3.2. Soudage par ultrasons	28
10. La relation entre intensité du courant I, de la tension du courant U et la longueur de l'arc L	29
11. Postes de soudage	32
11.1. Courbe caractéristique d'un poste.....	32
11.2. Sources de courant pour le soudage `à l'arc.....	34
11.3. Amorçage de l'arc électrique.....	34
11.4. Différents courants produits.....	35
11.4.1. Du courant continu	36
11.4.2. Du courant pulsé	36
11.4.3. Du courant alternatif	37
11.5. Électrode enrobée	38
11.5.1. Caractéristiques de l'électrode	38
11.5.2. Âme métallique.....	38
11.5.3. Electrode.....	39
11.5.4. Enrobage.....	39
11.5.5. Différents rôles de l'enrobage.....	40
11.6. Courant électrique.....	41
11.6.1. Polarité directe (négative).....	41
11.6.2. Polarité indirecte (positive).....	41
11.6.3. Principaux défauts rencontrés.....	41
11.7. Arc électrique	42
11.7.1. Propriétés de l'arc de soudage.....	42
11.7.1.1. Le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW.....	42
11.7.1.2. Le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre SAW.....	44
11.8. Caractéristiques électriques de L'ARC de soudage	46

11.9. L'arc électrique en soudage.....	48
--	----

CHAPITRE II /LE SOUDAGE TIG

1. Introduction.....	51
2. Le procédé tungstène INERT GAS (TIG)	51
2.1. Principe du soudage TIG	51
2.2 Procèdes de soudage	52
3. La définition de soudage tungstène INERT GAS (TIG).....	52
3.1. Le tungstène INERT GAS (TIG)	52
3.2. Principe et paramètres technologiques du soudage TIG	54
4. Caractéristiques de la soudure	55
5. Formation du bain de fusion	57
6. Phénomène physiques assoles au soudage TIG	58
6 .1. Phénomènes propres a la zone fondue	58
6.2. Mouvements de convection dans la ZF	60
6.3. Influence de la pression d'ARC	61
6.4. Phénomènes électromagnétiques	61
6.5. Phénomènes influençant la zone solide	62
6.6. Couplage thermomécanique	63
6.7. Couplage métallurgie- mécanique	65
6 .8. Couplage thermique- métallurgie	65
7. Cycles thermiques	65

CHAPITRE III : SIMULATION MATHÉMATIQUE DE SOUDAGE A L'ARC TIG

1. Introduction.....	68
2. La simulation numérique.....	68
2.1. Simulation thermique	68
2.1.1. Equation de la chaleur	68
2.1.2 conditions initiale et conditions aux limites	71
2.1. 3 Système d'équations finales	73
2.2 Apport d'énergie dans une opération du soudage	73
2.2.1 Source de chaleur point	74
2.2.2 Source de chaleur surfacique	74
2.2.3 Source de chaleur volumique.....	74

3 Méthode des éléments finis (MEF).....	75
3.1 Formulation variationnelle.....	75
3.2 Formulation en éléments finis.....	76
3.3 Fonctions d'interpolation.....	78
3.4 Calcul des matrices et vecteurs d'éléments finis.....	79
3.5 Assemblage et stockage des matrices d'éléments finis.....	81
3.6 Génération du maillage.....	82
3.7 Méthode de résolution numérique.....	83
 CHAPITRE IV : SIMULATION DE SOUDAGE SUR ABAQUS	
1. Introduction	86
2. Logiciel ABAQUS.....	86
3. Bases de l'interface d'ABAQUS.....	87
3.1 Organisation de l'interface.....	87
4- Les Modules.....	87
5. simulation de soudage d'acier 304L sur ABAQUS	93
6. ResultatS	95
7. Interprétations des résultats et commentaires.....	99
CONCLUSION GENERAL.....	101
BIBLIONGRAPHIE.....	103

Listes des Symboles et des Abréviations

Symboles	Significations	Unité
a_i	Coefficients de l'équation de température après discrétisation.	
b	Constant de l'équation.	
C_p	Capacité thermique massique à pression constante du matériau.	J/kg /K
E_n	Energie nominale	J/m
E_d	Energie dissipée dans le joint soudé	J/m
E_q	Energie équivalente	J/m
E_p	Épaisseur d'une plaque à soudé	mm
h_∞	Coefficient de transfert par convection	W/m ² /K
I	Intensité de courant de soudage	A
I_{mn}	Intégrale d'inertie.	
K	Conductivité thermique	W/m/K
L	Longueur d'arc électrique.	m
S	Interface du volume de contrôle entre P et S	
E, W	Nœud Est, West	
N, S	Nœud Nord, Sud	
$N_i, N_j, N(x, y)$	Fonction d'interpolation (méthode des éléments finis)	
N	Interface du volume de contrôle entre P et N	
$T; T_\infty$	Température ; Température ambiante	°C ou K
$T_i ; T_f$	Température aux différents points (i) ; Température de fusion	K
T_0	Température initiale d'un matériau	K
T^o	Température calculée à l'itération précédente	K
t	Temps	s
$\Delta t, dt$	Pas temporel	s
σ_x, σ_y	Distance entre deux noeuds voisins dans la direction x, y	m
$\Delta x, \Delta y$	Longueur, Largeur d'un volume de contrôle	m
X, Y	Variables indépendants m	
P_e	Nombre de Peclet	
Q, q_n, q_s	Flux de chaleur par unité de surface (heat flow)	W/m ²
r_b	rayon de l'électrode	m
E, E_y	Module de Young	GPa
S_c, S_p	Coefficients de la linéarisation du terme source S	

v, V_s	Vitesse de déplacement de l'arc (du soudage)	m/s
V_r, V_a	Vitesse de rotation et déplacement de l'outil de soudage FSW	
V_{ij}	Volume de Control (CV) entourant le point P_{ij} ,	
U	Tension d'arc (voltage électrique)	Volt
$K, K_{ij}^{(e)}$	Conductivité thermique ou Matrice de rigidité d'élément.	
$F_i^{(e)}$	Vecteur force équation.	
η	Rendement de l'arc électrique TIG	%.
ε	Émissivité thermique (0.82) ou déformation mécanique.	
ρ	Masse volumique du matériau à souder	kg/m ³
Ω	Domaine de calcul	
Ω_e	Domaine de calcul d'élément.	
Γ, Γ_e	Frontière globale et frontière d'élément	
$(\cdot)_n, (\cdot)_s$	Indices pour les directions (Nord et Sud)	
$(\cdot)_e, (\cdot)_w$	Indices pour les directions (East et West)	

Abréviations d'origine Anglophone / Francophone

BM (MB)	: Base metal (métal de base)
C.C	: Courant Continu
EP/EVP	: Elasto-plastique / élasto-viscoplastique
FE (EBW)	: Soudage par Faisceau d'Electrons (Electron Beam Welding)
MEF (FEM)	: Méthode des éléments finis (Finite element method)
FSW	: Friction Stir Welding
MIG/MAG (GMAW)	: Metal inert/active Gas (Gas Metal Arc Welding)
SMAW	: Shielded metal arc welding
TIG (GTAW)	: Tungsten Inert Gas (Gas Tungsten Arc Welding)
ZAT (HAZ)	: Zone affectée thermiquement (Heat Affected Zone)*
ZF (MZ / FZ)	: Zone de fusion (Melt-pool zone / fusion zone)
ZATM (TMAZ)	: Zone affectée Thermo-mécaniquement (Thermo-mechanically Affected Zone)

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I

- Figure I.1 : Classification de certains procédés de soudage
- Figure I.2 : Soudure autogène bout à bout sur chanfrein en V
- Figure I.3 : Diagramme de Séférian
- Figure I.4 : dilatation et contraction.
- Figure I.5 : la conductivité thermique.
- Figure I.6 : Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie. .
- Figure I.7 : Energie spécifique des différents procédés de soudage. .
- Figure I.8 : poste de soudage oxyacétylénique.
- Figure I.9 : matériel de soudage.
- Figure I.10 : Flamme carburante.
- Figure I.11 : Schéma du procédé de soudage TIG.
- Figure I.12 : Emplois des gaz en soudage TIG.
- Figure I.13 : Schéma d'un assemblage soudé par une simple passe..
- Figure I.14 : Observation métallographique d'un assemblage soudé (procédé TIG) d'un inconel 690 avec métal d'apport (FM52) réalisé au microscope optique
- Figure I.15 Schéma de la structure d'un joint soudé par du soudage multi-passes et soudure multi-passes à l'électrode enrobée en configuration rectiligne sur un acier inoxydable.
- Figure I.16 : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MIG-MAG.
- Figure I.17 : schéma de soudage par points
- Figure I.18 : schéma de soudage à la molette
- Figure I.19 : La relation entre intensité du courant I , de la tension du courant U et la Longueur de l'arc L .
- Figure I.20 : Puissance de l'arc en fonction de courant de soudage
- Figure I.21 : Courbe caractéristique d'un arc Interprétation
- Figure I.22 : Disposition de la caractéristique de l'arc pour trois longueurs
- Figure I.23 : Courbe caractéristique d'un poste de soudage
- Figure I.24 : point de fonctionnement en procédé d'un arc.
- Figure I.25 : Principe de procédé SMAW. .
- Figure I.26 : Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage pulsé.
- Figure I.27 : Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage alternatif.
- Figure I.28 : Constitution d'une électrode enrobée
- Figure I.29 : Électrode enrobée : caractéristiques.
- Figure I.30 : Soudage sous flux en poudre.

Figure I.31 : Caractéristiques tension-courant d'un arc TIG dans l'argon avec trois électrodes différentes.

Figure I.32 : Caractéristiques d'un arc/tungstène/cuivre dans l'argon pour différentes longueurs d'arc.

Figure I.33 : Physique de l'arc.

CHAPITRE II

Figure II.1 Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie.

Figure II.2 : Application et influence de la vitesse de soudage TIG.

Figure II.3 : Description du procédé TIG.

Figure II.4 : Schéma du procédé TIG.

Figure II.5 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure TIG(Coupe transversale).

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

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.

Figure II.9 : Effets de la tension de surface sur les mouvements de convection dans 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.

Figure II.11: Influence des forces de Lorentz sur les mouvements fluides dans le bain fondu.

Figure II.12 : Couplages intervenant dans une opération de soudage.

Figure II.13 : Représentation des contraintes résiduelles longitudinales et transversales ausein d'un joint soudé.

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

Figure II.15 : schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage.

CHAPITRE III

Figure III.1 : Modèle de bain de fusion bi-elliptique.

Figure III.2: a / Schéma du processus de soudage de deux tôles minces,b/Domaine Ω et frontières Γ_a et Γ_b .

Figure III.3 : Discrétisation d'un domaine irrégulier en éléments finis typiques.

Figure III.4 : Équilibre interne entre les différents éléments du domaine et effet de la frontière.

Figure III.5 : Assemblage de deux éléments finis quadrilatères Q4N. b/ EF Q4N quelconque.

CHAPITRE VI

Figure VI.1 : création de la géométrie.

Figure VI.2 : propreté Matériaux et section.

Figure VI.3 : Instance et assemblage.

Figure VI.4 : Création de step.

Figure VI.5 : création des chargements.

Figure VI.6 : Création de maillage.

Figure VI.7 : Lancement de calcul.

Figure VI.8 : Affichage des résultats

Figure VI.9 : La distribution de température de l'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

Figure VI.10 : Température d'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

Figure VI.11 : La distribution de flux de l'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

Figure VI.12 : Le flux d'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

Figure VI.13 : La distribution de température de l'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

Figure VI.14 : Température d'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

Figure VI.15 : La distribution de flux de l'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

Figure VI.16 : Le flux d'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier

Tableau I.2 : point de fusion

Tableau II.1 : Paramètres de soudage.

Tableau IV.1 Composition chimique d'acier 304L

Tableau IV.2 Les propriétés physiques d'acier 304L

Tableau IV.3 Paramètres du procédé de soudage TIG

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Jusqu'à la fin du 19ème siècle, des sections de métal étaient jointes par un processus de chauffage et de martelage appelé le soudage à forge. Aujourd'hui, toute une variété de processus de soudage différents est disponible, de sorte que le soudage est utilisé intensivement comme processus de fabrication servant à joindre des matériaux de nombreuses compositions, formes et tailles.

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

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

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

Mais, il n'en demeure pas moins indispensable de continuer à faire évoluer ces techniques, et surtout, de mieux appréhender l'ensemble des phénomènes, nombreux et complexes, qui interviennent au cours du soudage.

Ainsi, bien que les robots de soudage et autres systèmes de réalisations automatisées soient de plus en plus performants, les soudeurs restent irremplaçables, car seuls capables de s'adapter à l'ensemble des facteurs qui viennent perturber la bonne réalisation d'une soudure. En effet, les systèmes de calculs et de prédiction des paramètres opératoires servent d'aide à la décision mais ne peuvent remplacer l'expérience et la dextérité d'opérateurs manuels.

Le soudage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser des joints soudés grâce à des températures élevées, à de fortes pressions ou aux deux.

Dans notre étude, nous aborderons uniquement les procédés utilisant des hautes températures qui sont les plus fréquemment rencontrés en construction métallique. Il s'agit essentiellement de procédés développant une chaleur intense sur les surfaces à assembler afin d'engendrer une fusion locale. Un métal d'apport est en général ajouté dans le bain de fusion permettant ainsi de relier les deux surfaces à assembler et former ainsi un joint soudé de dimensions et de formes voulues après refroidissement. Le procédé le plus couramment utilisé en construction métallique est l'arc électrique développant une chaleur intense, entretenu entre l'extrémité du fil d'apport et les pièces à assembler.

Dans le présent travail on s'intéresse à la détermination des vecteurs du flux thermique en 2D et leur comportement ainsi que le champ de température, à travers une simulation tridimensionnelle du phénomène de transfert de la chaleur, du problème de soudage TIG. Le soudage concerne les tôles d'acier inoxydable 304L ayant un usage aéronautique. La modélisation de la source de chaleur lors du soudage effectuée par une source gaussienne surfacique mobile de forme bi-elliptique. La méthode des éléments finis tridimensionnels a été utilisée à travers le code ABAQUS pour effectuer les calculs et la simulation du phénomène.

Cette étude comporte 4 chapitres qui sont :

Le premier chapitre, sera consacré à l'étude bibliographique, qui présente un bref rappel sur le procédé de soudage, ces différents types, ces défauts et les caractéristiques mécaniques de l'ensemble soudé.

Deux principaux objectifs sont visés : la caractérisation du matériau et l'analyse des lois de comportement. Le premier objectif consiste à l'identification de tous les paramètres : mécaniques.

Le second chapitre est une approche générale sur le procédé de soudage TIG.

Dans le troisième chapitre on va présenter la modélisation mathématique du transfert thermique lors d'une opération du soudage TIG, tout en tenant compte des conditions aux limites et des hypothèses appropriées.

Dans le quatrième chapitre, on présente la simulation numérique utilisant les éléments finis afin de prédire le comportement global d'un assemblage soudé. Les calculs sont réalisés en 2D, à l'aide du code de calcul **ABAQUS 6.14**. On présente la simulation numérique utilisant les éléments finis afin de prédire le comportement global d'un assemblage soudé. Les calculs sont réalisés en 2D, à l'aide du code de calcul **ABAQUS 6.14**.

Cette simulation en 2D concerne le champ thermique, les cycles et les vecteurs flux thermiques ainsi que la déduction de l'étendue de zones à risques et de la taille du bain de fusion.

A la fin une conclusion générale qui englobe notre travail.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SOUDAGE

1. Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport.

2. Généralités

Comme le montre la Figure I.1, il existe une large variété de procédés de soudure. Cependant, dans le domaine de la Construction Métallique, l'utilisation est limitée à un petit nombre. En effet, pour le soudage des structures en acier, les procédés du soudage manuel à l'arc, du soudage à l'arc avec électrode fusible et le soudage sous flux sont principalement utilisés. Par conséquent, les procédés en gras de la Figure 1 seront présentés ci-après. Toutefois, certains autres procédés sont utilisés pour des applications particulières en Construction Métallique. Par exemple, pour créer des poutres mixtes, les goujons (connecteurs) sont soudés sur la poutre en acier par le « soudage à l'arc des goujons par fusion ». On peut noter que la NF EN ISO 4063 définit la nomenclature pour approximativement 80 procédés et variantes du soudage des métaux [1].

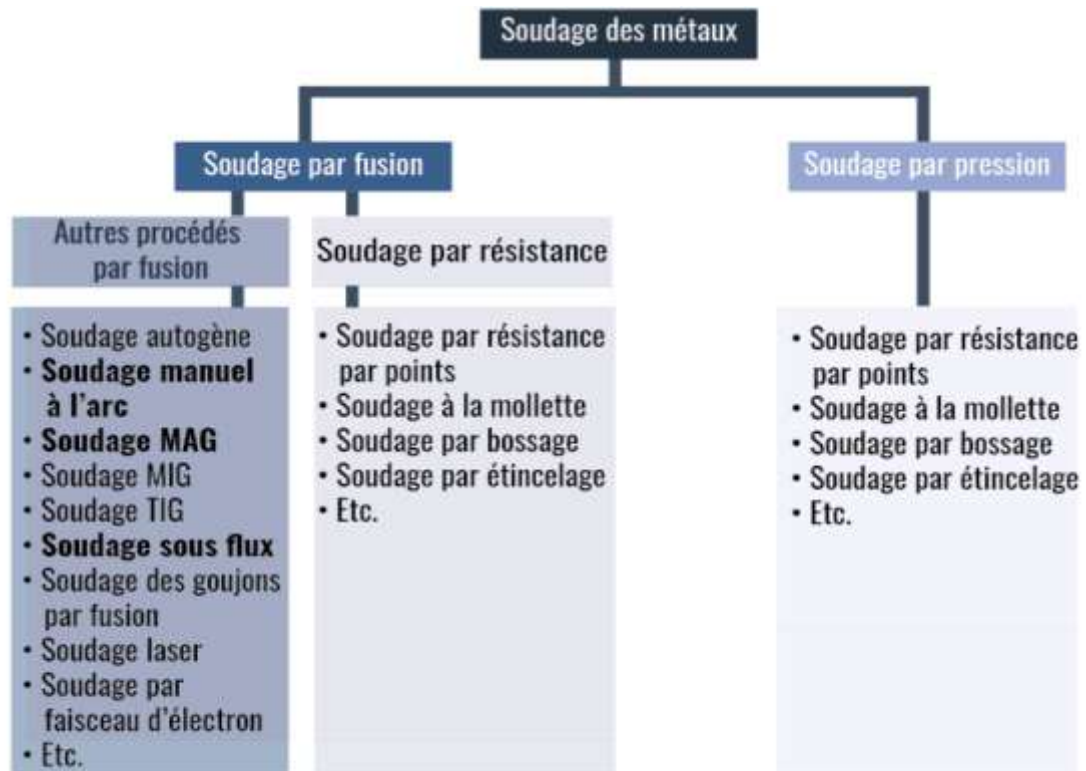


Figure I.1 : Classification de certains procédés de soudage [1].

3. Définition de soudage

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le plus répandu dans la plupart des domaines industriels (transporte, industrie pétrolier et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.).

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, sous l'action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers procédés mis en œuvre (combustion de gaz, arc électriques, pression...). On soude presque la totalité des métaux existants en utilisant plusieurs procédés. Il existe deux cas de soudage :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder

a- Le soudage Autogène

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé, le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport. Donc c'est une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport.

La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler. Les figures I.2 représentent des types de soudures autogènes.

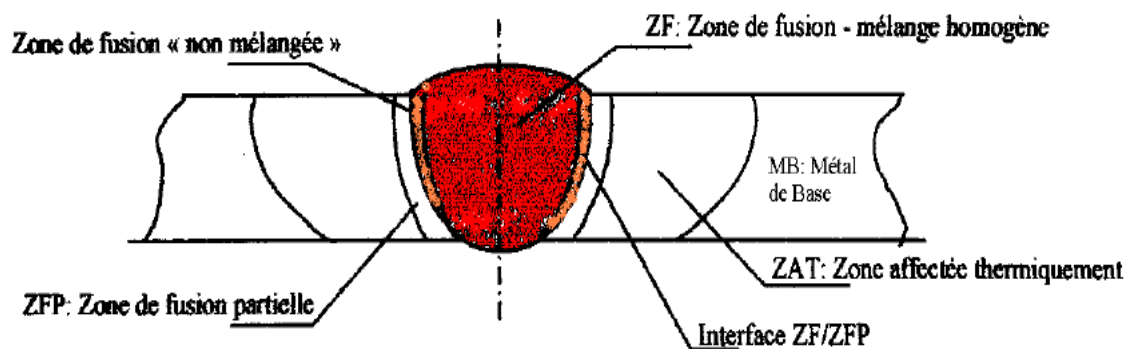


Figure I.2 : Soudure autogène bout à bout sur chanfrein en V[2].

b. Le soudage hétérogène

Le soudage est hétérogène lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler.

Dans ce procédé on distingue :

- **Le brasage fort** : température de fusion du métal > 450°C, avec utilisation du décapant Borax.
- **Le brasage tendre** : température de fusion du métal < 450°C, avec utilisation du décapant Borax.
- **Le soudo-brasage** : réalisé généralement au chalumeau. La température à obtenir varie suivant les métaux à souder :
 - Acier et fonte : 600 à 900°C.

- Cuivre : 850 à 900°C.

- Aluminium 600°C

4. Soudabilité

4.1. Notion de soudabilité

On considère qu'un matériau métallique est soudable, à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé, qui par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leurs présences, satisfont aux propriétés requises, est choisies comme base de jugement .

Dans le cas des aciers, un critère de soudabilité est donné par la valeur de carbone équivalent fixé par l'institut international de soudure. Il est donné par [3]

Calcul du pourcentage de carbone équivalent (%CE)

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + Cr + Mo + \frac{V}{5} + Ni + \frac{Cu}{15}$$

Avec : C_{eq} : Valeur de Carbone équivalent

Et : C : Carbone, Mn : Manganèse, Cr: Chrome, Mo : Molybdène, V: Vanadium, Ni: Nickel, Cu: Cuivre.

Selon la valeur de Carbone équivalent on distingue que :

- $C_{eq} \leq 0.4$, soudage sans précaution.
- $0.4 \leq C_{eq} \leq 0.6$, on effectue un préchauffage entre 100 à 250 C°.
- $C_{eq} \geq 0.6$, soudage difficile.
- $C_{eq} \geq 0.7$, acier non soudable.

Carbone équivalent, CE	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0.4	Excellent	Aucun
0.4 a 0.5	Bon	Aucun De 100 a 300 °C
0.5 a 0.6	Moyen	De 100 a 300 °C De 200 a 400 °C
0.6 a 0.7	Médiocre	De 300 a 400 °C
> 0.7	Mauvais	Non soudable

Tableau I.1 : Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier[3]

Calcul du pourcentage de carbone équivalent composé (CEC)

Ce calcul tient compte de l'épaisseur des pièces à souder, et plus la masse de la pièce est importante, plus il y aura un risque de trempe même pour un acier dont le %CE est faible.

$$\%CEC = \%CE + 0.0254 \times \text{épaisseur (en cm)}$$

Calcul de la température de préchauffage avec la formule de Séférian :

Le préchauffage a le double but de réduire le phénomène de trempe et de réduire les tensions internes. Le préchauffage ne modifie pas la structure du métal de base ou de la soudure [4].

$$T^{\circ}p = 350 \times \sqrt{\%CEC - 0.25}$$

Le diagramme de Séférian permet, à partir du pourcentage de carbone équivalent et de l'épaisseur des pièces à souder, de déterminer la température de préchauffage de l'ensemble à souder.

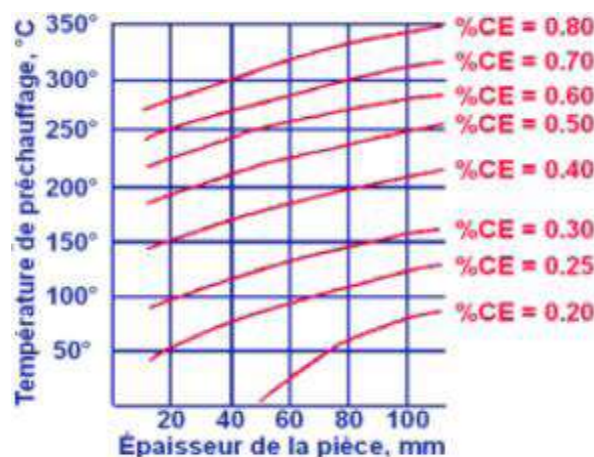


Figure I.3 : Diagramme de Séférian [4].

Il est évident que les éléments à assembler doivent être soudables ! Les procédés actuels ont élargi le domaine des matériaux soudables mais cela a un coût important.

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur.

Trois propriétés thermiques importantes des métaux sont à examiner :

❖ Les niveaux de **dilatation** et de **contraction** (ou retrait) thermiques influent sur la soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque que des fissures ou des déformations apparaissent, est élevé.

❖ Le **point de fusion**, est un facteur déterminant sur la soudabilité d'un métal. Plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.

❖ La **conductivité thermique** est importante pour déterminer le niveau de préchauffage nécessaire et la quantité de chaleur requise pour le soudage. Le cuivre est un très bon conducteur thermique, l'aluminium possède environ la moitié de la conductivité thermique du cuivre, alors que l'acier, seulement un dixième. La **conductivité électrique**, quant à elle, est importante pour les procédés de soudage électrique ; en général, la conductivité électrique diminue avec la température.

5. Caractéristiques thermiques et électriques

En soudage, le comportement d'un matériau sous l'effet de la chaleur permet de déterminer sa soudabilité, car la plupart des procédés de soudage impliquent l'application locale de chaleur. Voyons ici trois propriétés thermiques importantes des métaux [4].

5.1. Dilatation et contraction (ou retrait) thermiques

Lorsqu'un matériau est chauffé, il s'étire un peu ; c'est ce qu'on appelle la dilatation. À l'opposé, il subit un raccourcissement sous l'effet du froid ; c'est la contraction ou le retrait (figure I.4). Le niveau de dilatation et de retrait d'un métal influe sur sa soudabilité. Plus le métal s'étire ou se raccourcit, plus le risque que des fissures ou des déformations apparaissent est élevé. On définit la capacité de dilatation/retrait des métaux par un coefficient thermique. Ainsi, le coefficient thermique de l'aluminium, par exemple, est plus élevé que celui de l'acier. Pour une même variation de température, l'aluminium se dilate presque deux fois plus.

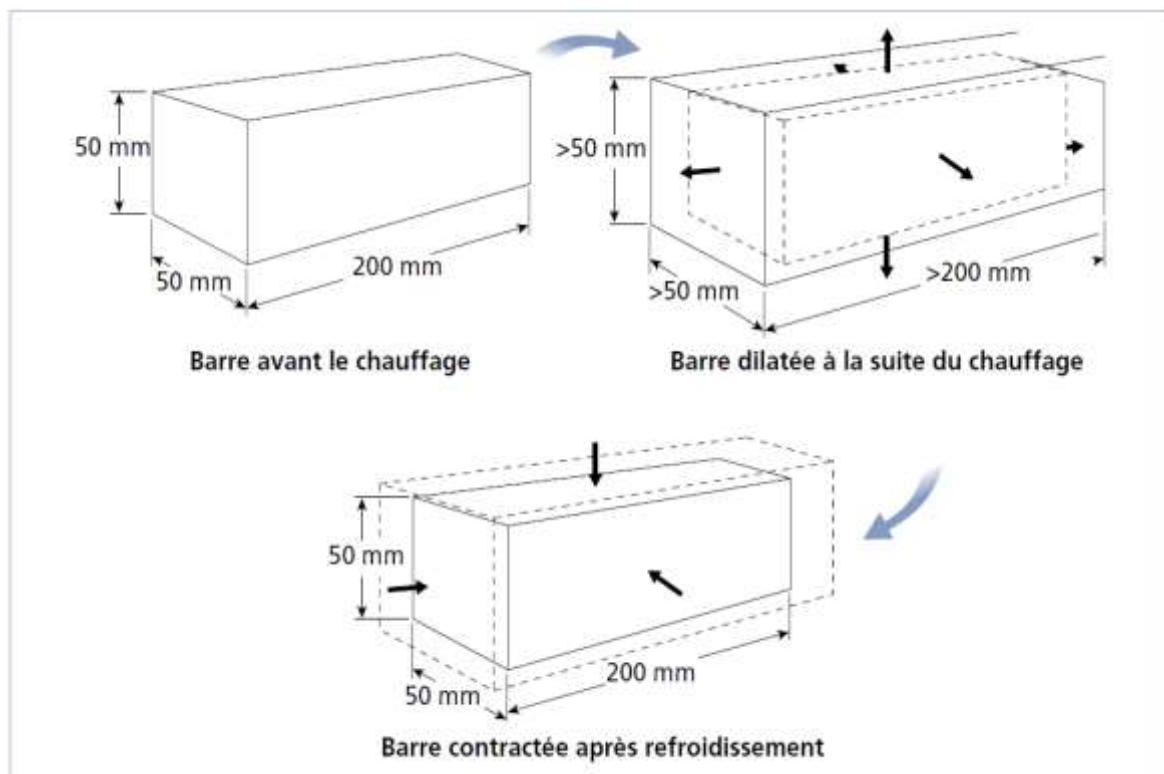


Figure I.4 : dilatation et contraction [4].

5.2. Point de fusion

- ✓ Le point de fusion indique la température à laquelle un métal passe de l'état solide à l'état liquide.
- ✓ Le point de fusion est un facteur important pour déterminer la soudabilité d'un métal. Ainsi, plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée

Matériau	Temperature de fusion en °C	Temperature de fusion en °F
Mercure	-39	-38
Magnésium	650	1202
Aluminium	660	1220
Cuivre	1085	1985
Nickel	1453	2647
Fer	1535	2795
Titane	1660	3020
Alumine (oxyde d'aluminium)	2054	3729

Carbone (diamant)	3550	6422
-------------------	------	------

Tableau I.2 : point de fusion[4].

5.3. Conductivité

La **conductivité thermique** est la capacité d'un matériau à conduire ou à transférer la chaleur (figure I.5). La conductivité thermique est importante parce qu'elle permet de déterminer le niveau de préchauffage nécessaire et la quantité de chaleur requise pour le soudage. Le cuivre est un très bon conducteur thermique. L'aluminium possède environ la moitié de la conductivité thermique du cuivre, alors que l'acier, seulement un dixième.

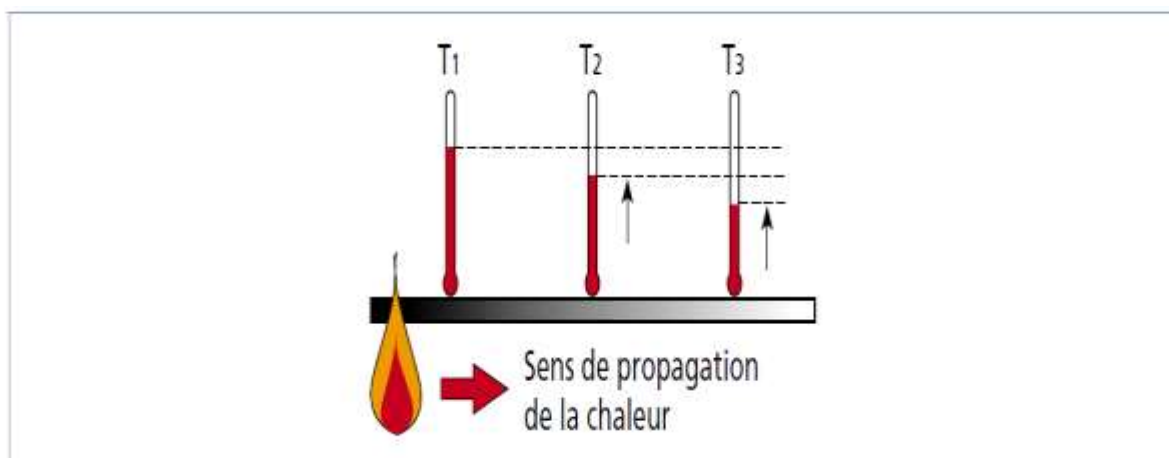


Figure I.5 : la conductivité thermique[4].

La **conductivité électrique**, quant à elle, est définie par la capacité d'un matériau à transmettre l'électricité, d'où son importance lorsqu'on a affaire à des procédés de soudage électriques. En général, la conductivité électrique diminue avec la température.

6. Les différents procédés de soudage

-Le soudage au gaz ou au chalumeau, qui comprend :

- Le soudage oxyacétylénique,
- Le brasage
- Le soudo brasage

- Le soudage à l'arc électrique, dans lequel on décrira :

- Le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée fusible
- Le soudage à l'arc électrique type TIG, Tungstène Inert Gas, avec électrode tungstène réfractaire sous protection gazeuse

➤ Le soudage semi-automatique, avec fil électrode fusible :

Dont nous détaillerons deux procédés, avec fil électrode plein, sous protection gazeuse :

-MIG : Métal Inert Gas, assemblage de pièce de métal autogène

-MAG: Metal Activ Gas, assemblage de métaux alliés (Chrome, manganèse, soufre, nickel, béryllium, aluminium)

7. La classification des procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que:

- Le type d'énergie mise en œuvre.
- Les paramètres physiques (température .pression. Milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

Les procédés de soudage peuvent être classés en fonction des énergies mise en œuvre

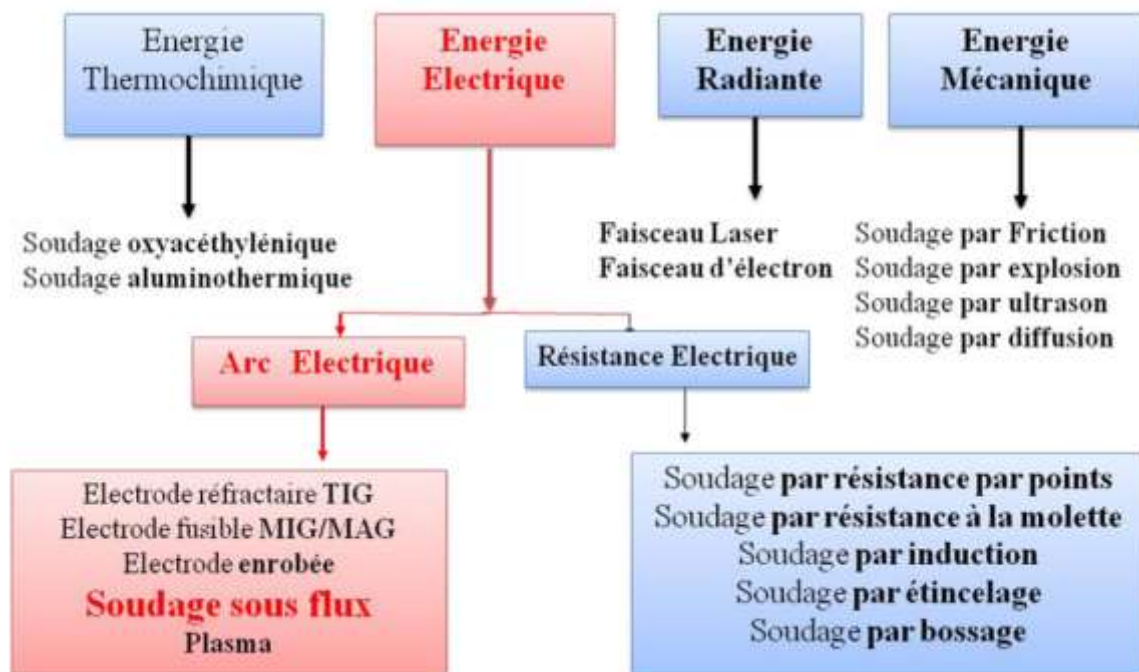


Figure I.6 : Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie[4].

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (Figure I.7). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

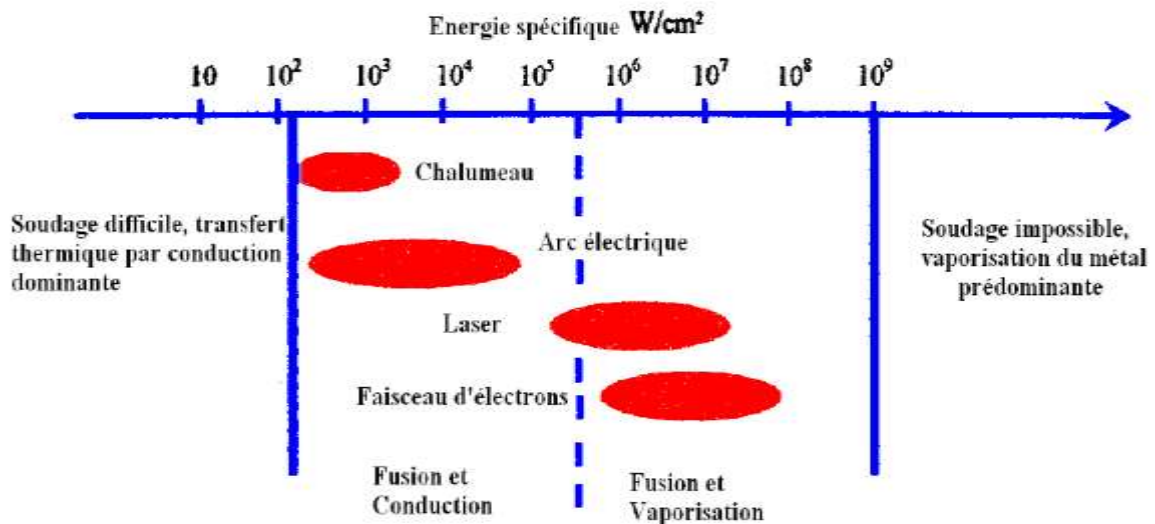


Figure I.7 : Energie spécifique des différents procédés de soudage [4].

8. Principales technologies de soudage

Pour obtenir un joint soudé dans les conditions idéales, il doit y avoir entre les pièces soudées une continuité parfaite des :

- Propriétés mécaniques.
- Métallurgiques.
- Physiques.

Pour unir deux surfaces de façon satisfaisante, celles-ci doivent être exemptes d'oxyde, de films organiques ou de gaz absorbés. (Par exemple l'oxydation de l'aluminium a un effet important sur le point de fusion, T_{fusion} $2054^{\circ}C$ au lieu de T_{fusion} $660^{\circ}C$).

L'exécution de la soudure nécessite quatre conditions :

- ✓ Disposer d'une source d'énergie pour unir les surfaces par pression ou par fusion.
- ✓ Le procédé doit pouvoir éliminer la contamination des deux surfaces à unir.

-
- ✓ Pendant l'opération de soudage, éviter la contamination atmosphérique ou ses effets.
 - ✓ Avoir un contrôle métallurgique de la soudure.

Les procédés de soudage doivent être parfaitement adaptés aux conditions de service exigées d'où la nécessité de choisir judicieusement le procédé ainsi que les conditions dans lesquelles sera exécutée la soudure.

Pour obtenir la continuité atomique entre les deux parties à assembler et si les conditions nécessaires précédentes sont respectées, on peut envisager deux modes de soudage

- Par pression en phase solide.
- En phase liquide.

9. QUELQUE TYPES DE PROCÉDES DE SOUDAGE

9.1. Les procédés de soudage de l'énergie thermo-chimique

9.1.1. Soudage oxyacétylénique

9.1.1.1. Définition et principe

Les deux pièces de métal sont chauffées jusqu'à fusion et le joint, entre elle, est formé de leur propre métal ainsi que du **métal d'apport, sous la forme d'une baguette**. Le métal d'apport qui constituera la soudure est identique au métal de base, la soudure est dite autogène.

La température de chauffe se situe entre 2 850°C et 3 200°C.

Le métal d'apport viendra combler l'espace entre les deux pièces à souder.

Des points de soudure (c'est le pointage) permettront de stabiliser les deux pièces, puis l'espace sera comblé au fur et à mesure par le dépôt du métal d'apport en fusion.

Celui-ci se dépose sous forme d'une goutte. Puis le soudeur imprime un mouvement de rotation avec la flamme du chalumeau.

Ce qui donnera cet aspect caractéristique, avec effet de vague, du cordon de soudure au chalumeau.

Ce type de soudure s'apparente à du «grand art» en soudage et n'est pas à la portée de n'importe quel soudeur.

De fait ce type de soudage n'occupe que la 3^{ème} ou 4^{ème} place parmi les procédés les plus répandus [5].

La chaleur nécessaire est apportée par une flamme obtenue par un mélange de deux gaz, Oxygène et Acétylène.

L'un, l'O₂, le comburant du mélange, a pour rôle d'activer la flamme ; l'autre, l'acétylène, le combustible, celui de la créer.

La densité de l'acétylène est plus faible que l'air. A l'intérieur des bouteilles, il est obtenu à l'aide d'un mélange d'acétone : 1 l d'acétone permet de fournir 24 l d'acétylène.

Ce mélange gazeux est à l'origine de la flamme la plus chaude, 3 200 °C à la pointe du dard. A cette température tous les métaux sont en fusion.

Les deux gaz sont utilisés en basse pression, un détendeur permet l'apport au poste du mélange gazeux à bonne pression.

Dans le soudage, le contact avec l'air ambiant empêche la soudure de se faire, car il entraîne immédiatement une oxydation des métaux à son contact.

C'est pourquoi, le soudage doit toujours se faire sous protection, ici **protection gazeuse**, qui crée une enveloppe gazeuse entre les métaux et l'air ambiant, ennemi du soudeur.

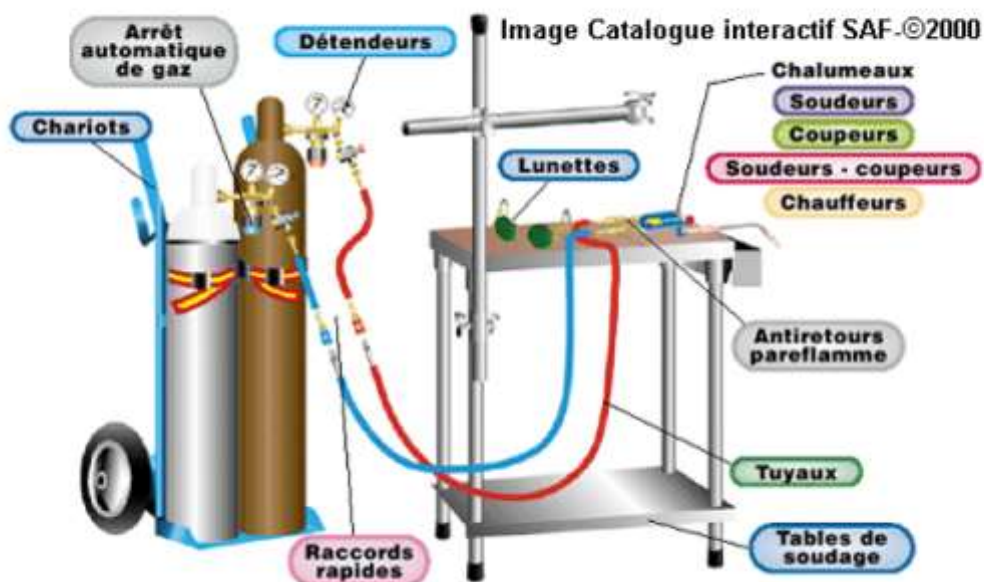


Figure I.8 : poste de soudage oxyacétylénique [5].

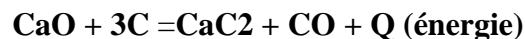
a. L'oxygène (O₂)

L'oxygène est un gaz incolore, inodore et sans saveur .Il est obtenu par l'électrolyse de l'eau ou par liquéfaction de l'air qui en contient 1/5 de son volume .Il est d'une pureté très élevée 99%, car un oxygène moins pur entraine une augmentation de la consommation de l'acétylène.

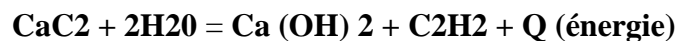
b. L'acétylène (C₂H₂)

L'acétylène (C₂H₂) est un hydrocarbure gazeux, incolore avec un pouvoir calorifique de 14000 calorie /m³ et dont l'odeur est désagréable (odeur d'œil). Il est dangereux au point de vu déflagration il explose en présence d'une décharge électrique ou du feu.

Un mélange d'oxygène et d'acétylène peut exploser à la pression atmosphérique s'il ne contient que très peu d'acétylène industriellement l'acétylène utilise pour le soudage et l'oxycoupage est fabrique à partir du carbure de Calcium (CaC₂), lequel est obtenu a partir d'un mélange de carbone (coke) et de chaux vive à très haute température, la réaction chimique qui s'y produit est la suivante (5) :



Ensuite l'acétylène est obtenu dans des générateurs par de la décomposition chimique du carbone de calcium avec l'eau selon la réaction suivante :

**Avantages**

Les raisons principales qui ont justifié pendant longtemps l'usage étendu de la soudure oxyacétylénique dans la réparation de la carrosserie sont les suivantes:

- Le soudeur contrôle la source de chaleur et la température, indépendamment du contrôle du matériau d'apport.
- Manipuler l'équipement est relativement simple, puisque le processus de travail ne requiert pas de grandes connaissances préalables pour être effectué.
- L'équipement implique un investissement réduit, il est normalement portatif et peut s'utiliser dans d'autres opérations concernant le soudage, comme oxycoupage, soudage fort, dressage, etc., juste en changeant ou en ajoutant un accessoire.

- Elle permet des opérations de soudage dans des zones difficilement accessibles de la carrosserie [6].

Inconvénients

L'usage de la soudure oxyacétylénique présente une série d'inconvénients, parmi lesquels il faut citer:

- La quantité de chaleur apportée à la zone à souder est très élevée, vu que le soudage s'effectue très lentement, ce qui provoque de grandes déformations et des tensions internes dans le matériau.
- L'échauffement et le refroidissement de la pièce sont lents.
- La zone thermiquement concernée est très étendue.
- La teneur en carbone des zones d'atteinte thermique est augmentée, ce qui se traduit par une augmentation de la fragilité et une réduction de l'élasticité des zones proches de l'union.
- La dimension du grain augmente, si bien que les propriétés mécaniques du matériau sont modifiées.
- Vu la quantité de chaleur apportée, la résistance obtenue par le laminage à froid se réduit considérablement.

Ces inconvénients impliquent qu'il ne faut pas utiliser la soudure oxyacétylénique dans la réparation de carrosserie, en la réservant pour des cas isolés et toujours en applications sur des tôles qui ne soient pas d'aciers spéciaux [6].

9.1.1.2. Détail du matériel de soudage

1. Un chalumeau haut ou basse pression
2. Un dispositif de sécurité anti-retour de l'oxygène vers l'acétylène
3. Un manodétendeur d'oxygène avec tuyau ou boyau d'alimentation couleur bleu (Normes)
4. Une bouteille d'oxygène
5. Un manodétendeur d'acétylène avec boyau d'alimentation rouge (Normes)
6. Une bouteille d'acétylène
7. Un jeu de buses calibrées
8. Une paire de lunettes teintées



Figure I.9 : matériel de soudage [6].

9.1.1.3. La flamme neutre du chalumeau

On peut avoir trois types de flammes pour le soudage oxyacétylénique :

- **Flamme neutre ou normale** : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage.

Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse.

- **Flamme oxydante** : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement. Le panache est plus lumineux.
- **Flamme carburante** : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières [7].

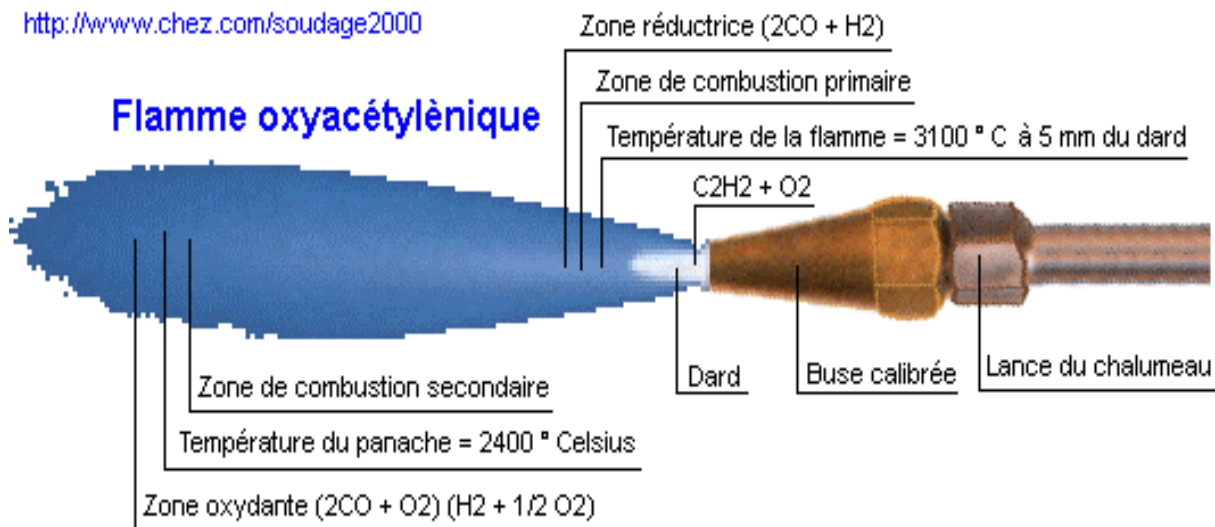


Figure I.10 : Flamme carburante [7].

En pratique

Le soudeur commence par mettre à nu (procédé mécanique ou chimique) le métal des deux pièces à souder.

Puis il allume l'acétylène, il règle le débit pour que la flamme touche juste la buse (en augmentant le débit, la flamme se crée plus en avant)

Ensuite il allume l'oxygène et règle le débit pour ne voir qu'un seul dard (langue à l'intérieur de la flamme) Si le débit est trop fort il y a deux dards. Le dard doit être assez court.

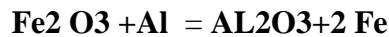
Après quoi il chauffe les deux pièces à souder sur une zone assez large, d'environ 2 cm, en faisant des petits cercles, ceci sans que le dard ne touche le métal. Jusqu'à ce que le métal prenne une couleur rouge cerise, 1 à 2 minutes en fonction de l'épaisseur du métal et de sa température de fusion.

C'est le contrôle visuel qui permet de déterminer que la bonne température est atteinte, la couleur et l'aspect du métal sont observés en permanence par le soudeur.

Celui-ci amène alors la baguette de soudage au niveau de l'espace entre les deux pièces à souder et il commence par les pointer : c'est-à-dire faire des points de soudure avant de les souder complètement ; ceci permet de stabiliser les deux pièces l'une par rapport à l'autre et confère au cordon de soudure une meilleure résistance aux forces de traction et de torsion.

9.1.2. Soudage Aluminothermique

Nous utilisons dans ce cas la chaleur dégagée par la réaction suivante :



Il faut amorcer la réaction soit avec de la poudre, soit avec une résistance électrique. Ce procédé est surtout utilisé pour le soudage de rail de chemin de fer.

9.2. Les procédés de soudage de l'énergie Electrique

9.2.1. Soudage à l'arc électrique

Deux familles dans cette branche d'énergie existent :

- ✓ Soudage à l'arc électrique
- ✓ Soudage par résistance électrique

La source d'énergie est l'arc électrique qui jaillit entre le métal à souder et le métal d'apport qui est électrode. Et dans ce procédé nous pouvons citer.

9.2.2. Soudage en atmosphère inerte (T.I.G)

9.2.2.1. Principe

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungstène Inert Gas) ou, en France, soudage à l'argon. Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas tungstène Arc Welding. La Figure explique le principe de cette technique de soudage. La torche TIG permet d'amorcer un arc électrique entre l'électrode de tungstène et la pièce à souder. La création de cet arc est facilitée par l'utilisation d'un gaz plasmagène, qui permet également d'éviter l'oxydation des régions entrant en fusion pendant le soudage. Une fois l'arc créé, la torche TIG se déplace le long du chanfrein pour réaliser la soudure [8].

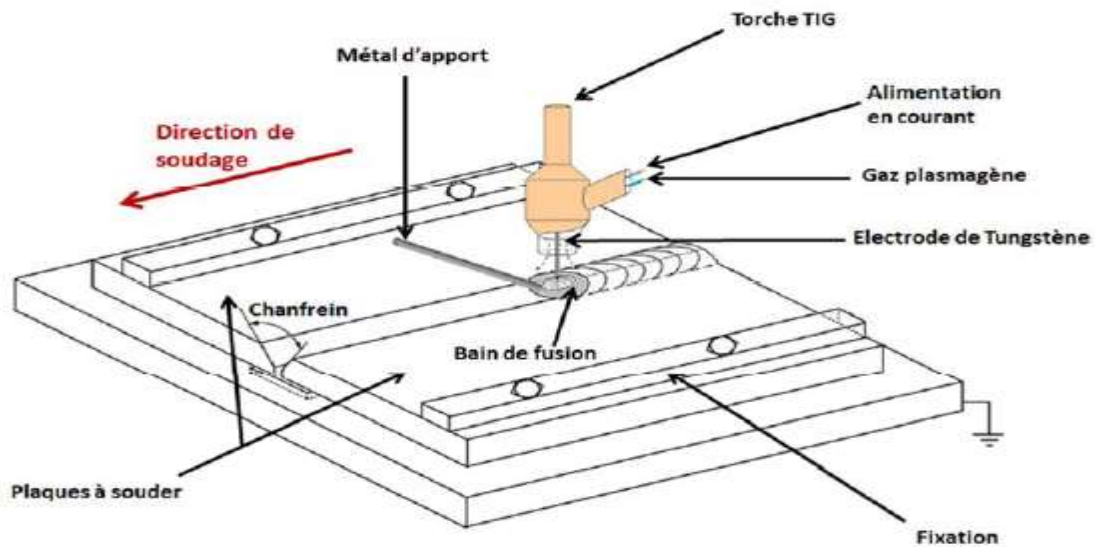


Figure I.11 : Schéma du procédé de soudage TIG [8].

Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. Il est possible de réaliser un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal à souder.

Dans la majorité des applications, la protection gazeuse est assurée par l'argon du fait de son faible coût par rapport à l'hélium. D'autres gaz comme l'azote ou l'hydrogène peuvent être employés pour souder certains alliages (Figure I.11).

Gaz	Qualité du gaz	Application en soudage
Argon	Inerte	Toutes applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon – Hélium (20 % - 80 % ou 50% - 50 %)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que le cas précédent
Argon – Azote (75 % - 25 %)	Réducteur	Alliage de cuivre
Argon – Hydrogène (1 %)	Réducteur	Acier inoxydable

Figure I.11 : Emplois des gaz en soudage TIG [8].

Les débits d'argon sont généralement compris entre 10 et 20 L/min ramené à la pression atmosphérique pour des vitesses de soudage de l'ordre de 5 mm/s.

Les paramètres du procédé de soudage TIG sont les suivants :

- ✓ Intensité et tension d'arc
- ✓ Longueur de l'arc
- ✓ Composition du gaz plasmagène
- ✓ Débit de gaz
- ✓ Vitesse de soudage et vitesse d'approvisionnement en matériau d'apport
- ✓ Inclinaison de la torche par rapport au plan de soudage
- ✓ Température entre les passes (pour un soudage multi-passes)
- ✓ Température du métal de base et du filler avant le soudage
- ✓ Vitesse du métal d'apport
- ✓ Séquence de soudage (soudage direct en ligne droite, soudage symétrique du centre vers les bords...)
- ✓ Position du soudage (soudage à plat, soudage en corniche...)

Les choix de ces paramètres s'avèrent être cruciaux pour obtenir le meilleur assemblage possible. Hong et al ont travaillé sur l'apparition de défauts dans les soudures en fonction des paramètres de soudage dans le cas d'un soudage haute énergie (laser CO₂). Les auteurs montrent que, pour un matériau et une épaisseur donnés, peu de couples vitesse/densité de puissance permettent une soudure sans défaut (fissure, bullage). Ces différents défauts sont engendrés par les conditions de solidification (gradient thermique et vitesse de croissance) générées par le procédé.

9.2.2.2. Assemblage soudé

Les assemblages soudés obtenus par soudage TIG ont une apparence macroscopique schématisée sur la Figure 1. La zone fondue est appelée joint soudé ou cordon de soudure.

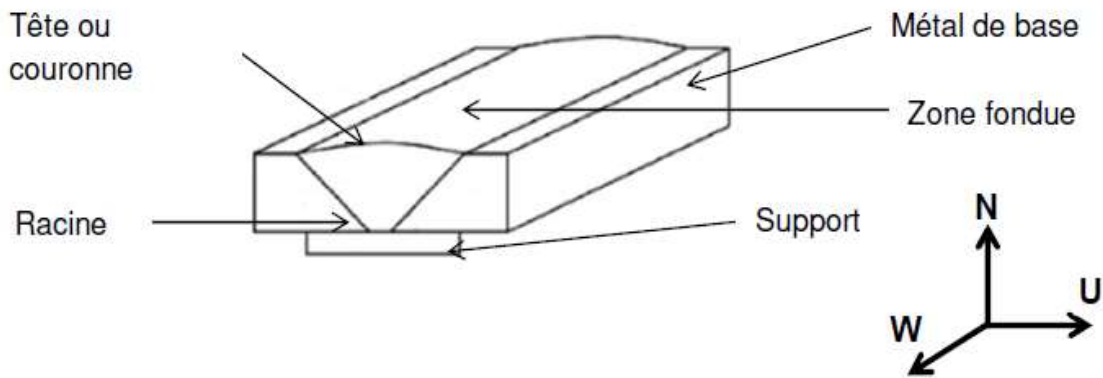


Figure I.12 : Schéma d'un assemblage soudé par une simple passe [8].

L'apport de chaleur provoque des changements métallurgiques dans la région adjacente aux joints soudés : la zone affectée thermiquement ou ZAT, aisément identifiable par la révélation de grains ayant grossi par rapport aux grains du métal de base (Figure I. 13).

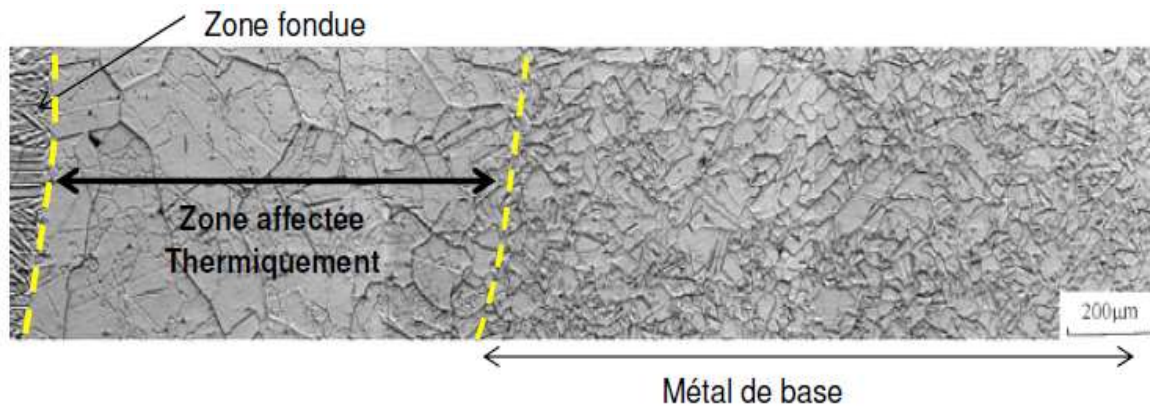


Figure I. 13 : Observation métallographique d'un assemblage soudé (procédé TIG) d'un inconel 690 avec métal d'apport (FM52) réalisée au microscope optique [8].

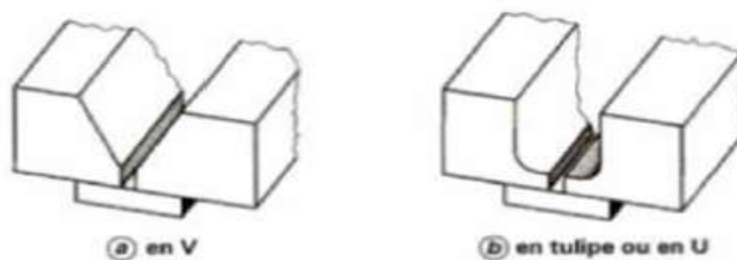


Figure I.14 : Chanfreins pour tôle épaisse [8].

Le soudage TIG est réservé à des soudures de faibles épaisseurs (1 à 3 mm en une passe) mais il est possible de souder des tôles épaisses (supérieur à 10 mm d'épaisseur) en ayant recours à un soudage TIG multi-passes. Pour les alliages de nickel, les pièces à souder avec de telles épaisseurs sont chanfreinées en V avec méplats (6 à 12 mm d'épaisseur) tandis qu'un joint en U (tulipe) est utilisé pour les épaisseurs supérieures à 12 mm (Figure I.14).

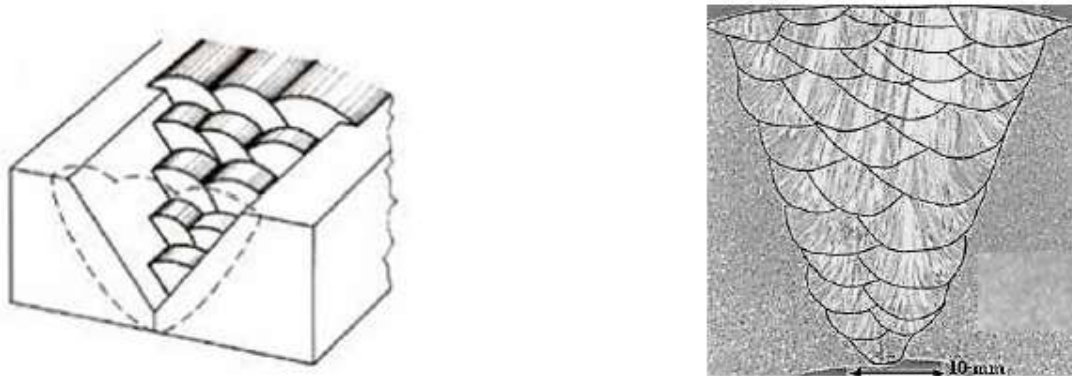


Figure I.15 : Schéma de la structure d'un joint soudé par du soudage multi-passes et soudure multi-passes à l'électrode enrobée en configuration rectiligne sur un acier inoxydable [8].

En soudage multi passes, les caractéristiques du joint soudé sont très complexes comme le montre la Figure. On observe bien des grains colonnaires de plusieurs millimètres de long qui croissent par épitaxie sur plusieurs passes.

Certaines industries devant répondre à des normes strictes, tous les assemblages soudés doivent être contrôlés avant la mise en service. La méthode choisie est une méthode non destructive par propagation d'ondes ultrasonores. Ces tests ont pour objectifs de détecter les défauts (localisation, dimension) et d'évaluer leur sévérité pour garantir l'intégrité de la soudure.

9.2.3. LE SOUDAGE MIG-MAG

9.2.3.1. DEFINITION

Le soudage est un procédé d'assemblage consistant à lier des pièces en effectuant une fusion locale de celles-ci. Cela permet d'assurer, après refroidissement, une continuité physique entre les deux pièces. Simplifiant les assemblages, cette technique offre les

meilleures garanties de résistance mécanique, d'étanchéité et de continuités thermique, électrique et magnétique. Plusieurs matériaux peuvent être soudés, mais le principal domaine d'application du soudage est l'assemblage des métaux.

Pour améliorer la qualité du joint réalisé, en particulier lors du soudage de fortes épaisseurs, on diminue par usinage l'épaisseur des pièces au niveau du raccord. Le creux formé est alors comblé par ajout de métal, également fondu lors de la soudure. Ce métal d'apport est généralement de même nature que celui des pièces à souder : on parle alors de soudure autogène. La vitesse de soudage dépend notamment de la quantité de métal devant être apporté au raccord. Cette quantité, évaluée par le taux de dépôt de métal d'apport sur les pièces à souder, est un paramètre important pour évaluer la productivité du processus. En effet, plus la vitesse de dépôt est élevée et plus il est possible de souder vite, donc plus l'opération est économiquement rentable. Le soudage à l'arc regroupe plusieurs techniques distinctes : le soudage à la baguette (ou à électrode enrobée), le soudage TIG (« tungstène Inert Gas », dans lequel est utilisé une électrode en tungstène théorique avec un métal d'apport extérieur), le soudage MIG-MAG (respectivement « Métal Inert Gas » et « Métal Active Gas », dans lesquels l'électrode est fusible et fournit le métal d'apport), le soudage à l'arc submergé et le soudage plasma. Le premier est typiquement manuel, alors que les autres peuvent être mis en œuvre par un opérateur ou automatisés sur un robot. Toutes ces techniques, sauf le soudage à l'arc submergé, ont en commun la nécessité de prévoir une protection gazeuse. En effet le métal fondu présente une très grande affinité pour les gaz, et la dissolution de gaz atmosphériques dans le cordon peut compromettre la qualité de la soudure réalisée. Si l'effet oxydant de l'oxygène semble évident, c'est surtout l'azote qui représente le principal danger. En effet son adsorption conduit à une altération considérable des qualités du métal. L'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur, est également un polluant important. Dans le cas des soudages MIG et MAG, la protection de la zone fondue est assurée par un gaz délivré en continu et l'arc est établi entre une électrode fusible et les pièces à souder. Dans la littérature, l'acronyme GMAW, pour « Gas Métal Arc Welding », est utilisé pour désigner de façon plus générale les deux procédés. Le schéma de l'extrémité d'une torche MIG-MAG est donné sur la Figure [8].

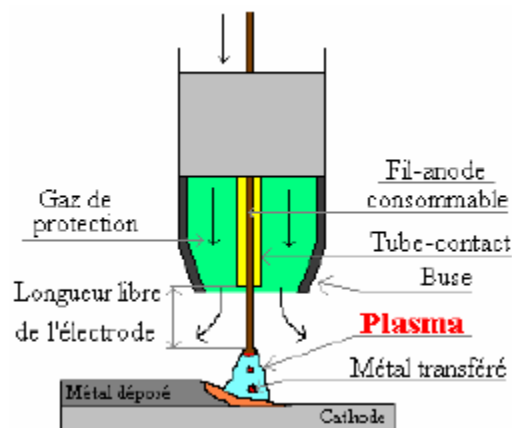


Figure I.16 : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MIG-MAG [8].

Le soudage MIG (« Métal Inert Gas ») utilise un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium comme gaz de protection. En soudage MAG (« Métal Active Gas »), un gaz chimiquement actif au niveau de la soudure est ajouté. Dans ce cas, le gaz le plus fréquemment employé est le dioxyde de carbone CO_2 , que ce soit pures ou mélangé dans différentes proportions avec un gaz inerte. On peut également utiliser d'autres gaz comme l'oxygène O_2 , l'hydrogène H_2 ou encore l'azote N_2 et/ou du monoxyde d'azote NO . Ils sont ajoutés en faible ou très faible quantité pour que l'effet recherché ne soit pas compensé par les inconvénients liés à leur présence. Dans la configuration la plus répandue, c'est le fil-électrode qui constitue l'anode et est relié à la borne positive du générateur par l'intermédiaire d'un tube-contact situé à la base de la torche de soudage, alors que les pièces à souder sont reliées à la masse (cathode).

Les métaux soudables par ce procédé sont l'acier faiblement ou non allié pour le soudage MAG ; les alliages légers (à base d'aluminium...) et cuivreux, ainsi que les aciers inoxydables pour le soudage MIG. Le soudage MAG se caractérise par une plus forte productivité. Les applications sont nombreuses, dans la chaudronnerie, la construction navale, la construction automobile. Le soudage MIG-MAG permet en effet un taux élevé de dépôt de métal, ce qui est particulièrement utile pour le soudage des fortes épaisseurs.

Le fil-électrode, enroulé sur un tambour, est dévidé en continu au cours du soudage. Son diamètre est compris, selon les applications, entre 0,6 mm et 1,6 mm Il est entraîné par des galets tournants dans une gaine débouchant dans la torche à une vitesse constante, de 1 à 20 m/mn. Pour le soudage MIG-MAG classique, le fil est en acier massif. Il est également possible d'employer des fils fourrés qui seront détaillés plus loin.

Différentes formes de courant sont utilisables pour le soudage. Outre le courant continu, qui représente une part importante des applications, il est possible d'utiliser un courant pulsé, pour optimiser le transfert du métal. La polarité peut également être alternée, mais les phases en polarité directe (fil-cathode et pièces-anode) ne doivent pas excéder une certaine limite. En effet, le soudage dans de telles conditions est moins stable. L'inversion de polarité est notamment utilisée dans le cas du soudage de l'aluminium, pour décaper la couche d'oxydes recouvrant la pièce.

9.2.4. Soudage par résistance électrique

Le chauffage nécessaire à l'endroit du soudage est assuré par effet de joule : $Q=I^2R.T$

L'intensité de soudage et le temps de passage jouent donc un grand rôle dans ce procédé. Il est utilisé essentiellement pour assembler des pièces par recouvrement. Et dans ce procédé nous distinguons.

9.2.5. Soudage par points

L'appareil de soudage sont constitués en principe de deux bras portant chacune une électrode, l'un de ces bras est mobile et vient pincer les pièces à souder.

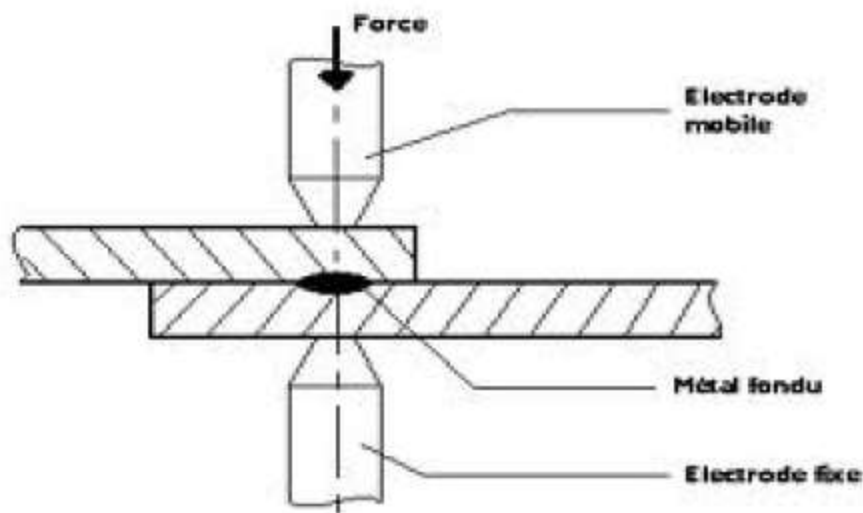


Figure I.17 : schéma de soudage par points [8].

9.2.6. Soudage à la molette

Utilise le même principe que le soudage par point, les électrodes se présentant sous forme de disques rotatifs.

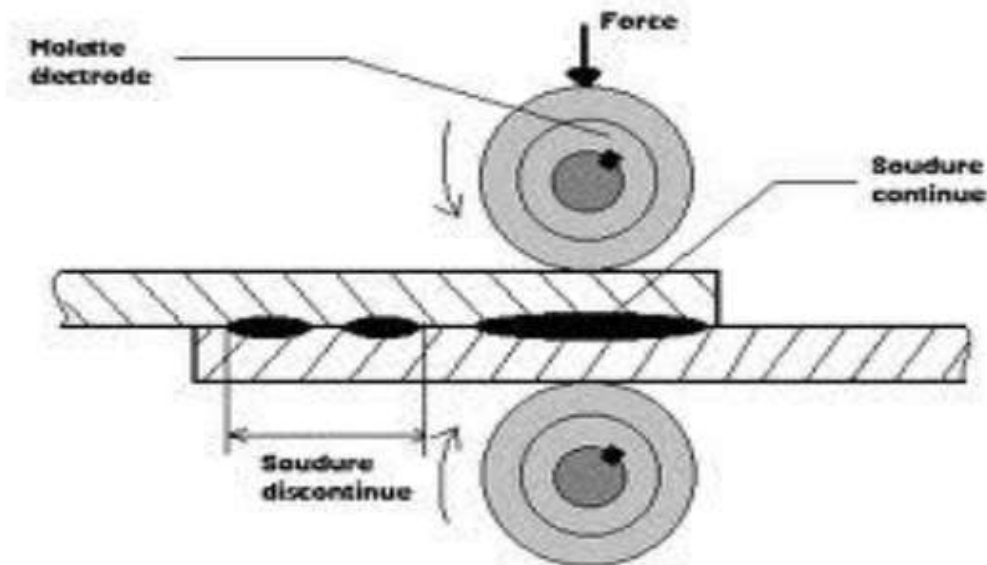


Figure I.18 : schéma de soudage à la molette [8].

9.2.7. Soudage en bout par étincelage

Ce procédé de soudage par résistance est essentiellement utilisé pour le rebutage des tubes, les bords à souder sont rapprochés sous tension et des arcs s'amorcent successivement, provoquant la fusion des bords. Le soudage a lieu alors par forgeage, les deux pièces à souder étant comprimées l'une contre l'autre.

9.2.8. Soudage par induction

La source d'énergie est ici le courant électrique induit dans les pièces à souder par l'application d'un champ magnétique intense des hautes fréquences.

9.3. Les procédés de soudage de l'énergie mécanique

9.3.1. Soudage par friction

Le principe est le suivant : une pièce est fixe, l'autre animée d'un moment de rotation et est appliquée contre la première.

L'énergie thermique dégagée par le frottement permet d'atteindre la température de forgeage.

9.3.2. Soudage par ultrasons

Ce procédé utilise l'énergie de vibration produite par un appareil électroacoustique. Il est utilisé surtout dans l'industrie nucléaire et en électrotechnique pour les soudages des feuilles d'aluminium, de molybdène, de platine etc.... il est très employé pour assembler les matières plastiques.

10. La relation entre intensité du courant I , de la tension du courant U et la longueur de l'arc L

La tension présente dans l'arc électrique dépend de l'intensité du courant et de la résistance. La résistance, à l'intérieur de l'arc, est essentiellement créée par l'air à travers lequel passe le courant. Ainsi, pour un courant donné, plus l'espace n'est grand (c'est-à-dire plus la longueur de l'arc est grande), plus la tension sera élevée.

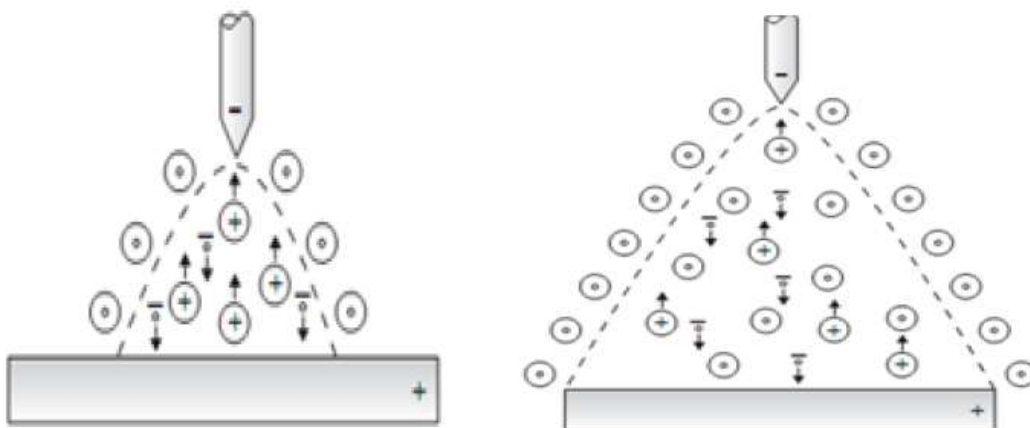


Figure I.19 : La relation entre intensité du courant I , de la tension du courant U et la Longueur de l'arc L [8].

La tension dans l'arc de droite est plus élevée, car la résistance est plus élevée et l'équation illustrant la relation entre la tension (U), l'intensité du courant (I) et la résistance (R) est la suivante :

$$U = R \times I \dots (II.1)$$

Avec cette équation, on peut aussi déduire que si la tension est constante, l'intensité du courant diminuera à mesure que la résistance augmentera.

L'énergie de l'arc dépend également de la tension. L'énergie par unité de temps (c'est adire la puissance) est égale à la tension multipliée par l'intensité du courant :

$$P = U \times I \dots (II.2)$$

Chaleur atteinte dans l'arc dépend donc de ces deux paramètres. Plus l'intensité du courant et la tension seront élevés, plus la chaleur libérée sera grande.

Cette fonction empêche l'électrode de coller à la pièce pendant le soudage, elle augmente le courant durant le soudage lorsque l'arc devient trop court.

Cette caractéristique permet d'avoir un arc très régulier et d'affiner les réglages pour les travaux en position et d'utiliser une plus grande variété d'électrodes (rutile, basique, cellulosique).

La puissance d'arc peut être réglée par un bouton de commande. Au minimum, il en résulte un arc doux et sans projections et au maximum, l'arc électrique sera plus dur et plus pénétrant

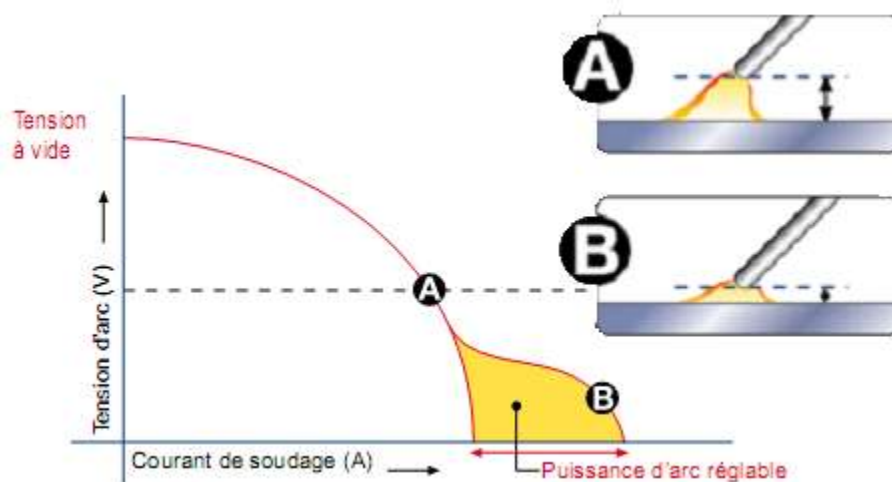


Figure I.20: Puissance de l'arc en fonction de courant de soudage
Courbe caractéristique de l'arc [9].

Si on maintient un entrefer constant entre deux électrodes, et qu'on fait varier le courant I de l'arc on remarque que la variation de la tension U ne suit pas la loi d'Ohm, le graphe $U=f(I)$ n'est pas une droite de pente R, ou R est la résistance de l'arc [9].

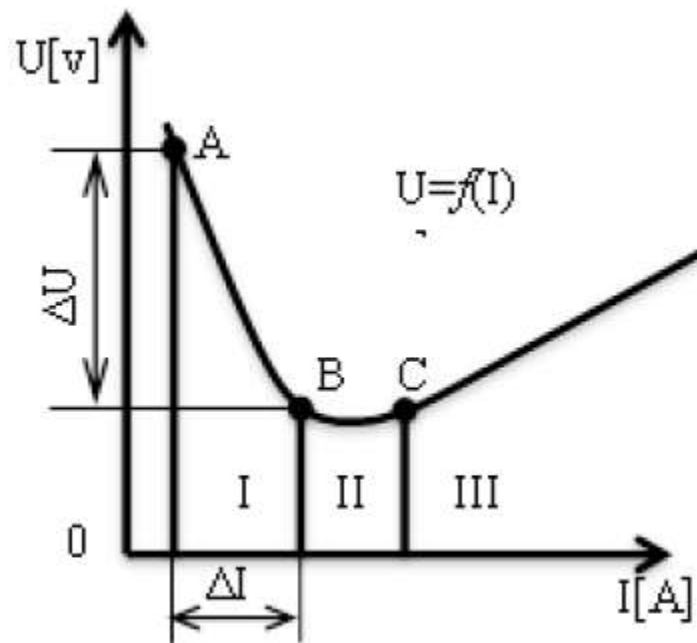


Figure I.21 : Courbe caractéristique d'un arc Interprétation [9].

On peut distinguer trois zones caractéristiques :

Zone I : pour les faibles intensités de courant, les électrodes ne sont pas chauffées aux maximum, on augmente l'intensité de ΔI , il s'ensuit une élévation de la température, ce qui facilite l'émission des électrons et diminue la différence de potentielle nécessaire pour l'émission cathodique.

Zone II : de B à C la diminution de la résistance de l'arc est moins rapide, le produit $U=R I$ est presque invariable.

Zone III : à partir du point C, l'émission des électrons et l'ionisation des gaz ne peuvent plus augmenter d'avantage, le pouvoir émissif de la cathode atteint son maximum, la résistance de l'arc devient pratiquement constante et la relation $U= f(I)$ est presque linéaire.

Si on écarte les électrodes plus ou moins c'est-à-dire on fait varier la longueur de l'arc on obtient une série de courbes approximativement parallèles : figure.

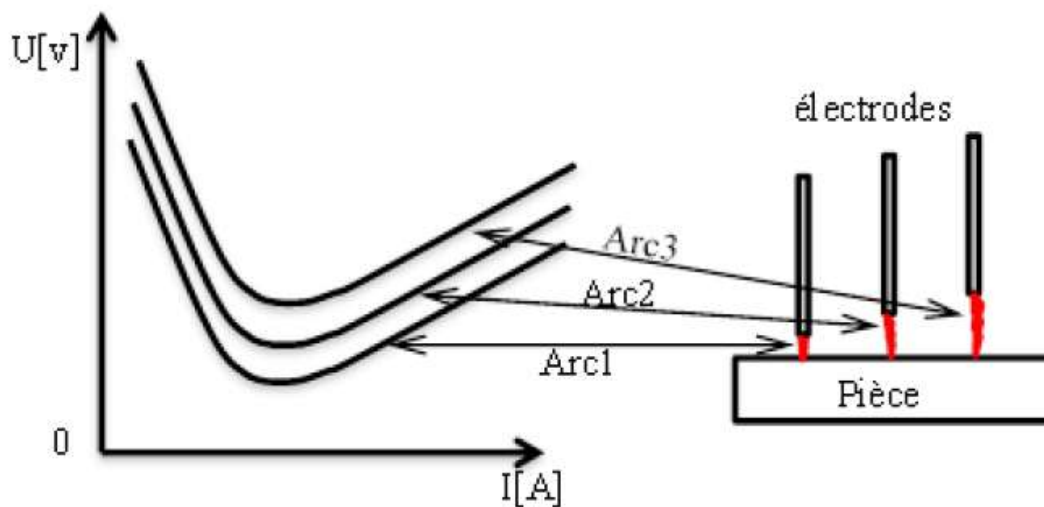


Figure I.22 : Disposition de la caractéristique de l'arc pour trois longueurs [9].

11. Postes de soudage

Un poste de soudage est un appareil électrique qui se compose principalement d'un bobinage de cuivre dans lequel circule un courant électrique. Au passage de ce courant est généré un courant induit dans un bobinage secondaire. En faisant varier le nombre de spires du bobinage primaire on admet un réglage de l'intensité au secondaire. A la sortie du poste on peut compter deux câbles : l'un relié par une pince à la table de soudage ou à la pièce à souder, l'autre équipé d'une pince porte électrode.

Les postes de soudage sont des appareils qui permettent de transformer le courant du réseau (tension élevée et intensité de courant faible) en courant de soudage (tension faible et intensité élevée), qui doit être stable et offre la possibilité de fusionner l'électrode[9].

11.1. Courbe caractéristique d'un poste

Un poste de soudage est caractérisé par:

- la tension à vide U_0 (correspondant à une intensité nulle);

$40 v \leq U_0 \leq 100 v$. Mesurée sur le poste lorsqu'il ne débite pas, U_0 doit être supérieure à la tension d'amorçage.

- Intensité du court-circuit I_{cc} ($U=0$); l'électrode est en contact avec la pièce.
- Intensité de soudage I_s définissant la courbe plongeante. Plus elle sera plongeante, plus faible sera la variation de l'intensité ΔI provoquée par une variation de la longueur de l'arc et plus grande sera la stabilité de l'arc;

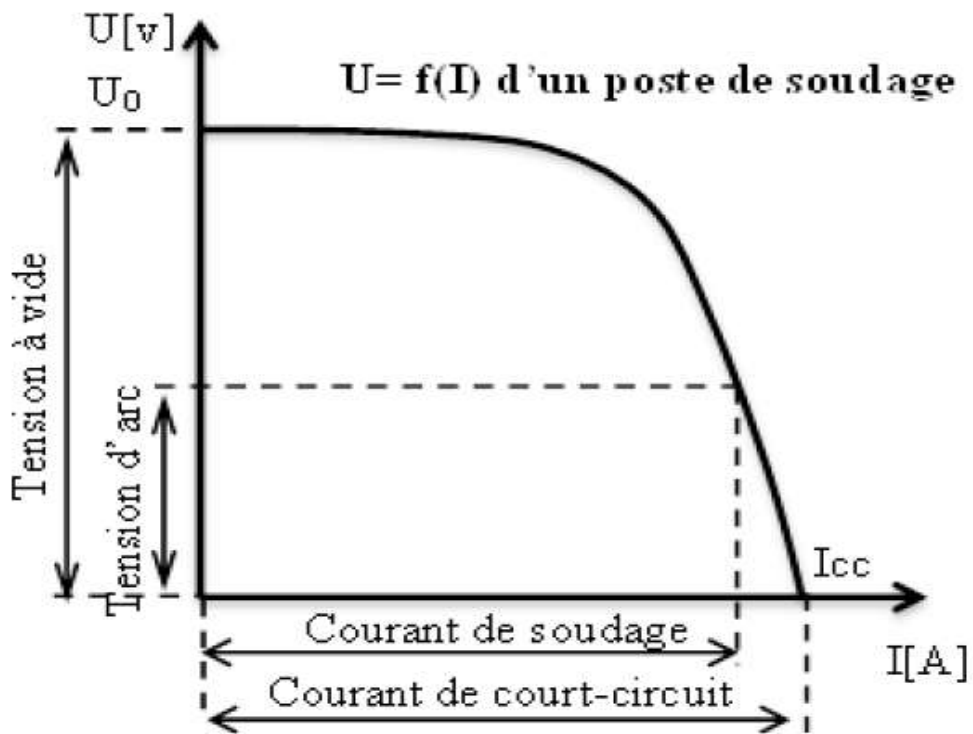


Figure I.23 : Courbe caractéristique d'un poste de soudage [9].

Tous les postes de soudage avec les électrodes enrobées ont les caractéristiques tombantes ou verticales. On obtient le point de fonctionnement à l'intersection des deux courbes.

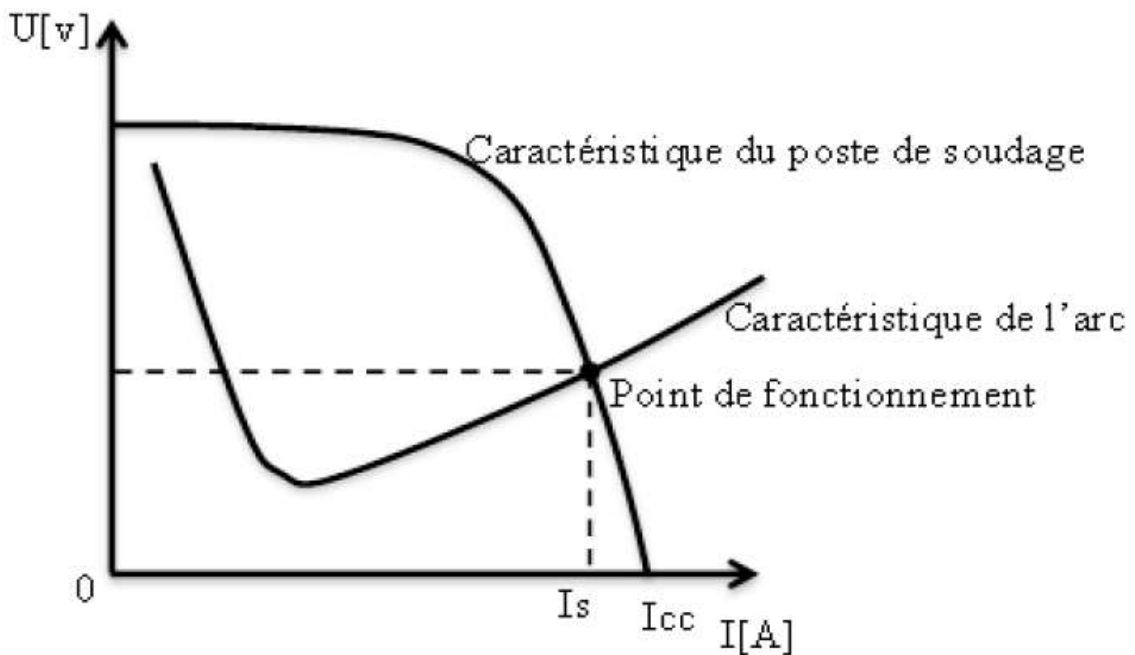


Figure I.24 : point de fonctionnement en procédé d'un arc [9].

11.2. Sources de courant pour le soudage à l'arc

Les sources de courant récentes pour le soudage à l'arc sont de technologie onduleur. Elles ont pour avantages d'être moins encombrantes, plus légères et surtout multi-procédés (Electrode enrobée, GTAW & GMAW). Afin de répondre à la demande de la production pour de nombreux matériaux, les fabricants de postes à souder, ont dû imaginer différents types de courants. C'est d'ailleurs, entre autres, pour cet objectif de soudabilité de matériaux de plus en plus complexes métallurgiquement, que la course aux développements de nouvelles sources de courant, toujours plus performantes, reste un défi majeur [10].

11.3. Amorçage de l'arc électrique

L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.

Le fait de porter deux électrodes à un potentiel différent et faire le contact, le courant passe, mais s'il y a un mauvais contact la résistance est grande d'où une élévation de la température par effet joule : c'est l'amorçage, si ces électrodes sont écartées légèrement le courant passe toujours et il apparaît une lumière éblouissante c'est l'arc électrique.

Les électrodes émettent des électrons, si ces électrons sont animés d'une énergie suffisante, ils excitent l'(es) atome(s) du gaz rencontré, un ou plusieurs électrons de cet atome quittent leurs orbites et se rapprochent du centre de ce dernier (l'atome), ces électrons reviennent ensuite à leur niveau d'énergie en émettant des photons (lumière). Pour une énergie encore plus intense l'électron provenant de l'électrode arrache un électron de l'atome, et à la place de l'atome il y a un ion positif et un électron négatif, le gaz traversé est ionisé « on dit que l'arc ionise le gaz qu'il traverse ». Le haut pouvoir calorifique de l'arc fait augmenter la température et permet la fusion du métal, c'est la soudure.

En soudure le métal passe de l'âme de l'électrode jusqu'au bain de fusion par gouttes, ces gouttes sont plus ou moins fines suivant la nature de l'âme et la nature de l'enrobage, la finesse des gouttes croît avec l'intensité du courant de soudage, la pénétration croît avec le diamètre de l'électrode et l'intensité du courant, le principe du procédé SMAW est illustré par la figure.

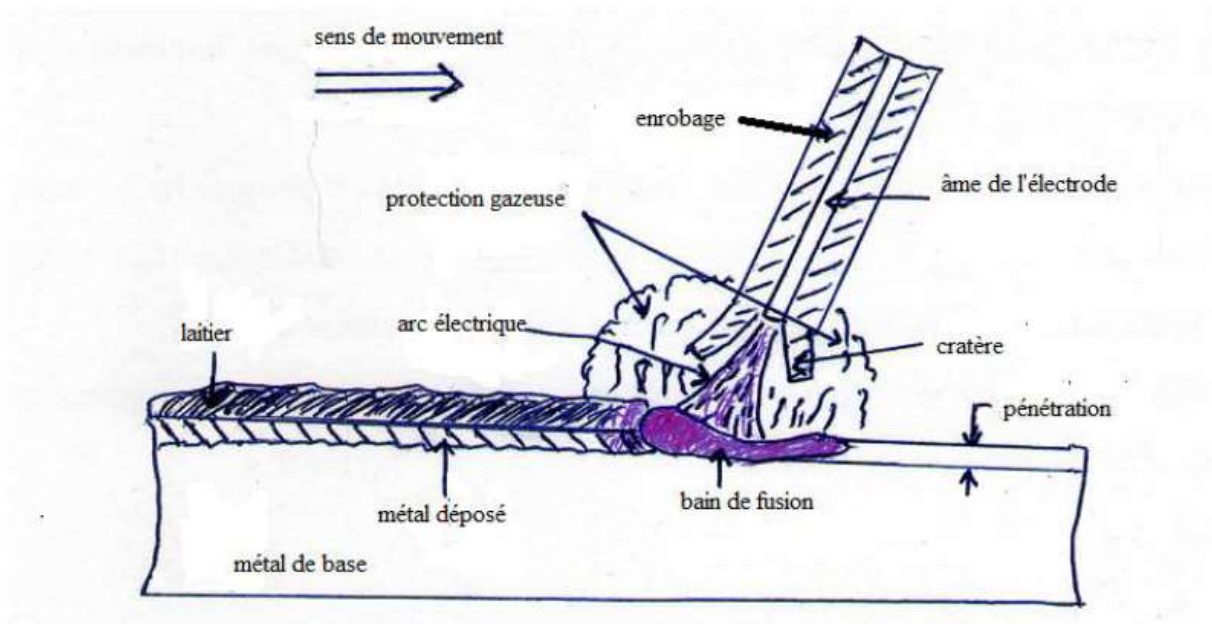


Figure I.25: Principe de procédé SMAW [10].

11.4. Différents courants produits

Le générateur de soudage peut fournir trois types de courant

11.4.1. Du courant continu

La polarité est choisie suivant l'élément à fondre (électrode ou tôle) dans la mesure où l'élément soumis au bombardement des électrons reçoit la plus grande quantité d'énergie. Ainsi dans le cas du soudage MIG/MAG (Métal Inert Gas / Métal Active Gas), sauf cas particulier du soudage utilisant des fils fourrés basiques, il est nécessaire de faire fondre le _l d'apport qui est donc soumis à une polarité positive. Dans ce cas, le terme de polarité inverse est utilisé pour désigner cette configuration de soudage. Au contraire, les torches de soudage TIG (Tungstène Inert Gas) utilisent une électrode infusible et afin de préserver l'_électrode, une polarité directe est appliquée. En courant continu, une différence de potentiel continue est créée entre l'électrode et la tôle. L'électronique du générateur régule l'énergie fournie à l'arc pour obtenir un transfert stable.

11.4.2. Du courant pulsé

Qui est similaire au courant continu mais constitué de deux temps de niveaux d'intensité différents : l'un dit "froid" et l'autre dit "chaud". Cette forme particulière du courant permet de gérer l'apport d'énergie dans le métal de base et d'obtenir un transfert de métal sans court-circuit et extinction de l'arc [11].

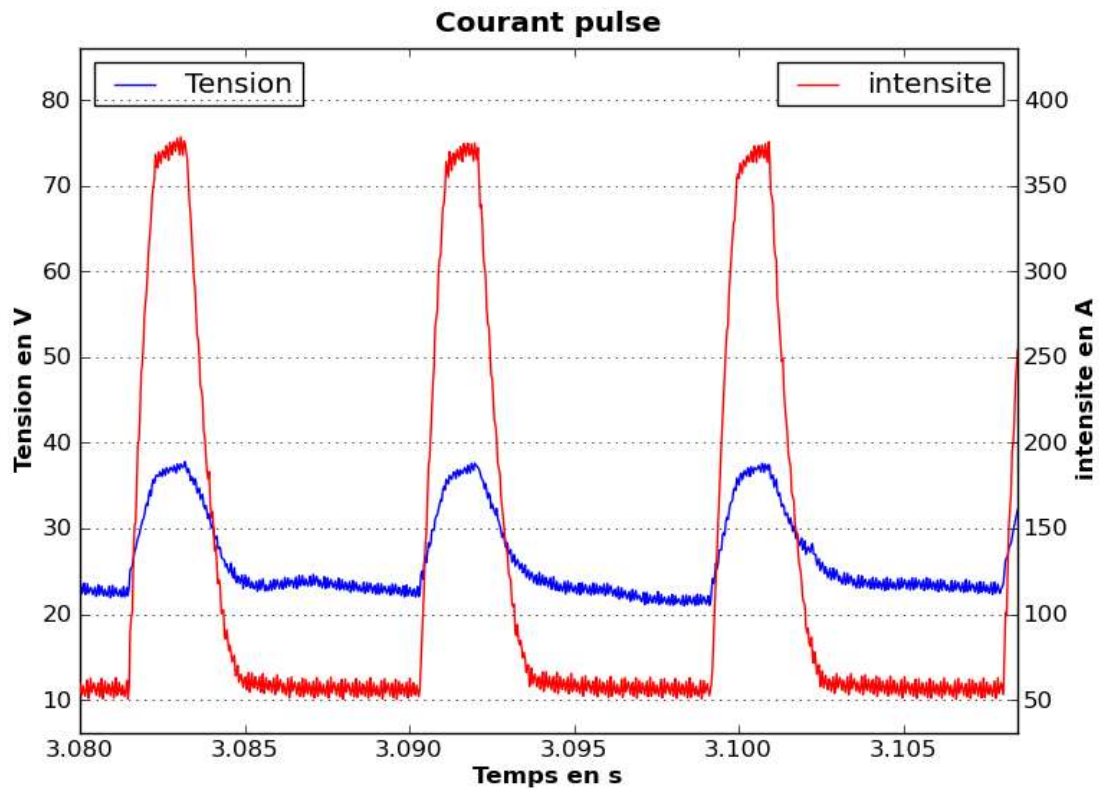


Figure I .26 : Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage pulsé [11].

11.4.3. Du courant alternatif

Pour des matériaux de nature bien spécifique et pour des types d'assemblages particuliers (alliages légers principalement), il est parfois nécessaire de produire un arc dont la polarité change régulièrement, il s'agit donc d'un courant alternatif.

Les électrons circulent ainsi alternativement vers l'électrode (appelé dans le jargon du soudeur "phase de décapage", de l'alumine par exemple) puis vers la pièce à souder ("phase de pénétration", phase durant laquelle on apporte l'énergie qui fond le métal de base).

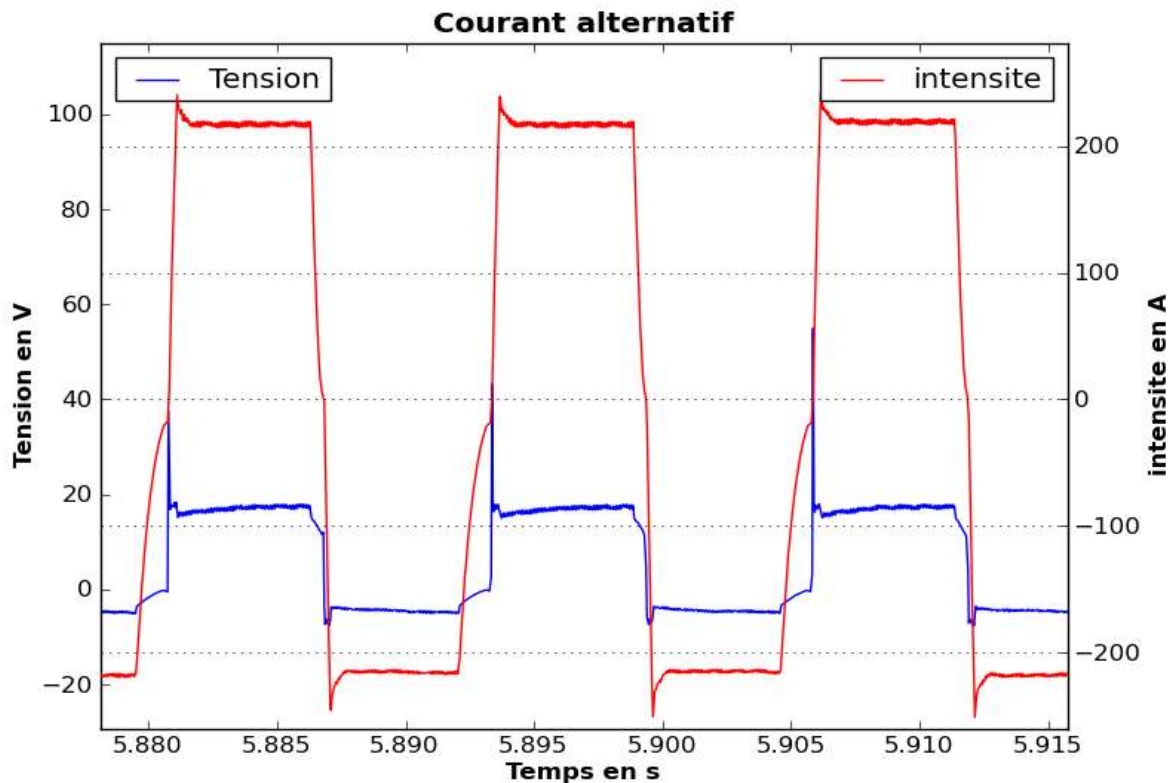


Figure I.27 : Diagrammes tension et intensité pour un régime de soudage alternatif.

L'utilisation de trois types de courant permet de produire dans un environnement gazeux un arc électrique (puissance spécifique : de l'ordre de 10 Kw.cm^{-2}) dont les caractéristiques doivent satisfaire aux contraintes imposées par la nature des éléments à assembler et par la configuration de l'assemblage. Ces sources vont fortement influencer le comportement dynamique du bain de fusion en GTAW comme en GMAW. Ces différents modes de courant ne sont pas que différentes manières de délivrer l'énergie pour la fusion du métal de base, mais aussi un moyen pour contrôler la fusion de l'électrode fusible du procédé MIG.

11.5. Électrode enrobée

11.5.1. Caractéristiques de l'électrode

L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures [11].

11.5.2. Âme métallique

C'est la partie métallique de l'électrode. C'est le métal d'apport déposé pour assembler les pièces. Elle compose le centre de l'électrode.

Diamètres : 1,25 ; 1,6 ; 2 ; 2,5 ; 3,15 ; 4 ; 5 ; 6,3 ; 7 et 8 mm

Composition : aciers, alliages d'aluminium ou de cuivre, nickel, chrome.

Le rôle de l'âme :

- Conduit le courant ;
- Dépose le métal ;
- Crée l'arc électrique.

11.5.3. Electrode

L'électrode enrobée, ou baguette de soudage, est constituée d'une âme métallique et d'un enrobage (figure).

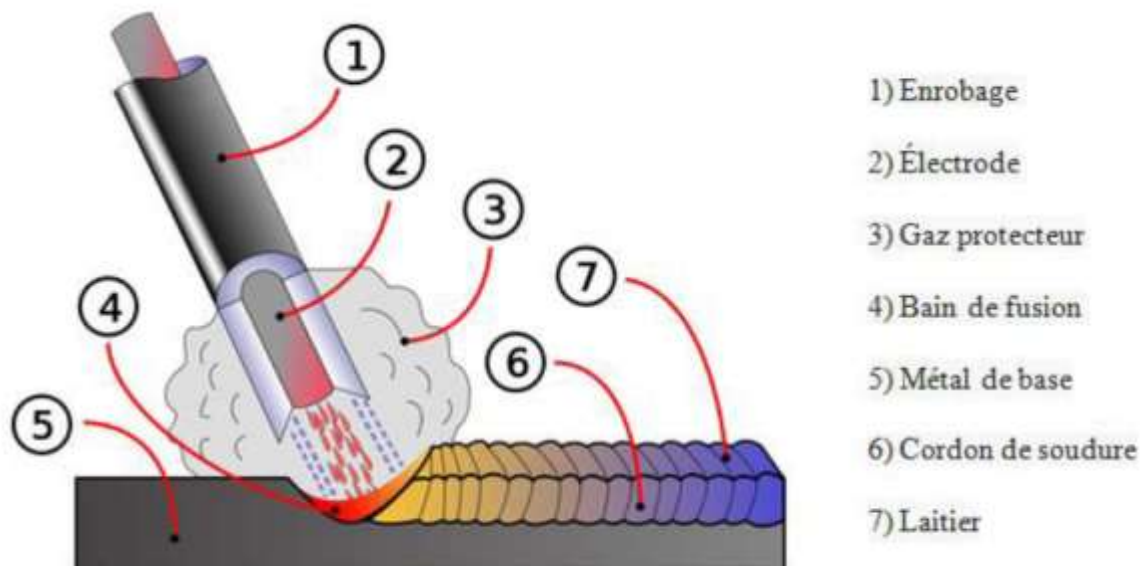


Figure I.28 : Constitution d'une électrode enrobée [11].

11.5.4. Enrobage

C'est un mélange complexe dont les composants sont choisis en fonction du métal à souder. Il forme le laitier qui remonte à la surface. Sa viscosité permet de varier les positions.

Pour éviter l'absorption d'humidité, les électrodes sont préchauffées au four (étuvage) avant de les utiliser. Certains enrobages sont résistants à l'absorption d'humidité mais leur efficacité ne dure que quelques heures.

Types d'enrobage.

- Cellulosique.

-Oxydant.

-Basique.

-Rutile.

-Acide.

Il peut être de différents types :

-A ou RA (acide) : adapté aux aciers ;

-B ou RB (basique) : à utiliser en courant continu, son laitier adhère peu, donne des soudures étanches ;

-C ou RC (cellulosique) : courant continu, adapté aux positions délicates, pénétration profonde, donne des soudures étanches, l'arc décroche facilement ;

-(oxydant) : arc stable, pénètre peu, bel aspect des soudures ; (non utilisé de nos jours car dégage trop de fumées, source de maladie professionnelles) ;

-R ou RR (rutile, TiO_2) : arc stable, pénètre moyennement, donne des soudures étanches ;

-S : spécial.

Les électrodes ont des longueurs variées, 225mm, 250mm, 300mm, 350mm, 450mm, 600mm, ou 700mm.

11.5.5. Différents rôles de l'enrobage

-Rôle électrique : l'enrobage permet une bonne circulation du courant électrique, il favorise l'amorçage et la stabilisation de l'arc par ionisation de l'air.

-Rôle physique : l'électrode est de même nature que le métal de base, la soudure est autogène. L'enrobage confère une protection vis à vis de l'air ambiant, permettant le soudage et l'unification de l'arc électrique.

- Il concentre l'arc par la formation d'un cratère à son extrémité. Il permet le soudage dans différentes positions et influence la forme et l'aspect du cordon, l'enlèvement des dépôts de laitier.

-Rôle mécanique : l'apport de matière confère une solidité à l'assemblage.

-Rôle métallurgique : il protège le bain de fusion de l'action de l'air par formation d'une pellicule de laitier liquide et d'une veine gazeuse.

- Il ralentit le refroidissement et ajoute, dans certains cas, des éléments nécessaires à l'obtention des caractéristiques mécaniques du joint de soudure.

- Par ailleurs, l'adhérence du laitier solidifié au cordon de soudure dépend essentiellement du type d'enrobage de l'électrode (acide, basique, cellulosique ou rutile : oxyde de titane Ti O₂).

11.6. Courant électrique

On peut modifier les paramètres tels que l'intensité ou la tension.

Le courant peut être alternatif ou continu.

Dans le cas du courant continu, la polarité joue un rôle important dans la qualité et l'aspect du cordon de soudure. Le choix de la polarité est dicté par le type d'électrode utilisée.

11.6.1. Polarité directe (négative)

- Électrode au pôle négatif (-).
- Pièce au pôle positif (+).

Note :

- Température plus élevée du métal de base.
- Bonne fusion du bain.
- Utilisation généralement pour les électrodes rutiles.

11.6.2. Polarité indirecte (positive)

- Électrode au pôle positif (+).
- Pièce au pôle négatif (-).

Note :

- Température plus élevée du métal d'apport.
- Utilisation généralement pour l'électrode basique.

11.6.3. Principaux défauts rencontrés

- Défauts de pénétration ;
- Soudure "percée" ;

- Porosités.

11.7. Arc électrique

Beaucoup de procédés de soudage utilisent l'arc électrique comme source d'énergie de fusion car la chaleur de l'arc peut être facilement concentrée et maîtrisée. La physique du transfert de métal à travers d'un arc électrique a été largement étudiée au cours du XX^e siècle. L'arc électrique consiste en un flot relativement élevé de courant électrique maintenu à travers une colonne de gaz ionisé appelé plasma. La puissance d'un arc peut être exprimée en unités électriques comme le produit de la tension aux bornes de l'arc par le courant passant à travers l'arc. Pour des valeurs données de 23 volts de tension d'arc et de 200 ampères d'intensité, la puissance calculée de l'arc électrique est de 4600 watts. La température de l'arc peut atteindre 3000 °C. Toute cette puissance brute générée par l'arc électrique n'est pas utilisée de manière effective dans les procédés de soudage [12]. Le taux d'efficacité d'utilisation de la chaleur peut varier de 20 à 90 pour cent selon les propriétés de convection, de conduction, de radiation ainsi que les projections responsables de ces pertes de chaleur. Par exemple, le taux d'efficacité d'utilisation de la chaleur est relativement peu élevé en soudage TIG, moyen en soudage à l'électrode enrobée et élevé à l'arc sous flux pulvérulent.

11.7.1. Propriétés de l'arc de soudage

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur, les deux procédés de soudage les plus utilisés sont :

- le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW.
- le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre SAW.

11.7.1.1. Le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW

Caractères principaux

- Électrode : tige métallique ou baguette de longueur limitée formant le métal d'apport.
- Protection : vapeurs provenant d'un enrobage de l'électrode.
- Nature du courant : alternatif ou continu.
- Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.
- Protection : apport simultané de poudre composite appelé flux.

-
- Courant : continu et alternatif. 50 à 250(A).
 - Epaisseurs (mm) : 5 à 20 plutôt moyennes.
 - Vitesse opératoire : lente.
 - Productivité : Faible.
 - Forme de joint : en bout, à clin, en T.
 - Hygiène : des fumées, rayonnements.
 - Applications : tous travaux.

❖ **Appareillage:** L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse.

Caractéristiques de l'électrode : L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures [13].

Avantage et inconvénient

Procédé universel pour les avantages qu'il présente et qui sont liés à la simplicité et une flexibilité inégalées de son emploi dans tous les domaines industriels:

- Un équipement simple et facile à mettre en œuvre.
- Possibilité d'emploi pratiquement dans toutes les conditions (Chantier, atelier, etc.).
- Disponibilité de main d'œuvre et produit de soudage sur le marché, large variété des électrodes de soudage.

Ces avantages sont à opposer aux inconvénients qu'il présente et qui sont notamment liés à

- Arrêts nécessaires pour le changement des électrodes en cours de soudage ce qui peut engendrer les défauts de reprises.
- D'une capacité et d'une productivité relativement limitée par rapport au procédé SAW et MIG/MAG.

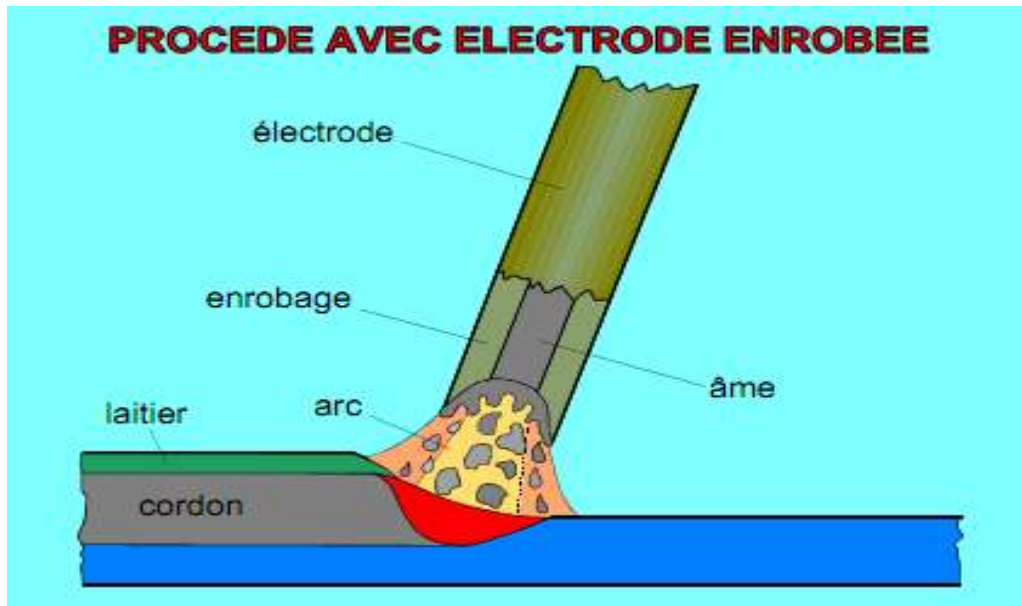


Figure I.29: Électrode enrobée : caractéristiques [13].

11.7.1.2. Le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre SAW

Caractères principaux

- Électrode: fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.
- Protection: apport simultané de poudre composite appelé flux.
- Courant: continu et alternatif. 10 à 100 (A) (et +) plutôt fortes.
- Epaisseurs (mm): 10 à 100 (et +) plutôt fortes.
- Vitesse opératoire: forte.
- Productivité: forte.
- Forme de joint: forte, en bout en T.
- Hygiène: aspiration des poussières.
- Applications: chaudronnerie lourde.

❖ Appareillage:

- Une tête de soudage, l'entraîneur de fil, le dévidoir.
- Recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- Une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif.

-
- Un coffret d'automatisme et des accessoires(12).

Caractéristiques du couple fil/flux

❖ Fil:

➤ Le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé;

➤ Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui facilite l'arrivée du courant et reste sans effet sur le métal déposé.

❖ Flux:

Le flux en poudre crée le milieu ionisé (ou conducteur) et protège la soudure. De plus, comme l'enrobage, il partage avec le fil la responsabilité des caractéristiques des soudures.

Avantage et inconvénient

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptative métallurgique, mais il résout le problème de la productivité par :

- Son fonctionnement continu grâce au fil-électrode.
- Son taux de dépôt supérieur.
- Cela le cantonne dans le domaine de la chaudronnerie moyenne et lourde et, de façon générale, dans les applications dans lesquelles :
 - Les épaisseurs sont élevées (> 30 à 50 mm) et, par suite, les chanfreins importants.
 - Les soudures sont longues (plusieurs mètres) et uniformes (absence d'angle).

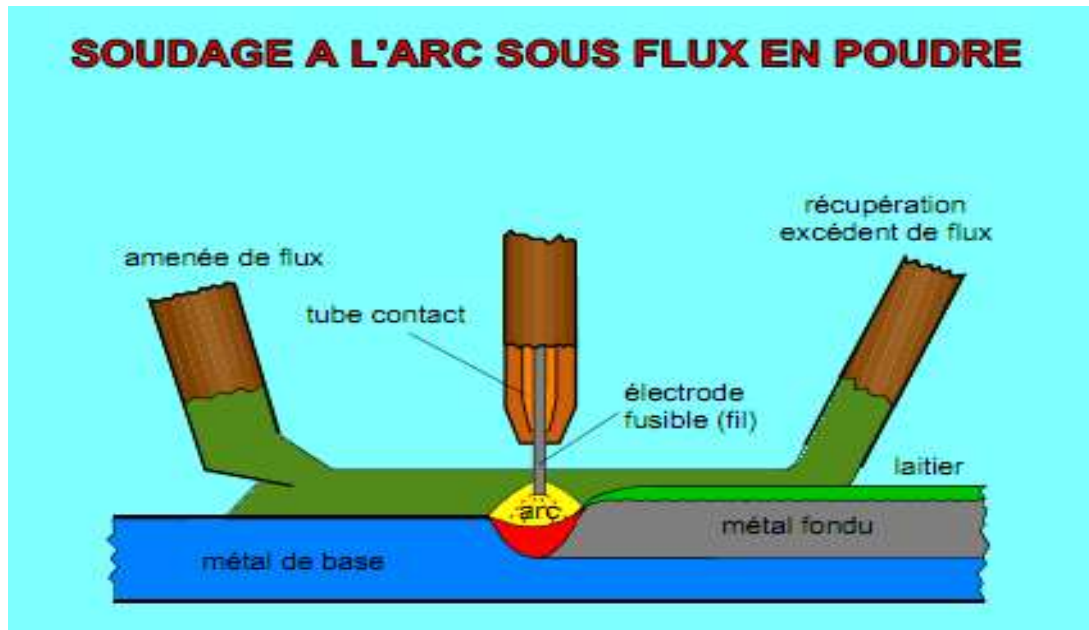


Figure I.30 : Soudage sous flux en poudre [13].

11.8. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE L'ARC DE SOUDAGE.

La relation tension-intensité de l'arc en soudage TIG, avec électrode négative a été étudiée par un bon nombre de chercheurs, et les résultats sont résumés par JACKSON.

A bas courant, la tension chute rapidement avec l'augmentation de celui-ci, elle atteint un minimum à un courant entre 100 et 300 A.

Cette tension minimale et la forme générale de la caractéristique tension-courant, dépendent des dimensions et des matériaux des électrodes, de la température, de la nature du gaz de protection et de la longueur de l'arc [14].

Généralement, il est admis que l'énergie de l'arc est égale à la perte de chaleur par la cathode, l'anode et la colonne, et qu'à un certain degré, la caractéristique de l'arc est une fonction de ces pertes montre les caractéristiques pour deux électrodes de 3 mm de diamètre en tungstène pur et thorié et pour une électrode de 1,5 mm de diamètre en tungstène pur. L'électrode de 1,5 mm de diamètre en tungstène pur et l'électrode de 3 mm de diamètre en tungstène thorié transmettent moins de chaleur à leur environnement que l'électrode de 3 mm de diamètre en tungstène pur et la tension de l'arc correspondante est plus basse.

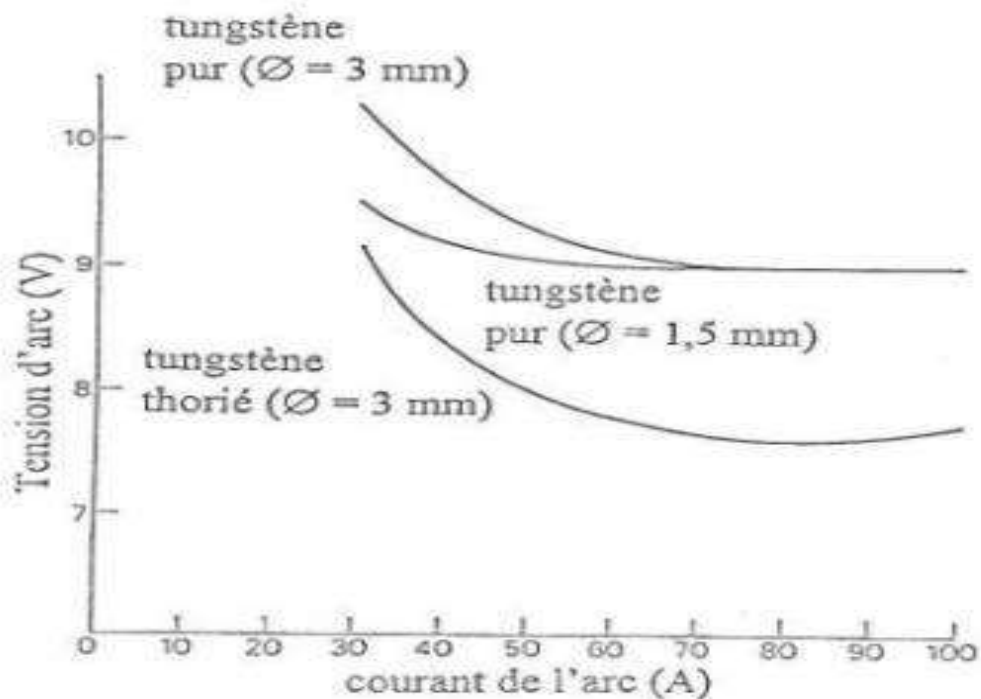


Figure I.31 : Caractéristiques tension-courant d'un arc TIG dans l'argon avec trois électrodes différentes [14].

Le processus électrique qui se déroule dans l'arc, détermine son caractère de base. A la cathode, les électrons sont évaporés, et la chaleur d'évaporation est fournie par l'énergie développée dans la zone de la chute cathodique. Dans la colonne, l'énergie est absorbée en maintenant le gaz à une température pour laquelle il est conducteur d'électricité. Au niveau de l'anode, les électrons condensent et libèrent l'énergie.

Si on tient compte des chutes de tension dans les câbles et dans les électrodes, la caractéristique d'un arc TIG dans l'argon décroît rapidement jusqu'à 50 A, puis elle reste sur ce niveau où elle remonte doucement.

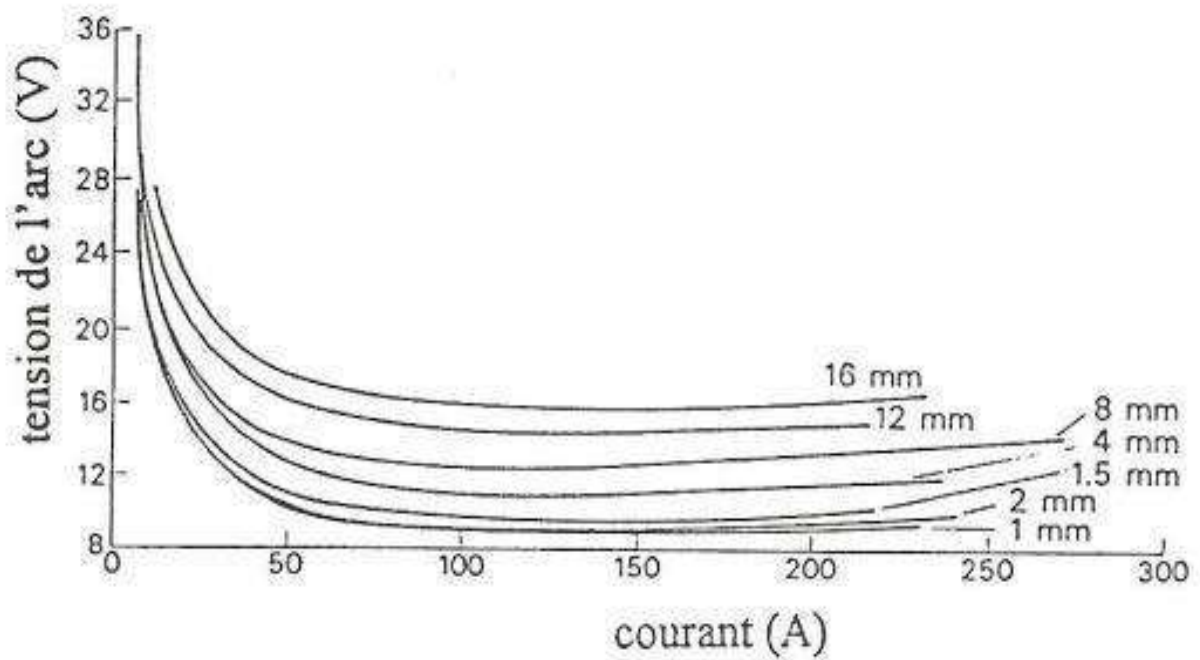


Figure I.32: Caractéristiques d'un arc/tungstène/cuivre dans l'argon pour différentes longueurs d'arc [14].

11.9. L'arc électrique en soudage

Dans cette section, les phénomènes physiques et les moyens de caractérisation de l'arc électrique sont présentés.

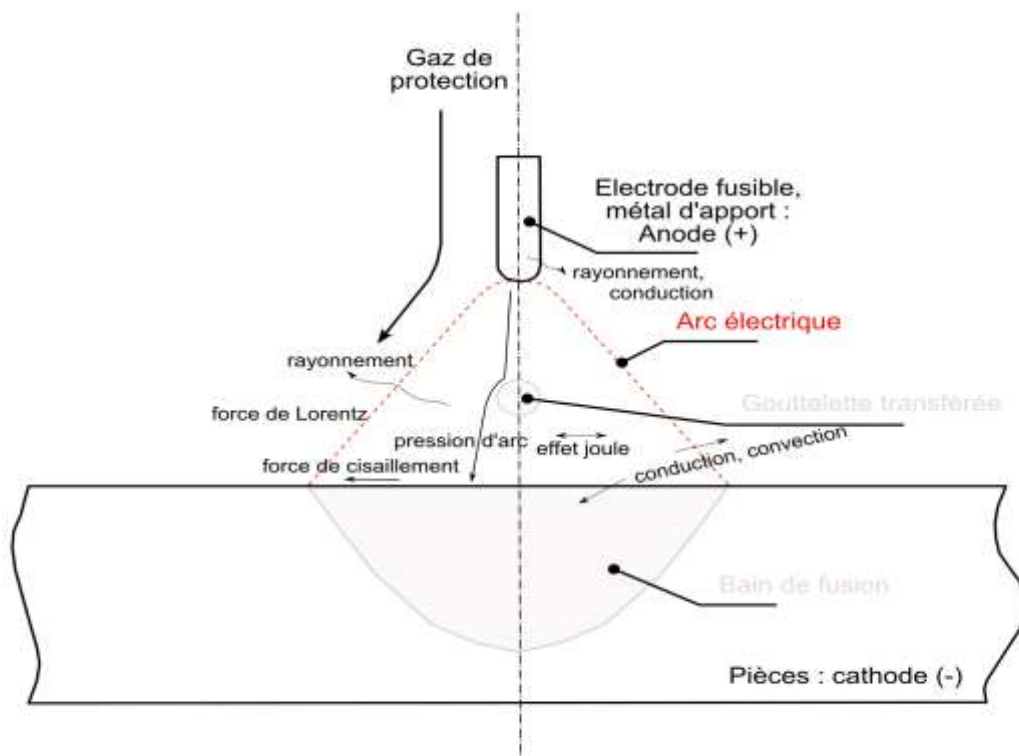


Figure I.33 : Physique de l'arc [10]

CHAPITRE II : LE SOUDAGE TIG

1. Introduction

Le procédé Tungstène Inerte Gaz est généralement appelé soudage TIG. Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique entre l'électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Le métal d'apport est amené manuellement avec une baguette ou automatiquement avec une bobine de fil. L'électrode de tungstène et le bain de fusion sont protégés de l'air par un gaz inerte, évitant ainsi des contaminations atmosphériques. Le gaz utilisé est généralement de l'argon ou de l'hélium. Il est également possible de mélanger ces deux gaz pour des applications spéciales. Les mélanges argon-hydrogène peuvent être utilisés pour l'acier inoxydable austénitique.

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/cm²) 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 [26].

2.2 PROCEDES 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).

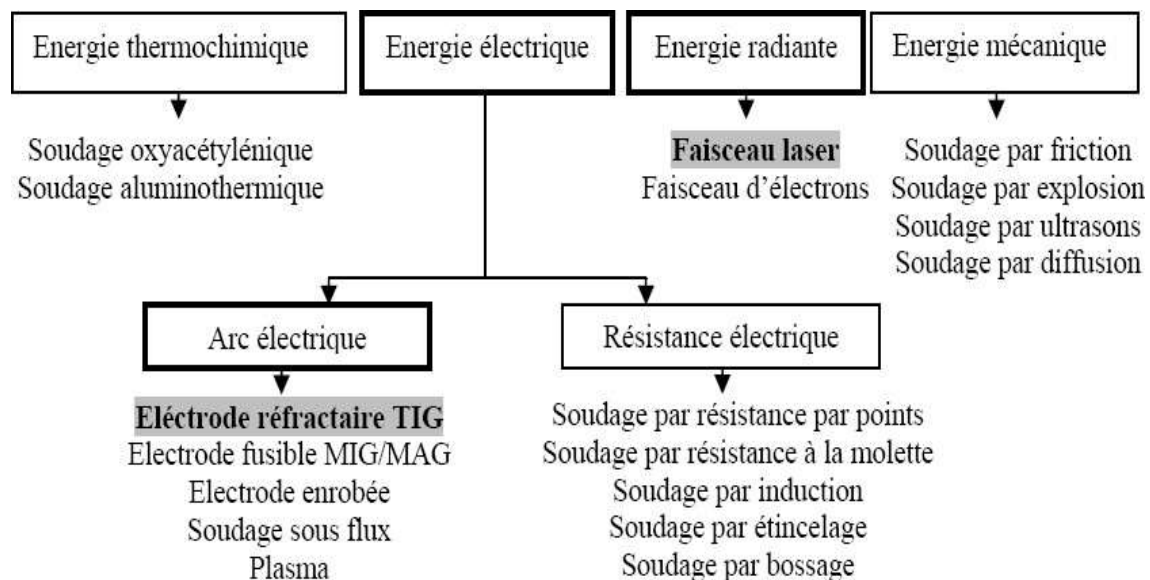


Figure II.1 : Procédés de soudage selon les différentes sources d'énergie [26].

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

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

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 [26]

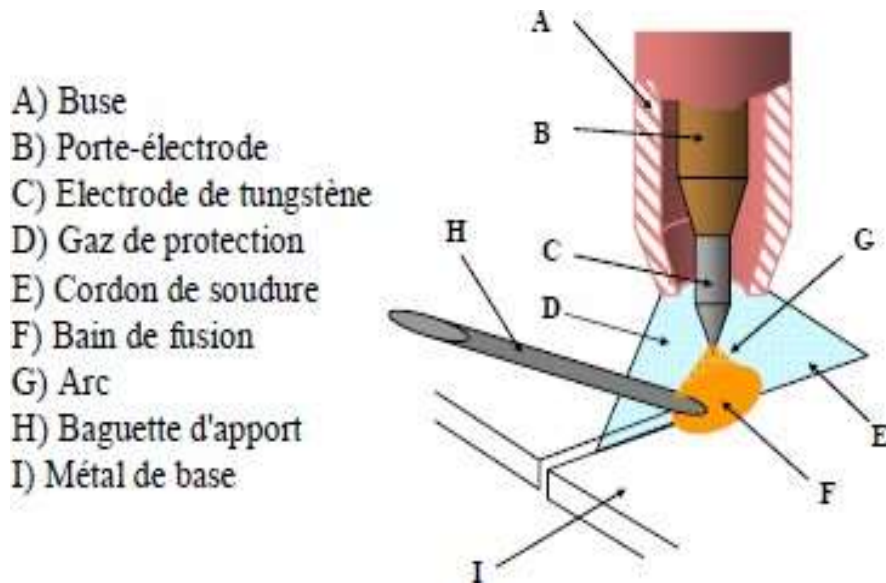


Figure II.3 : Description du procédé TIG [23].

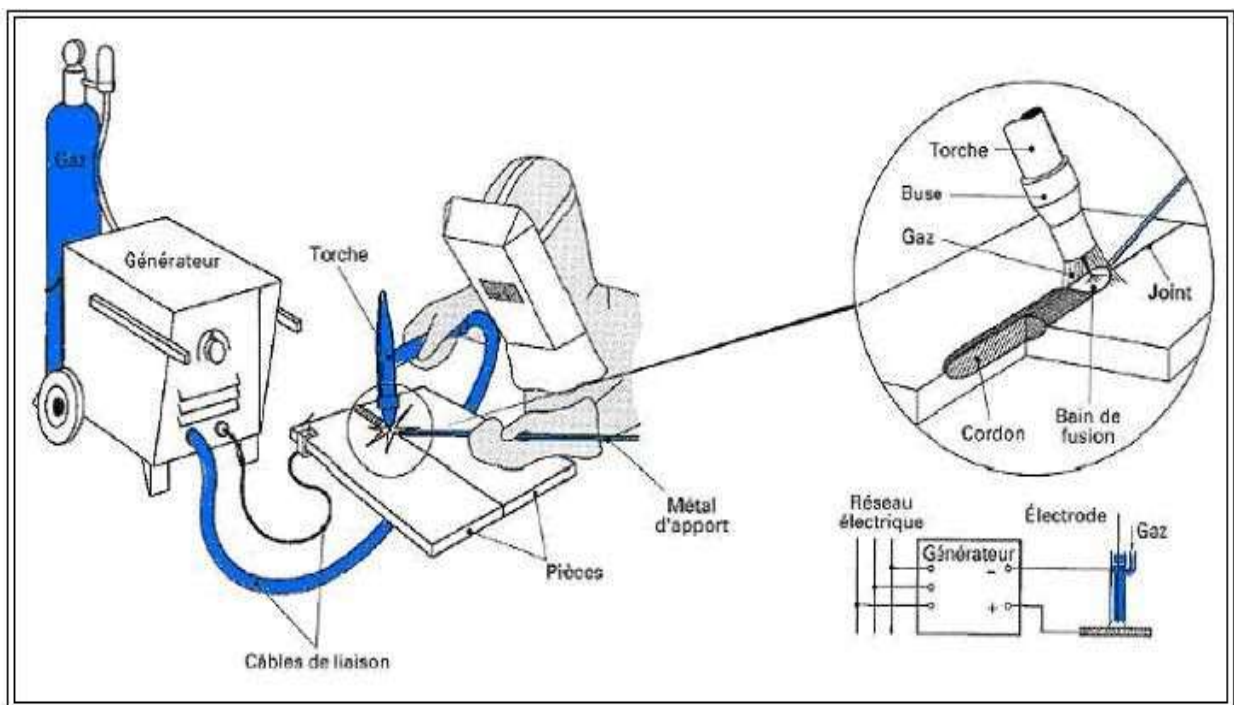


Figure II.4: Schéma du procédé TIG [23].

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 entrainer 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 représente les paramètres de soudage utilisés lors de notre expérience :

Tableau II-1 : Paramètres de soudage [27].

Epaisseur de L'échantillon n(mm)	Courant utilisé (V)	Intensité (A)	Diamètre électrode (mm)
2	12-18	85-140	1.5
2.5	12-18	100-140	2

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).

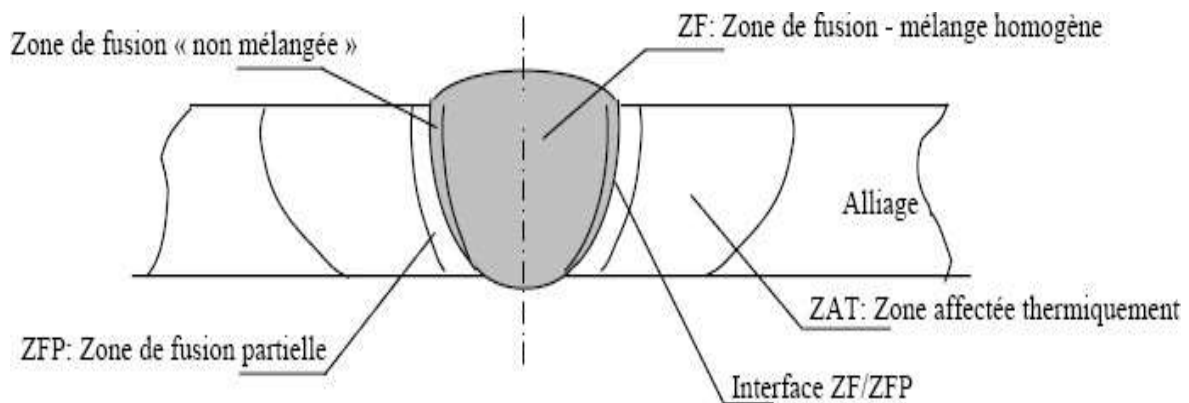


Figure II.5: Variété de microstructures dans un cordon de soudure

TIG(Coupe transversale).

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

a) 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 températures 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.

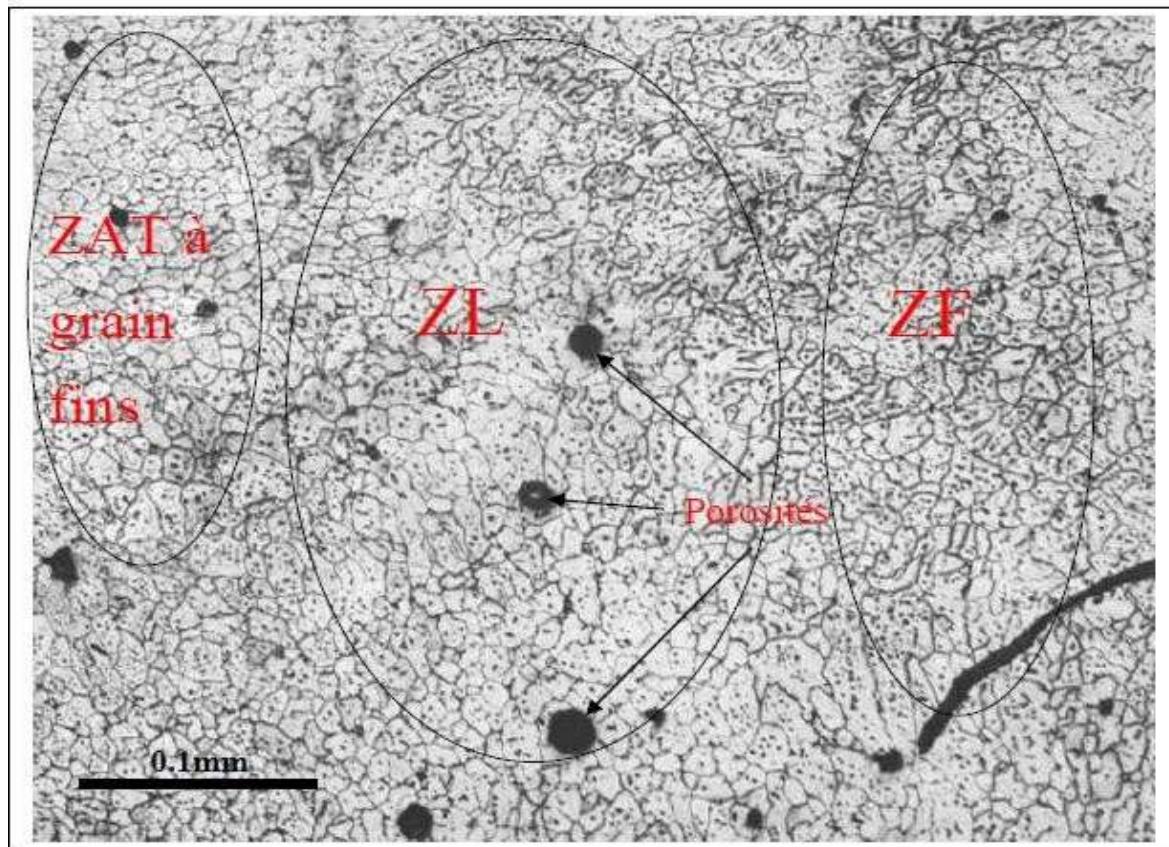


Figure II.6 : Les différentes zones de transformation structurales (ZF-ZL-ZAT) de l'aluminium 2024[23].

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.

5. 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.

5.1 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).

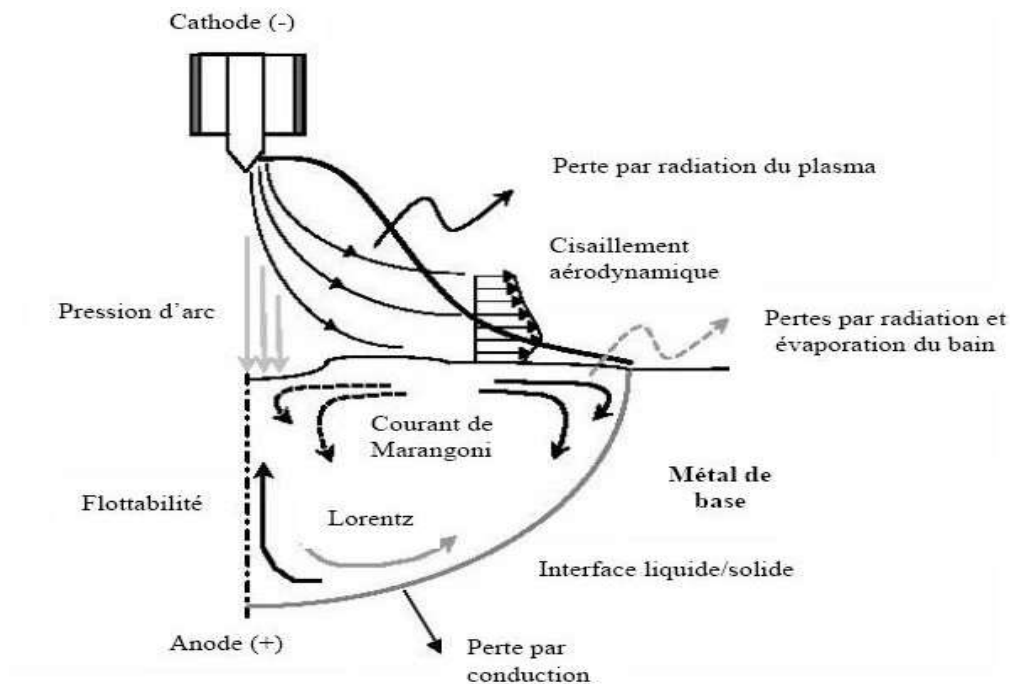


Figure II.7 : Forces et courants de convection dans le bain de fusion de soudage TIG.

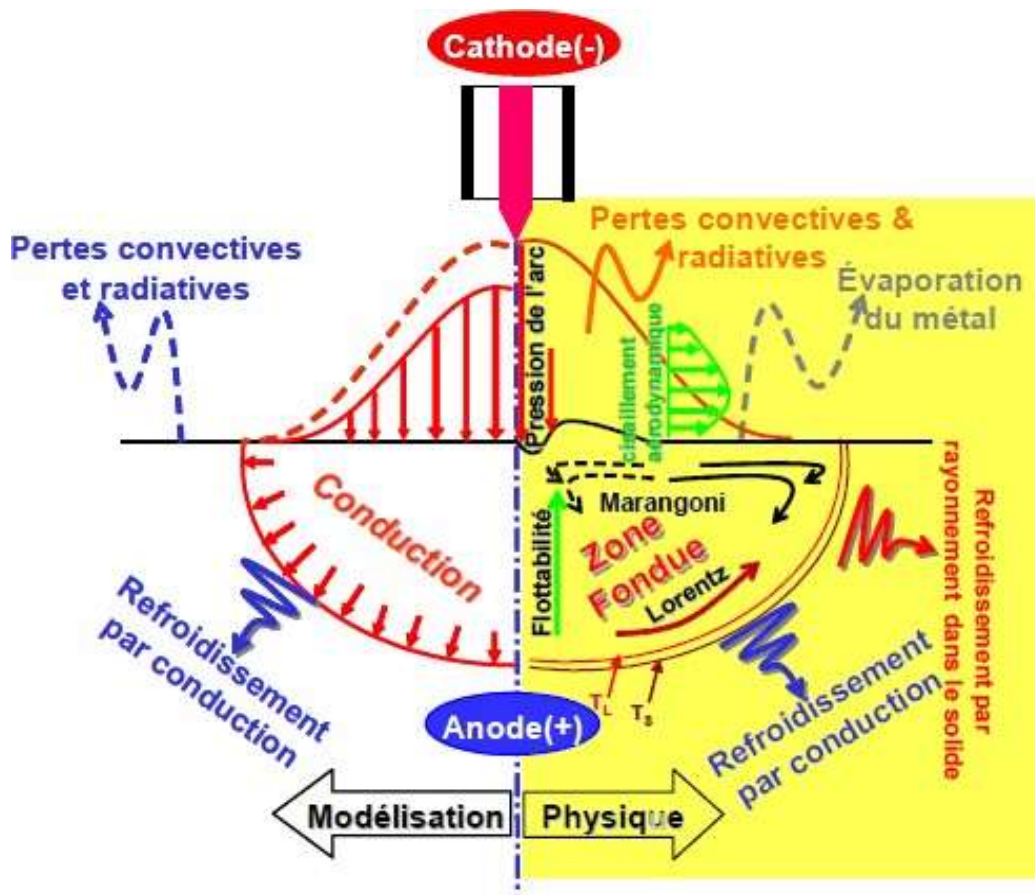


Figure II.8 : les phénomènes thermiques du soudage TIG [31].

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.

5.2 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 γ détermine le sens d'écoulement du fluide (Figure II-9).

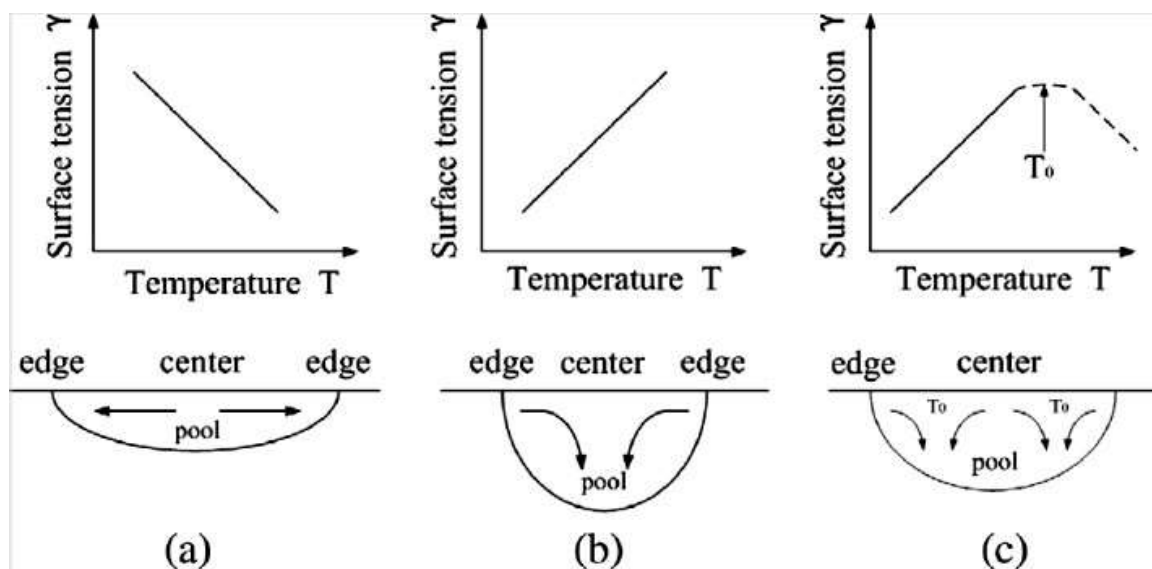


Figure II-9 : Effets de la tension de surface sur les mouvements de convection dans la zone fondue [31].

En effet, si la température au centre du bain est plus importante que celle en périphérie, cela signifie que $dy/dT > 0$, 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 dû 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.

5.3 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

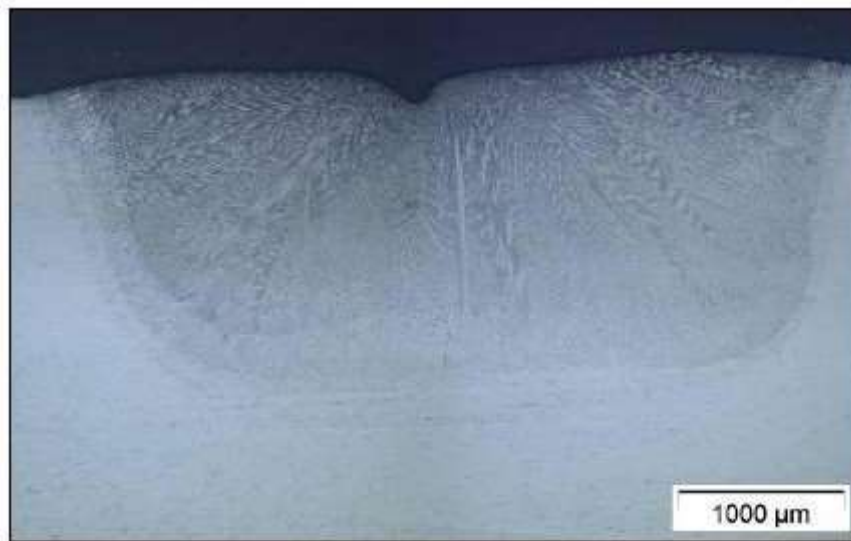


Figure II-10 : Déformation résiduelle de la surface soumise à la pression d'arc observée lors d'un essai TIG sans déplacement de la torche.

5.4 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).

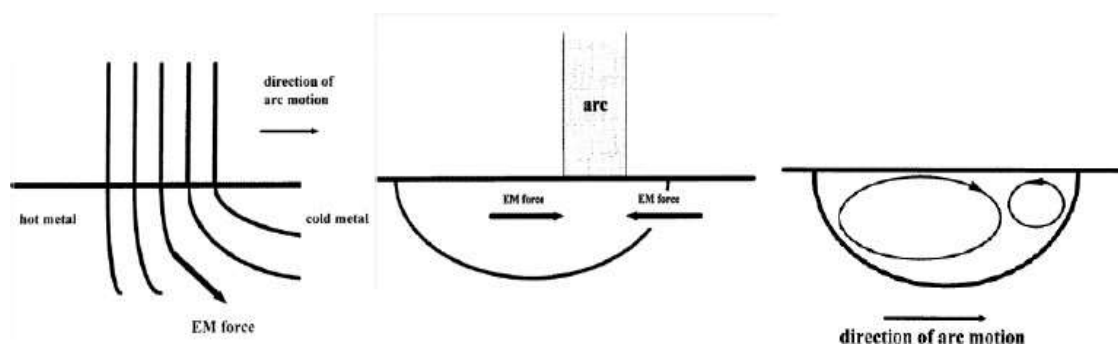


Figure II-11 : Influence des forces de Lorentz sur les mouvements fluides dans le bain fondu[30].

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.

5.5 .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.

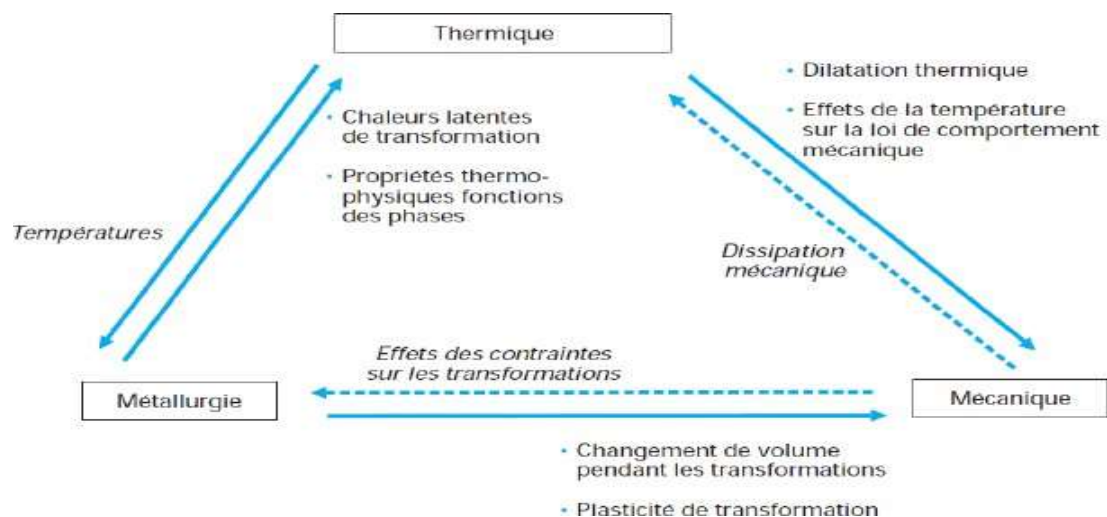


Figure II-12 : Couplages intervenant dans une opération de soudage [27].

5.6 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.

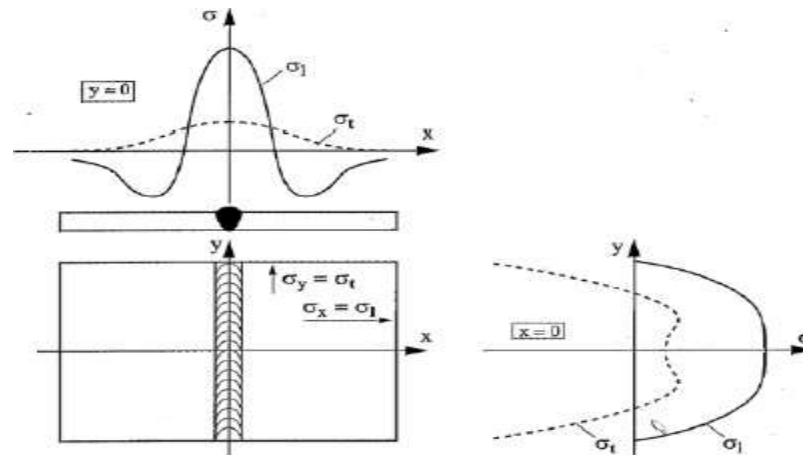


Figure II-13 : Représentation des contraintes résiduelles longitudinales et transversales ausein d'un joint soudé [31].

En considérant les maximums des isothermes représentés ci-dessous (Figure II-13), 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 [30].

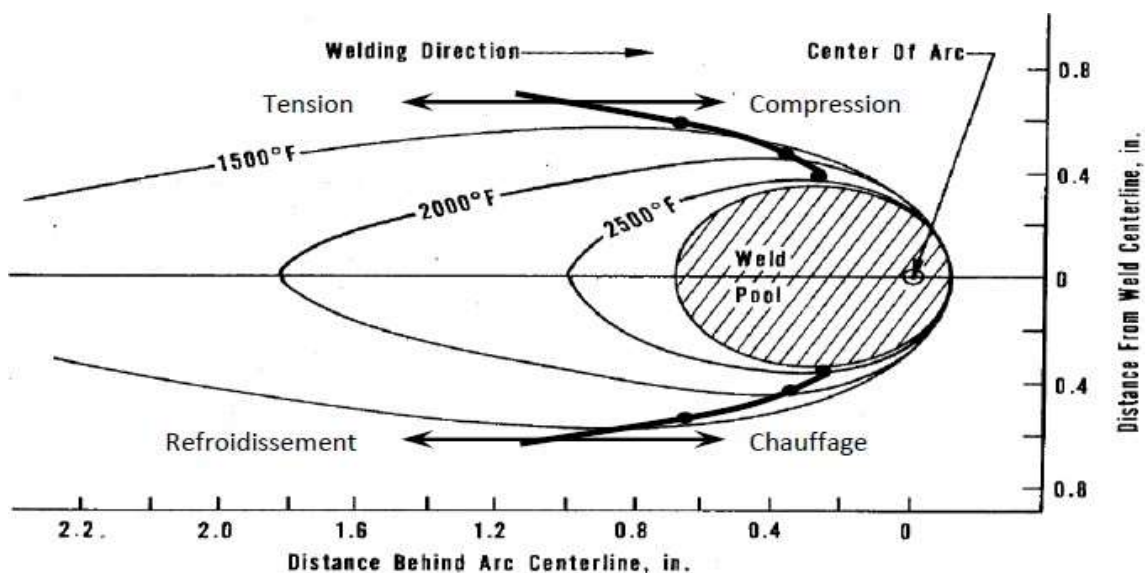


Figure II-14 : Limitations des zones en tension et en compression en soudage avec torchemobile.

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.

5.7 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.

5.8 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.

6 .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, enregistre 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.

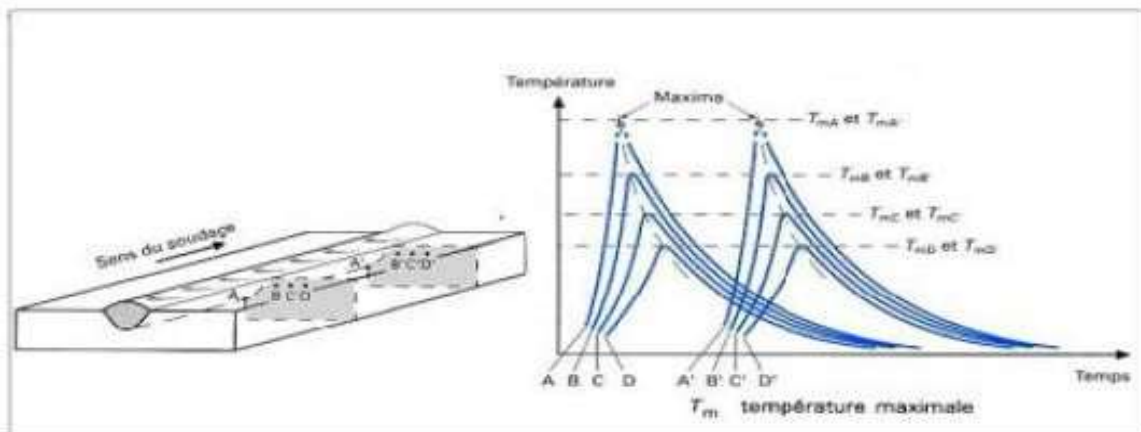


Figure II-15 : schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [23].

CHAPITRE III : SIMULATION
MATHEMATIQUE DE SOUDAGE A L'ARC
TIG

1. Introduction

Ce chapitre est organisé, se résume à l'étude et au développement du modèle mathématique de transfert thermique lors d'une opération de soudage TIG. et consacrée aux méthodes numériques utilisées pour la résolution de l'équation de la chaleur.

2. La simulation numérique

Dans le domaine du soudage électrique à l'Arc la simulation propose une solution de raccourci aux expérimentations et tests de soudage, elle offre une prédiction des phénomènes physiques, avec prise en compte des paramètres de soudage pour aboutir à des résultats plus proches de la physique, et donc du cas industriel. Pour être performante et fiable, la simulation numérique doit en effet intégrer les comportements thermiques, métallurgiques et mécaniques du métal, de même quelques certains aspects chimiques des procédés de soudage. Plusieurs travaux de recherche traitent ce sujet en visant l'objectif de la réduction du coût, de la fiabilité et du bon rendement au cours de la production.

2.1. Simulation thermique

2.1.1. Equation de la chaleur

Considérons le transfert de la chaleur par conduction dans un volume Ω d'une pièce à souder ; si on suppose que la propriété du matériau ne dépendent pas de la température, et on a une source de chaleur volumique dans la pièce. Le bilan énergétique dans le domaine Ω et traduit par l'équation de la chaleur suivante [32]

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \text{div}(k. \text{grad}T) = S \quad (\text{III. 1})$$

Ou encore, en faisant intervenir l'enthalpie du matériau, définie par $H(T) = \int_{T_0}^T \rho C_P (T) dT$

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \text{div}(k. \text{grad}T) = S \quad (\text{III.2})$$

Pour le métal de base, c'est l'énergie interne générée :

$$S = 2h_{\infty}(T - T_{\infty}) + 2\sigma\varepsilon(T^4 - T_{\infty}^4) \quad (\text{III.3})$$

Au niveau du cordon :

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

Ce terme doit être représenté sous la forme linéaire :

$$S = SC + SP * T_p \quad (\text{III.5})$$

Tel que, la linéarisation de ce terme "S" s'obtient en utilisant la méthode de la tangente. Nous l'adaptions sous une forme générale, (c.à.d. au niveau du métal de base et au niveau du cordon de soudure) équations (6), comme suit :

$$\begin{cases} SC = (2 - cas) \cdot (h_{\infty}T_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T_{\infty}^4 + \sigma\varepsilon T_{\infty}^4) + cas \cdot q_0 e^{-f(x,y,t)} \\ SP = -(2 - cas) \cdot (h_{\infty} + 4\sigma\varepsilon T_{\infty}^3) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Où :

cas = 0 => Au niveau du métal de base ;

cas = 1 => Au niveau du cordon de soudure.

Et l'indice ⁽⁰⁾ de T^0 indique que la température est calculée à l'instant précédent. Le coefficient q_0 de l'expression (6) de la source de chaleur est égal :

$$q_0 = \frac{3.Q}{\pi.r_x.(r_{yav}+r_{yav})/2} \quad \text{Ou} \quad Q = \eta.U.I \quad (\text{III.7})$$

Tel que U : Tension électrique (V) ;

I : l'intensité de courant (A) ;

η : le rendement de l'arc.

$$\text{La fonction } f(x, y, t) \text{ est définie par : } f(x, y, t) = -3 \left(\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{(y-v.t)^2}{r_y^2} \right) \quad (\text{III.8})$$

Les rayons du bain bi-elliptique (r_x, r_{yav}, r_{yav}) sont définis de manière que 95% de la chaleur générée soit contenue dans la bi-ellipse. La résolution du problème thermique du soudage est effectuée par la Méthode des Eléments Finis "MEF", réputée par sa puissance à résoudre des problèmes non linéaires et complexes. Vu la symétrie des 2 plaques à soudées, on a choisi de mailler que la première plaque, où les discrétisations sont aussi adoptés selon deux zones différentes pour affiner le maillage dans la zone de soudure et améliorer le calcul [33].

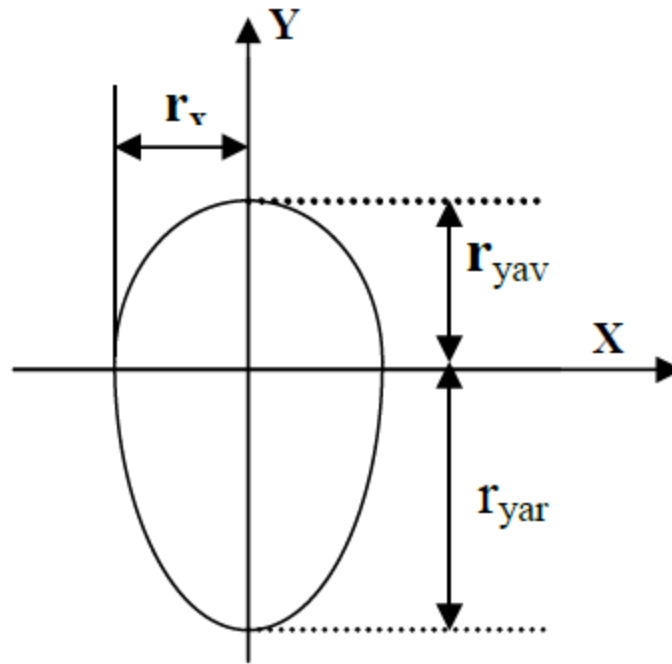


Figure III.1. Modèle de bain de fusion bi-elliptique [33].

Où T est la température, K la conductivité thermique du matériau, ρ la masse volumique, c_p la capacité calorifique et S une éventuelle source de chaleur volumique interne.

L'équation (III.1) est la forme générale de l'équation de diffusion de la chaleur. Cette équation souvent appelé équation de la chaleur fournit l'outil de base pour analyser la conduction de la chaleur. La résolution de la chaleur nous permet d'obtenir la répartition de la température T en fonction du temps.

L'équation de la chaleur (III.1) pour s'écrire dans différent système de coordonnées comme suite :

a) En coordonnées cartésiennes

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = S \quad (\text{III. 9})$$

b) En coordonnées cylindriques

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = S \quad (\text{III.10})$$

2.1.2 conditions initiale et conditions aux limites

La relation (III.1) est une equation aux derivées partielles, elle possède en theorie une infinite de solution si on ne fix pas de condition initiale en temps et de conditions aux limites

aux frontières du domaine étudié. Par conséquent, la solution de l'équation de la chaleur dépend des conditions physiques existant à la frontière du domaine Ω , où est défini le processus thermique, ainsi que d'une condition initiale, on remarque que l'équation de la chaleur est une équation aux dérivées partielles du second ordre en espace et du premier ordre en temps.

Les conditions aux limites peuvent être de type température imposée, ou bien flux imposé, ou encore elles sont déterminées par des échanges par rayonnement et convection avec l'air extérieur : ces conditions peuvent s'exprimer simplement sous forme mathématique comme suit :

Condition aux limites

On distingue plusieurs types de conditions aux limites thermiques

-Condition de température imposées de type Dirichlet

$$T|_{\Gamma_T} = T_{imp}, \quad t > 0 \text{ pour } \Gamma_T \in \Gamma \quad (\text{III.11})$$

T_{imp} est la température imposée à la frontière Γ_T

-Condition de flux imposé de type Neumann

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_q} = q_{imp}, \quad t > 0 \text{ pour } \Gamma_q \in \Gamma \quad (\text{III.12})$$

q_{imp} est le flux imposé à la frontière Γ_q , n est la norme extérieure.

-Condition de symétrie (surface isolée)

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_s} = 0, \quad t > 0 \text{ pour } \Gamma_s \in \Gamma \quad (\text{III.13})$$

-Condition mixte de type convection et rayonnement

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{cr}} = h(T - T_{ext}) + \sigma_0 \varepsilon (T^4 - T_{ext}^4) \quad t > 0 \text{ pour } \Gamma_{cr} \in \Gamma \quad (\text{III.14})$$

h est le coefficient d'échange convectif, T_{ext} est la température du milieu extérieur, σ_0 est la constante de Stefan-Boltzmann, ε l'émissivité du matériau.

Il est à noter que la source de chaleur provenant du soudage peut être aussi introduire dans les conditions aux limites, c'est à dire comme condition limite extrême [34].

Quant aux conditions initiales elles sont classiquement définies comme suit :

-Condition initiale

Si on considère un domaine Ω , et lorsqu'on veut modéliser le transfert thermique en régime transitoire, on doit connaître l'état thermique initial en tout point M du domaine. Cette condition peut se mettre sous la forme suivante [34]:

$$T(M, t) = T_0, \text{ à } t = 0 \text{ pour } M \in (\Omega \cup \Gamma) \tag{III.15}$$

Où T_0 est la température initiale.

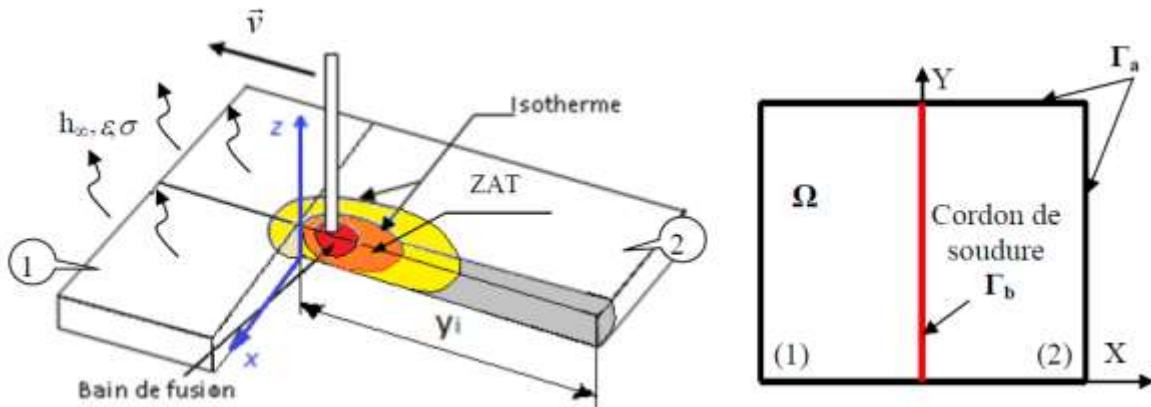


Figure III. 2 : a / Schéma du processus de soudage de deux tôles minces

b/Domaine Ω et frontières Γ_a et Γ_b [33] .

Pour le cas bidimensionnel, on retrouve l'expression suivante :

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S(T, x, y, t) \tag{III.16}$$

Dans le cas général sous une forme compactée, on a l'équation :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -div(-K \cdot \overline{gradT}) + S \tag{III.17}$$

Avec des conditions aux limites et initiales appropriées, la résolution de l'équation différentielle (III.17) donne la solution au problème posé.

Conditions aux limites et initiales

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

- Aux frontières Γ_a (figure III.2), le flux q_n est égal à:

$$q_n = h_\infty(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon(T^4 - T_\infty^4) \tag{III.18}$$

Où h_∞ : coefficient de convection égal à $10 \text{ W/m}^2.K$; T : température au bord de l'assemblage

(K) ; T_∞ : température ambiante (K) ; ε : émissivité thermique égale à 0.82, σ : constante de Boltzmann égale à $5.67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^4$.

• Au plan de la symétrie de l'assemblage (à la frontière Γ_b), [34] le flux de chaleur est nul:

$$q_n = -K \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.19})$$

Le flux q_n étant donné par l'équation de Fourier : $q_n = -K \cdot \vec{\nabla} T$

• La température initiale du matériau est supposée égale à la température ambiante:

$$T_0 = 300K$$

2.1. 3 Système d'équations finales

Le système d'équations finales de la conduction de chaleur dans les deux plaques métalliques à souder (cas bidimensionnel) s'écrit comme suit [31]:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S(T, x, y, t) \quad (\text{III.20})$$

$$q_n = h_\infty(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \text{ sur } \Gamma_a \quad (\text{III.21})$$

$$q_n = 0 \text{ sur } \Gamma_b \quad (\text{III.22})$$

2.2 Apport d'énergie dans une opération du soudage

La modélisation thermique du soudage requiert une connaissance profonde de l'apport d'énergie résultat des phénomènes très complexes dans l'arc électrique ; la modélisation de l'arc électrique a été l'objet de plusieurs travaux. L'apport d'énergie dans une opération de soudage provient de l'arc électrique; ce dernière provoque, grâce à la collision des porteurs de charges (électrons, ions, molécules), une augmentation de la température de la pièce à souder. L'énergie est déposée essentiellement en surface de la pièce à souder. Elle dépend fortement du procédé de soudage utilisé. Par ailleurs, l'apport de chaleur dépend également de l'utilisation ou non du métal d'apport.

En simulation numérique de soudage, la modélisation de la source de chaleur est très importante : les difficultés consistent alors à choisir le phénomène physique responsable de l'apport de chaleur et les remplacer par une source de chaleur appropriée dans l'équation de la chaleur. La modélisation de l'apport d'énergie a été effectuée en supposant différentes formes des sources de chaleur. Depuis les années quatre-vingt, plusieurs articles ont été publiés

différents modelé de source de chaleur utilises dans la simulation numérique du soudage a l'arc électrique.

2.2.1 Source de chaleur point

ROSENTHAL vers la fin des années trente a réussi à trouver la solution analytique exacte de l'équation de la chaleur dans le cas de soudage. Il a résolu l'équation aux dérivées partielles de conduction de chaleur en utilisant une source de chaleur point qui se déplace avec une vitesse constante. La source chaleur point de ROSENTHAL est donnée par l'équation (III.11) l'analyse de ROSENTHAL qui suppose une source de chaleur ponctuelle, linière ou plane est soumise à de graves erreurs pour les températures calculées près de la zone de fusion et de la zone affectée par la chaleur :

$$Q = \eta \cdot I \cdot U \quad (\text{III.23})$$

Q est la chaleur, η est le rendement de l'arc, I le courant de soudage, U est le potentielle de soudage.

2.2.2 Source de chaleur surfacique

L'apport d'énergie en surface d'une pièce à souder est donne par une condition à la limite de l'équation aux dérivées partielles de la chaleur. La source de chaleur surfacique est modélisée comme une densité de flux de chaleur, appliquée sur une surface S ; on a alors, dans un repère lié à la source :

$$q(x, y) = \frac{Q}{S} \cdot f(x, y) \quad (\text{III.24})$$

$f(x, y)$ Étant la fonction de repartition surfacique, qui est maximale en $(x = 0, y = 0)$, c'est à dire pour un point situé juste sous la source, A est la surface.

2.2.3 Source de chaleur volumique

Pour les situations de soudage, ou la profondeur de pénétration est faible, le modelé de source de chaleur de surface donne de bons résultats. Cependant, pour les sources de densité de forte puissance tels que le laser ou le faisceau d'électrons, elle ignore l'action de creusement de l'arc qui transport la chaleur en dessous de la surface. Dans ce cas, on modélise l'apport de chaleur en faisant intervenir un terme source interne dans l'équation de la chaleur, c'est à dire une densité volumique de flux de chaleur appliquée au sien du volume du matériau. Ce dernière type de modélisation est plus adapte lorsque on veut englobet dans la

formulation de l'apport de chaleur la contribution énergétique des phénomènes qui ont lieu dans le bain fondu.

3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS (MEF)

La méthode choisie pour la résolution du problème thermique du soudage est la méthode des éléments finis "MEF", réputée par sa puissance à résoudre des problèmes non linéaires et complexes. L'élément fini utilisé pour le développement et la résolution du champ thermique est du type quadrilatère à 4 nœuds.

3.1 Formulation variationnelle :

Ecrivons le terme de dérivation de la température par rapport au temps en différence finie :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{i+1} = \frac{T(i+1) - T(i)}{\Delta t}, \text{ Elle sera abrégée par : } \frac{T - T_0}{\Delta t}$$

T est la température à l'instant actuel et T_0 est la température à l'instant précédent.

L'équation devient :

$$\rho \frac{c_P}{\Delta t} T - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \left(S + T^0 \cdot \rho \frac{c_P}{\Delta t} \right) = 0 \quad (\text{III.25})$$

On développe la forme variationnelle de l'équation (III.25) pour un domaine (Ω) typique en multipliant cette équation (III.25) par une fonction test $N(x, y)$. On l'intègre sur le domaine (Ω) de frontière Γ . Les fonctions test $N(x, y)$ choisies (abrégées en N_i) doivent être dérivables au moins une fois par rapport à x et y . L'axe (Y) est considéré comme direction de soudage. On aura [35].

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho c_P}{\Delta t} T \cdot N_i \cdot d\Omega - \iint_{\Omega} N_i [(K \cdot T'_x)'_x + (K \cdot T'_y)'_y] d\Omega - \iint_{\Omega} \left[S + \frac{\rho c_P}{\Delta t} T^0 \right] N_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.26})$$

$$\text{En posant : } F_1 = K \frac{\partial T}{\partial x} = (KT'_x) \quad \text{et} \quad F_2 = K \frac{\partial T}{\partial y} = (KT'_y)$$

On développe le deuxième terme de l'équation (III.26) en utilisant les identités suivantes :

$$\begin{cases} N_i \cdot \frac{\partial(F_1)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (N_i F_1) - \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot F_1 \\ N_i \cdot \frac{\partial(F_2)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (N_i F_2) - \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot F_2 \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Puis, en appliquant le théorème de « Green » sur les composantes de l'opérateur gradient,

Pour un contour fermé, on trouve :

$$\begin{cases} \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} (N_i \cdot F_1) dx dy = \oint_{\Gamma} N_i \cdot F_1 \cdot n_x \cdot ds \\ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial y} (N_i \cdot F_2) dx dy = \oint_{\Gamma} N_i \cdot F_2 \cdot n_y \cdot ds \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Où ds est la longueur de l'arc infinitésimal le long du contour Γ . n_x et n_y sont les composantes du vecteur unité normal \vec{n} sur la frontière Γ .

$$\vec{n} = n_x \cdot \vec{i} + n_y \cdot \vec{j} \tag{III.a}$$

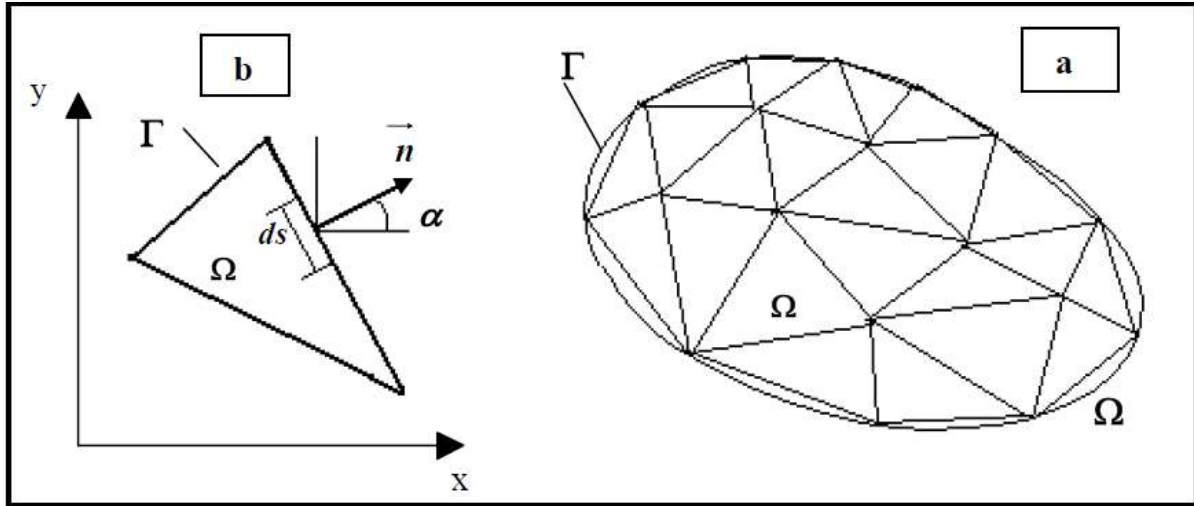


Figure III.3.a,b : Discretisation d'un domaine irrégulier en éléments finis typiques[35].

En substituant les équations (III.27) et (III.28) dans l'équation (III.26) on obtient :

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho \cdot C_P}{\Delta t} \cdot T \cdot N_i \cdot d\Omega + \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} (F_1) + \frac{\partial N_i}{\partial y} (F_2) \right] N_i \cdot d\Omega - \iint_{\Omega} (S + \frac{\rho \cdot C_P}{\Delta t} \cdot T^0) \cdot N_i \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma} N_i \cdot (n_x \cdot F_1 + n_y \cdot F_2) ds = 0 \tag{III.29}$$

Notant d'après (III.29) le flux :

$$q_n = n_x \cdot F_1 + n_y \cdot F_2 = K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} \right) + K \left(\frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} \right) = K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \tag{III.30}$$

La forme variationnelle devient alors :

$$\iint_{\Omega} \frac{\rho \cdot C_P}{\Delta t} \cdot T \cdot N_i \cdot d\Omega + \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} (F_1) + \frac{\partial N_i}{\partial y} (F_2) \right] \cdot N_i \cdot d\Omega - \iint_{\Omega} (S + \frac{\rho \cdot C_P}{\Delta t} \cdot T^0) \cdot N_i \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma} N_i q_n ds = 0 \tag{III.31}$$

Cette équation variationnelle forme la base du modèle d'éléments finis de l'équation (III.a).

3.2 Formulation en éléments finis

On suppose que T est approximée dans un domaine élémentaire Ω_e ayant ' n ' nœuds par l'expression suivante :

$$T(x, y, t) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y) \cdot T_j(t) = [N] \cdot \{T\} \tag{III.32}$$

Où T_j sont les valeurs des températures inconnues aux nœuds considérés, telles qu'elles dépendent du temps t . N_j est la fonction d'interpolation au point (x_j, y_j) ayant la propriété :

$$N_j(x_i, y_i) = \delta_{ij}$$

Avec : δ_{ij} symbole de **Kronecker**.

Substituant l'équation (II.32) dans la forme variationnelle (II.31) en tenant compte de la forme linéaire de la source S , on aboutit à :

$$\sum_{j=1}^n \iint_{\Omega_e} \left(\frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} - S_p \right) \cdot T_j \cdot N_j \cdot N_i \cdot d\Omega + \sum_{j=1}^n \left\{ \iint_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] K \cdot d\Omega \right\} T_j - \iint_{\Omega_e} \left(S_c + \frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} T^0 \right) \cdot N_i \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma_e} N_i q_n ds = 0 \quad (\text{III.33})$$

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

Autrement $\sum_{j=1}^n K_{ij}^{(e)} \cdot T_j^{(e)} = F_i^{(e)}$, s'écrit sous forme matricielle : $[K] \cdot \{T\} = \{F\}$.

Avec :

$$\begin{cases} K_{ij}^{(e)} = \iint_{\Omega_e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] K \cdot d\Omega + \iint_{\Omega_e} N_i N_j \left(\frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} - S_p \right) d\Omega \\ F_i^{(e)} = \iint_{\Omega_e} N_i \left(S_c + \frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} T^0 \right) \cdot d\Omega + \oint_{\Gamma_e} N_i q_n ds = 0 \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

Ou $K_{ij}^{(e)} = k_{ji}^{(e)}$ du fait de la symétrie de la matrice $[K]$ et le second terme de $F_i^{(e)}$

• Calcul du 2^{ème} terme du membre de droite de $F_i^{(e)}$

$$\oint_{\Gamma_e} q_n \cdot N_i \cdot ds = \oint_{\Gamma_e} K \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} \right) N_i \cdot ds = \oint_{\Gamma_e} K \cdot (\vec{\nabla} T \cdot \vec{n}) N_i \cdot ds = \oint_{\Gamma_e} K \cdot \frac{\partial T}{\partial n} N_i \cdot ds \quad (\text{III.35})$$

Par convention, on désignera toute frontière intérieure commune Γ_e entre deux éléments finis par AB et toute frontière extérieure des éléments finis périphériques du domaine global par CD. Au niveau de chaque frontière intérieure AB la somme des gradients $\frac{\partial T}{\partial n}$ est nulle.

Sur les frontières CD de chaque élément fini, le gradient $\frac{\partial T}{\partial n}$ est imposé par les conditions aux limites du domaine.

$$q_n = K \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_\infty - T) + \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T^4) \quad (\text{III.36})$$

On calcule cette partie de q_n en utilisant une température calculée à l'itération précédente T^* (vu la forte non linéarité), donc :

$$\oint_{\Gamma_e} q_n \cdot N_i \cdot ds = \oint_{\Gamma_e} q_n^* \cdot N_i ds = \oint_{\Gamma_e} [h(T_\infty - T_i^*) + \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T_i^{*4})] N_i \cdot ds \quad (\text{III.37})$$

Ce terme est évalué uniquement pour les éléments finis de frontière et q_n^* sera noté q_n par la suite.

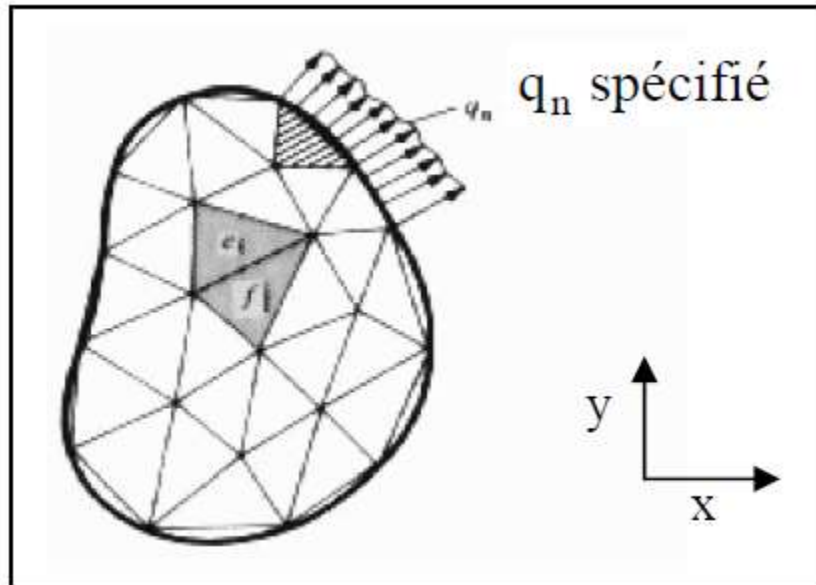


Figure III.4 : Équilibre interne entre les différents éléments du domaine et effet de la frontière [33].

3.3 Fonctions d'interpolation

De la formulation en éléments finis (équation III.33) et du calcul des matrices d'éléments finis (équation III.34), on remarque que T doit être au moins une fonction bilinéaire en x et y et linéaire en temps, comme elle est globalement approximée dans l'expression (III.38).

L'écriture de cette expression sous forme polynomiale est :

$$T(x, y, t) = C_1 + C_2x + C_3y + C_4xy \quad (\text{III.38})$$

Où les C_i dépendent du temps. On détermine leurs valeurs dans la suite pour un élément quadrilatère et on déduit les expressions des fonctions d'interpolation.

❖ Application pour un élément quadrilatère à quatre nœuds

En utilisant l'approximation polynomiale bilinéaire (III.38) pour la variable T , on obtient le système suivant (III.39) pour un élément quadrilatère à quatre nœuds.

$$\begin{cases} T_1 = T(x_1, y_1, t) = C_1 + C_2x_1 + C_3y_1 + C_4x_1y_1 \\ T_2 = T(x_2, y_2, t) = C_1 + C_2x_2 + C_3y_2 + C_4x_2y_2 \\ T_3 = T(x_3, y_3, t) = C_1 + C_2x_3 + C_3y_3 + C_4x_3y_3 \\ T_4 = T(x_4, y_4, t) = C_1 + C_2x_4 + C_3y_4 + C_4x_4y_4 \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

En posant :

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

$$\text{On aura : } \{T\} = [H]\{C\} \quad \text{où} \quad \{C\} = [H]^{-1}\{T\}$$

$$\text{Prenons une matrice } [L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \quad \text{telle que } [L] = [H]^{-1}$$

$$\{C\} \text{ peut s'écrire donc : } \{C\} = [L]\{T\}$$

L'équation (III.33) dans la forme générale (x, y, t) sera :

$$T(x, y, t) = [g][L]\{T\} \quad \text{(III.40)}$$

$$\text{Avec} \quad [g] = [1 \quad x \quad y \quad xy]^t$$

En utilisant l'équation (III.26) et (III.34), on obtient les fonctions d'interpolations N_i :

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

qui peuvent s'écrire donc sous la forme :

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

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

3.4 Calcul des matrices et vecteurs d'éléments finis

Le calcul de la matrice rigidité $[K_{ij}^{(e)}]$ et du vecteur force $\{F_i^{(e)}\}$ de l'équation (III.34) dépend à la fois des propriétés du matériau considéré et des coefficients du modèle source élaboré. Tous ces coefficients sont aussi fonction de la température. Notre méthode est d'évaluer ces coefficients en fonction de la température de l'itération précédent T^* , puis les considérer comme des constantes (Cte_i) dans les expressions.

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

$$[K_{ij}^{(e)}] = K. [S^{11}] + K. [S^{22}] + [S^{33}] \quad (\text{III.43})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} S_{ij}^{11} = \iint_{\Omega_e} \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} dx \cdot dy \\ S_{ij}^{22} = \iint_{\Omega_e} \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} dx \cdot dy \\ S_{ij}^{33} = \iint_{\Omega_e} N_i \cdot N_j \cdot \left(\frac{\rho C_p}{\Delta t} - S_p \right) \cdot dx \cdot dy = \iint_{\Omega_e} N_i \cdot N_j \cdot (Cte_1) \cdot dx \cdot dy \end{cases}$$

Ainsi que, nous avons :

$$F_i^{(e)} = \iint_{\Omega_e} N_i \left((S_c + \frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} T^0) \right) \cdot d\Omega + \oint_{\Gamma_e} N_i \cdot q_n^* \cdot ds = \iint_{\Omega_e} N_i (Cte_2) \cdot dx \cdot dy + \oint_{\Gamma_e} N_i \cdot q_n \cdot ds \quad (\text{III.38})$$

En utilisant les fonctions d'interpolation développées précédemment, les matrices dans les équations (III.43) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{ij}^{11} = L_{2i}L_{2j} \int_{\Omega_e} dx dy + (L_{2i}L_{4j} + L_{2j}L_{4i}) \int_{\Omega_e} y dx dy + L_{4i}L_{4j} \int_{\Omega_e} y^2 dx dy \\ S_{ij}^{22} = L_{3i}L_{3j} \int_{\Omega_e} dx dy + (L_{3i}L_{4j} + L_{3j}L_{4i}) \int_{\Omega_e} x dx dy + L_{4i}L_{4j} \int_{\Omega_e} x^2 dx dy \\ S_{ij}^{33} = \left(\frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} - S_p \right) \left[L_{i1}L_{1j} \int_{\Omega_e} dx dy + (L_{i1}L_{2j} + L_{i2}L_{1j}) \int_{\Omega_e} x dx dy + (L_{i1}L_{3j} + L_{i3}L_{1j}) \int_{\Omega_e} y dx dy + \right. \\ \left. (L_{i1}L_{4j} + L_{i2}L_{3j} + L_{i3}L_{2j} + L_{i4}L_{1j}) \int_{\Omega_e} x \cdot y \cdot dx \cdot dy + L_{i2}L_{2j} \int_{\Omega_e} x^2 \cdot dx \cdot dy + (L_{i2}L_{4j} + L_{i4}L_{2j}) \right. \\ \left. \int_{\Omega_e} x^2 \cdot y \cdot dx \cdot dy + L_{i3}L_{3j} \int_{\Omega_e} y^2 \cdot dx \cdot dy + (L_{i3}L_{4j} + L_{i4}L_{3j}) \int_{\Omega_e} x \cdot y^2 \cdot dx \cdot dy + L_{i4}L_{4j} \int_{\Omega_e} x^2 \cdot y^2 \cdot dx \cdot dy \right] \end{array} \right. \quad (\text{III.44})$$

On remarque que pour simplifier l'écriture des équations on a noté une double intégrale par une simple.

En notant $I_{mm} = \int x^m \cdot y^n dx \cdot dy$, de l'équation (III.43), on aura :

$$\begin{aligned} k_{ij} = & (KL_{2i}L_{2j} + KL_{3i}L_{3j} + (Cte_1)L_{i1}L_{1j})\mathbf{I}_{00} + \\ & (KL_{2i}L_{4j} + KL_{2j}L_{4i} + (Cte_1)(L_{i1}L_{3j} + L_{i3}L_{1j}))\mathbf{I}_{01} + \\ & (KL_{3i}L_{4j} + KL_{4i}L_{3j} + (Cte_1)(L_{i1}L_{2j} + L_{i2}L_{1j}))\mathbf{I}_{10} + \\ & (KL_{4i}L_{4j} + (Cte_1)L_{i3}L_{3j})\mathbf{I}_{02} + (KL_{4i}L_{4j}(Cte_1)L_{i2}L_{2j})\mathbf{I}_{20} + \\ & (Cte_1)(L_{i1}L_{4j} + L_{i2}L_{3j} + L_{i3}L_{2j} + L_{i4}L_{1j})\mathbf{I}_{11} + (Cte_1)(L_{i2}L_{4j} + L_{i4}L_{2j})\mathbf{I}_{21} + \\ & (Cte_1)(L_{i3}L_{4j} + L_{i4}L_{3j})\mathbf{I}_{12} + (Cte_1)L_{i4}L_{4j}\mathbf{I}_{22} \end{aligned} \quad (\text{III.45})$$

Et :

$$F_i^{(e)} = \left(S_c + \frac{\rho \cdot C_p}{\Delta t} T^0 \right) \left[L_{i1} \int_{\Omega_e} dx \cdot dy + (L_{i2}) \int_{\Omega_e} x \cdot dx \cdot dy + (L_{i3}) \int_{\Omega_e} y \cdot dx \cdot dy + (L_{i4}) \int_{\Omega_e} xy \cdot dx \cdot dy \right] + L_{i1} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot ds + L_{i2} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot x \cdot ds + L_{i3} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot y \cdot ds + L_{i4} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot xy \cdot ds \tag{III.46}$$

$$F_i^{(e)} = (Cte_2) \cdot [L_{i1}I_{00} + L_{i2}I_{10} + L_{i3}I_{01} + L_{i4}I_{11}] + L_{i1} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot ds + L_{i2} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot x \cdot ds + L_{i3} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot y \cdot ds + L_{i4} \oint_{\Gamma_e} q_n \cdot xy \cdot ds \tag{III.47}$$

La transformation de *Green* permet la transformation d’une intégrale double de surface I_{mn} en une intégrale simple curviligne le long de la frontière de l’élément considéré et son calcul numérique est donné par la méthode de *Gauss-Legendre*.

3.5 Assemblage et stockage des matrices d’éléments finis

L’assemblage est une opération qui consiste à construire la matrice globale $[K]$ et le vecteur global $\{F\}$ du domaine complet à partir des matrices élémentaires $[K^{(e)}]$ et des vecteurs élémentaires $\{F^{(e)}\}$ des éléments finis. Pour représenter cet assemblage, on illustre la procédure par un simple exemple en considérant seulement le maillage de deux éléments finis quadrilatères (Figure III.4). Soient $K_{ij}^{(1)}$ et $K_{ij}^{(2)}$ ($i, j = 1,2,3,4$) les coefficients des matrices de rigidité correspondant à ces éléments. A partir du maillage on obtient la correspondance entre les nœuds globaux et les nœuds locaux des éléments pour construire les tableaux de correspondance, ceci permet d’obtenir les coefficients de la matrice de rigidité globale $[K]$.

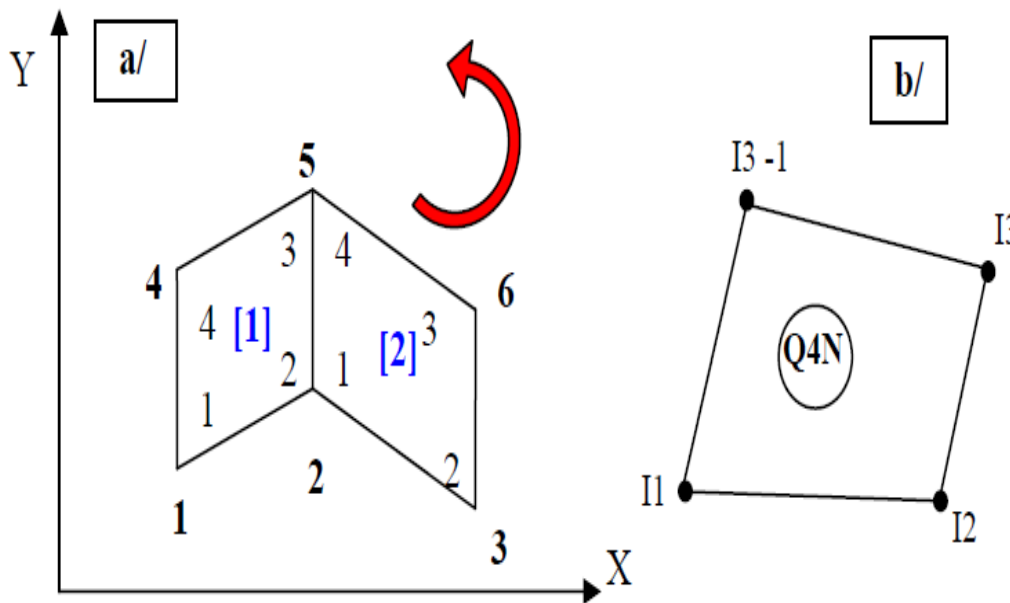


Figure III.5.a,b : a/ Assemblage de deux éléments finis quadrilatères Q4N. b/ EF Q4N quelconque[34] .

Coefficients pour l'élément (1) et l'élément (2) :

$$[K^{(1)}] = \begin{bmatrix} K_{11}^{(1)} & K_{12}^{(1)} & K_{13}^{(1)} & K_{14}^{(1)} \\ K_{21}^{(1)} & K_{22}^{(1)} & K_{23}^{(1)} & K_{24}^{(1)} \\ K_{31}^{(1)} & K_{32}^{(1)} & K_{33}^{(1)} & K_{34}^{(1)} \\ K_{41}^{(1)} & K_{42}^{(1)} & K_{43}^{(1)} & K_{44}^{(1)} \end{bmatrix} \quad [K^{(2)}] = \begin{bmatrix} K_{11}^{(2)} & K_{12}^{(2)} & K_{13}^{(2)} & K_{14}^{(2)} \\ K_{21}^{(2)} & K_{22}^{(2)} & K_{23}^{(2)} & K_{24}^{(2)} \\ K_{31}^{(2)} & K_{32}^{(2)} & K_{33}^{(2)} & K_{34}^{(2)} \\ K_{41}^{(2)} & K_{42}^{(2)} & K_{43}^{(2)} & K_{44}^{(2)} \end{bmatrix}$$

La matrice $[K]$ assemblée sera donc :

	1	2	3	4	5	6
1	$k_{11}^{(1)}$	$k_{12}^{(1)}$	0	$k_{14}^{(1)}$	$k_{13}^{(1)}$	0
2	$k_{21}^{(1)}$	$k_{22}^{(1)} + k_{11}^{(2)}$	$k_{12}^{(2)}$	$k_{24}^{(1)}$	$k_{23}^{(1)} + k_{14}^{(2)}$	$k_{13}^{(2)}$
3	0	$k_{21}^{(2)}$	$k_{22}^{(2)}$	0	$k_{24}^{(2)}$	$k_{23}^{(2)}$
4	$k_{41}^{(1)}$	$k_{42}^{(1)}$	0	$k_{44}^{(1)}$	$k_{43}^{(1)}$	0
5	$k_{31}^{(1)}$	$k_{32}^{(1)} + k_{41}^{(2)}$	$k_{42}^{(2)}$	$k_{34}^{(1)}$	$k_{33}^{(1)} + k_{44}^{(2)}$	$k_{43}^{(2)}$
6	0	$k_{31}^{(2)}$	$k_{32}^{(2)}$	0	$k_{34}^{(2)}$	$k_{33}^{(2)}$

La matrice $[K]$ étant symétrique, dans le programme, seuls les coefficients non nuls sont stockés selon une méthode dite "stockage complexe aléatoire". Deux vecteurs

AD et AE permettent ce stockage, le premier sert au stockage des coefficients diagonaux et le second au stockage des coefficients situés au-dessus de la diagonale.

3.6 Génération du maillage

La génération du maillage est une partie importante de la modélisation par la méthode des éléments finis. Le développement d'une méthode de discrétisation efficace est l'objectif principal de la procédure qui va suivre. Il existe des techniques de génération de maillage selon le degré de complexité du domaine mais le maillage doit toujours vérifier les conditions suivantes :

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

Dans notre cas le maillage est défini de telle sorte que le domaine physique est partagé en deux zones, pour les mêmes raisons que pour la méthode MVF, une zone à maillage fin courant le long du cordon et une autre avec un maillage grossier au-delà de cette zone.

La modélisation par éléments finis induit des résultats avec des champs d'évolution discontinus de la fonction recherchée. Les résultats évoluent en fonction du maillage adopté et convergent vers la solution exacte. Pour déterminer une densité optimale du maillage, celui-ci est affiné progressivement jusqu'à ce que les résultats obtenus se stabilisent ; le maillage obtenu est considéré comme optimal.

3.7 Méthode de résolution numérique

Après remplissage et stockage de la matrice de rigidité $[K]$ et du vecteur $\{F\}$, on calcule le vecteur solution $\{T\}$, pour cela, on doit résoudre le système d'équations (III.28) :

$$[K].\{T\} = \{F\} \text{ ou bien : } \sum_{j=1}^N k_{ij}.T_j = F_i \text{ avec : } i = 1, \dots, N$$

(III.48)

Pour la résolution, on adopte la méthode itérative de *Gauss Seidel Accéléré* (avec facteur *desurrelaxation* ω) . L'avantage principal des méthodes itératives est qu'elles sont aptes à résoudre des systèmes d'équations de taille assez élevée. Cette méthode consiste à modifier le schéma itératif de *Gauss Seidel* par un schéma qui consiste à accélérer encore le processus de convergence par le remplacement des termes de la solution avec les valeurs déjà calculées de l'itération actuelle, immédiatement dans le schéma itératif pour la détermination des valeurs restantes. La procédure itérative consiste essentiellement à passer de l'étape (r) à l'étape (r+1) par le schéma suivant ($T^{(r)}$ étant déjà calculé) [34]

$$\begin{aligned} & \text{faire } i = 1 \text{ à } N \\ & \text{som} = \sum_{j < i} k_{ij}T_j^{(r+1)} + \sum_{j > i} k_{ij}T_j^{(r)} \\ & T_i^{(r+1)} = (1 - \omega)T_i^{(r)} + \frac{\omega}{k_{ij}}(F_i - \text{som}) \end{aligned}$$

(III.49)

Avec i, j indices de la matrice de rigidité $[K]$ et du vecteur force $\{F\}$ et r est l'indice d'itération, ($r = 0$: vecteur initial). Le paramètre de sur-relaxation ω , dans notre cas, est choisi dans l'intervalle $[1,2]$.

CHAPITRE IV :
SIMULATION DE SOUDAGE SUR ABAQUS

1. INTRODUCTION

De nos jours, la simulation numérique est très utilisée afin de déterminer les niveaux de contraintes et déformations résiduelles générés par les procédés de soudage. En effet, la réalisation de structures mécano-soudées complexes nécessite la prise en compte fine des contraintes et déformations résiduelles dès l'étape de conception. En outre, de plus en plus d'études sont consacrées à l'établissement de critères thermo mécano- métallurgiques pour améliorer la soudabilité des matériaux, dans un but de limiter au maximum l'apparition de fissures en cours de fabrication. Dans cet esprit, nous nous attacherons à voir comment la simulation numérique peut nous aider à améliorer la répétabilité de l'Inconel 304L par fabrication additive.

2. Logiciel ABAQUS

ABAQUS a été développé par HIBBIT, KARLSSON & Sorensen (HKS) devenu ABAQUS, INC depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

ABAQUS est donc un progiciel de calcul éléments finis qui se compose de trois produits : ABAQUS/Standard,

ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

✓ **ABAQUS/Standard** est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.

✓ **ABAQUS/Explicit** est un solveur qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

✓ **ABAQUS/CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

3. Bases de l'interface d'ABAQUS

3.1 Organisation de l'interface

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivants :

- la fenêtre d'affichage graphique
- une première barre de menus en haut : ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve
- une deuxième barre horizontale d'outils : y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)
- une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

Plus important :

- on dispose à gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.

4- Les Modules

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

a- Le module « PART ».

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans

ABAQUS CAE, soit en l'important d'un logiciel de dessin tiers.

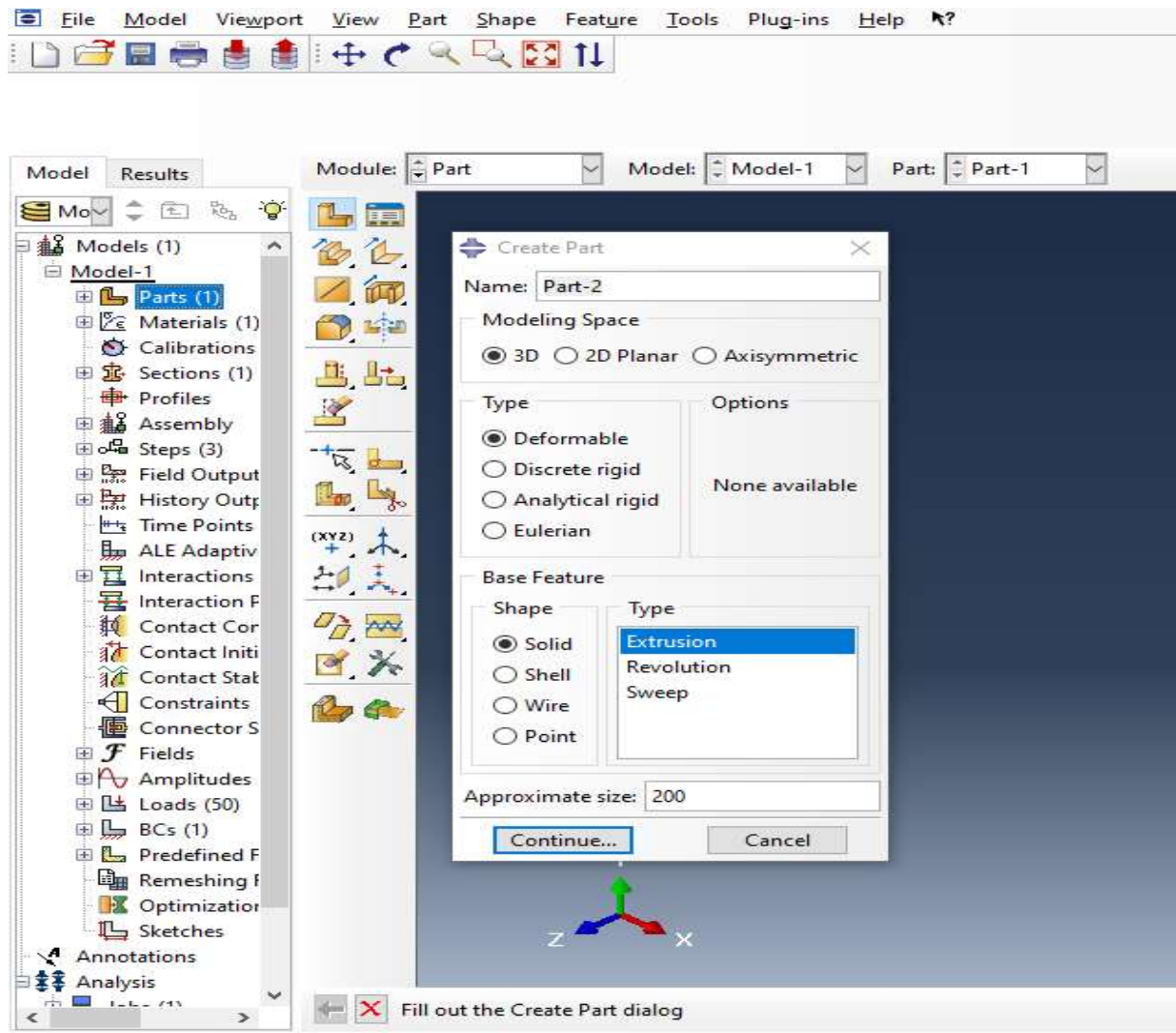


Figure VI.1 : création de la géométrie.

b- Le module « PROPERTY ».

Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

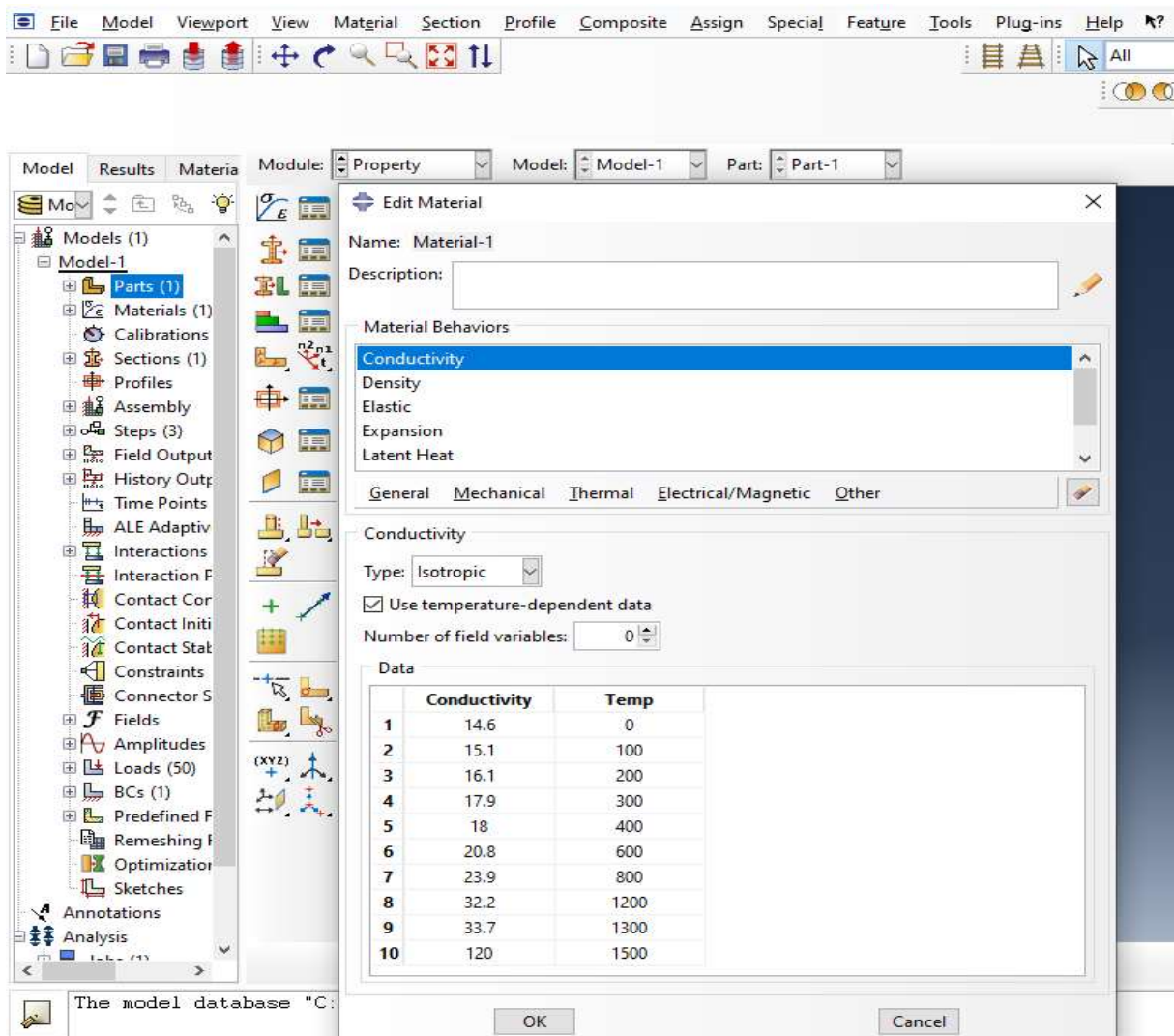


Figure VI.2 : propriété Matériaux et section.

c- Le module « ASSEMBLY ».

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.

Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

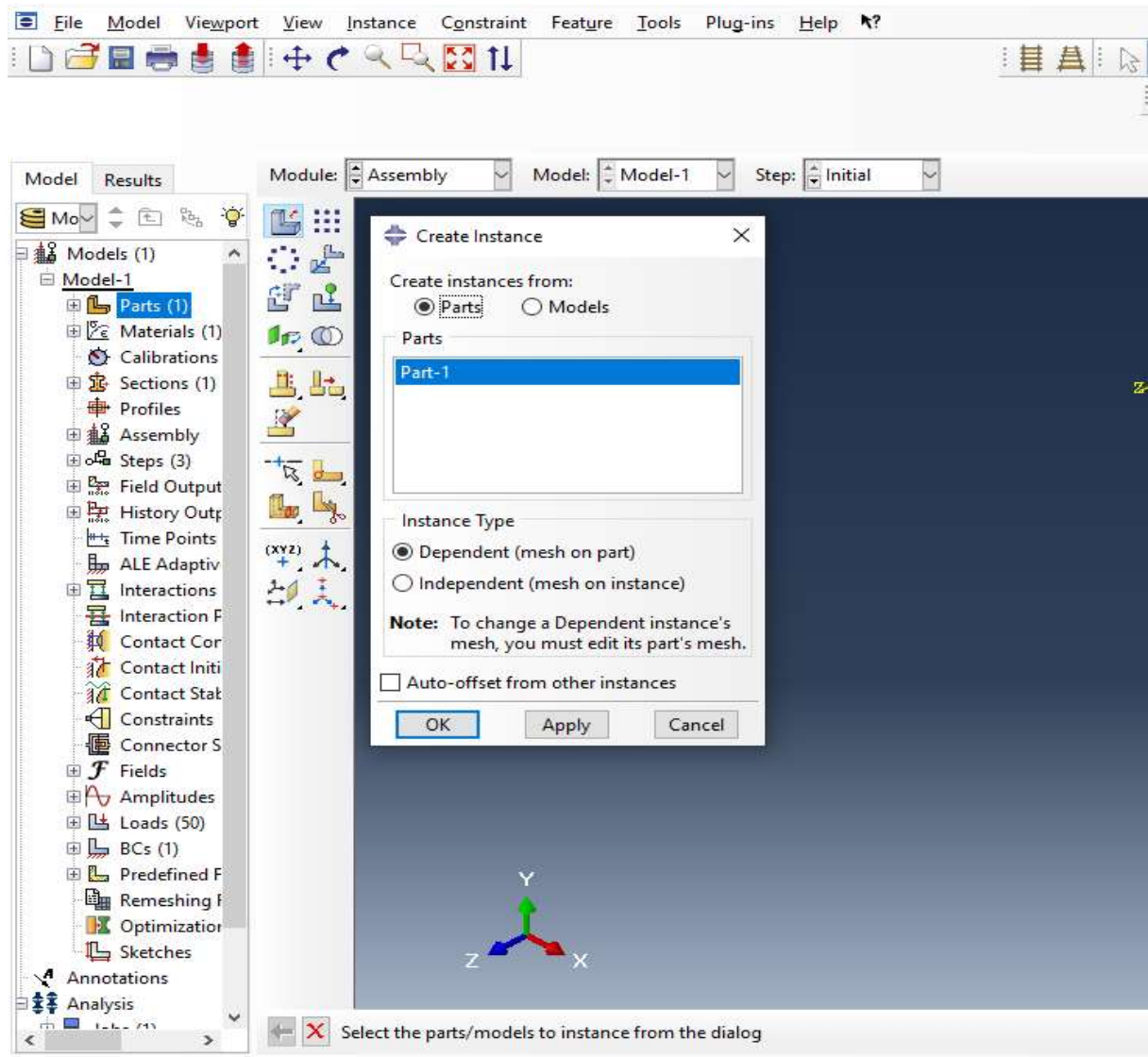


Figure VI.3 : Instance et assemblage.

d- Le module « STEP ».

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

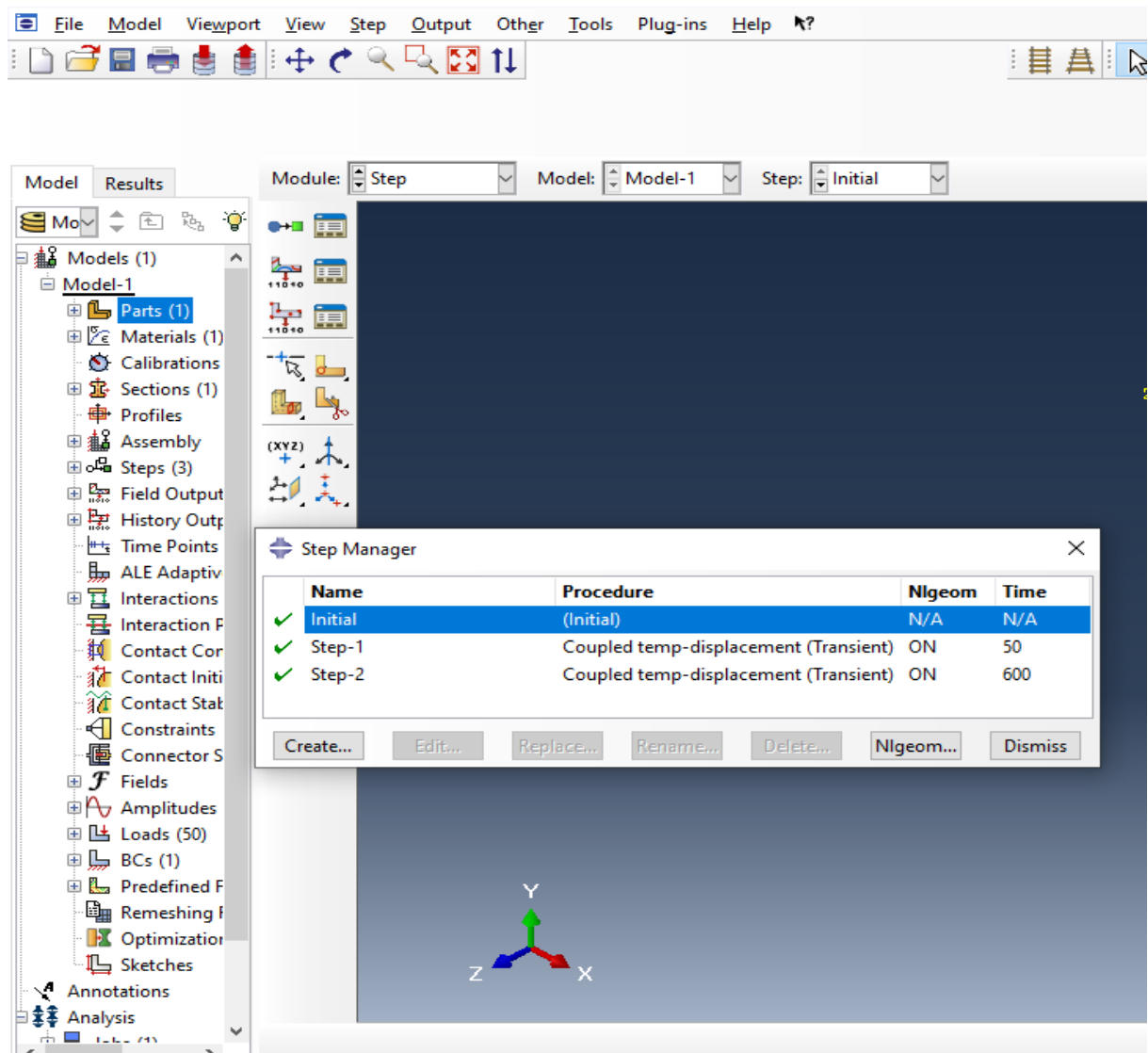


Figure VI.4 : Création de step.

e- Le module « INTERACTION ».

Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

f- Le module « LOAD ».

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

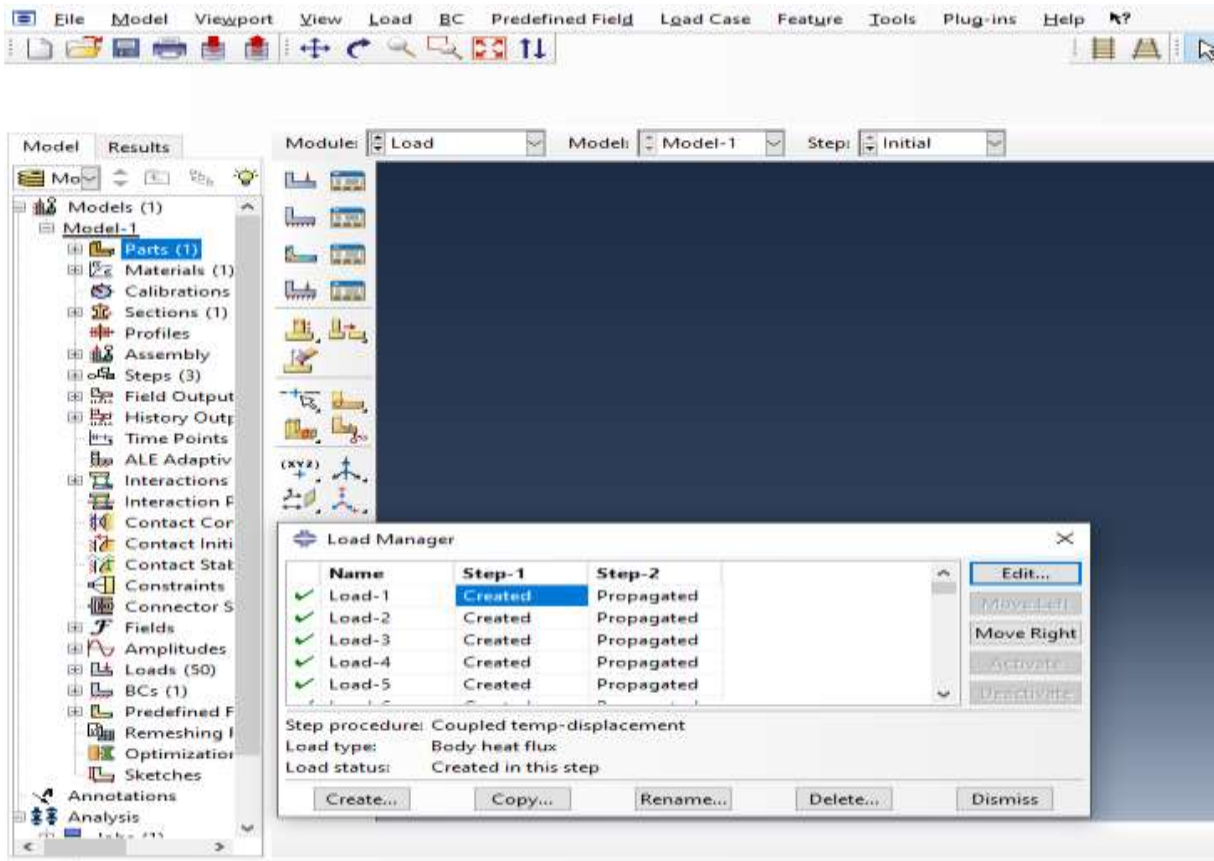


Figure VI.5 : création des chargements.

g- Le module « MESH ».

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

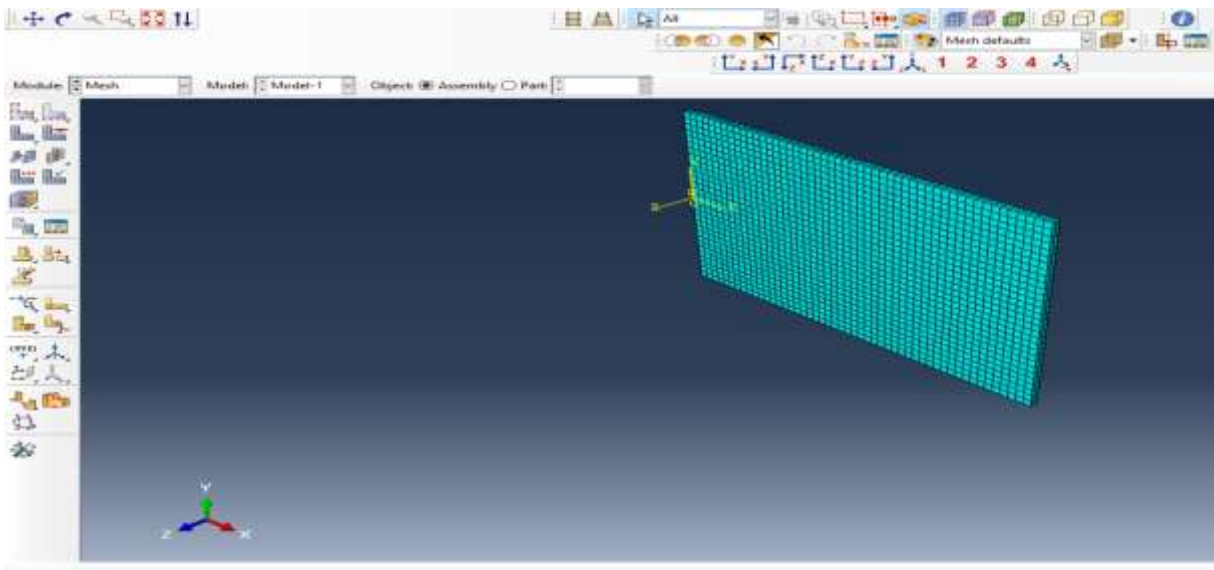
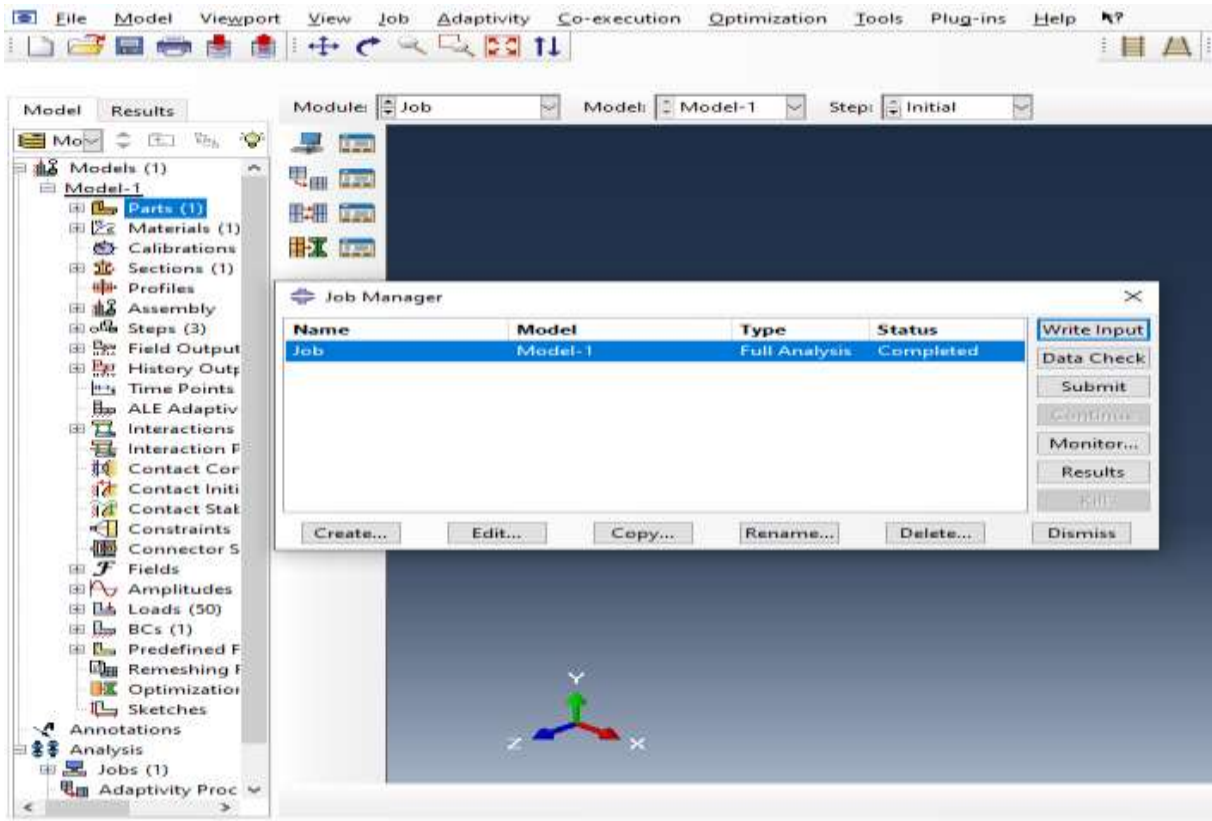


Figure VI.6 : Création de maillage.**h- Le module « JOB ».**

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

**Figure. VI.7 : Lancement de calcul.****i- Le module « VISUALIZATION ».**

Ce module permet de visualiser le **modèle** et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

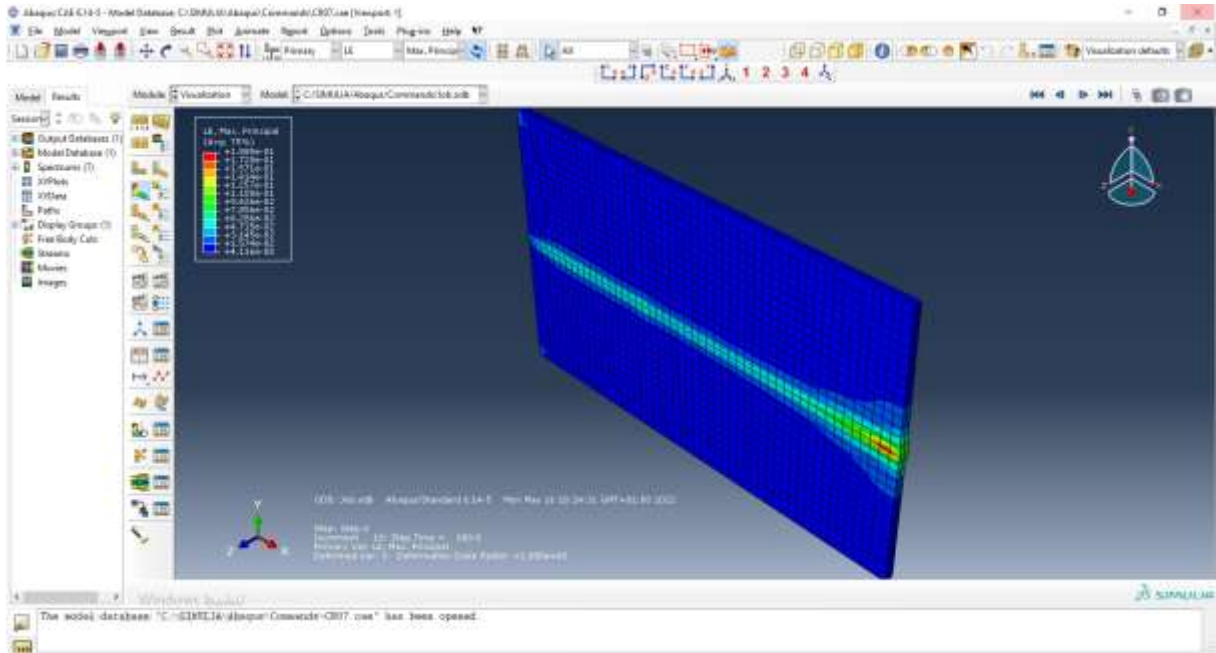


Figure VI.8 Affichage des résultats

j- Le module « SKETCH ».

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

5. simulation de soudage d’acier 304L sur ABAQUS

a- Composition chimique d’acier 304L

C	Mo	Cu	Ni	Mn	Cr	Si	P	S
0.023	0.257	0.39	8.32	1.73	17.95	0.68	0.027	0.024

Tableau IV.1 Composition chimique d’acier 304L

b- Les propriétés physiques

Densité : $7900 (Kg/m^3)$ / $T_{solidus}:1400$ / $T_{liquidus}: 1454$

Température d'intervalle (°C)	Dilatation thermique ($\alpha \times 10^{-6} K^{-1}$)	T (°C)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}K^{-1}$)	Chaleur spécifique ($JKg^{-1}K^{-1}$)	Module de Young E (GPa)	Limite d'élasticité (MPa)
20-100	16	20	15	500	200	265
20-200	17	100	16	500	194	218
20-300	17	200	17.5	520	186	186
20-400	18	300	19	530	179	170
20-500	18	400	20.5	540	172	155
20-600	19	500	22	540	165	149

Tableau IV.2 Les propriétés physiques d’acier 304L

c-Paramètres du procédé de soudage TIG

Courant (A)	Tension (V)	Vitesse (m /s)
10	35	0.002

Tableau IV.3 Paramètres du procédé de soudage TIG

Longueur de plaque : **100 mm**

Epaisseur de plaque : **2 mm**

Largeur de plaque : **30 mm**

6. RESULTATS

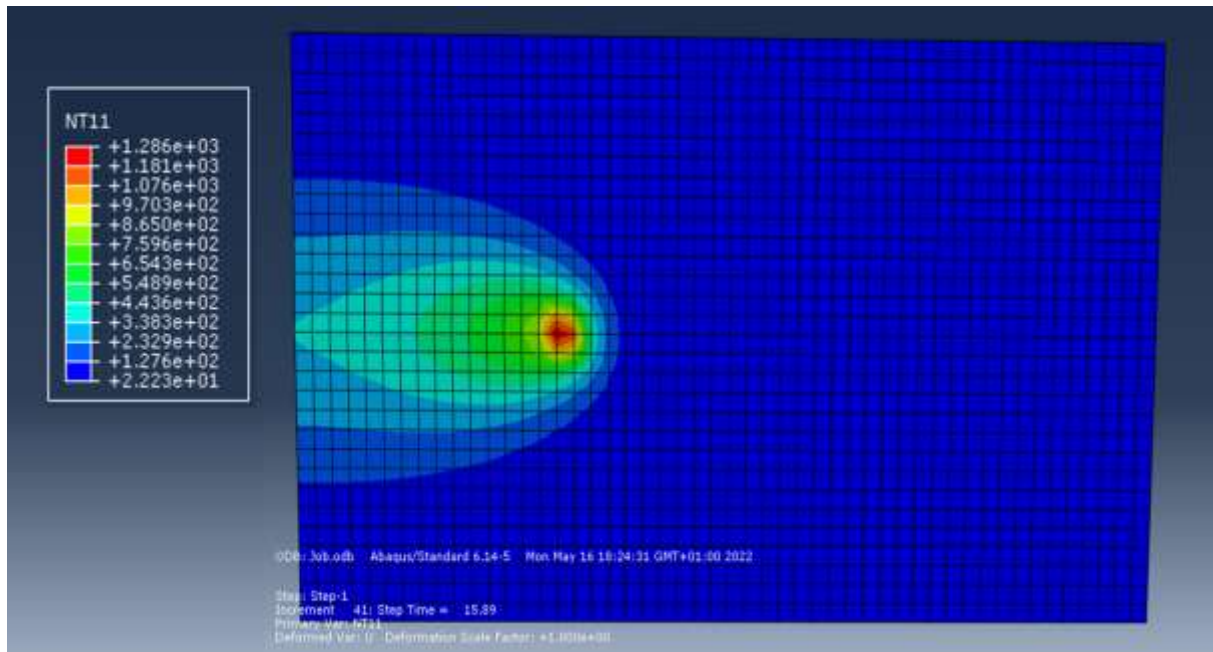


Figure IV.9. La distribution de température de l'apport de chaleur de Goldak à 15 ,89 s.

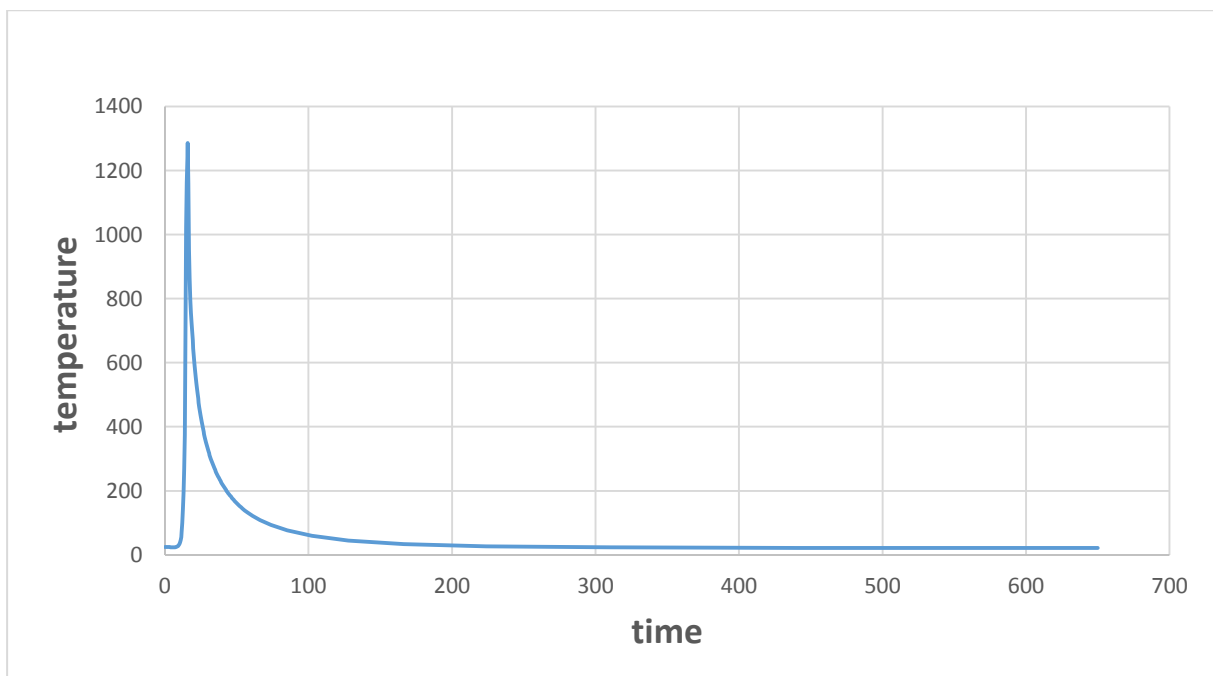


Figure IV.10. Température d'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

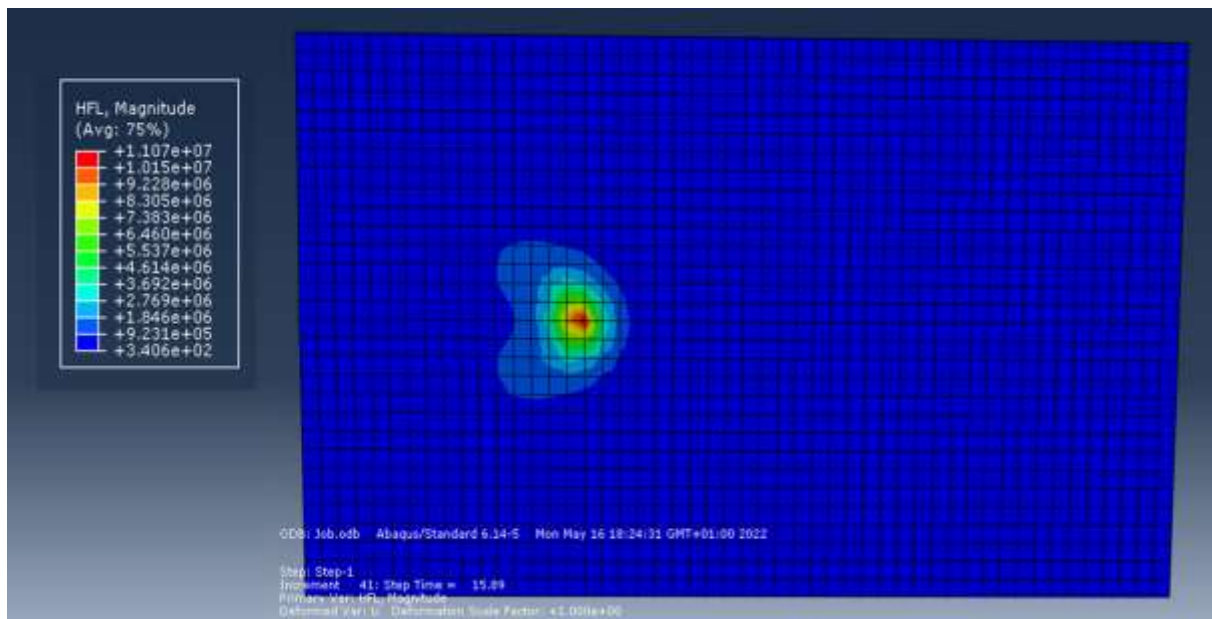


Figure IV.11. La distribution de flux de l'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

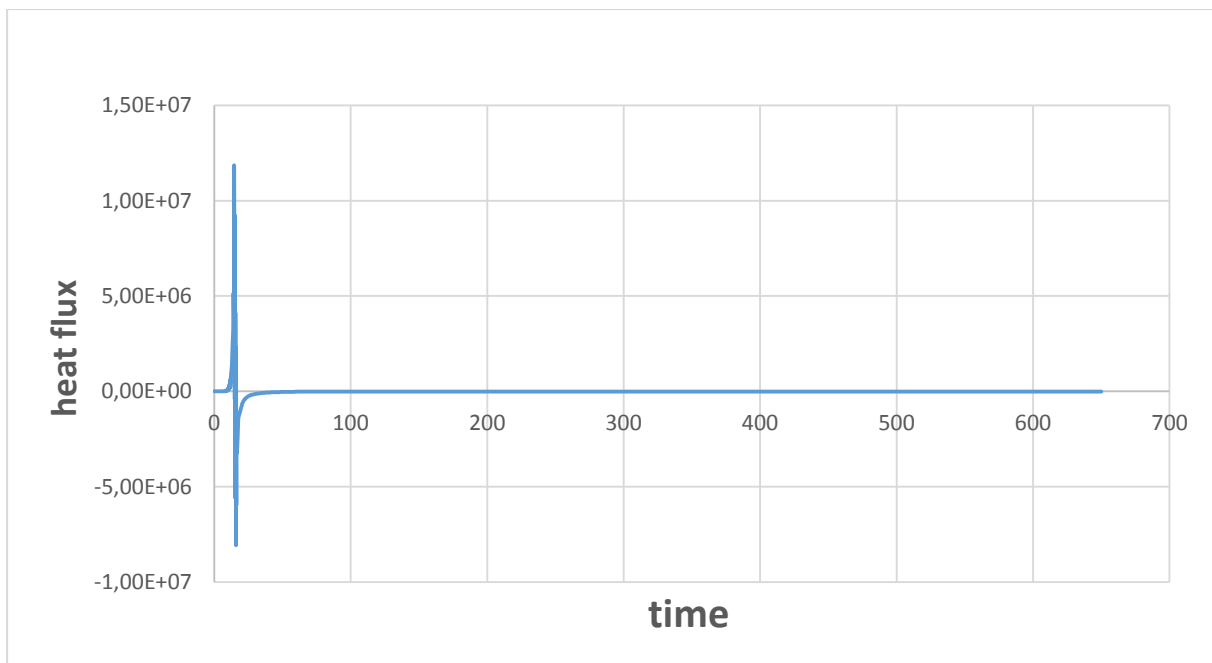


Figure IV.12. Le flux d'apport de chaleur de Goldak à 15,89 s.

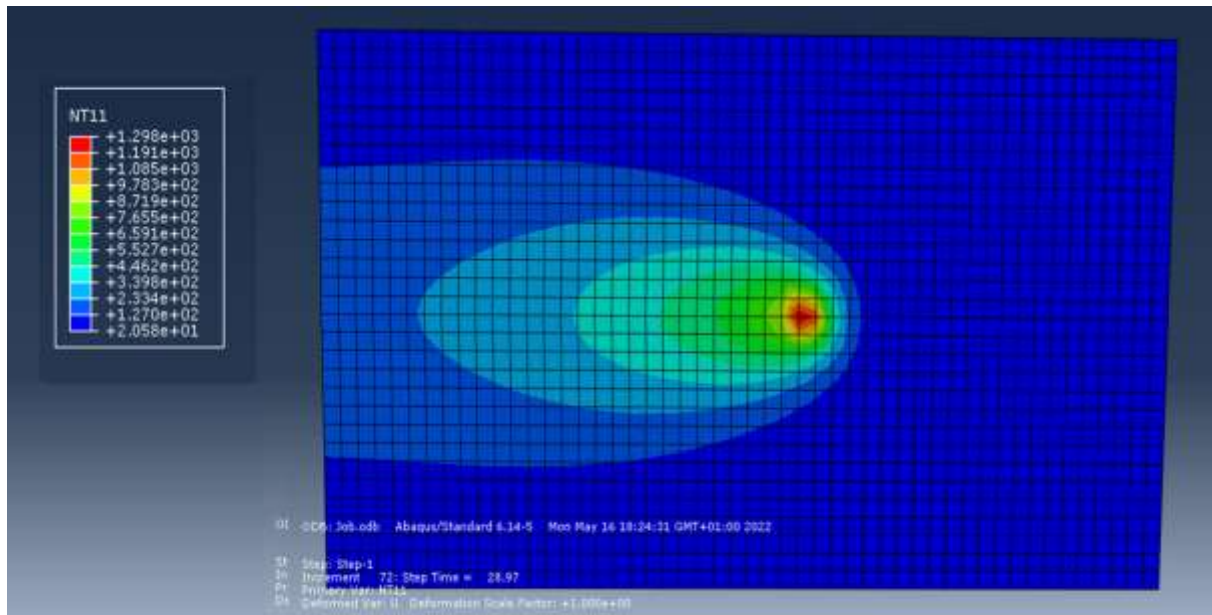


Figure IV.13. La distribution de température de l'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

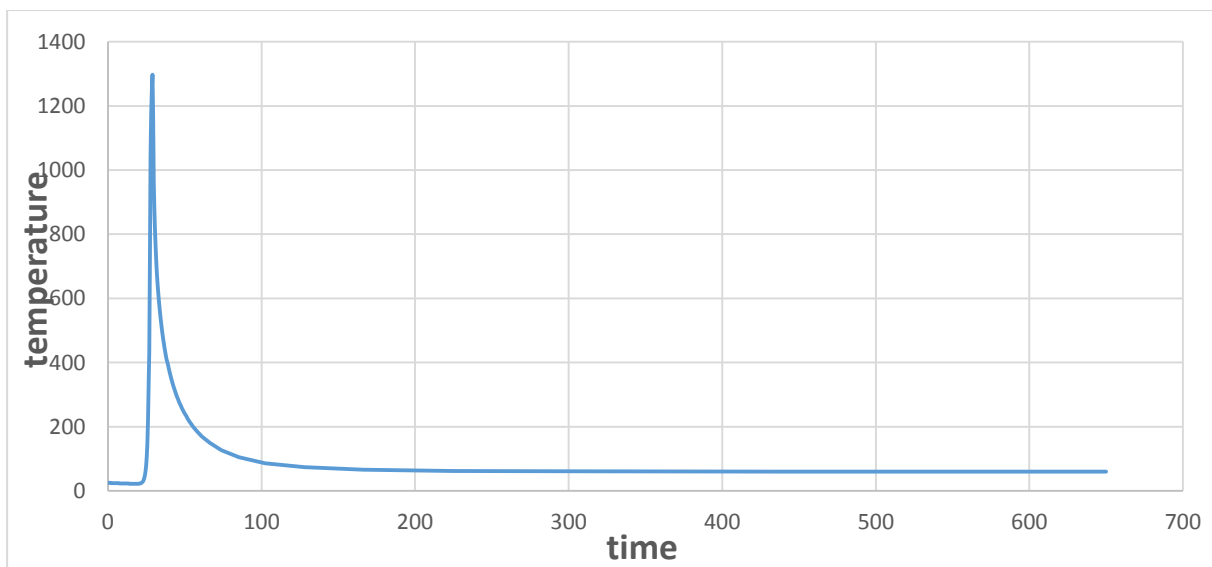


Figure VI.14. Température d'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

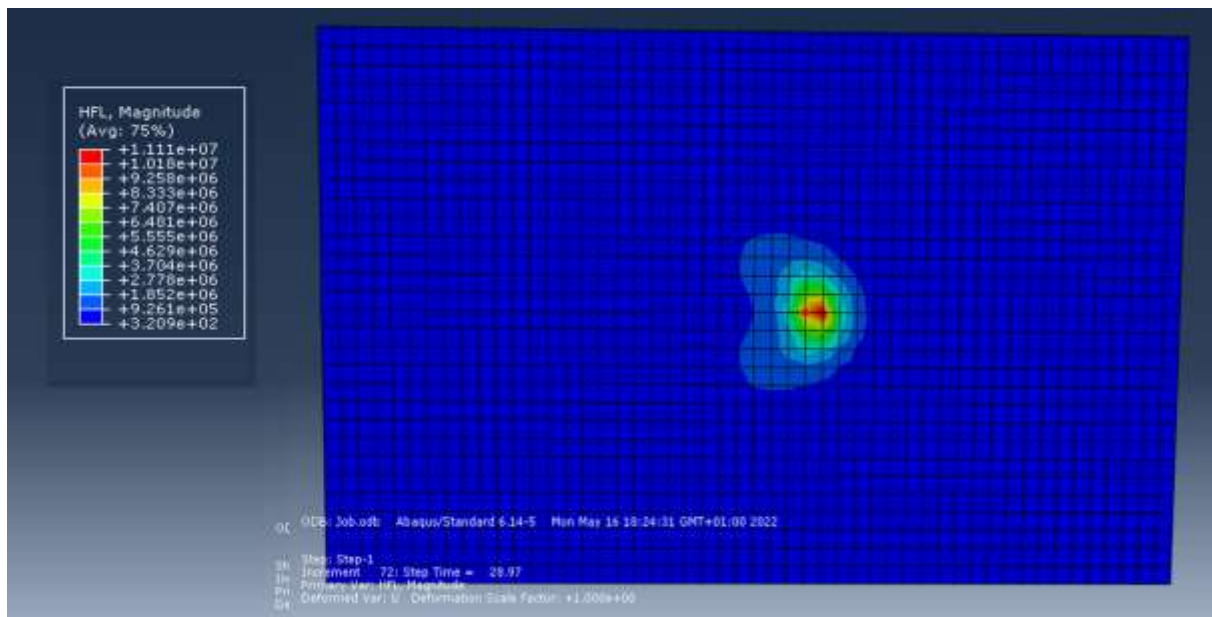


Figure IV.15. La distribution de flux de l'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

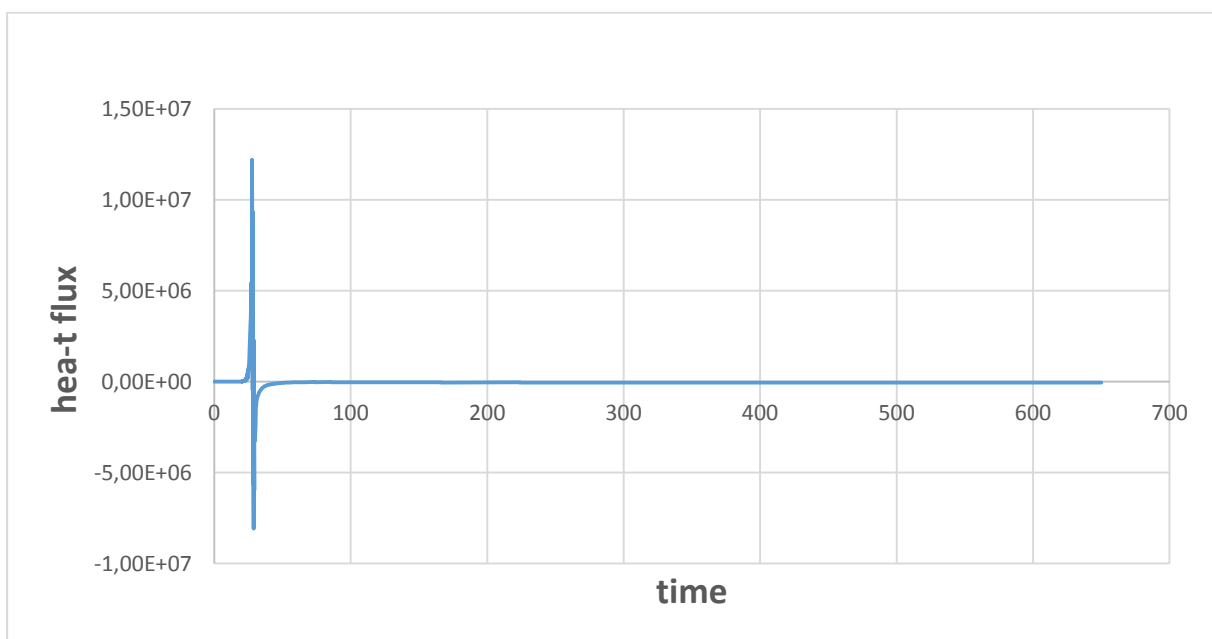


Figure IV.16. Le flux d'apport de chaleur de Goldak à 28,97 s.

7. Interprétations des résultats et commentaires

Les figures IV (9-10-13 et 14) montrent la répartition de température par les contours isothermes et les champs des températures (cartographies thermiques) sur les tôles assemblées aux instants ($t=15,89s$ et $28,97s$). Ces champs thermiques montrent l'évolution de la température au cours du soudage et retracent la trajectoire de la source de chaleur.

On constate que les régions proches de la source sont soumises à des gradients de température très élevés. Les lignes des isothermes sont beaucoup plus denses en amont qu'en aval de la source de chaleur, car la diffusion de chaleur et le déplacement de la source ont le même sens en amont mais opposé en aval.

En présence des gradients thermiques importants par ce phénomène de soudage, nous avons évalué le flux thermique traversant la tôle à travers sa vectrice densité TF.

Cette densité du flux thermique ($watt/m^2$) est exprimée par la loi de Fourier.

Les figures IV (11-12-15 et 16) montrent une répartition du flux thermique aux instants ($t=15,89s$ et $28,97s$) et un zoom de la zone de concentration de ces vecteurs.

Nous déduisons que les vecteurs de grandes intensités sont orientés vers l'avant gauche et en profondeur (en amont de la source).

D'autres vecteurs en aval de la source de faibles intensités sont orientés vers l'arrière gauche et en profondeur. Cela est justifié d'une part par la direction de la chaleur de l'arc électrique qui est orienté verticalement vers la tôle, et d'autre part, suivant la vitesse de soudage et la diffusion de la chaleur ont le même sens ou opposé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a permis aussi de voir l'effet des paramètres de soudage sur les évolutions de champ de température, les cycles thermiques le flux thermique et les étendus des Zones à risque (ZF et ZAT).

Aussi bien, elle a permis de déterminer les limites et le taille du bain de fusion de 304L.

Ainsi que, le comportement du vecteur de flux thermique et son orientation sur chaque point de la tôle, selon la position de la source de chaleur et sa vitesse de soudage.

L'issue de notre travail effectuée, concerne l'étude de la simulation numérique du procédé de soudage T.I.G pour les cordons de soudure pour des tôles d'acier inoxydable séries 304L ayant un usage aéronautique en utilisant la méthode des éléments finis. Pour notre modélisation nous avons pris une distribution gaussienne de la source de chaleur, avec des propriétés physiques dépendantes du temps.

Nous avons pu, suite à grande effort et en tant compte de maillage selon la trajectoire de la source de chaleur dans le cas (cordon rectiligne), déterminer la distribution des températures. En exécutant un programme qui nous a donné 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 zone à risque de la température dans chaque point doit rester inférieure à la température de fusion du métal, on s'intéresse aussi à la détermination des vecteurs du flux thermique en 2D et leur comportement.

La connaissance de flux thermique et du champ de température lors d'un procédé de soudage est primordiale pour toute étude du comportement thermique ou mécanique (ou métallurgique) des soudures.

La compréhension du comportement du flux thermique et la maîtrise de l'étendue de ces zones thermiques à risque sont importantes pour toute étude préventive de l'effet des différents paramètres de soudage. En outre, la détermination de l'état microstructural et les propriétés mécaniques du cordon de soudure, dépend de la direction des flux thermiques et les variations de température, en termes de vitesse de refroidissement local. Donc l'analyse thermique des

problèmes de soudage est primordiale pour toute optimisation des caractéristiques des cordons de soudure ou amélioration de leur qualité.

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 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 (volume finis, éléments finis et différences finis) rendues possible par le développement de fortes puissance de calcul, est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes résultant du soudage.

Bibliographie

- [1] André Beyer, chef de projet recherche – CTICM –. Procédés de soudage en construction métallique, Mars (2020), p. 1.
- [2] BELABED Abdelmadjid (2016-2017), Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles, Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER. (2016-2017) p. 4-5.
- [3] Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI). Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage, août 2010 p. 10-11.
- [4] principaux Procédés de soudage description, démarche d'évaluation et de prévention des risques, p. 6-7.
- [5] Organisation de Service mars, NOTIONS DE CARROSSERIE SOUDURES, Barcelone. Tome 23662, (1999), p. 10-11.
- [6] Le Soudage Oxyacétylénique : Procédé 311.
- [7] Thomas Billotte. Caractérisation et modélisation des structures de solidification en soudage TIG d'alliages austénitiques. Matériaux. Université de Lorraine, 2017. Français.
- [8] Dr TOUALBIA Djamel, Cours de : Soudage et rechargement, Destiné aux étudiants de la deuxième année Master sciences et technique, Option : Maintenance industrielle.
- [9] Julien Chapuis. Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc. Mécanique [physics.med-ph]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. Français.
- [10] M SEBAA Fethi, M RAHOU Mohamed, procédés et matériels de soudage, 2019-2020.
- [11] RAZAFIMAMONJY Onjanirina Stephan, MEMOIRE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME GRADE MASTER – TITRE INGENIEUR MATÉRIAUX, SOUDAGE A L'ARC ELECTRIQUE : SIMULATION THERMIQUE ET ESSAIS MECANIKES, 12 décembre 2017.
- [12] BERGOUG ALI, Contrôle Non Destructif des joints de soudure
- [13] Adnan KECHAOU, ETUDE DU SOUFFLAGE MAGNETIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE DE SOUDAGE, 2013.
- [14] Raymond Loewy, L'Aluminium. Série de technologie ,2009.
- [15] Roger Develay. Données numériques sur l'Aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [16] Institut international de soudure. Recommandation concernant les structures soudées en Aluminium et alliage Al-Mg.2eme édition .1980
- [17] Christian Vargel,. Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur M.4661. Année 2008.
- [18] Roger Develay. Aluminium et alliages d'Aluminium corroyés, propriétés mécaniques. Techniques de l'ingénieur (M 134), 2008.
- [19] Christian.Vargel. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Edition dunod (Paris), 1979.
- [20] 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.
- [21] Revue Métallerie 49-Spécial soudage, Classification des alliages d'Aluminium, Avril2003
- [22] <http://www.wikipédia.org/aluminium>, 2009.
- [23] 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
- [24] E.A. Brandes, G.B. Brook, Smithells , Light Metals Handbook, Butterworth-Heinemann (1998) pp. 8-28.
- [25] MF. Ashby DRH. Jones, Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, DUNOD.1991
- [26] Mustapha TEMMAR, étude des effets des traitements thermiques sur les propriétés structurales et mécaniques de l'alliage d'aluminium 7075 t6soudé par le procédé de soudage TIG, université de Blida, thèse de doctorat janvier 2012.
- [27] R. Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur M1290, p 17.
- [28] ASSAINI MOULOUD, Y. BENKEDDA & D. H. BASSI, étude thermique Comparative de deux nuances d'aluminium soudées par le procédé TIG, SNS 2008, Paris 27/03/2008.
- [29] MAKLOUF HAMID, Modélisation numérique de soudage à l'arc des acier, Ecole nationale supérieure des mines de paris, thèse de doctorat 2008
- [30] 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 doctorale 24 avril 2007.
- [31] Abde Halim Zitouni, Etude Du Comportement Hydrodynamique du Bain Fondu Lors Du Soudage Al'ARC Electrique, University Saad Dehleb De Blida, Thèse de Doctorat, Novembre 2020
- [32] Rabah HAMZAOU12, D. H. BASSIR3, Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d'Acier 304L, Partie B : Evolution 3D,CSC Annaba, 09-11Novembre 2014.
- [33] Mouloud AISSANI, MATERIAUX AERONAUTIQUES PAR DES METHODES NUMERIQUES : APPLICATION AU SOUDAGE DE STRUCTURES METALLIQUES, UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA, THÈSE DE DOCTORAT, 2012 / 2013.
- [34]. HICHEM BEKOUICHE, Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers, Université de Biskra, Juin 2013