

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Frères Mentouri Constantine 1

Faculté des Sciences de la Technologie

Département de Génie des Transports



N° de série : 36/D3C/2022

N° de d'ordre :02/TR/2022



Thèse

Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3^{ème} cycle LMD

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Ingénierie des Transports

Spécialité : Transport et Distribution des Hydrocarbures

Présentée par : **BENSIALI Hadjer**

Thème

Modélisation des procédés de soudage : Application aux assemblages des pipelines

A soutenir le 09/06/2022 à 10^h

Devant le jury composé de :

Mr. BENIDIR Mohamed	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
Mr. BIDI Lyes	MCA	Université Frères Mentouri Constantine 1	Rapporteur
Mr. BOUZERARA Ramdane	MCA	Université Frères Mentouri Constantine 1	Examineur
Mr. BOUCHELAGHEM A.M	Professeur	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Mr. LAOUAR Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur

2021/2022

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au niveau de Laboratoire Ingénierie des Transports et Environnement, Université Frères Mentouri Constantine 1, Constantine, Algérie.

Je tiens à exprimer avant tous, toute ma gratitude à mon rapporteur, Monsieur BIDI Lyes. Je tiens aussi à remercier également, Monsieur BENIDIR Mohamed, Monsieur BOUZERARA Ramdane, Monsieur BOUCHELAGHEM A.M, Monsieur LAOUAR Lakhdar pour leur participation à mon jury de thèse.

Je remercie tout particulièrement Mr. Lyes BIDI Maître de Conférences à l'Institut des Sciences et Techniques Appliquées de l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, pour son encadrement, son dévouement, sa patience et sa gentillesse qui m'ont permis d'avoir un œil nouveau sur mes travaux à travers nos échanges permanents.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur BOULAHLIB M. Salah, pour l'attention et l'aide qu'il m'a apporté. Je le remercie pour les échanges et les discussions sur les deux plans scientifique et moral.

Je tiens également à remercier l'ensemble des étudiants de master qui travaillent avec moi durant toutes ces années de thèse.

Je tiens à remercier ma mère, mes frères et mes sœurs qui m'ont constamment soutenue au cours de mes études et qui m'ont toujours fait confiance : un grand merci à eux.

Je remercie pour finir mon mari pour sa patience quotidienne, son soutien permanent, ses bons conseils et de m'avoir supporté pendant toutes ces années.

Je dédie ce travail à une personne qui n'est plus là à ce jour et sans qui, je ne serais jamais arrivée à faire cela : mon père. Une très grande pensée pour lui.

NOMENCLATURE

Notations :

<i>A</i>	Facteur d'absorption
<i>a_f</i>	Paramètre de la source Goldak suivant l'axe x ($x \geq 0$) (m)
<i>a_r</i>	Paramètre de la source Goldak suivant l'axe x ($x < 0$) (m)
<i>b</i>	Paramètre de la source Goldak suivant l'axe y (m)
<i>c</i>	Paramètre de la source Goldak suivant l'axe z (m)
<i>c_p</i>	Capacité thermique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
<i>D</i>	Diamètre de l'électrode [<i>mm</i>]
<i>E₁</i>	Fraction F_1 de l'énergie de l'arc électrique.
<i>E₂</i>	Fraction F_2 de l'énergie de l'arc électrique
<i>E₃</i>	Fraction F_3 de l'énergie de l'arc électrique.
<i>f_f</i>	Coefficient de distribution de la chaleur devant
<i>f_r</i>	Coefficient de distribution de la chaleur derrière
<i>h</i>	Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
<i>H</i>	Hauteur du dépôt de matière [<i>mm</i>]
<i>H</i>	Hauteur de dépôt du modèle numérique [<i>mm</i>]
<i>I</i>	Courant de soudage (A)
<i>k</i>	Paramètre de concentration de la source (m^{-2})
<i>K_z</i>	Paramètre d'involution de la source (m^{-1})
<i>L1</i>	Largeur du cordon face envers [<i>mm</i>]
<i>L2</i>	Largeur du cordon au milieu [<i>mm</i>]
<i>L_{sup}</i>	Largeur de la zone fondue côté supérieur [<i>mm</i>]

L_m	Largeur au milieu du cordon[mm]
L_{inf}	largeur de la zone fondue côté inférieur[mm]
$n1$	l'exposant dans la direction longitudinale (source Sabapathy)
$n2$	l'exposant dans la direction transverse (source Sabapathy)
$n3$	l'exposant dans la direction z en profondeur (source Sabapathy)
Q_f	la densité volumique de puissance à l'avant du procédé ($W.m^{-3}$)
Q_r	la densité volumique de puissance derrière le procédé ($W.m^{-3}$)
q_{surf}	la source surfacique plus la partie pariétale ($W.m^{-2}$)
Q_{vol}	la source volumique ($W.m^{-3}$)
$r0$	le rayon de la source conique en $z = 0$ (m)
$r1$	le rayon de la source conique en $z = -h$ (m)
r_{surf}	le rayon de la source surfacique (m)
r_1	rayon de fusion en $z = -h$.
T	la température (K)
T_0	la température ambiante (K)
T_f	la température de fusion (K)
U	la tension de soudage (V)
u	La fonction d'Heaviside
V_s	la vitesse de soudage ($m.s^{-1}$)

Lettres grecques :

α	L'angle d'inclinaison de l'apport de matière ($^{\circ}$)
η	le rendement des procédés de soudages à l'arc
η_s	le rendement de la source surfacique
η_v	le rendement de la source volumique conique
λ	la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
ρ	la masse volumique ($kg.m^{-3}$)

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 : Introduction générale	10
Introduction générale.....	10
Chapitre 2 : Etat de l'art	13
1 . Introduction	13
2 . Généralités.....	13
3 . Les procédés de soudage	16
3.1 L'arc électrique.....	16
a- La cathode.....	17
b- L'anode.....	17
d- La colonne d'arc	18
3.1.1 Soudage a L'électrode Enrobée.....	18
3.1.1.1 Caractéristiques de l'électrode.....	19
3.1.1.2 Âme métallique.....	19
3.1.1.3 Enrobage	19
3.1.1.4 Domaines d'applications	21
3.1.2 Soudage Sous Protection Gazeuse : MIG/MAG	21
3.1.3 soudage TIG	22
3.1.4 Le Soudage Plasma	23
3.1.5 Soudage sous flux en poudre SAW	24
4 . Modélisation numérique du soudage.....	25
4.1 Approche multiphysique complète	27
4.2 Approche source équivalente.....	30
4.2.1 Définition de cette approche	30
4.2.2 Le concept de source de chaleur et les différents types de source	30
4.2.3 Etat de l'art de modélisation des procédé de soudage à l'aide d'une source équivalente :	39
5 . Méthode des Plans d'Expériences	41
5.1 Principe et objectifs de la méthode des Plans d'Expériences	41
5.1.1 La méthode classique	42
5.1.2 La méthode « moderne »	42
5.2 Notion de plan complet et plan fractionnaire	43

5.3	Estimation de l'erreur et effets significatifs	44
5.4	Modèle mathématique d'estimation	44
5.5	Les Plans d'Expériences Numériques (PEN)	45
5.6	L'utilisation de la méthode des Plans d'Expériences dans la littérature	45
6	Conclusion.....	47
Chapitre 3 : Etude expérimentale du procédé de soudage SMAW		49
1.	Introduction	49
2.	Réseau Algérien de transport des hydrocarbures par canalisation	49
2.1	Description du Réseau de Transport.....	50
2.2	Consistance du réseau de transport.....	51
2.3	Système de transport d'hydrocarbures par canalisation	51
2.4	Description du STC GR5.....	53
2.4.1	Consistance Globale du STC GR5	53
3.	Processus d'assemblage des pipelines.....	54
4.	Description du procédé mis en œuvre	57
4.1	Le poste de soudage SMAW	58
4.2	Paramètres de soudage.....	59
4.3	Matériaux.....	60
4.3.1	L'acier API 5L X70.....	60
4.3.2	E6010 Electrode	60
4.4	Prélèvement de l'échantillon	61
4.5	Examen Métallographique.....	63
4.5.1	Découpage des échantillons	63
4.5.2	Polissage.....	63
4.5.3	Attaque chimique	63
4.5.4	Observations macrographiques	63
5.	Approche plans d'expériences	64
5.1	Facteurs d'influences (FI).....	65
5.2	Fonctions objectifs (FO).....	66
5.3	Matrice expérimentale	66
6.	Résultats et discussion.....	68
6.1	Analyse des macrographies	68
6.2	Analyse de l'influence des facteurs sur les fonctions objectives.....	69

6.3	Analyse des surfaces de réponse	71
7.	Développement du modèle expérimental.....	75
8.	Conclusion	77
	Chapitre 4 : Etude numérique du procédé de soudage SMAW.....	79
1 .	Introduction	79
2 .	Généralités sur les modélisations	79
2.1	Analyse phénoménologique	79
2.2	Propriétés thermo physiques.....	82
2.3	Modélisation du changement de phase	83
2.4	Modélisation en régime quasistationnaire	84
2.5	Géométrie et conditions aux limites thermiques	85
2.6	Maillage du modèle	86
2.7	Termes sources	87
3 .	Résultats des simulations	88
3.1	Résultats.....	88
3.2	Validation du modèle numérique	89
3.3	Analyse des évolutions de la température	91
4 .	Optimisation à l'aide d'un plan d'expériences numériques (PEN).....	92
4.1	Fonctions objectifs (FO).....	93
4.2	Facteurs d'influences (FI).....	94
4.3	La matrice programme (MP)	95
4.4	Résultats.....	96
5 .	Validation du modèle numérique	98
6 .	Conclusion.....	100
	Conclusion et perspectives.....	101

LISTES DES FIGURES

Chapitre 2

Figure 2- 1: Cordons de soudure.....	14
Figure 2- 2: Classification des procédés du soudage .[1],[2] ,[3] ,[4],[5]	15
Figure 2- 3: Sources thermiques et densités d'énergies.[1],[4]	16
Figure 2- 4: Arc électrique.....	17
Figure 2- 5: Principe du soudage à l'électrode enrobée (SMAW)	18
Figure 2- 6: Schéma d'une électrode enrobée [3].	19
Figure 2- 7: Schéma du bain de fusion et torche du procédé MIG/MAG.	22
Figure 2- 8: Schéma de principe du soudage TIG.[3]	23
Figure 2- 9: Principe du soudage plasma. .[5].....	24
Figure 2- 10: Principe du soudage SAW.	25
Figure 2- 11: Phénomènes dus au soudage et leurs interactions.[6],[7],[8]	26
Figure 2- 12: Modélisation numérique du soudage.	27
Figure 2- 13: Schéma d'un arc électrique et des principaux phénomènes mis en jeu.....	28
Figure 2- 14 : Schéma d'un bain de soudage et des principaux phénomènes mis en jeu.....	28
Figure 2- 15: Représentation de la distribution gaussienne bivariante.	33
Figure 2- 16: Représentation plane de la source « Kerrouault » [36]	34
Figure 2- 17: Source double ellipsoïde de Goldak [37].	36
Figure 2- 18: Source conique de Goldak.	37
Figure 2- 19: Distribution de densité de puissance dans un plan pour la source « Goldak » (a), et la source « Sabapathy » avec $n1 = 6$ et $n2 = n3 = 2$ (b) [39].....	38
Figure 2- 20: Source CIN avec la même énergie Q et différents facteurs k , Kz	38
Figure 2- 21: Distribution de densité de puissance dans un plan pour la source « CIN » avec $k = 4.106$ et $Kz = 10^{-5}$ (a) ; et $k = 3.105$, $Kz = 10^{-5}$ (b).....	39
Figure 2- 22: la distribution de température dans la pièce pour l'étude [45].	40
Figure 2- 23: la comparaison entre la forme de la zone fondue expérimental et numérique pour les travaux [53],[54],[55].....	41
Figure 2- 24: Pourcentage des valeurs compris dans l'intervalle de confiance $\pm \sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ [63].....	44
Figure 2- 25: Présentation graphique de la méthodologie de travail suivie.	48
Figure 2- 26: Phase d'assemble de la pièce.	48

Chapitre 3

Figure 3- 1: Réseau Algérien de transport des hydrocarbures par canalisation	50
Figure 3- 2: Système de transport d'hydrocarbures par canalisation.....	52
Figure 3- 3: Situation Géographique du gazoduc GR5.	53
Figure 3- 4: Synoptique du projet GR5.....	54
Figure 3- 5: Présentation des différentes phases d'assemblages des pipelines.	55
Figure 3- 6: l'opération de chanfreinage pour le soudage automatique et manuel.	56
Figure 3- 7: l'opération de Clampsage pour le soudage automatique et manuel.	56

<i>Figure 3- 8:L'opération de préchauffage pour le soudage automatique et manuel.</i>	57
<i>Figure 3- 9:Principe du procédé de soudage SMAW en configuration chanfrein -V-</i>	58
<i>Figure 3- 10:Le poste de soudage SMAW.</i>	59
<i>Figure 3- 11:Dimensions du chanfrein.</i>	60
<i>Figure 3- 12:Description générale de l'opération de soudage SMAW.</i>	61
<i>Figure 3- 13:Les deux morceaux prélevés à partir pipelines soudé manuellement.</i>	62
<i>Figure 3- 14:Les échantillons de l'étude.</i>	62
<i>Figure 3- 15:Macrographie de joints soudés à trois passes au soudage SMAW.</i>	64
<i>Figure 3- 16: Présentation des fonctions objectifs (H, L1, L2).</i>	66
<i>Figure 3- 17:Diversité des résultats et des morphologies obtenues.</i>	69
<i>Figure 3- 18:Influence des facteurs sur la hauteur du dépôt H[mm].</i>	70
<i>Figure 3- 19:Influence des facteurs sur la largeur du cordon face envers L1 [mm].</i>	71
<i>Figure 3- 20:Influence des facteurs sur largeur au milieu de cordon L2 [mm].</i>	71
<i>Figure 3- 21:Variation de la hauteur du cordon H avec Vs et D.</i>	72
<i>Figure 3- 22:Variation de la hauteur du cordon H avec T et D.</i>	72
<i>Figure 3- 23:Variation de la largeur du cordon face envers L1 avec D et Vs.</i>	73
<i>Figure 3- 24:Variation de la largeur du cordon face envers L1 avec Vs et T.</i>	73
<i>Figure 3- 25:Variation de la largeur au milieu du cordon L2 avec D et I.</i>	74
<i>Figure 3- 26:Variation de la largeur au milieu du cordon L2 avec D et Vs.</i>	75
<i>Figure 3- 27:Comparaison entre les mesures et les valeurs estimées de hauteur de dépôt (H).</i>	76
<i>Figure 3- 28:Comparaison entre les mesures et les valeurs estimées de la largeur du cordon de soudure (L1).</i>	76
<i>Figure 3- 29:Comparaisons entre les mesures et les valeurs estimées de pénétration latérale (L2).</i>	77

Chapitre 4

<i>Figure 4- 1:Principe du procédé de soudage SMAW.</i>	80
<i>Figure 4- 2 : Macrographie d'un cordon à la première passe obtenue par le SMAW.</i>	81
<i>Figure 4- 3 : Le problème à étudier.</i>	82
<i>Figure 4- 4:Propriétés thermophysiques et mécaniques de l'acier API 5L X70 fonction de la température.[97]</i>	82
<i>Figure 4- 5:Prise en compte de la chaleur latente de fusion.</i>	83
<i>Figure 4- 6:Evolution de la propriété physique « x » avec la fonction flc2hs.</i>	84
<i>Figure 4- 7: Géométrie de la pièce.</i>	86
<i>Figure 4- 8: Maillage utilisé pour la création de la géométrie 3D du procédé SMAW.</i>	86
<i>Figure 4- 9 : Formulation mathématique du problème thermique.</i>	88
<i>Figure 4- 10:Gradients de température dans la pièce.</i>	89
<i>Figure 4- 11: Champ de température obtenu à l'aide du modèle numérique SMAW.</i>	89
<i>Figure 4- 12:Comparaison des zones fondues obtenus avec le modèle numérique et l'expérience.</i>	90
<i>Figure 4- 13:Positions des thermo grammes numériques.</i>	91
<i>Figure 4- 14:Evolution de température dans la position (y = 9 mm ; z =-2 mm).</i>	92
<i>Figure 4- 15:Evolution de température dans la position (y = 5mm ; z =-1 mm).</i>	92

<i>Figure 4- 16:Evolution de température dans la position (y = 4.2 mm ; z =-3 mm).</i>	92
<i>Figure 4- 17:Evolution de température dans la position (y = 6.5mm ; z =-4 mm).</i>	92
<i>Figure 4- 18:Diagramme de résolution du problème de sensibilité des paramètres par la méthode des plans d'Expériences numériques (PEN).</i>	93
<i>Figure 4- 19:Présentation des FO.</i>	94
<i>Figure 4- 20:Influence des facteurs sur la hauteur du dépôt H[mm].</i>	96
<i>Figure 4- 21:Influence des facteurs sur largeur de la zone fondue côté inférieur.</i>	97
<i>Figure 4- 22:Influence des facteurs sur largeur aux milieux du cordon.</i>	97
<i>Figure 4- 23:Influence des facteurs sur largeur de la zone fondue côté supérieur.</i>	98
<i>Figure 4- 24:Comparaison entre géométrie expérimentale et le modèle numérique après optimisation.</i>	99

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table 3- 1:Paramètres opératoires du soudage SMAW.</i>	59
<i>Table 3- 2:Compositions chimiques du métal de base et de l'électrode (% en poids).</i>	61
<i>Table 3- 3:Facteurs d'influences et les domaines de variation.</i>	65
<i>Table 3- 4:Matrice expérimentale et valeurs mesurées des fonctions objectif.</i>	67
<i>Table 4- 1: Comparaison entre géométrie expérimentale et le modèle numérique.</i>	90
<i>Table 4- 2 : les coordonnées des points thermo grammes numériques</i>	91
<i>Table 4- 3: Facteurs d'influence et leurs niveaux de variation.</i>	94
<i>Table 4- 4:La matrix programme(PM).</i>	95
<i>Table 4- 5:Grandeurs dimensionnelles de comparaisons (expériences – modèle) après optimisation.</i>	98
<i>Table 4- 6: Les valeurs des paramètres après optimisation</i>	99

Chapitre 1 : Introduction générale

Introduction générale

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. 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.

Parmi les procédés de soudage qui ont un grand intérêt dans tous les domaines de l'industrie, le soudage à l'arc électrique pour une facilité d'utilisation et ne demande pas un équipement coûteux, le déplacement du matériel est possible au cours du soudage manuel en cas des réparations sur chantier.

La construction des nouvelles usines pétrolières et les nouveaux réseaux d'exploitation des hydrocarbures nécessite la mise en place de nouvelles techniques d'assemblage des éléments constitutifs de ces installations pour avoir une meilleure cohérence entre ces éléments. En effet le transport par pipeline est conditionné sur l'assemblage de plusieurs tubes élémentaires de 12 mètres de long à l'aide d'un procédé de soudage. Il est la technique d'assemblage la plus utilisée dans ce champs et comme les produits transportés dans ces installations sont des produits inflammables et à grande degré de dangerosité, l'atout principal sera d'avoir une bonne continuité entre les différentes canalisations pour empêcher une éventuelle fuite due au fissures des joints de soudure.

Le procédé de soudage à l'arc électrique SMAW est le procédé le plus utilisée dans l'industrie pétrolière dans le but d'améliorer la qualité et la productivité. Il bénéficie de la possibilité de souder à grande vitesse de fortes épaisseurs. Des phénomènes physiques, nombreux et couplés, intervenant lors de ce procédé. Une meilleure compréhension est alors possible, par la mise en place d'outils prédictifs de simulation du soudage, à partir des connaissances des matériaux à assembler et des paramètres opératoires, ce qui éviterait la réalisation d'essais répétitifs très onéreux.

L'objectif de cette thèse est de comprendre les phénomènes physique qui ont lieu lors de l'opération de soudage des pipelines afin d'assurer une très bonne qualité de cordons de soudure, au vu du niveau très élevé requis pour la sécurité des installations dans l'industrie pétrolière. Cette compréhension permettra de maîtriser les différents procédés de soudage utilisés et plus particulièrement le soudage à l'arc électrique SMAW objet de ce travail. A partir de là on pourra déterminer les paramètres optimaux pour une configuration de soudage donnée. Les travaux abordés dans cette thèse se décomposent en 2 phases :

Une première phase concerne un aspect expérimental permettant la compréhension des différents processus présents dans ce procédé. Ces données expérimentales permettront de valider les résultats des simulations numériques qui seront réalisées dans une seconde phase.

Le but de la simulation numérique du soudage est généralement de décrire les effets mécaniques (tels que les champs de contraintes et les déformations) qui sont directement dépendants des évolutions de températures provoquées par les opérations de soudage. Il est donc impératif d'accéder à la définition de l'apport de chaleur qui peut être décrit suivant deux approches : l'approche multiphysique et l'approche « source équivalente ». La première approche consiste à résoudre un problème magnéto-hydro-dynamique couplant la physique de la (ou les) source d'énergie, son interaction avec le bain de soudage, le transfert de l'énergie dans le bain de soudage et sa diffusion dans le solide. Cependant, cette méthode reste complexe, elle nécessite de poser un certain nombre d'hypothèses et demande un temps de calcul souvent prohibitif. La seconde approche consiste généralement à résoudre un problème de conduction non linéaire dans les pièces à assembler en utilisant un concept dit de « source de chaleur équivalente ». Dans ce cas, on peut se donner a priori une forme analytique de la source représentant la distribution de l'apport de chaleur par le procédé de soudage.

L'approche source équivalente est ici employée pour simuler le champ thermique créé dans les pièces à souder lors d'une opération de soudage à l'arc électrique SMAW. La mise en œuvre de cette approche est relativement simple, elle demande des temps de calcul réduits et permet de quantifier la distribution d'énergie apportée par l'arc électrique et dans la partie solide de la pièce en dehors de la zone fondue.

La démarche de ce travail est essentiellement expérimentale pour réaliser des essais préliminaires afin d'établir des plages des paramètres opératoires. La mise en place de la méthode des Plans d'Expériences Expérimentaux permet d'écrire des lois empiriques de variation des grandeurs géométriques caractérisant la forme du bain de fusion en fonction des paramètres opératoires. A partir des interprétations des résultats expérimentaux, nous proposons d'introduire un modèle direct purement conductif basé sur l'approche sources équivalentes dans la simulation numérique de la formation du bain de fusion. Afin d'optimiser les différents paramètres nous avons utilisées la méthode des Plans d'Expériences Numériques (PEN), qui est une méthode complètement originale. La validation du modèle est fondue sur la comparaison entre l'expérience et le modèle développé.

Dans le cadre de cette thèse, le soudage manuel à l'arc électrique SMAW a été étudié. L'objectif de cette opération de soudage est de remplir la première passe du chanfrein en v pour l'acier API 5L X70. La stratégie Plans d'Expériences Expérimental a été effectuée. Cette stratégie nous a permis de réduire le nombre d'essais tout en ayant une bonne précision sur les résultats. L'application de cette stratégie s'est faite en plusieurs étapes : des essais préliminaires ont permis de mettre en évidence les paramètres principaux à retenir pour les essais exploratoires et une d'optimisation a permis de définir les conditions optimales de soudage. L'application de cette technique, nous a permis de mettre en évidence les liens entre les paramètres opératoires et les indicateurs de performances par des modèles empiriques

fiables et ainsi d'optimiser les performances le procédé de soudage SMAW. Les résultats, ainsi obtenus, nous ont permis de développer un modèle direct à l'aide du logiciel par éléments finis COMSOL Multiphysics. Enfin l'optimisation des différents paramètres des sources par de Plans d'Expériences Numériques (PEN). Cette méthode permet d'une part, d'estimer des effets des paramètres des sources équivalentes sur les différentes grandeurs qui caractérisent la géométrie de la zone fondue et donc d'étudier la sensibilité des modèles vis-à-vis de ces grandeurs, et d'autre part, de déterminer la flexibilité du modèle vis-à-vis de l'ajustement des paramètres.

Ce manuscrit présente dans un premier temps l'état de l'art sur les différents procédés de soudage, les différentes approches pour la modélisation de ces procédés et enfin la méthode d'optimisation des paramètres des sources de chaleur équivalentes grâce à l'approche plan d'expériences numériques. Par la suite, un chapitre sera consacré aux différents résultats issus des nombreux essais expérimentaux et à leurs analyses. La description du modèle numérique 3D thermique sera présenté dans un quatrième chapitre avec la comparaison et la validation du modèle numérique par rapport aux résultats expérimentaux. Enfin une conclusion et des perspectives viennent clore le manuscrit.

Chapitre 2 : Etat de l'art

1 . Introduction

Un pipeline est l'assemblage de plusieurs tubes par soudage, nécessitant des procédés de soudage productifs et non coûteux, afin d'assurer des cordons de soudure fiables. Le soudage à l'arc manuel SMAW est le procédé le plus utilisé dans l'industrie pétrolière, au vue ces multiples avantages. Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux. Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. L'énergie de l'arc accroît la qualité des cordons réalisés ainsi que la productivité.

Dans ce manuscrit nous présenterons une étude bibliographique de procédé de soudage à l'arc électrique SMAW Cette étude est consacrée à l'aspect technologique de procédé de soudage étudié, aux différentes approches de modélisation des phénomènes physiques qui agissent lors des opérations de soudages, et enfin aux méthodes d'optimisation des modèles.

La première partie présente différentes techniques de soudage d'un point de vue expérimental, le soudage à l'arc (SMAW, TIG, MIG /MAG, Plasma, SAW). La seconde partie aborde les deux approches (multiphysique et « source de chaleur équivalente ») pour la modélisation des procédés de soudage. Différents modèles des sources de chaleur équivalentes sont exposés. La troisième partie expose la méthode existante pour l'optimisation (la méthode des Plans d'Expériences). Afin d'optimiser les différents paramètres de source équivalente.

2. Généralités

Le soudage c'est technique d'assemblage permanent dont le rôle principal est de garantir la continuité métallique (chimique, mécanique...etc.) entre les métaux, avec ou sans métal d'apport (les deux pièces ont la même température de fusion), soit par effet de la chaleur(avec ou sans fusion du matériau) ou par effet purement mécanique (pression). Donc un assemblage c'est deux métaux soudent par un procédé de soudage, l'évolution de cette technique a commencé depuis de 19^{ème} siècle au cour la fabrication mécanique puis le développement a continué et expansé dans l'industrie en générale et la constriction des bâtis.

Les premiers précédés de soudage qui apparaissaient utiliser l'électricité comme une source d'énergie (soudage à l'arc électrique et la résistance électrique). Dons la même période le soudage au chalumeau ont été trouvé, il permet de collecter en proportion adéquate le gaz

combustible (L'acétylène, L'hydrogène, Le propane) et l'oxygène pour former une flamme dont la température maximale atteint 3200°C (la flamme oxyacétylénique).

Chaque procédé de soudage peut être assimilé à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique engendré par le soudage. Une fois réalisée, la soudure par fusion se décompose en plusieurs zones *Figure 2-1* :

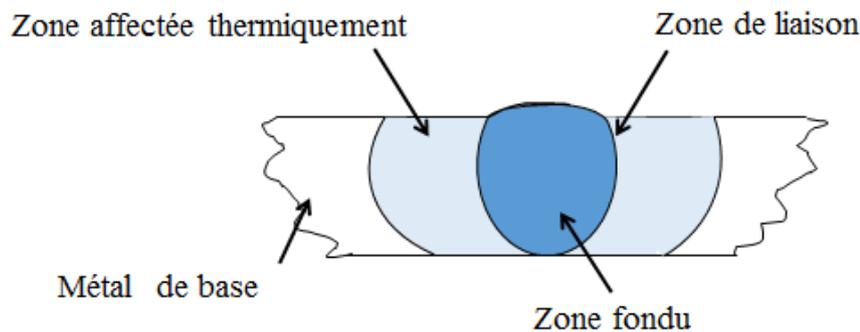


Figure 2- 1: Cordons de soudure.

- **Zone Fondue (ZF)** : zone où l'état liquide est prépondérant où la structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On distingue des gradients de concentration de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner les variations de dureté.
- **Zone Affectée Thermiquement (ZAT)** : zone adjacente à la zone fondue sur une largeur plus ou moins étendue qui a été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.
- **Zone de Liaison(ZL)** : zone située entre la ZF et la ZAT, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.
- **Métal de Base (MB)** : au-delà de la ZAT, l'élévation de la température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale.

Au cours du soudage à l'arc, l'effet thermique est prépondérant et est caractérisé par :

- Un rapide changement de température (élévation de température et refroidissement) .
- Un faible temps de maintien de la température maximale .

- Une localisation de points chauds entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides .
- Une importante énergie de soudage régissant le cycle thermique et induisant dans la structure une zone fondue et une zone affectée thermiquement.

Le cycle thermique résultant du procédé est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon la composition chimique du matériau, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou ductile.

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la *Figure 2-2*.

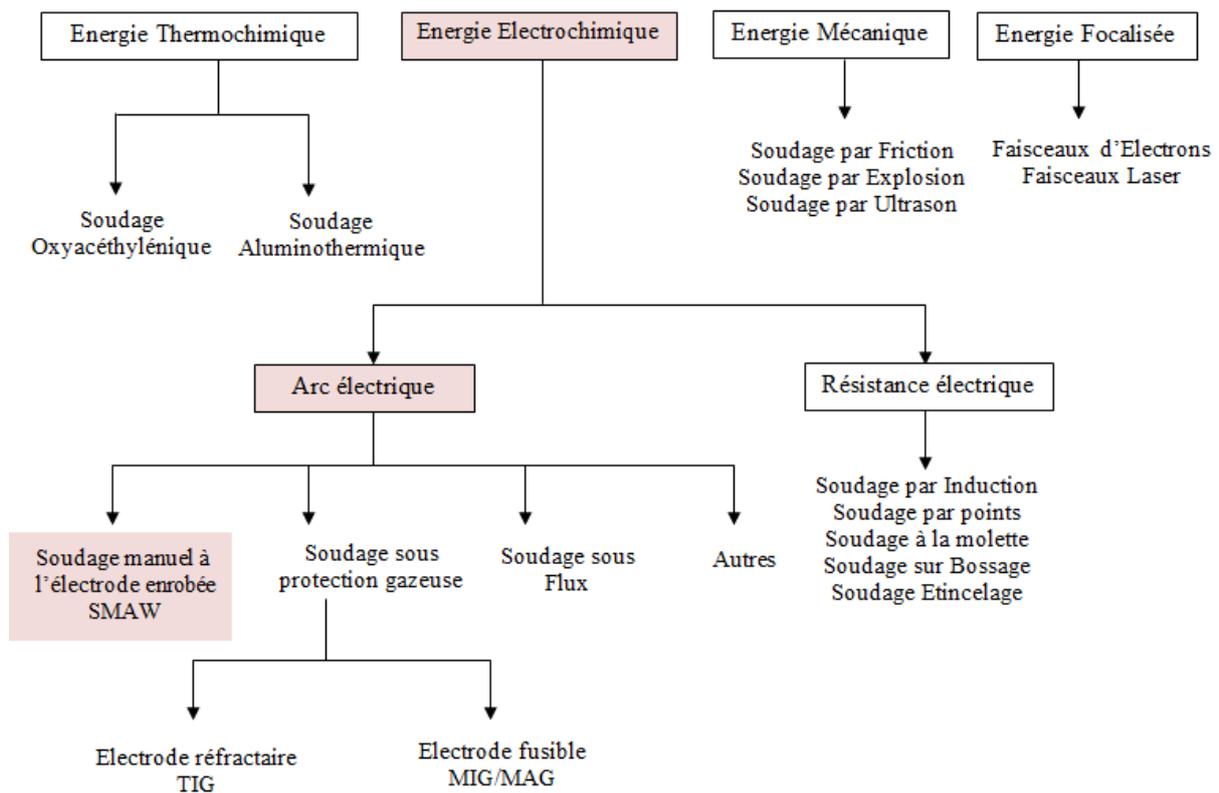


Figure 2- 2: Classification des procédés du soudage .[1], [2] ,[3] ,[4],[5]

.La conséquence directe de cette classification est la comparaison des énergies des différentes sources (*Figure 2-3*). Notons qu'il est préférable d'utiliser la notion d'énergie spécifique (énergie par unité de surface) pour comparer les différents procédés entre eux.

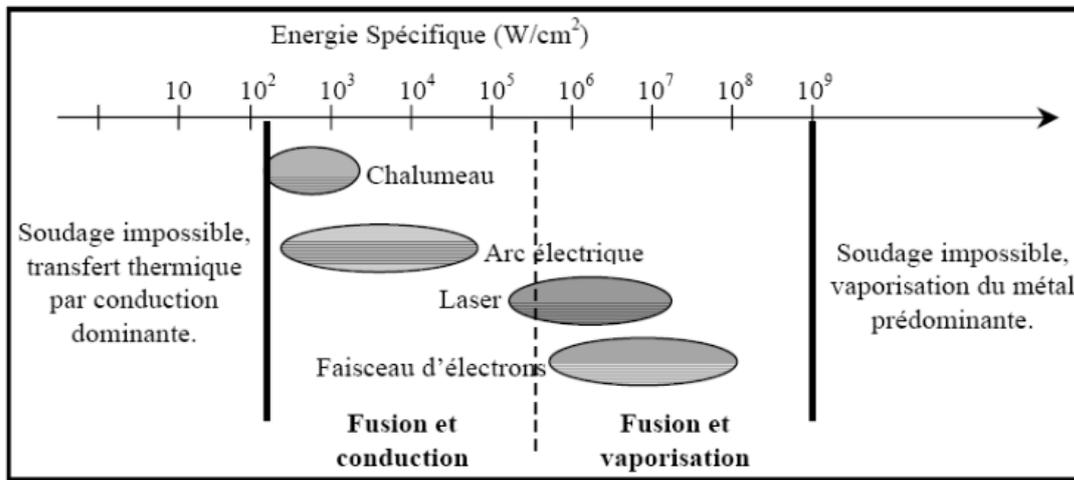


Figure 2- 3: Sources thermiques et densités d'énergies.[1],[4]

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

3. Les procédés de soudage

3.1 L'arc électrique

Bernardos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tous premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudages s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis vase solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Le procédé se développe essentiellement grâce à la mise au point d'une électrode enrobée en cellulose qui, du fait de sa vaporisation formant écran de protection, réalise l'impérative condition, pour obtenir des soudures saines, de soustraire les métaux en fusion à l'action de l'air. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire.

L'arc électrique est un passage de flux d'électrons d'une cathode à une anode. Il est confiné dans un gaz neutre qui va limiter la formation de plasma d'arc. On distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc *Figure 2-4*.

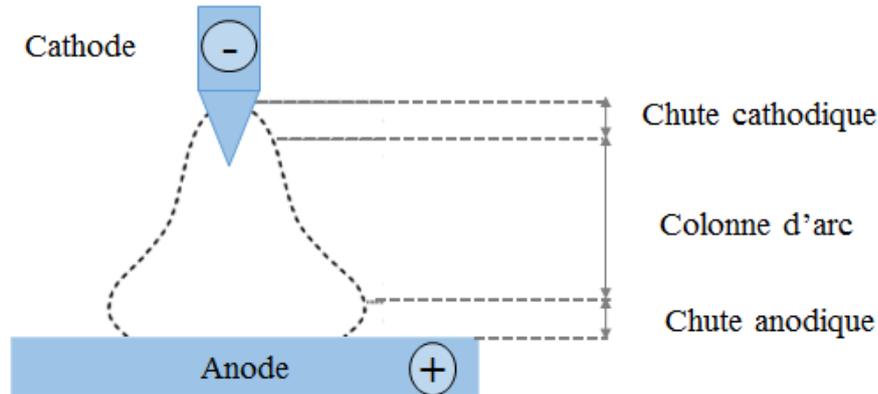


Figure 2- 4:Arc électrique.

L'anode et la cathode ont des caractéristiques similaires par plusieurs aspects. Elles présentent toutes les deux une chute de tension qui a lieu sur de très courtes distances conduisant à des champs électriques localement très importants (pouvant atteindre 109V/m à la cathode contre 103V/m dans la colonne d'arc). Ces zones appelées tache anodique et tache cathodique sont caractérisées par une contraction de l'arc aux deux pôles. Elles sont nécessaires à la stabilité de l'arc électrique.

Les énergies mises en jeu dans ces régions vont conditionner la qualité de l'arc ainsi que la célérité des électrons émis. Les densités de courant au sein de la colonne ionisée sont proches de 106 à 107A/m² alors qu'elles sont de 108 à 109A/m² pour l'anode et peuvent atteindre des valeurs encore supérieures pour la cathode. Nous allons revenir sur chacune de ces trois zones pour comprendre les principes qui régissent le transfert des électrons.

a- La cathode

C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire selon deux modes distincts appelés émission thermoïonique ou émission non thermoïonique (autrement nommée cathode froide).

b- L'anode

Les paramètres électriques (intensité, tension) contrôlent la décharge électrique à la cathode. En revanche, le flot d'électrons pénètre dans l'anode par la tache anodique avec une certaine densité de courant qui va déterminer la géométrie du bain. Cette densité d'énergie ne peut être contrôlée qu'indirectement à partir de la cathode. La stabilité de la tache anodique dépend en majeure partie du gaz d'assistance, du matériau à souder et de la géométrie de soudage. La densité de courant au droit de la tâche anodique est gaussienne, sa largeur sera fonction du gaz d'assistance utilisé (argon ou hélium), de la géométrie d'électrode (type d'affûtage et conicité d'électrode) et des paramètres opératoires (intensité et tension d'arc, vitesse de soudage,

longueur d'arc). Pour ce qui est du rendement d'arc mesuré, il varie de 50 à 70%, suivant les paramètres utilisés. La tension d'arc et la nature de l'anode sont les principaux facteurs qui influent le rendement de l'arc.

d- La colonne d'arc

Le passage des électrons entre les électrodes ionise partiellement le gaz de protection sur son chemin, ce qui rend la colonne d'arc conductrice et crée un plasma d'arc. L'ensemble est électriquement neutre, composé d'atomes de gaz de protection, d'électrons (chargés négativement), d'ions gazeux (positifs) et certainement de vapeurs métalliques.

3.1.1 Soudage à L'électrode Enrobée

Les origines du soudage à l'arc remontent à la fin du 19^{ème} siècle. Le soudage à l'électrode enrobée est inventé en 1907, appelé aussi SMAW, "Shielded Metal Arc Welding", ou MMA, "Manual Metal Arc". Il connaît son essor industriel vers 1920 en même temps que d'autres procédés tels que le soudage oxyacétylénique (au chalumeau) ou le soudage par résistance. Le procédé de soudage à l'électrode enrobée utilise une source d'énergie extérieure, à savoir l'arc électrique. Il est fourni par un générateur appelé poste à souder. Cet arc apporte l'énergie nécessaire pour fondre le métal de base et le métal d'apport que constitue l'électrode.

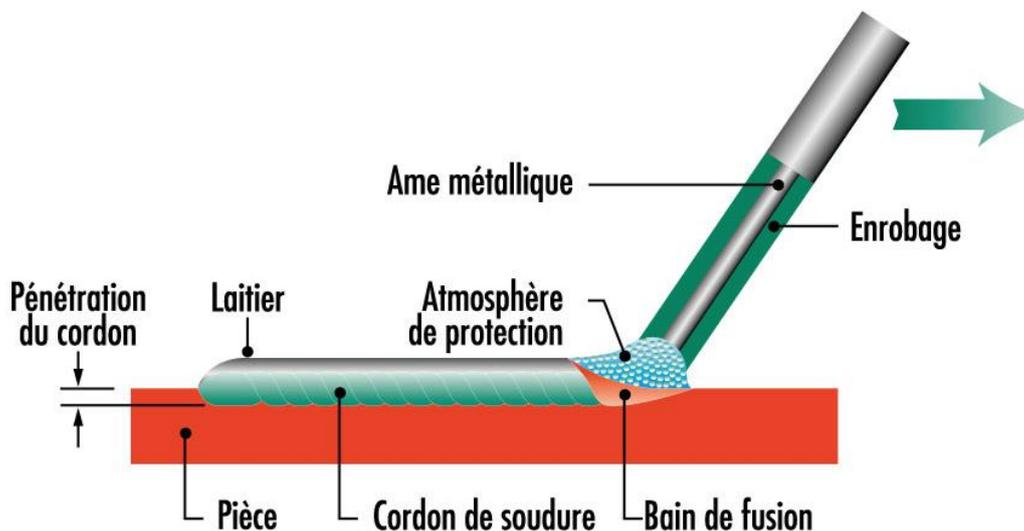


Figure 2- 5: Principe du soudage à l'électrode enrobée (SMAW)

L'électrode est formée d'une âme métallique et d'un enrobage. L'âme doit avoir au moins les mêmes caractéristiques mécaniques que le métal de base. Elle fond en gouttelettes qui sont

projetées dans le bain de fusion. Après refroidissement et solidification, l'âme constitue le cordon de soudure. L'enrobage participe à la formation d'un laitier et d'un gaz. Le laitier protège le bain de fusion tandis que le gaz protège le bain et l'arc.

3.1.1.1 Caractéristiques de l'électrode

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette (d'où les expressions courantes de baguette de soudage et de soudage à la baguette) comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (Figure 2-6). 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. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (NF A 81-300).

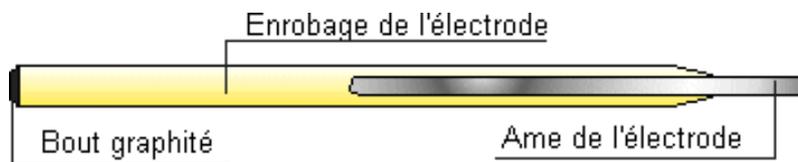


Figure 2- 6: Schéma d'une électrode enrobée [3].

3.1.1.2 Âme métallique

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliages devant assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure. Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux de dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par suite le courant de soudage à utiliser. La longueur n'excède pas 400 à 500 mm, pour des raisons évidentes de fabrication et d'emploi.

3.1.1.3 Enrobage

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes, il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication. Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc. Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes : minces, semi-épais et épais, respectivement $< 140\%$, 140 à 180% et $> 180\%$ du diamètre de l'âme.

❖ Types d'enrobage

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont :

- enrobage acide (symbole A ou RA) : réservé à des aciers de bonne soudabilité .
- enrobage basique (symbole B ou RB) : courant continu, laitier facile à détacher .
- enrobage cellulosique (symbole C ou RC) : forte pénétration, arc relativement instable, soudage en position, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures.
- enrobage rutile (symbole R et RR) (le rutile est l'oxyde de titane TiO_2) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, pénétration moyenne, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures .
- enrobage oxydant (symbole O) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, faible pénétration, belle apparence du cordon, travaux courants. Le symbole S est relatif aux enrobages spécifiques non répertoriés.

❖ Rôles de l'enrobage

a) Rôle électrique

C'est le premier rôle essentiel de l'enrobage ; il permet d'amorcer l'arc et de le maintenir de façon stable par les vapeurs et divers dégagements gazeux qui y prennent place. Le potentiel d'ionisation des éléments dégagés définit directement, pour un courant donné, la tension d'arc. Selon la composition de l'enrobage, cette tension peut varier dans de larges limites comprises entre 4 et 30 V. Deux conséquences en résultent :

- la stabilité de l'arc et sa facilité d'amorçage et de réamorçage d'autant plus aisées que la tension d'arc est basse, grâce par exemple à des éléments tels que le potassium, le sodium aux potentiels d'ionisation très bas .
- toutes choses égales par ailleurs, la puissance obtenue dans l'arc et par suite la fusion de l'électrode et la pénétration qui lui sont liées, d'autant meilleures que la tension est élevée.

En découleront les principales conditions d'utilisation :

- type de courant approprié (alternatif ou continu) .
- tension d'amorçage (à vide) du générateur .
- pénétration et taux de dépôt .
- diversité d'emploi,etc.

b) Rôle métallurgique

L'enrobage doit, pour exercer son second rôle essentiel de protection pendant le soudage, émettre des vapeurs chassant l'air de la zone d'arc et posséder des qualités neutres, légèrement réductrices ou au pouvoir oxydant contrôlé. Pendant et après la fusion, l'enrobage forme laitier et surnage par sa faible densité au-dessus du bain jusqu'au refroidissement complet au cours duquel il se solidifie tout en conservant son action protectrice ; il doit être enlevé par piquage. On a constaté que certains éléments de l'enrobage se diluaient dans le métal en fusion et se retrouvaient dans le cordon. De là, l'idée d'introduire par ce biais des

corps tels que le manganèse, le silicium, le titane, le nickel, le chrome, etc. de nature à participer à la texture métallurgique résultante de la zone fondue.

c) Rôle mécanique

Le laitier que forme l'enrobage a en outre un certain nombre d'autres effets purement mécaniques sur :

- le bombé du cordon .
- la dilution et la pénétration par effet de creuset .
- la possibilité de travailler en position par la viscosité et l'adhérence.

3.1.1.4 Domaines d'applications

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une simplicité et une flexibilité inégalées grâce à :

- un équipement on ne peut plus simple .
- une électrode enrobée qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en oeuvre, principalement les métaux ferreux.

3.1.2 Soudage Sous Protection Gazeuse : MIG/MAG

Découvert au cours de la deuxième guerre mondiale, le développement du procédé MIG-MAG (nommé aussi Gaz Metal Arc Welding, GMAW) visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes.

Enfin, comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, le procédé MIG-MAG s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (*Figure 2-7*). Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage, où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée.

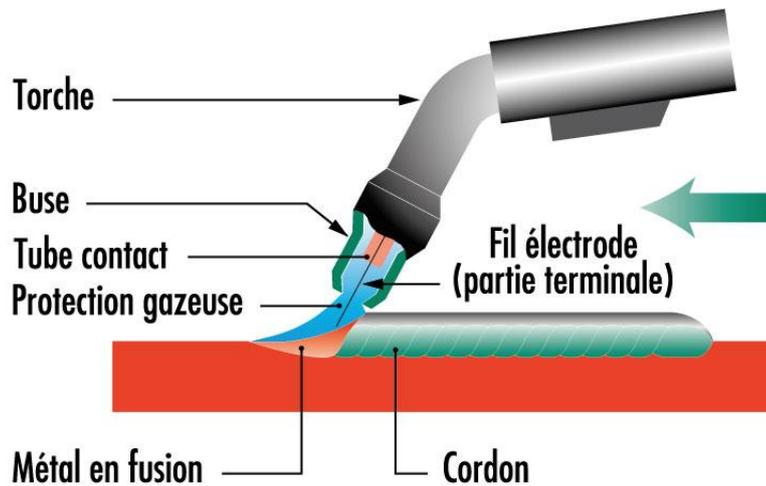


Figure 2- 7:Schéma du bain de fusion et torche du procédé MIG/MAG.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

- **Le procédé MAG (Metal Active Gas)** qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO₂), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O₂).
- **Le procédé MIG (Metal Inert Gas)** qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

Le soudage MIG/MAG est utilisé lorsque l'utilisateur recherche une productivité importante. Avec un taux de projection faible, il est possible de souder les fortes épaisseurs et de faire du remplissage de chanfreins par passes multiples. Ce procédé est utilisé en semi-automatique ainsi qu'en automatique pour un large éventail d'industrie (chaudronnerie, constructions navales...).

3.1.3 soudage TIG

Le mot TIG est un acronyme qui signifie "Tungstène Inerte Gas". Il définit un procédé de soudage également appelé "Gas Tungsten Arc Welding" (GTAW) en langue anglo-américaine, pour lequel la fusion des bords à assembler est obtenue par la création d'un arc électrique. L'arc électrique est initié à partir d'une électrode réfractaire en tungstène dans un confinement de gaz inerte (Figure 2-8.). Malgré un faible rendement de l'arc, cette source thermique d'origine électrique fournit suffisamment d'énergie aux pièces pour fondre leur bord. Lors du refroidissement, la liaison se solidifie et assure ainsi une continuité mécanique et métallurgique entre les deux pièces. Parmi les procédés de soudage à l'arc électrique, le procédé TIG est le plus rudimentaire puisqu'il n'apporte que des calories à la pièce à souder. Eventuellement, un métal d'apport peut être ajouté mais

son introduction est totalement indépendante de la source thermique. La simplicité de ce procédé permet d'obtenir des joints soudés d'excellente qualité pour la plupart des matériaux métalliques. Le matériel de soudage est constitué d'une source de courant, d'une source de gaz de protection et d'une torche de soudage. La flexibilité et la simplicité de cet équipement permettent une utilisation manuelle. Pour augmenter la productivité et la régularité des joints soudés, le procédé peut être automatisé.

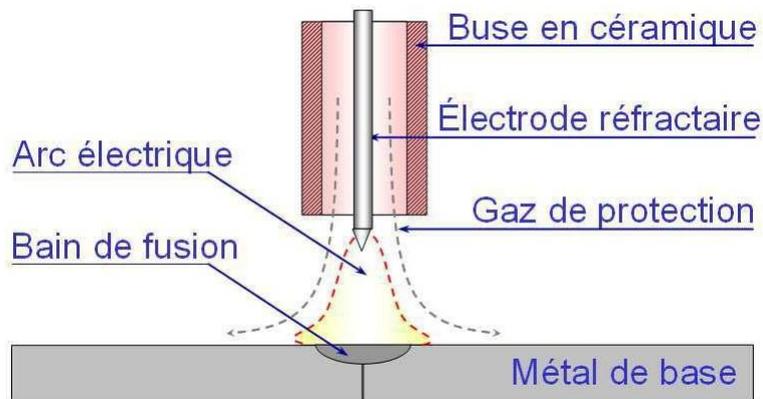


Figure 2- 8:Schéma de principe du soudage TIG.[3]

3.1.4 Le Soudage Plasma

Le soudage plasma se caractérise par la transformation à l'état de plasma d'un gaz plasma-gène par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire et la pièce à souder (Figure 2-9). Ce gaz est confiné mécaniquement et cinétiquement par l'intermédiaire d'une tuyère refroidie, à travers laquelle on l'oblige à passer. La protection du métal en fusion est assurée par un gaz annulaire.

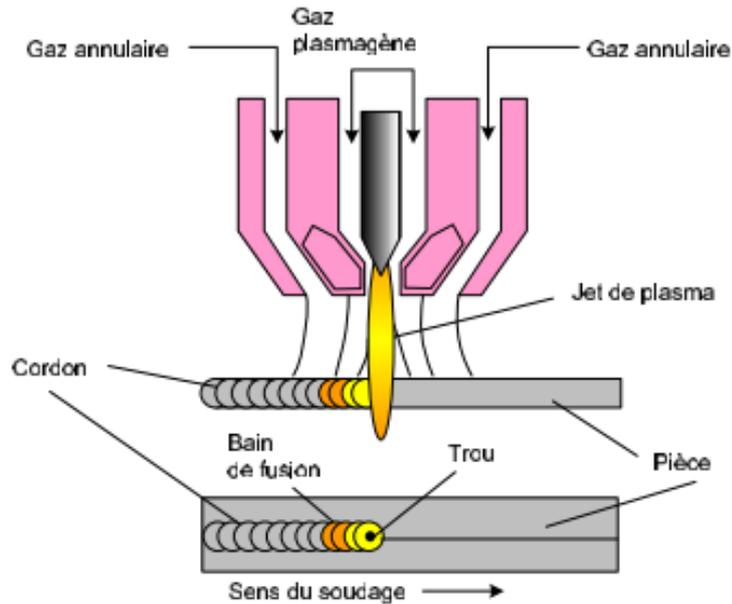


Figure 2- 9: Principe du soudage plasma. .[5].

La forte constriction de l'arc obtenue permet de disposer d'une forte densité d'énergie (107 W.cm^{-2}). Ce procédé permet de traverser les pièces de part en part et il permet d'accroître les performances du soudage à l'arc conventionnel et d'augmenter la vitesse de soudage et l'épaisseur des éléments à assembler.

3.1.5 Soudage sous flux en poudre SAW

L'arc s'établit entre un fil et la pièce à souder s'écoulant au fur et à mesure de l'avancement de la soudure. Ce flux joue le rôle de l'enrobage des électrodes manuelles.

Les bords du joint sont fondus simultanément par un ou plusieurs fils électrodes nous fournissant l'apport de métal. L'arc de soudage jaillit au travers d'un flux spécial mis partiellement en fusion par la chaleur dégagée ; il est donc invisible.

Le métal se solidifie sous la protection d'un laitier qui après refroidissement et récupération de la poudre non fondue, se détache facilement laissant apparaître un cordon de très bel aspect. Le courant est amené au moyen de glissières au voisinage de l'extrémité du fil, ce qui permet d'utiliser de fortes densités de courant sans crainte de voir rougir le fil.

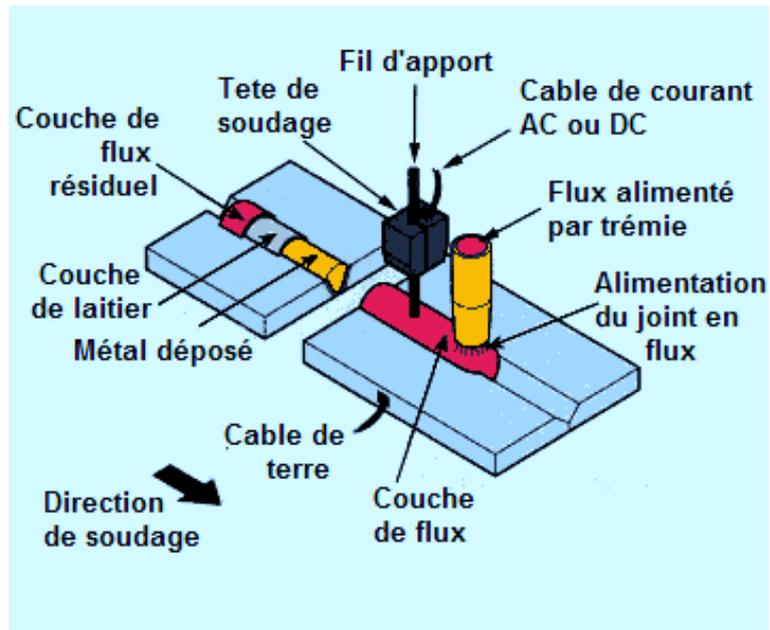


Figure 2- 10: Principe du soudage SAW.

4. Modélisation numérique du soudage

Les opérations de soudage d'aciers s'accompagnent de phénomènes thermique métallurgique et mécanique. Ces phénomènes induisent inévitablement des champs de contraintes internes dans le rôle peut être déterminant sur la qualité et la tenue mécanique du composant. Afin de mieux comprendre le sujet traité, nous allons rappeler les principaux phénomènes qu'il est possible de rencontrer dans un alliage ferreux sujet à une variation importante de température, qui de plus présente des transformations structurales à l'état solide. La Figure 2-11, schématise les principales interactions thermiques métallurgiques et mécaniques au cours d'une opération de soudage.

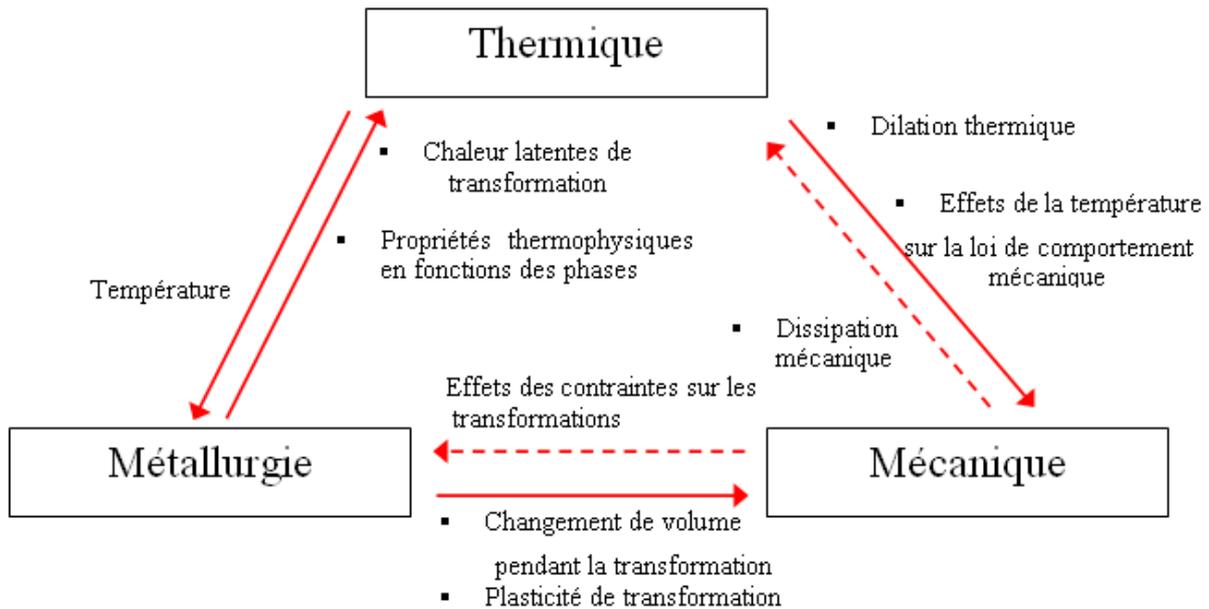


Figure 2- 11:Phénomènes dus au soudage et leurs interactions.[6],[7],[8]

❖ **Couplage thermomécanique**

Ce couplage représente l'influence de la thermique sur la mécanique et réciproquement. Il est caractérisé par la variation des propriétés mécaniques avec la température et par le phénomène de dilatation thermique. Le phénomène de dissipation intrinsèque qui décrit le dégagement de chaleur engendré par les déformations inélastiques, peut également être pris en compte bien qu'il soit négligé dans la plupart des cas.

❖ **Couplage thermo-métallurgique**

De manière générale, ce couplage traduit l'influence de la thermique sur la métallurgie et réciproquement. Les variations de température au chauffage et au refroidissement engendrent diverses transformations métallurgiques (transformations structurales à l'état solide, changements d'état solide-liquide). A leur tour, ces transformations modifient les propriétés thermophysiques de la matière et s'accompagnent d'absorption ou de dégagement de chaleur, appelés chaleurs latentes de transformation.

❖ **Couplage mécanique-métallurgique**

L'état de contrainte affecte la cinétique des changements de phases. Les contraintes peuvent ralentir ou accélérer les transformations en venant faciliter ou s'opposer aux modifications d'arrangements cristallins. Lors d'un changement de phase, les différentes phases formées ont des caractéristiques mécaniques qui leur sont propres. Plus précisément, les caractéristiques élastiques (module de Young et coefficient de Poisson) sont peu affectées alors que les caractéristiques de plasticité (limite d'élasticité et module d'écrouissage) le sont fortement. Cette interaction mécanique-métallurgique modifie considérablement l'évolution des

contraintes lors de l'opération de soudage. De plus, les changements des arrangements cristallographiques, consécutifs aux changements de phases, induisent des changements de volume et donc des contraintes internes. Localement, le niveau de ces contraintes internes peut dépasser la limite d'élasticité et conduire à une plastification engendrant des déformations résiduelles, même en l'absence d'une sollicitation mécanique externe. Ces microdéformations résiduelles provoquent une déformation à l'échelle macroscopique appelée plasticité de transformation.

Tous ces couplages sont donc directement dépendants des évolutions de températures imposées par le procédé de soudage ainsi que le cycle thermique du procédé.

Pour pouvoir accéder à ce cycle thermique, on peut utiliser deux approches : l'approche multiphysique complète et l'approche source équivalente.

L'effet mécanique sur l'état métallurgique est faible et il est représenté par le fait que les états de contraintes, dans le matériau, font varier les cinétiques des modifications microstructurales et les températures auxquelles ces modifications interviennent.

Pour pouvoir accéder à ce chargement thermique, on retrouve deux approches couramment utilisées : l'approche multiphysique complète et l'approche dite de « source équivalente ».

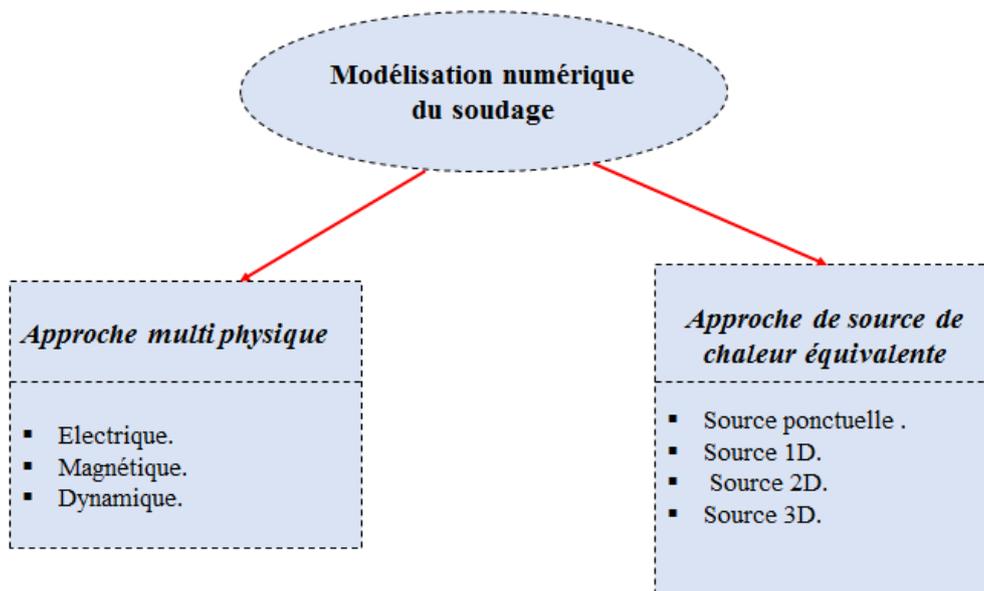


Figure 2- 12: Modélisation numérique du soudage.

4.1 Approche multiphysique complète

Cette approche consiste à résoudre un problème magnétohydrodynamique (MHD) couplant la physique de la source d'énergie, son interaction avec le bain de soudage, le transfert de l'énergie dans le bain de soudage et sa diffusion dans le solide.

Pour un procédé de soudage à l'arc, la physique du soudage est composée des physiques de l'arc électrique et du bain. L'écoulement et la forme du plasma d'arc sont décrits grâce à diverses contributions thermiques (effet Joule, conduction, rayonnement, convection, transport d'énergie dû au glissement des électrons) et deux moteurs du mouvement (forces

électromagnétiques et de gravité). La pièce, et le bain en particulier, est aussi le siège d'interactions électromagnétiques (effet Joule et forces de Lorentz) et d'échanges thermiques (Convection, évaporation, rayonnement). Pour le bain, l'action combinée de la pression d'arc, de la tension de surface et des forces de cisaillement dû à l'action du gaz de couverture, modifie la forme de sa surface libre. D'un point de vue numérique, ceci a pour principal effet d'augmenter l'instabilité numérique du problème.

La résolution des différentes équations décrivant l'arc et le bain nécessite de nombreuses simplifications et d'hypothèses comme un écoulement laminaire, un équilibre thermodynamique local dans l'arc, un plasma optiquement fin. Ceci est dû au fait que l'écoulement interagit de manière couplée avec les champs magnétiques et électriques et les Propriétés thermophysiques du plasma et du bain (Figure 2-13et Figure 2-14). [9]

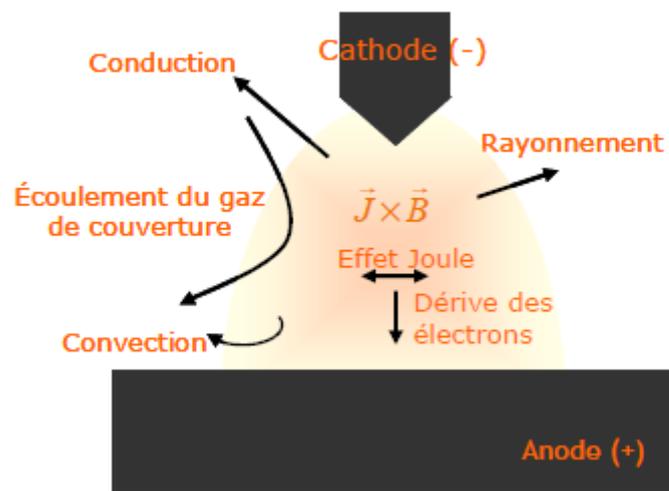


Figure 2- 13:Schéma d'un arc électrique et des principaux phénomènes mis en jeu.

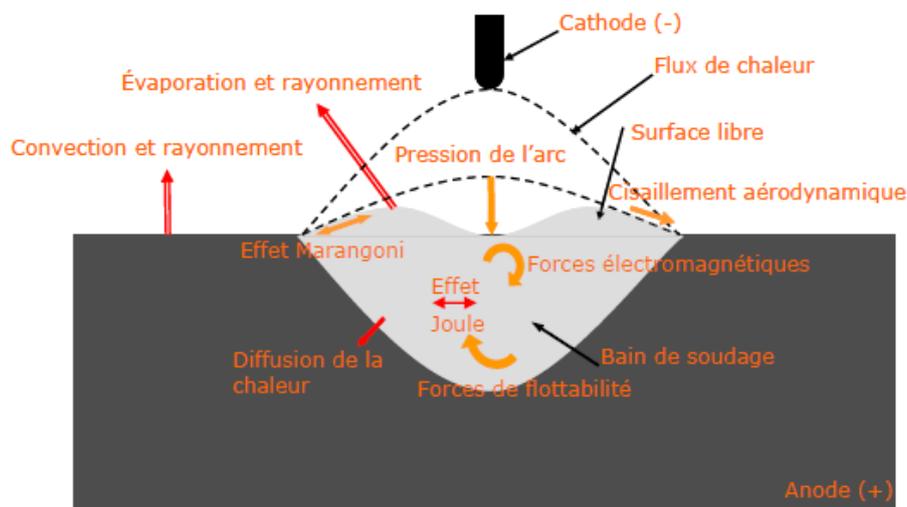


Figure 2- 14 : Schéma d'un bain de soudage et des principaux phénomènes mis en jeu.

La modélisation de l'arc et du bain se différencie par rapport aux écoulements usuels de la mécanique des fluides par les diverses spécificités découlant des diverses interactions et propriétés propres aux plasmas thermiques.

La littérature inclut en général deux types de modèle : modèle d'arc et modèle d'arc/bain.

❖ *Les modèles d'arc*

Un modèle d'arc de référence en 2D axisymétrique que la communauté scientifique utilise pour ses validations de modèles a été proposé par Hsu et al [10]. dans les débuts de la simulation de l'arc (années 80). Pour des conditions opératoires identiques (cathode conique, argon pur comme gaz utilisé, courant de 200 A) ces auteurs ont fourni des résultats expérimentaux sur lesquels on peut s'appuyer. Autour de ce modèle, différents développements originaux ont été réalisés, tels que la prise en compte d'un modèle à deux températures [11], [12], [13], de la turbulence [12], [14], de vapeurs métalliques [15], [16], [17], [18], ou bien encore de la diffusion des électrons [19], [20]. Ces éléments semblent intéressants mais restent pour le moment trop en amont pour la modélisation du problème couplé arc/bain.

❖ *Les modèles d'arc/bain*

Les modèles arc/bain sont tous en 2D axisymétrique et se limitent à une modélisation simple de l'arc (identique au cas de référence) couplée avec un modèle de bain peu développé. Une étude détaillée des trois grands groupes de modélisation du bain de soudage est présentée dans [21]. En particulier :

- Michel Brochard [22] a mis en place une modélisation du procédé de soudage à l'arc TIG afin de pouvoir prédire la géométrie du bain de fusion, le chargement thermique et les forces transmises à la pièce, en fonction des paramètres opératoires du soudage. Brochard a modélisé de manière couplée chacune des parties du procédé : la cathode (ou électrode de soudage), le plasma (ou arc), l'anode (ou pièce), et leurs interfaces.
- Oreper [23] a réalisé un calcul de diffusion-convection, tenant compte des interactions arc-bain, avec une prise en compte du changement de phase solide/liquide grâce à une méthode de capacité calorifique effective. Les paramètres thermophysiques du matériau sont pris constants dans ce cas.
- La première modélisation où l'effet de la variation de propriétés thermophysiques est pris en compte est due à T. Zacharia et al. [24]. Un facteur deux dans la pénétration peut être observée entre une modélisation à propriétés constantes et ce travail, qui, par ailleurs, est compatible avec les mesures réalisées.
- Dans la référence [25], les auteurs se sont concentrés sur les aspects de déformation du bain, dans une configuration « pleine pénétration ». Un état stationnaire est recherché dans le traitement dont le formalisme s'inscrit dans le système des coordonnées curvilignes de la nouvelle surface déformée. Un accord à quelques pour cent avec des mesures expérimentales est présenté.
- V. Pavlyk [26] prend en compte la déformation de la surface libre ainsi que l'augmentation du volume, la distribution de courant est modélisée par une loi

analytique et le calcul est mené avec le logiciel FIDAP en Volumes Finis (VF) et une formulation Eléments Finis.

- La modélisation du soudage à l'arc avec et sans apport de matière (TIG, MIG, MAG) a été développée dans le cadre de la thèse de F. Roger [27]. Le modèle de calcul développé en fortran à partir de la méthode des volumes finis permet de résoudre un problème multiphysique (thermique-électromagnétique-hydrodynamique) grâce à un algorithme de détection de la zone fondue qui permet de résoudre le problème par domaines. Les forces motrices de convection, dans le bain de fusion, d'origine gravitationnelle, électromagnétique, ainsi que les forces de tension de surface (Marangoni) sont prises en compte.
- M. Hugues et al. [28] ont modélisé une jonction en T en soudage MIG grâce au code PHYSICA, en formulation Volumes Finis.

4.2 Approche source équivalente

4.2.1 Définition de cette approche

Cette approche consiste à résoudre un problème de conduction non linéaire dans les pièces à assembler en utilisant un concept dit de « source équivalente ». Dans ce cas, on peut se donner une forme analytique a priori de la source volumique représentant l'énergie du procédé. Les paramètres de cette source sont estimés par application d'une méthode inverse à partir d'informations provenant de résultats expérimentaux réalisés.

4.2.2 Le concept de source de chaleur et les différents types de source

a. Le concept de source de chaleur

Un modèle de source de chaleur de soudage se propose de décrire la façon dont est distribuée l'énergie du soudage dans les pièces à assembler. Ce concept peut s'exprimer de la façon suivante : si l'on décompose le domaine des pièces assemblées en deux sous-domaines correspondant à la zone liquide et la zone solide, on peut changer chacun de ces domaines sans conséquence sur l'autre, si la température et le flux de chaleur à l'interface ne sont pas modifiés. Ainsi, on peut résoudre l'équation de conservation d'énergie dans le cadre d'une formulation thermocinétique si l'on identifie la partie adective de l'équation de conservation d'énergie dans une formulation « fluide » à une source de chaleur équivalentes Q_{th} pour obtenir un champ de température et un champ de flux identique.

On écrit ainsi :

$$Q_{th}(x, y, z, t) = -\rho c_p \vec{U} \cdot \text{grad}T = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}.\left[\lambda \text{grad}T\right] \quad (2-1)$$

Généralement, ce type d'étude est mené en considérant que la source de chaleur est indépendante du temps. Aussi il est possible de travailler en eulérien, en se mettant dans le repère de la source équivalente. Dans ce cas, nous ne faisons plus apparaître la variable temps. Ensuite, si l'on connaissait par un moyen quelconque le champ de température dans les pièces assemblées, on aurait, dans le cas d'un problème purement conductifs, accès à la distribution volumique de chaleur qui rendrait le problème équivalent (source équivalente). Le principe de ces modèles de source est la transformation et la redistribution d'une puissance apportée par un procédé de soudage, s'exprimant sous la forme suivante :

$$Q_{th}(x, y, z) = \eta Pf(x, y, z) = \eta UI f(x, y, z) = Qf(x, y, z) \quad (2-2)$$

Le rendement η est un paramètre tenant compte des pertes énergétiques apparaissant lors du transfert d'énergie.

b. Les différents types de sources de chaleur équivalentes

Les procédés de soudage tels que MIG/MAG, TIG, SMAW... font intervenir une densité de puissance concentrée. On représente alors ces densités de puissance par des distributions d'énergie dans les pièces à assembler (source apparente du soudage). La distribution de la chaleur dépend du procédé utilisé mais aussi des mouvements convectifs de la zone fondue. Toutefois, la dépendance du champ de température avec la distribution de la densité de puissance n'est pertinente qu'à des distances de l'ordre de grandeur des dimensions du bain. Aux distances plus importantes, une source apparente de soudage ponctuelle produit des variations de température identiques toutes choses étant égales par

Ailleurs. En effet, la diffusion de la chaleur tend à homogénéiser et uniformiser les lignes de flux, ce qui atténue l'influence de la distribution. La pertinence de la distribution d'énergie de la source apparente de soudage dépend donc de la loupe qu'utilise le modélisateur. Si les effets mécaniques engendrés par le champ de température sont liés aux hautes températures, le modélisateur a besoin d'une source apparente de Soudage pertinente (cas des distorsions) ce qui n'est pas fondamentalement le cas pour l'étude de contraintes résiduelles.

❖ Source ponctuelle

Cette source apparente de soudage suppose que la puissance électrique P_{elec} du générateur de soudage, produit de la tension (U) par l'intensité(I), soit une source ponctuelle mobile se déplaçant sur la ligne de soudage selon une vitesse V. La puissance thermique permettant le soudage est reliée à la puissance électrique via un coefficient de rendement η qui comptabilise les pertes énergétiques lors du transfert d'énergie. Cette source apparente de soudage correspond au modèle proposé par RONSENTHAL[29]. Ce modèle n'intégrant pas de redistribution spatiale de l'énergie, ne peut pas être prédictif si les transferts par advection sont importants. Il a par ailleurs l'inconvénient majeur de produire une température infinie au point où est appliquée la source.

Dans le référentiel lié à l'outil, la source s'écrit :

$$Q_{th}(x, y, z) = \eta P_{elec} \delta(x_s) \delta(y_s) \delta(z_s) = \eta UI \delta(x_s) \delta(y_s) \delta(z_s) \quad (2-3)$$

où δ est la distribution de DIRAC.

❖ Source 1D

Introduite aussi par RONSENTHAL [29], c'est une distribution ponctuelle en un point donnée du domaine (pas de diffusion suivant l'épaisseur). Elle suppose que l'énergie se répartit de façon uniforme sur une profondeur de pénétration. Si la soudure est débouchante. Ce type de source est essentiellement utilisé pour les procédés de type faisceaux d'électrons ou laser (un cordon étroit et profond). La source apparente de soudage s'écrit dès lors :

$$Q_{th}(x_s, y_s) = \frac{\eta UI}{e} \delta(x_s) \delta(y_s) \quad (2-4)$$

Ce modèle est décrit par deux coefficients, donc deux variables que l'on peut ajuster par l'utilisation de différents modèles prédisant la profondeur de pénétration [30][31][32][33]. Toutefois, ce modèle, n'intégrant pas de redistribution spatiale de l'énergie, ne peut être prédictif si les transferts par advection sont importants. Il a par ailleurs l'inconvénient majeur de produire une température infinie au point où est appliquée la source.

❖ Source 2D

Des formulations permettent d'éviter le problème de température infinie créée par une source ponctuelle. Elle correspond à un constat visuel selon lequel le dépôt de l'énergie sur la surface des Pièces à assembler peut-être distribuer en première approximation sur une ellipse. La redistribution volumique n'est donc pas prise en compte dans ce type de modèle. Il s'ensuit que ces sources ne permettent pas de prendre en compte une redistribution de l'énergie dans le volume par advection. Elles sont, en revanche, adaptées pour les modélisations thermohydrodynamiques, lorsque la modélisation est 2D (configuration débouchante) ou lorsque le bain fondu est peu pénétrant.

a) Source uniforme sur une ellipse

Elle consiste à distribuer la chaleur uniformément sur une ellipse d'axes a et b. Cette source surfacique fait apparaître 3 coefficients à ajuster.

$$Q_{th}(x_s, y_s) = \frac{\eta UI}{\pi ab} \quad \text{si} \quad (x_s, y_s) \text{ tq } \left(\frac{x_s^2}{a^2} + \frac{y_s^2}{b^2} \right) \leq 1 \quad (2-5)$$

b) Source gaussienne sur une ellipse

Cette formulation a été proposée par Rykhaline[34], [35] sous sa forme monovariante. Elle part du constat que la distribution d'énergie est plus forte au centre qu'en périphérie. Elle suppose que la densité de flux de chaleur suit une distribution gaussienne bivariate [35] de la forme :

$$Q_{th}(x_s, y_s) = \frac{\eta UI}{\pi ab} e^{-\left(\frac{x_s^2}{a^2} + \frac{y_s^2}{b^2}\right)} \quad (2-6)$$

La densité de flux maximal vaut : $Q_{\max} = \frac{\eta UI}{\pi ab}$

Cette source surfacique fait aussi apparaître 3 coefficients (η , a , b) à ajuster. *Figure 2-15* présente la distribution gaussienne bivariate.

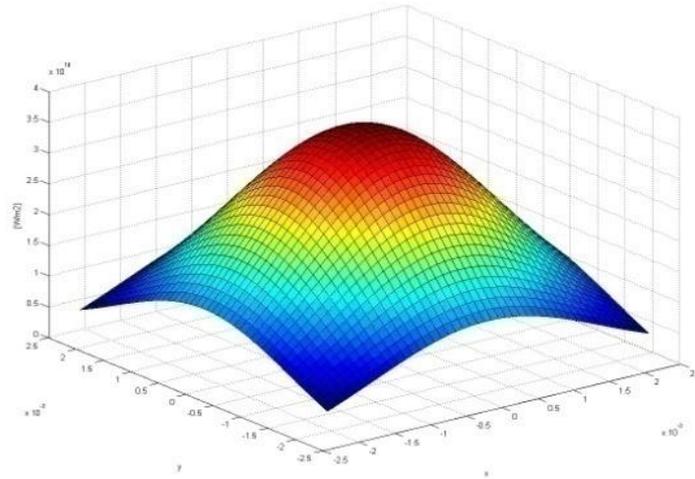


Figure 2- 15: Représentation de la distribution gaussienne bivariate.

c) Source combinaison annulaire gaussienne

Dans son travail de doctorat, Nicolas Kerrouault [36] présente une formulation de source qui donne une forme de bain similaire à celle qu'il a obtenue expérimentalement. Il s'agit de la combinaison de deux gaussiennes, l'une centrée en $(0, 0, 0)$ et l'autre distribuée sur un cercle de rayon b . La formulation mathématique de cette source est de la forme :

$$Q_{ther}(x_s, y_s) = A \exp\left(-3 \frac{x_s^2 + y_s^2}{r_a^2}\right) + B \exp\left(-3 \frac{(\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - b)^2}{r_b^2}\right) \quad (2-7)$$

Cette formule fait apparaître 6 coefficients. La conservation de l'énergie permet d'écrire une relation entre les deux termes source. Si on suppose que : $f_a \eta UI$ est dissipée dans le premier terme, on a alors

$$f_a \eta UI = A \int_V \exp\left(-3 \frac{x_s^2 + y_s^2}{r_a^2}\right) dV \quad (2-8)$$

$$(1 - f_a) \eta UI = B \int_V \exp\left[-3 \frac{(\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - b)^2}{r_b^2}\right] dV \quad (2-9)$$

L'intégration de ces deux intégrales permet d'obtenir A et B.

$$A = \frac{3 f_a \eta UI}{\pi r_a^2} \quad (2-10)$$

$$B = \frac{3(1 - f_a) \eta UI}{\pi r_b^2 [e^{-v^2} + \sqrt{\pi} v (1 + \operatorname{erf} v)]} \text{ où } v = \frac{\sqrt{3} b}{r_b} \quad (2-11)$$

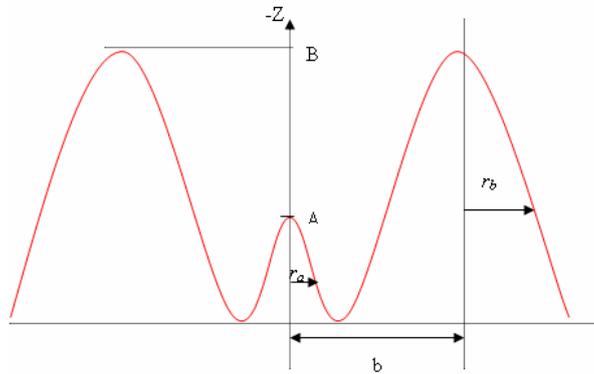


Figure 2- 16: Représentation plane de la source « Kerrouault » [36].

Cette distribution surfacique suppose implicitement un déplacement de l'énergie vers l'extérieure qui peut être due à un effet de Marangoni négatif. L'écoulement est alors surfacique du centre vers les bords du bain

❖ Source 3D

Les sources 3 D sont utilisées pour tenter de prendre en compte une redistribution de l'énergie due aux mouvements convectifs dans le bain.

a) Source uniforme dans le volume

On généralise ici les sources surfaciques au volume en supposant une distribution constante dans l'épaisseur. On écrit ainsi :

$$Q_{ther}(x_s, y_s, z_s) = \frac{Q_{ther}(x_s, y_s)}{h} [1 - u(z_s - h)] \quad (2-11)$$

Où

U : est la fonction d'Heaviside

S : la profondeur de pénétration du bain fondu.

b) Source double ellipsoïde

Cette source a été proposée par Goldak [37] La source de chaleur se distribue dans deux quarts de demi-ellipsoïde, avant et après la source (*Figure 2-17*). Elle correspond à une distribution gaussienne dans chaque plan du $\frac{1}{4}$ d'espace considéré.

La source $Q_f(x, y, z)$ à l'avant du procédé s'écrit :

$$Q_f(x, y, z) = f_f \frac{6\sqrt{3}Q}{a_f bc \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x}{a_f}\right)^2} e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (x > 0) \quad (2-12)$$

Derrière le procédé nous avons :

$$Q_r(x, y, z) = f_r \frac{6\sqrt{3}Q}{a_r bc \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x}{a_r}\right)^2} e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (x \leq 0) \quad (2-13)$$

Où a_r, a_f, b, c : sont les axes de l'ellipsoïde.

y : la coordonnée radiale.

x : la coordonnée dans la direction d'avance du procédé.

z : la coordonnée axiale.

Q : l'énergie de la source.

f_{ff} et f_r : des coefficients de distribution de la chaleur entre l'avant et l'arrière (arc, faisceau)

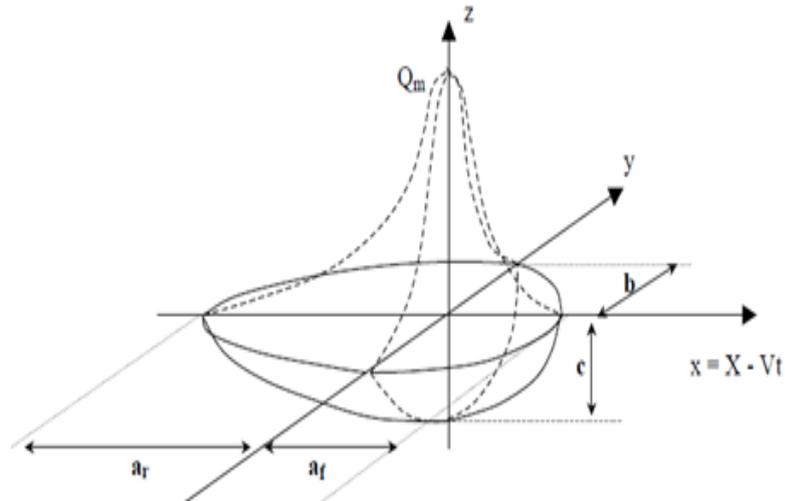


Figure 2- 17: Source double ellipsoïde de Goldak [37].

c) Source conique

Une source conique a été proposée par Goldak[38] (Figure 2-18). Elle correspond à une distribution radiale gaussienne et linéaire dans la profondeur. L'énergie se dépose ainsi dans un cône. Elle est particulièrement adaptée aux procédés à haute énergie (faisceau d'électrons, laser). L'expression mathématique de cette distribution est de la forme :

$$Q_{ther}(x, y, z) = \frac{9Q}{\pi h (r_0^2 + r_0 r_1 + r_1^2)} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_z^2}\right) [1 - u(z + h)] \quad (2-14)$$

Avec $r_z = r_0 + \frac{r_0 - r_1}{h} z$ où r_0 est le rayon de fusion en $z = 0$

h : la profondeur de pénétration

r_1 : Le rayon de fusion en $z = -h$ et $u(z+h)$ la fonction d'Heaviside.

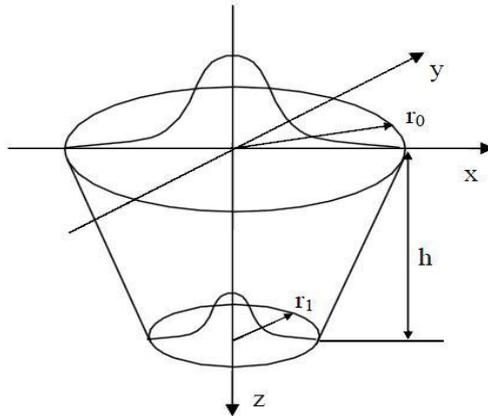


Figure 2- 18:Source conique de Goldak.

d) Source Sabapathy

Sabapathy a proposé une adaptation du modèle de Goldak permettant de mieux reproduire les faibles pénétrations parfois rencontrées en soudage à l'électrode enrobée [39],[40]

$$Q(x, y, z) = Q_0 e^{-3\left(\frac{|x|}{a}\right)^{n1}} e^{-3\left(\frac{|y|}{b_i}\right)^{n2}} e^{-3\left(\frac{|z|}{c}\right)^{n3}} \quad (2-15)$$

Sabapathy montre que si l'on augmente l'exposant n_3 correspondant à la profondeur du bain en maintenant les deux autres exposants à la valeur 2 comme dans le modèle de Goldak, la profondeur du bain obtenue par simulation numérique diminue. Avec ce modèle de source, les surfaces équipotentielles de densité volumique de puissance ne sont plus ellipsoïdales, mais correspondent à des surfaces d'équations :

$$\left(\frac{|x|}{a}\right)^{n1} + \left(\frac{|y|}{b_i}\right)^{n2} + \left(\frac{|z|}{c}\right)^{n3} = 1 \quad (2-16)$$

Figure 2-19 montre une comparaison des distributions de densité de puissance des modèles « Goldak » et « Sabapathy » dans un plan perpendiculaire à l'axe de la source de chaleur. Une augmentation de l'exposant n_1 dans la direction longitudinale provoque un « étalement » de la distribution dans cette direction.

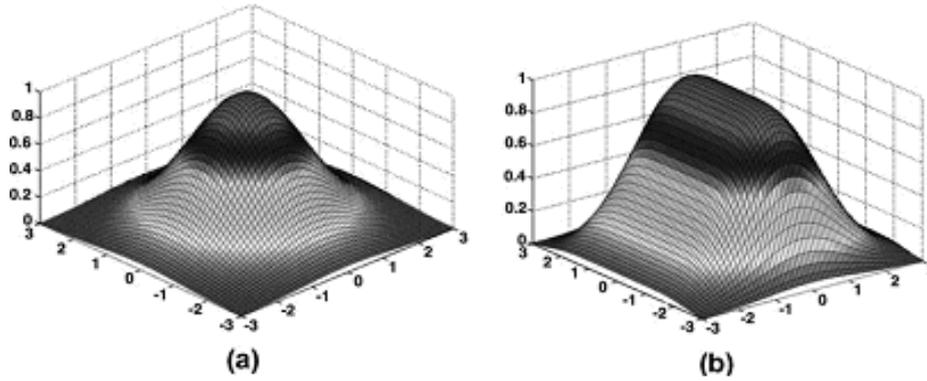


Figure 2- 19: Distribution de densité de puissance dans un plan pour la source « Goldak » (a), et la source « Sabapathy » avec $n1 = 6$ et $n2 = n3 = 2$ (b) [39]

d) Source CIN (Cylindrical Involution Normal)

Cette source a été proposée par Ranatowski[41] . Elle a une formulation générale pour laquelle on peut retrouver de nombreuses formes de source précédemment citées. L'expression mathématique de cette source est la suivante :

$$Q_{cin}(x, y, z) = \frac{kK_z Q}{\pi[1 - e^{(-K_z h)}]} \exp[-k(x^2 + y^2) - K_z z][1 - u(z + h)] \quad (2-17)$$

Avec $K_z (m^{-1})$ paramètre d'involution de la source, $k (m^{-2})$ paramètre de concentration de la source, $h(m)$ est la profondeur de pénétration.

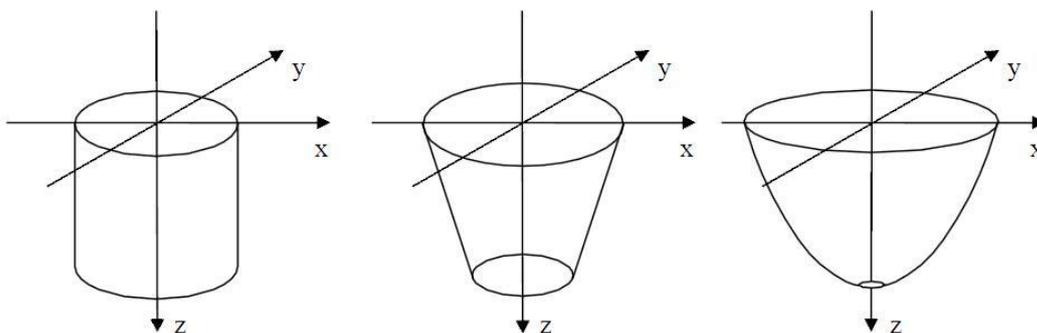
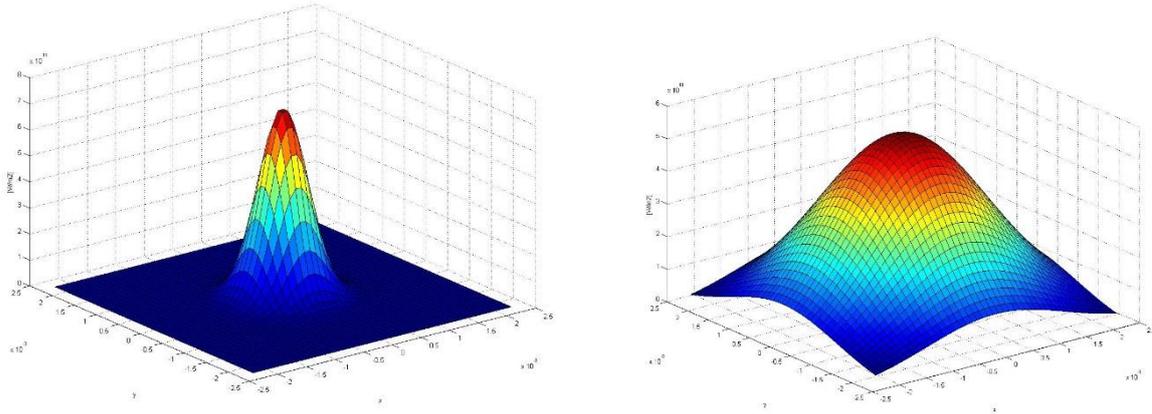


Figure 2- 20: Source CIN avec la même énergie Q et différents facteurs k, K_z .



(a)

(b)

Figure 2- 21: Distribution de densité de puissance dans un plan pour la source « CIN » avec $k = 4.106$ et $K_z = 10^{-5}$ (a) ; et $k = 3.105$, $K_z = 10^{-5}$ (b)

4.2.3 Etat de l'art de modélisation des procédés de soudage à l'aide d'une source équivalente :

La simulation numérique des procédés de soudage apparaît bien souvent comme un moyen d'accès privilégié aux grandeurs qui les caractérisent. Ainsi, la simulation numérique du soudage est du plus grand intérêt lorsqu'il s'agit d'étudier la tenue mécanique d'un joint soudé ou de vérifier la faisabilité d'une séquence de soudage. La simulation de tels procédés nécessite la modélisation des interactions complexes entre des phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques et la mise en oeuvre de méthodes numériques particulières. Sous l'impulsion de l'industrie nucléaire au cours des années 1980 et 1990. Les méthodes et modèles développés [42] ont alors constitué les fondations de logiciels de simulation numérique aujourd'hui utilisés par un grand nombre de sociétés industrielles des secteurs aéronautique, automobile ou encore de la métallurgie.

dans la littérature il existe plusieurs études sur la modélisation des procédés de soudage à l'aide de source de chaleur équivalente [43], [44] cette modélisation consiste une mieux caractérisation de forme de la zone fondue et la distribution de température dans la pièce [45] l'objectif est de déterminer les contraintes résiduelles dans les pièces à assembler [46][47].

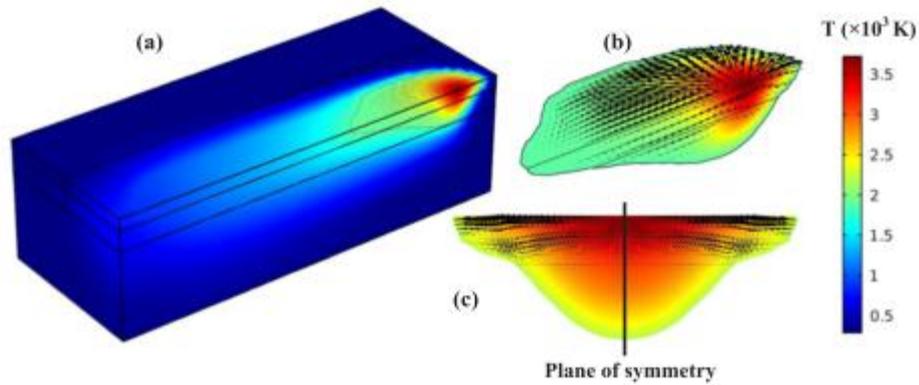
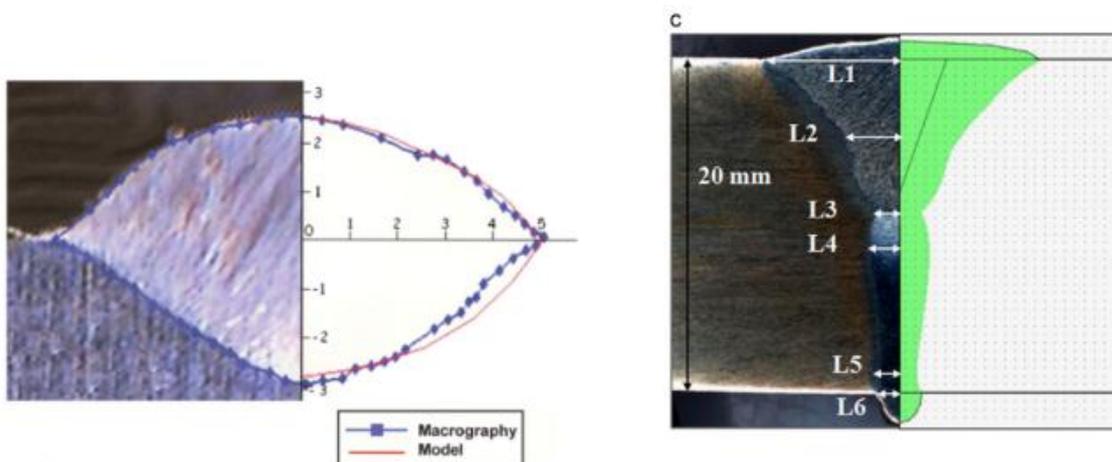


Figure 2- 22: la distribution de température dans la pièce pour l'étude [45].

Puisieurs auteurs [48][49],[50],[51] ont adopté de source de chaleur de type double ellipsoïde de Goldak [37] l'objectif est de traiter des effets des paramètres de soudure sur les contraintes résiduelles développées lors du soudage à l'arc électrique GTAW.

Autre étude [52] utilise un modèle à éléments finis en trois dimensions pour analyser la distribution de température dans une soudure à joint en T et prédire la géométrie des billes dans le soudage au laser de tôles d'acier inoxydable AISI304 de 1,6 mm d'épaisseur. L'apport de chaleur au modèle est supposé être une source de chaleur gaussienne conique.

Parmi les travaux qui ont utilisé la combinaison de deux type de source de chaleur [53],[54] , [55] La première est une source surfacique gaussienne et la deuxième une double ellipsoïde de Goldak [37] pour prédire la forme de zone fondue numérique à partir des résultats expérimental au cours de soudage hybride laser/ MIG ,MAG.



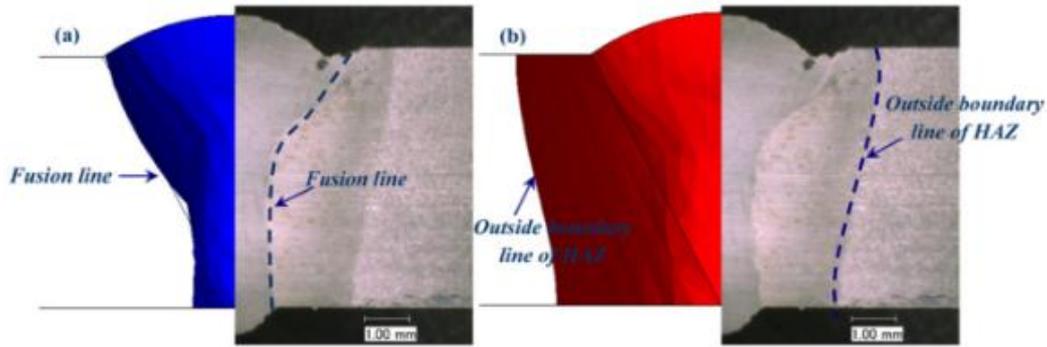


Figure 2- 23: la comparaison entre la forme de la zone fondu expérimental et numérique pour les travaux [53],[54].[55]

Contrairement quelque publication [56],[57],[58] ont choisi de présenter une nouvelle source de chaleur numérique pour la simulation de soudage à l'arc au gaz tungstène (GTAW) et le soudage laser . Elle permet de prédire les principales dimensions du cordon de soudure et l'évolution de la température dans la pièce.

Les effets de certains paramètres de soudage ont été étudiés par Antony [59]. Ils sont formulé un problème de source de chaleur mobile et obtenu des solutions de température transitoire en utilisant un solveur par éléments finis.

5. Méthode des Plans d'Expériences

5.1 Principe et objectifs de la méthode des Plans d'Expériences

En général, le soudage manuel SMAW est très complexe du fait du beaucoup interactions entre les paramètres intervenant dans l'évolution du procédé. En conséquence, pour étudier et surtout pour obtenir un modèle expérimental de l'évolution du procédé, il est nécessaire d'effectuer un très grand nombre d'essais. Dans ce contexte, le volume d'essais requis est soumis à deux tendances contradictoires :

- D'une part, il est nécessaire d'inclure tous les facteurs avec plusieurs niveaux pour obtenir un modèle représentatif,
- D'autre part, il est nécessaire de minimiser le nombre d'essais pour réduire la durée et le coût de l'expérimentation.

Dans ces conditions, l'utilisation d'une stratégie expérimentale optimale, comme partie intégrante d'une stratégie globale qui va de la conception à la réalisation des expériences, devient une nécessité [60],[61],[62]. Une stratégie optimale peut être définie comme une stratégie qui, pour un nombre minimum d'essais, fournit un modèle expérimental indiquant la direction à suivre pour atteindre l'optimum, sans affecter la précision d'estimation de ce

modèle. Actuellement, afin de réaliser une modélisation expérimentale, il existe deux méthodes : la méthode dite « classique » et la méthode dite « moderne.

5.1.1 La méthode classique

La stratégie classique (Gauss-Seidel) est définie par le principe «un paramètre à un moment donné» et se caractérise par une recherche unifactorielle[62]. Ceci suppose de fixer le niveau de tous les paramètres, sauf un, et de mesurer la « Fonction Objectif » en fonction de l'évolution du paramètre non fixé. (On désigne « Fonction Objectif » une grandeur physique ou un paramètre recherché). Après expérimentation il est possible de déterminer la variation de la Fonction Objectif relativement au facteur étudié. L'étude de plusieurs facteurs nécessite d'appliquer le même algorithme pour chacun. Étudier plusieurs facteurs avec plusieurs points expérimentaux représente un travail gigantesque qui dépasse parfois les limites de la faisabilité (par exemple : 8 facteurs avec 4 points expérimentaux impose 65 536 expériences). Dans ces conditions, l'expérimentateur est obligé de réduire le nombre d'essais, soit en diminuant le nombre de points expérimentaux, soit en réduisant le nombre des facteurs étudiés. Le fait de renoncer à certains facteurs oblige à prendre plus de précautions dans l'interprétation et entraîne une présentation des résultats parfois très incomplète.

5.1.2 La méthode « moderne »

La méthode « moderne » (Box-Wilson) est définie par le principe «tous les facteurs à chaque moment» et utilise une stratégie multi factorielle[62]. Ceci suppose de faire varier les niveaux de tous les facteurs à la fois, mais d'une manière programmée et raisonnée. Le fait de faire varier tous les facteurs à la fois présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut énumérer [63] :

- Une diminution du nombre d'essais,
- Un nombre de paramètres étudiés très grand,
- Une détection des interactions entre les paramètres,
- Une détection des valeurs optimales,
- Une meilleure précision sur les résultats,
- Une modélisation des résultats.

Une des principales applications des plans d'expériences est la recherche des facteurs ayant une influence significative sur la ou les Fonctions Objectif. En général, parmi les facteurs étudiés, beaucoup seront de faible influence et seuls quelques-uns joueront un rôle important dans la variation de ces Fonctions Objectif. Ainsi, tous les facteurs influents auront été détectés et leurs variations étudiées avec un minimum d'essais. Les Plans d'Expériences permettent d'une part d'analyser un grand nombre de paramètres et ont comme but la hiérarchisation des paramètres en fonction de l'effet provoqué sur les grandeurs physiques

(Fonctions Objectif étudiées). Et d'autre part d'obtenir les modèles empiriques qui relient les paramètres aux Fonctions Objectif.

A ce niveau, il est important de rappeler que cette technique permet de relier les facteurs d'influence aux fonctions objectifs sans donner d'information sur les processus physiques mis en jeu. Aussi les informations obtenues avec cette méthode seront à corrélérer avec les résultats issus de la modélisation vis-à-vis l'étude de sensibilité des paramètres des sources de chaleur.

❖ Fonctions Objectifs et Facteurs d'Influence

L'étude d'un phénomène ou d'un processus suppose l'analyse de l'évolution d'une grandeur en fonction de la variation de différents paramètres. Sous une forme mathématique, on peut écrire que la grandeur d'intérêt y , appelé « Fonction Objectif (FO) », est une fonction de plusieurs variables x_i , appelées « Facteurs d'Influence (FI) » :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_z) \quad (2-16)$$

Pour qu'une grandeur soit acceptée comme fonction objectif [60], elle doit :

- Caractériser d'une manière correcte l'objectif de la recherche,
- Pouvoir être exprimée d'une manière quantitative,
- Présenter une signification physique claire, compréhensible,
- Présenter un caractère univoque,
- Pouvoir être déterminée avec une précision suffisante, supérieure aux erreurs expérimentales

Une grandeur peut être acceptée comme Facteur d'Influence[62], seulement si elle :

- Est indépendante (peut-être mise sur n'importe quel niveau dans son domaine de variation, indépendamment des niveaux sur lesquels sont situés les autres facteurs) ;
- Est compatible avec les autres facteurs d'influence (i.e. qu'elle peut être combinée avec les niveaux des autres facteurs pour un fonctionnement normale du système);
- Est contrôlable (peut être mesurée, fixée et maintenue sur les niveaux de variation désirés) ;
- Agit de façon directe et univoque sur l'objet de la recherche.

5.2 Notion de plan complet et plan fractionnaire

Les Plans d'Expériences Complets (PEC)[64] permettent d'étudier tous les facteurs avec leurs interactions. L'interprétation des résultats obtenus est directe. En revanche, lorsque le nombre

de facteurs augmente, la méthode devient lourde à mettre en place (le volume global d'un Plan d'Expériences est égal à P^k , avec k nombre des facteurs, et P nombre de niveaux de chaque facteur). Les Plans d'Expériences Fractionnaires (PEF) [65][53] permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux Plans d'Expériences Complètes. Un Plan d'Expérience Fractionnaire à 2 fois moins, voire 4 fois moins (ou 2n fois moins) d'essais que le Plan d'Expériences Complet correspondant. En revanche, l'interprétation des résultats demande une attention particulière qui nécessite un travail en équipe.

5.3 Estimation de l'erreur et effets significatifs

Lorsqu'on effectue la mesure d'une réponse, on trouve un résultat numérique y_i . Cette valeur s'écarte de la valeur vraie, que l'on ne connaîtra jamais. On sait seulement que la valeur vraie a une certaine chance d'être comprise dans un intervalle autour de y_i . Cet intervalle s'appelle « intervalle de confiance » : plus il est grand plus la valeur vraie y_v a de chance d'y appartenir. Dans le cas de la distribution normale, les pourcentages de chance sont représentés sur la *Figure 2-24*.

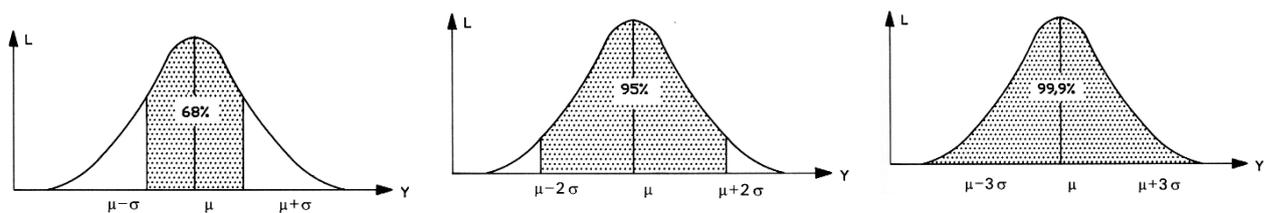


Figure 2- 24: Pourcentage des valeurs compris dans l'intervalle de confiance $\pm \sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$ [63].

Par exemple, lorsqu'on énonce une proposition et que l'on suppose que cette proposition correspond à une valeur comprise dans l'intervalle Δy , si on choisit $\Delta y = 2\sigma$, il y a 95 % de chance que cette proposition soit correcte, soit 5% de chance de se tromper.

5.4 Modèle mathématique d'estimation

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots z \quad (2-17)$$

où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une exactitude donnée.

- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. On suppose que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

5.5 Les Plans d'Expériences Numériques (PEN)

Lorsque les expérimentations sont coûteuses, il arrive de plus en plus fréquemment que l'on étudie d'abord les phénomènes à l'aide de simulations numériques. Les calculs sont souvent complexes et nécessitent des temps de calcul très longs. Il est alors avantageux d'organiser les simulations de la même manière que les essais des plans d'expériences. L'utilité de ces plans numériques, d'une part est de quantifier l'influence des paramètres du modèle sur les Fonctions Objectifs choisies, afin de minimiser le nombre de paramètres à étudier, et d'autre part, essayer de trouver la plage des paramètres d'entrée du modèle, afin de juger de la robustesse du modèle numérique.

5.6 L'utilisation de la méthode des Plans d'Expériences dans la littérature

La synthèse des résultats trouvés dans la littérature ont permis d'approfondir la compréhension des comportements lors des assemblages à l'aide de différents procédés de soudage et selon plusieurs configurations. L'objectif principale est illustrer l'influence des paramètres opératoires et leurs interactions au cours du soudage.

Au cours de développement technologique, l'utilisation de faisceau laser à la première fois au cours de soudage a été en 1975, plusieurs auteurs adoptent ce procédé laser Pan et al [66], Lee et al [67] ont étudiés à l'aide de la méthode Taguchi, l'influence des paramètres lors de l'assemblage des plaques, les conditions de soudage optimales ont été obtenues à 0.86 ms de la largeur d'impulsion et à 3.18–3.35 mm de la position focale. Afin déterminé la qualité des cordons de soudure Bagchi et al [68] ont utilisé les conditions expérimentales qui sont conçues sur la base du tableau orthogonal de Taguchi L9 pendant la simulation numérique du soudage au laser. Pakmanesh et Shamanian[69] ont essayé de minimisé les défauts de soudure par l'optimisation des paramètres de soudage laser pulsés sur le joint à recouvrement d'une feuille d'acier inoxydable 316L. Les effets de la puissance laser, de la durée des impulsions et de la fréquence ont été étudiés.

Le soudage semi-automatique a été utilisé dans de nombreux travaux, Pour illustrer l'importance de la protection gazeuse au cours du soudage GMAW, Ghosh et al [70] .ont fait varier débit de gaz de protection. Cette étude a permis l'analyse des effets du débit de gaz de protection et de la distance buse-plaque sur la résistance à la traction et le pourcentage d'allongement. Un contrôle non destructif à l'aide d'une inspection visuelle et un examen radiographique aux rayons X à permet la détection d'éventuelles défauts de surface dans les

éprouvettes soudées. Huang et al [71] ont aussi adopté la méthode Taguchi pour déterminer l'effet des paramètres de soudage sur la géométrie du cordon. Trois flux ont été utilisés pour étudier l'effet de l'activation des flux assistée par le gaz de soudage à l'arc, afin d'avoir une pénétration plus importante et une résistance à la traction et une dureté supérieures. Murugan et Parmar[72] , Martinez-Conesa et al [73], ont utilisé une technique factorielle pour développer des modèles mathématiques afin de prédire la géométrie du cordon de soudure , à l'aide de ce modèle une optimisation multifonctionnelle est réalisée pour déterminer l'espace des solutions optimales. Plusieurs auteurs se sont intéressés à ce procédé , on peut citer entre autres les travaux de Ibrahim et al [74], Srivastava et Garg[75].

Quelques chercheurs. Dhas et Satheesh[76] , Singh et al [77]. Hayajneh et al [78], Sailender et al [79] ont montré l'optimisations avec la méthode des plans d'expériences au cours de soudage à l'arc sous flux SAW pour trouver les paramètres les plus influents sur la réponse (la distorsion en flexion, résistance de la soudure...).

Un certain nombre de travaux ont été publiés sur le soudage TIG. Tarnag et Yang [80], ont utilisé la méthode Taguchi pour formuler le tracé expérimental, analyser l'effet de chaque paramètre sur la géométrie du cordon et prévoir le réglage optimal pour chaque paramètre.

D'autre part, Kumar et al. [81], par Padmanaban et Balasubramanian[82], Manikandan et al [83].ont intéressé à l'analyse de régression pour prédire les effets des paramètres de soudage TIG à courant pulsé sur les propriétés en traction. D'autres études expérimentales, réalisées par Bharath et Sridhar et al [84], montre que la vitesse est le facteur le plus déterminant, pour obtenir une meilleure résistance à la flexion et que le courant utilisé pendant le soudage est le facteur le plus déterminant pour obtenir une résistance à la traction supérieure.

Par ailleurs, des études sont actuellement menées pour améliorer la qualité de morphologie de cordon de soudure par la nouvelle procédé hybride. Bidi et al [53] ont intégré la modélisation expérimentale à l'aide de la méthode des plans d'expériences avec la simulation numérique des phénomènes thermiques lors d'une opération de soudage dans le cas de procédé hybride laser/MIG à plat. Cette combinaison a permis d'obtenir un outil prédictif de la forme de la zone fondue et des champs de températures à l'intérieur des pièces à assembler. Ces mêmes chercheurs Bidi et al [65] se sont intéressés à l'assemblage par soudage hybride laser/MAG. Dans un premier temps l'influence des paramètres opératoires sur la pénétration latérale, dans et dans un second temps l'optimisation de la géométrie des cordons, afin d'obtenir simultanément une pénétration latérale totale supérieure à 0.4 mm et un rapport H/L inférieur à 0.6. Cette optimisation a été réalisée à l'aide de deux types de plans d'expériences, le premier : un plan d'expérience complet (PEC) à 32 essais et le second un plan d'expérience fractionnaires (PEF) à 8 essais. autre chercheur Casalino et al [85] ont traité le problème de la porosité et les contraintes résiduelles près de la zone affectée thermiquement par une nouvelle génération de laser à fibre assistée par une source MIG.

Outre les études d'optimisation des paramètres opératoires de soudage par friction-malaxage (FSW) .On peut par exemple citer les travaux Kadaganchi et al [86] , Ajith et al

[86], Ugrasen et al [87]. Les objectifs de ces travaux sont d'obtenir des cordons de qualité supérieur, une meilleure résistance à la traction et une dureté maximales.

Pour le procédé SMAW, les travaux sont plus importants. Shukla et al [88], Ahire et al [89] ils ont utilisé la méthodologie de surface de réponse pour rechercher l'influence des paramètres de processus sur le joint soudé à l'arc métallique manuel. Dernièrement Patilet et Kadam et al [90] ils ont optimisé les paramètres d'entrée de soudage manuel avec électrode enrobé (courant de soudage, la vitesse de soudage, l'écart de racine, l'angle d'électrode) sur les fonctions objectives (la résistance de la soudure, le taux de dépôt de métal et la hauteur du cordon), ils ont utilisé méthode Taguchi et méthodologie de surface de réponse. Lenin et al [91] ils ont adopté la méthode Taguchi pour analyser l'effet de chaque paramètre, et les paramètres optimaux du procédé de soudage SMAW pour obtenir une plus grande résistance de la soudure. Une optimisation de la technique de soudage vibratoire pendant le soudage à l'arc manuel (SMAW) a été proposée par Pravin Kumar Singh et al [92], dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques d'un joint de soudure bout à bout. La technique d'analyse de Taguchi a été appliquée pour optimiser les paramètres du processus. L'étude vise à maximiser la résistance à la rupture et la dureté des joints soudés.

6. Conclusion

La bibliographie souligne un nombre d'études important autour du soudage et de son optimisation.

Dans le cadre de cette thèse, nous appliquons une technique d'optimisation telle que les plans d'expériences au soudage à l'arc électrique SMAW en chanfrein. Au regard de la complexité du soudage SMAW. Nous avons expérimenté notre démarche sur le procédé soudage SMAW « passe-talon » (*Figure 2-26*). Cette démarche consiste tout d'abord à réaliser des essais préliminaires afin d'approcher au mieux les paramètres opératoires validés par l'analyse macrographiques des coupes transverses des cordons de soudure. Le travail se poursuit par une analyse phénoménologique du soudage dans le but d'extraire le maximum d'informations afin de développer un modèle représentant l'apport de chaleur. Le modèle numérique peut alors être construit sous un code de calcul numérique, ici COMSOL Multiphysics. Afin de mieux cerner les paramètres opératoires et leur sensibilité sur des dimensions caractérisant la coupe macrographique obtenue expérimentalement, un Plan d'Expériences est mis en œuvre. Ce Plan d'Expériences permet de conforter le modèle numérique et de déterminer un modèle empirique fiable qui relie les paramètres opératoires aux dimensions du cordon de soudure, tout en mettant en œuvre un nombre minimal d'expériences. Après validation du modèle par comparaison des coupes macrographiques théoriques et expérimentales, un jeu optimal des paramètres de la source équivalente étant connu, des Plans d'Expérience Numériques sont mis en place permettant d'analyser le comportement du modèle vis-à-vis des paramètres de la source. *La Figure 2-25* résume la démarche développée dans ce travail.

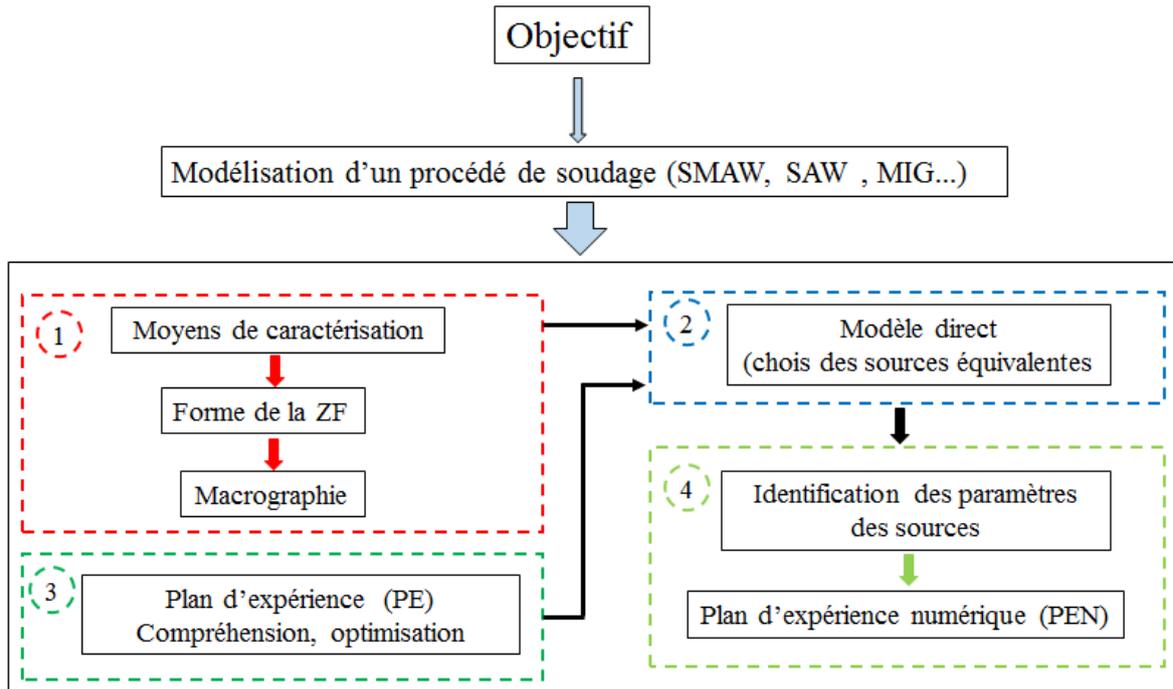


Figure 2- 25:Présentation graphique de la méthodologie de travail suivie.

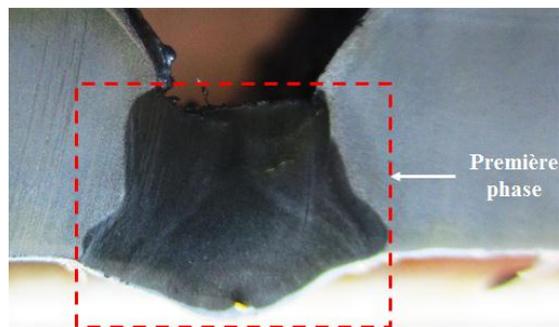


Figure 2- 26:Phase d'assemble de la pièce.

Chapitre 3 : Etude expérimentale du procédé de soudage SMAW

1. Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous allons présenter le travail expérimental réalisé pour l'étude du soudage à l'arc électrique SMAW. Nous estimons nécessaire la réalisation d'une étude paramétrique de soudage, d'une part pour intégrer les résultats de celle-ci comme données d'entrées dans le modèle de simulation à développer dans le cadre de l'étude numérique de ce procédé et d'autre part pour valider les résultats du calcul numérique.

La première partie de ce chapitre présente l'étude de processus d'assemblage des pipelines qui doit nous permettre de choisir les paramètres de soudage à l'arc électrique SMAW d'acier API 5LX70 : la tension, l'intensité, la vitesse de soudage et le diamètre de l'électrode seront choisis en fonction de la qualité des cordons obtenue.

Dans la deuxième partie l'analyse des macrographies est réalisée sur la soudure obtenue par les paramètres du procédé choisis par l'analyse paramétrique. Des résultats de la variation des paramètres opératoires de soudage sur la morphologie de cordon sont donnés sous forme histogrammes de PARETO.

2. Réseau Algérien de transport des hydrocarbures par canalisation

Le réseau de transport des hydrocarbures par canalisation est constitué de plus de 20000Km de conduites en acier dont la majeure partie est enterrée subissant ainsi au fil du temps des dégradations qui influent sensiblement sur leurs durées de service. Ce réseau est utilisé pour le transport de différents types de produits, gazeux, liquides et solides ou polyphasiques. En ce qui concerne les hydrocarbures on dispose de deux types de canalisations selon le produit transporté, comme les gazoducs pour le transport du gaz naturel et oléoducs pour le transport des hydrocarbures liquides, comme le pétrole. Ce moyen de transport massif a connu un essor considérable, occupant ainsi la première place du point de vue économique et sécurité. Ce réseau est vital pour l'acheminement du gaz naturel, et des hydrocarbures liquides produits dans le sud du pays vers les centres de transformation (raffineries, complexes de séparation et de liquéfaction, usines pétrochimiques) et de consommation à l'intérieur et à l'extérieur du pays.

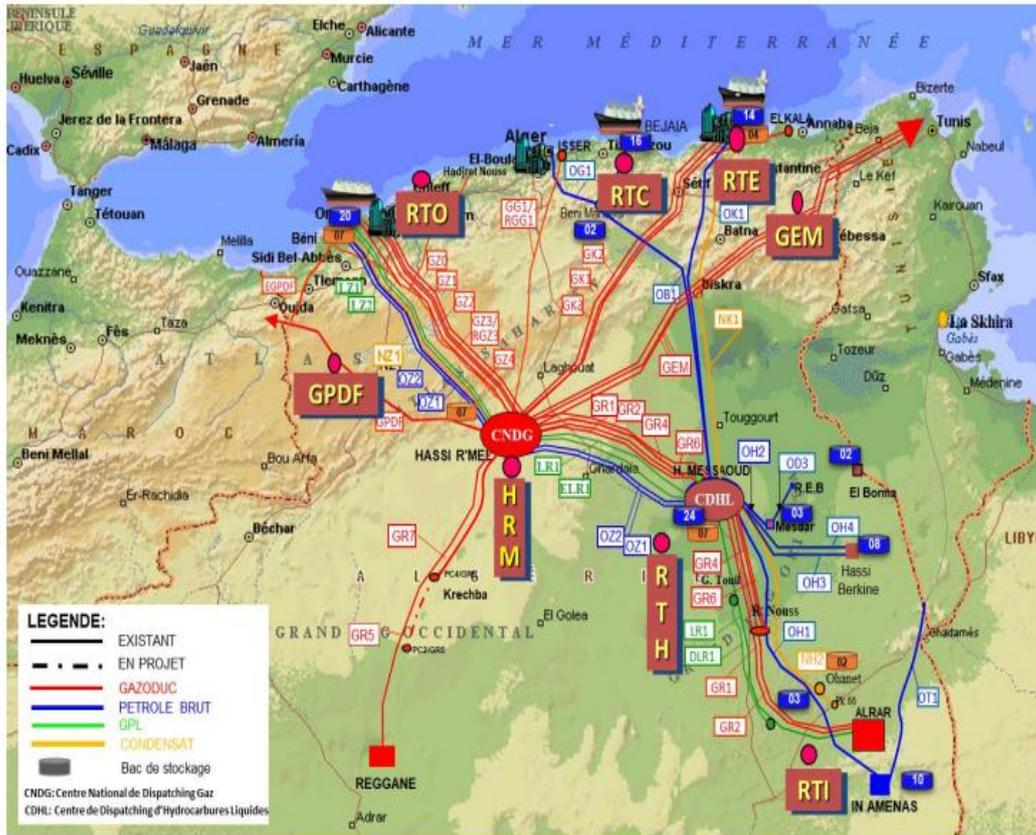


Figure 3- 1: Réseau Algérien de transport des hydrocarbures par canalisation

2.1 Description du Réseau de Transport

Le réseau de transport des hydrocarbures liquides et gazeux est constitué d'un ensemble de canalisations, de stations de pompage, de stations de compression et de parcs de stockage, assurant le transport des effluents issus des champs de production, d'un centre de stockage ou d'un dispatching, vers les pôles industriels de traitement et de liquéfaction, de transformation, d'exportation et d'alimentation du marché national.

Le développement du réseau de transport depuis la construction de la première canalisation en 1959, a été engendré par les besoins en matière de transport en constante croissance, nécessitant ainsi le développement continu de nouvelles capacités de transport.

Ce réseau de transport est composé de deux parties complémentaires :

- **Un réseau sud, qui assure le transport :**

Des effluents issus des gisements vers Haoud El Hamra (CDHL) pour le pétrole brut et le condensat et vers Hassi-R'mel (CNDG) pour le gaz naturel et le GPL.

- **Un réseau nord, qui assure le transport :**

- ✓ Du pétrole brut et du condensat du CDHL vers les raffineries et les ports d'exportation
- ✓ Du gaz naturel du CNDG vers le marché national, les gazoducs destinés à l'exportation et les complexes de liquéfaction ;
- ✓ Du GPL de Hassi-R'mel vers les complexes de séparation.

Le choix des tracés des canalisations répond, en plus des aspects liés à la sécurité des personnes et des biens, à des critères d'optimisation économique et des distances de raccordement, pour l'ensemble des utilisateurs.

2.2 Consistance du réseau de transport

Le réseau de transport du concessionnaire s'étend sur une longueur de 19 623 km, dont :

- ✓ 21 oléoducs d'une longueur de 9 946 km, avec une capacité de transport de 248,36 Millions TM/an.
- ✓ 16 gazoducs d'une longueur totale de 9 677 km, avec une capacité de transport de 178,079 Milliards de Sm³/an.
- ✓ 82 stations de pompage et de compression.
- ✓ 127 bacs de stockage de pétrole brut et de condensat, d'une capacité design de 4,2 Millions de Tep.
- ✓ 02 Centres de Dispatching Liquides et Gaz.

Les postes de chargement d'Hydrocarbures implantés au niveau des Terminaux Marins dans les différents ports (Arzew, Bethioua, Béjaïa, Skikda) sont exploités par une filiale du Concessionnaire.

En plus des postes de chargement à quai, ces ports sont équipés de cinq (05) bouées de chargement de pétrole en mer (02 à Arzew, 02 à Skikda et 01 à Béjaïa) de type SPM (Single Point Mooring), qui permettent les accostages de tankers de gros tonnage, allant jusqu'à 320 000 TM.[93]

2.3 Système de transport d'hydrocarbures par canalisation

Les canalisations dans le réseau de transport d'hydrocarbures constituent un système de transport composé des sous-systèmes suivants :

- ❖ Installations de stabilisation et de séparation (gaz et liquide) Le produit issu des puits passe par un ensemble de phases, où il subira plusieurs traitements, des traitements simples basés sur la stabilisation et la séparation selon la densité des constituants (eau, huile, gaz) du produit ou bien des traitements par des paramètres de procédés (température, pression, débit, niveau...). Cette phase donnera trois produits : eau, gaz et huile (*Figure3-2*).
- ❖ Station de pompage et station de compression Ils permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.

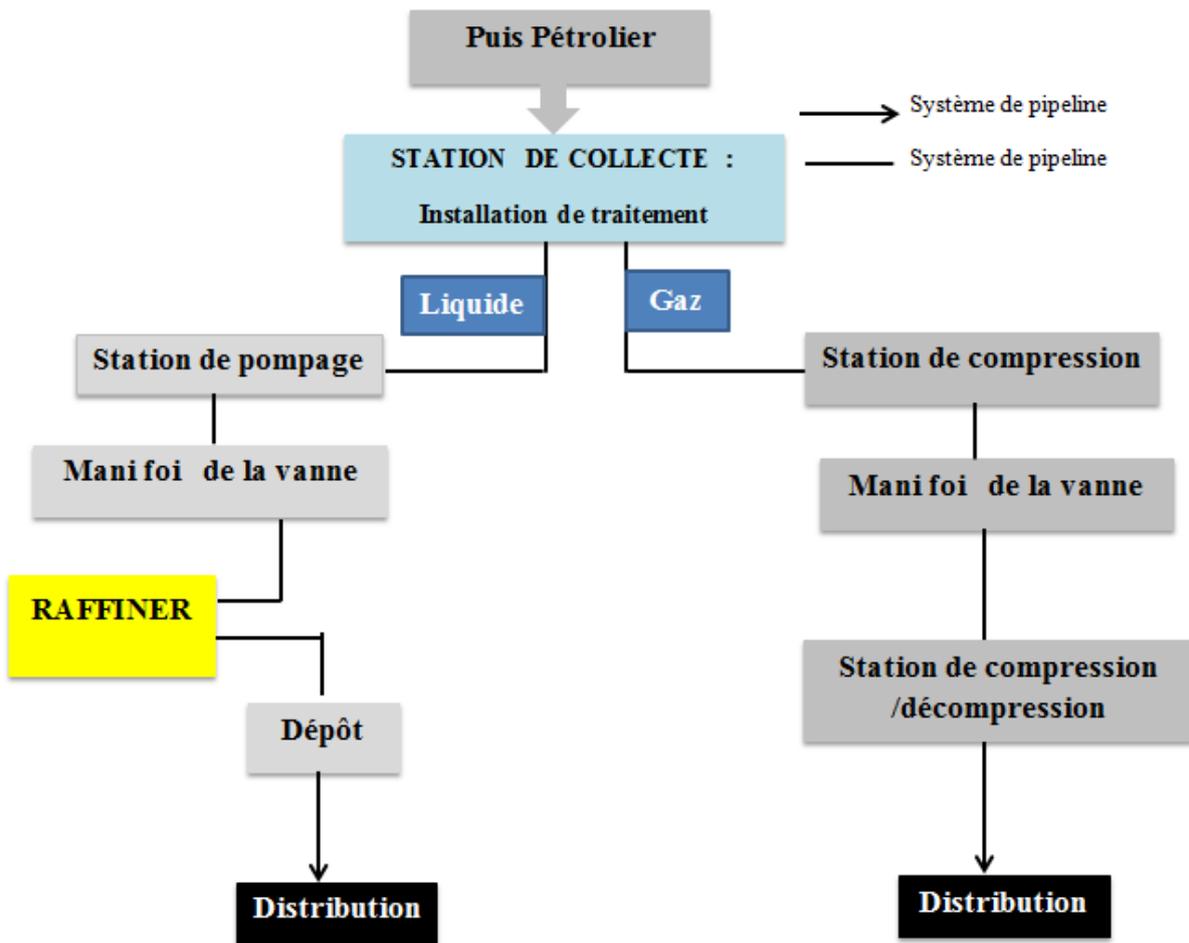


Figure 3- 2: Système de transport d'hydrocarbures par canalisation.

- ❖ Postes de sectionnement : Ils permettent d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces postes sont parfois équipés de coupure pour introduire et recevoir des outils intelligents, destinés à contrôler les différents paramètres d'intégrité de la canalisation comme la géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, etc.

La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure (ou de demi-coupure) consécutifs varie d'une dizaine de kilomètres pour de courtes antennes ou points spéciaux, à quelques centaines de kilomètres pour de grandes canalisations de transit.

- ❖ Les postes de détente ou postes de régulation : Ils permettent de diminuer la pression du fluide à l'aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploitées à des pressions différentes.

- ❖ Les stations d'arrivée : Ils marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Cela peut être un réservoir de stockage dans une raffinerie pour les opérations de raffinage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution.

2.4 Description du STC GR5

Le gazoduc GR5 transportant le gaz depuis Reggane vers la station de compression GR5 sur une distance de plus de 700 kilomètres. Éalisé entièrement par des entreprises nationales, ce gazoduc, s'étendant sur une distance de 765 km de Reggane à HassiR'Mel en passant par Krechba, augmentera la capacité de production de la station de compression GR5 à environ 60 milliards de m³/an, en acheminant du gaz depuis les champs du sud-ouest du pays vers la station GR5, à savoir de Reggane Nord ainsi que ceux Timimoune et Touat qui entreront en production dans les prochains jours.

La réalisation du gazoduc GR5 avait été confiée à des entreprises nationales en gré à gré, à savoir COSIDER canalisation, l'Entreprise nationale de canalisations (ENAC), la Société nationale de génie civil et bâtiment (GCB) et l'Entreprise nationale des grands travaux pétroliers (ENGTP). La figure suivante illustre la situation Géographique du gazoduc GR5 :

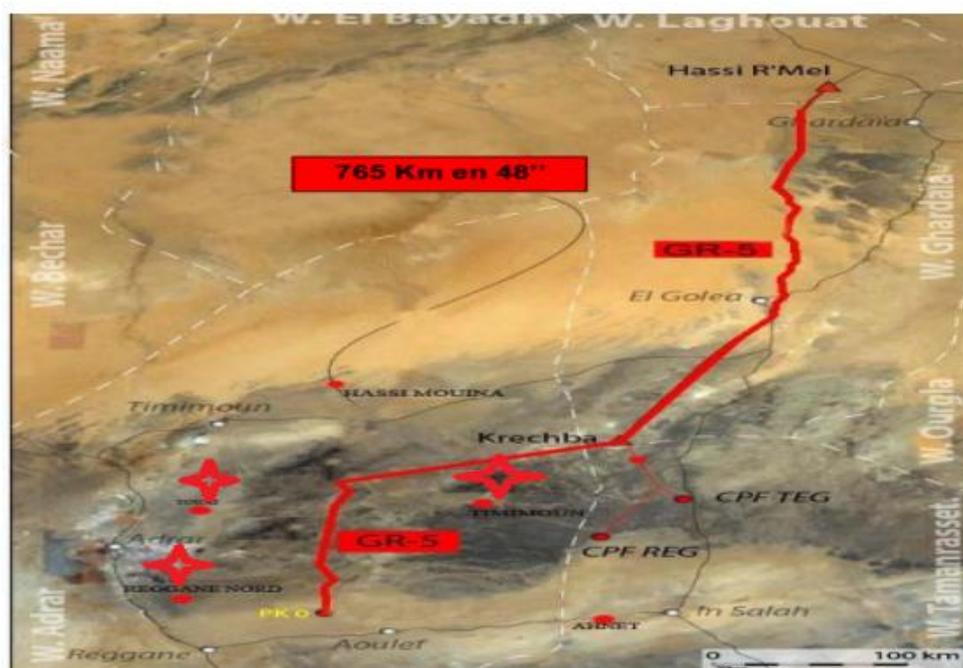


Figure 3- 3: Situation Géographique du gazoduc GR5.

2.4.1 Consistance Globale du STC GR5

Le Projet GR5 / lot N°1 aura pour consistance :

- ❖ Réalisation d'une canalisation d'une longueur de 309 Km et d'un diamètre de 48'' de REGGANE à KRECHBA.
- ❖ Réalisation d'un Terminal départ TD à REGGANE au PK 00.
- ❖ Réalisation d'un Terminal arrivée TA à KRECHBA au PK 309.
- ❖ Réalisation de Deux postes de coupure aux PK 75 et PK 175.
- ❖ Réalisation de Douze (12) postes de sectionnement aux PK 20, 38+500, 58, 95, 115, 135, 156, 198, 220, 242+500, 264+500 et 287.
- ❖ Réalisation de Trois (03) points d'injection au PK 00 et qui sont MSARI AKABLI, REGGANE Nord et AHNET.
- ❖ Réalisation de Deux (02) points d'injection au PS N°04, PK N° et qui sont REGGANE DJEBEL HIRANE.
- ❖ Réalisation d'un (01) point d'injection au PS N°08, PK 198 à TIMIMOUN.

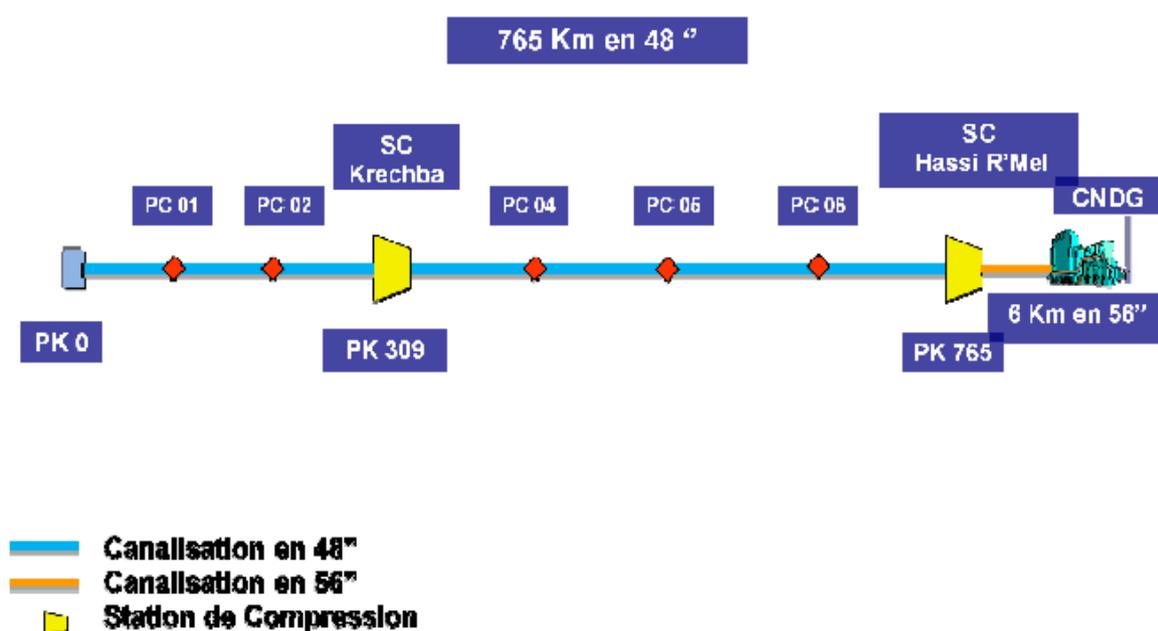


Figure 3- 4:Synoptique du projet GR5.

3. Processus d'assemblage des pipelines

L'étude s'est portée sur des pipes d'une longueur de 12 000 mm, d'un diamètre de 1 219.5 mm et une épaisseur de 13 mm. Le matériau est un acier de type API 5L X70, utilisé par la société nationale SONATRACH pour le transport des hydrocarbures par canalisations. Afin d'assembler les pipes les uns aux autres pour la réalisation d'une ligne continue, on utilise deux procédés de soudage à l'arc électrique : le procédé automatique SAW et le manuel SMAW, au vue leurs avantages vis-à-vis la productivité et la maniabilité. L'Operations

d'assemblage des tubes passe principalement par deux phases : la première consiste à assembler les tubes par deux à l'aide du procédé SAW (*Figure 3-5*). Elle est réalisée au niveau de l'atelier, afin d'éviter les déplacements du lourd matériel de soudage automatique. La seconde phase a pour but d'assembler grâce au procédé à l'arc électrique manuel SMAW l'ensemble des tronçons déjà assemblés préalablement par le procédé SAW. Contrairement à la première phase, la seconde est réalisée sur chantier, en utilisant du matériel de soudage manuel SMAW plus maniable.

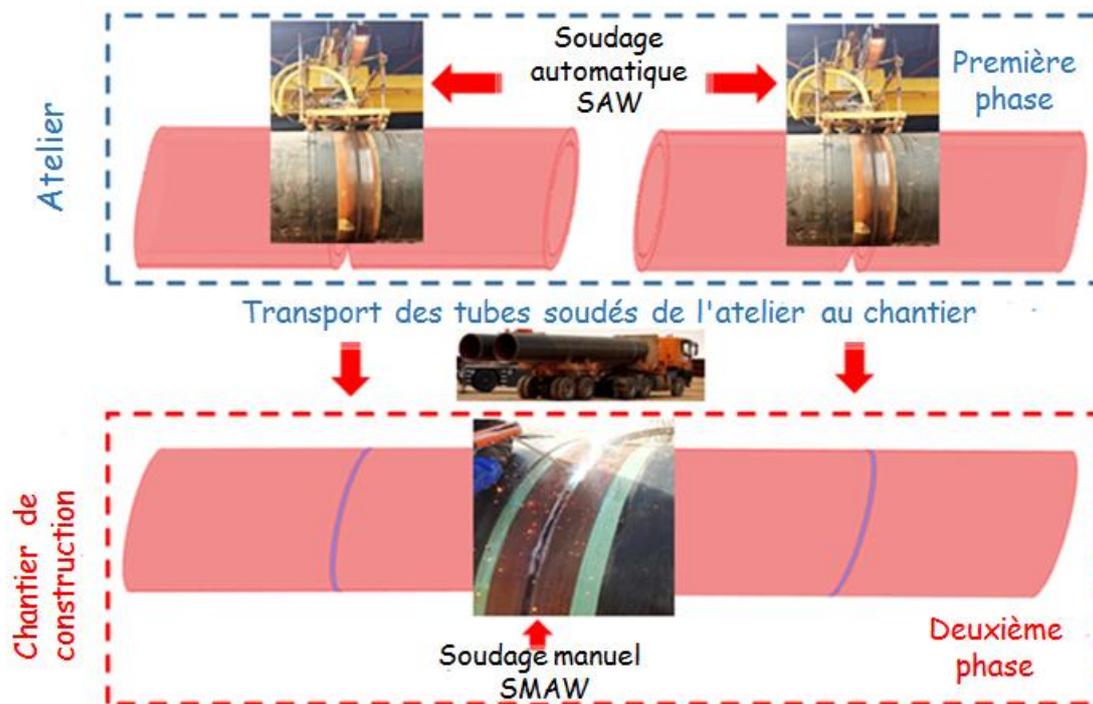


Figure 3- 5:Présentation des différentes phases d'assemblages des pipelines.

Avant chaque assemblage, plusieurs étapes de préparation sont nécessaires afin de garantir des joints de soudures de très bonne qualité.

❖ Préparation de la surface

La première étape est la préparation de la surface qui est une opération essentielle pour l'élimination d'éventuels défauts, cette opération comporte trois parties : le chanfreinage, le meulage et le brossage (*Figure 3-6*). Une préparation correcte des bords à souder ne permettra jamais d'éliminer à 100% les causes d'apparition des défauts, mais permettra dans 100% des cas d'augmenter la qualité finale de l'assemblage soudé.



Figure 3- 6:l'opération de chanfreinage pour le soudage automatique et manuel.

❖ Clampsage

Afin d'obtenir un écart identique entre les deux bords des deux tubes chanfreinés, on réalise l'étape de Clampsage. La bonne exécution de cette étape permet d'éviter les défauts liés à la première passe, comme l'excès de pénétration.



Figure 3- 7:l'opération de Clampsage pour le soudage automatique et manuel.

❖ Préchauffage

La dernière étape avant le soudage des tubes est le préchauffage aux abords de la zone à soudée. La faite de chauffer l'acier avant de commencer à le souder, par un bruleur au propane, permet de ralentir le refroidissement de la zone à souder. Le préchauffage réduira ainsi, les contraintes et donc le développement et la propagation de fissures dans la zone fondue (ZF) et surtout dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Le besoin en préchauffage est proportionnel à l'épaisseur à souder, contraintes liées à la teneur en carbone et la teneur

d'hydrogène diffusible du métal soudé. Le préchauffage est réalisé à l'aide de lances à gaz (*Figure 3-8*) ou des résistances chauffantes électriques, jusqu'à obtention d'une température de 100°C.



Figure 3- 8:L'opération de préchauffage pour le soudage automatique et manuel.

4. Description du procédé mis en œuvre

L'objectif de cette opération de soudage est de remplir la première passe du chanfrein en v- (*Figure 3-9*), cette phase est appelée la phase du talon (*Figure3-11*), car cette phase est la plus importante qui nous permet d'avoir une première liaison entre les deux tubes.

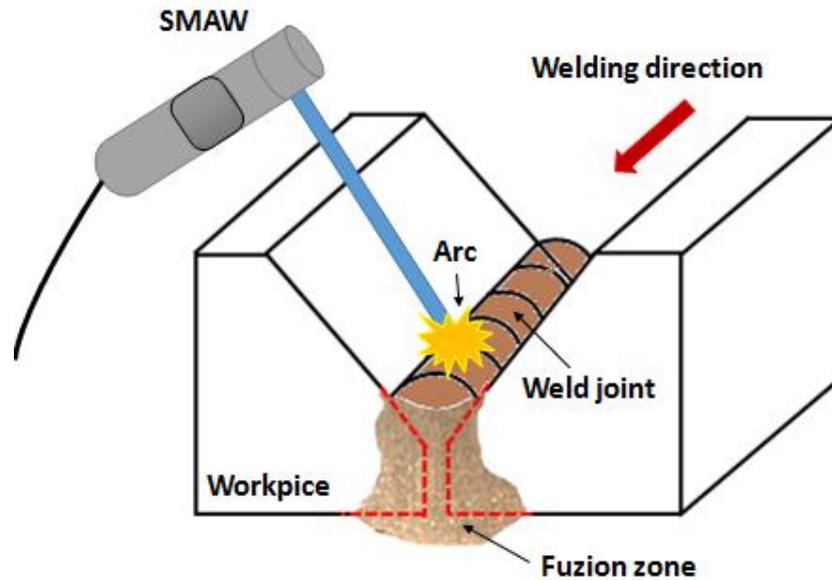


Figure 3- 9: Principe du procédé de soudage SMAW en configuration chanfrein -V-.

4.1 Le poste de soudage SMAW

Un Bigblue 400x modèle de Miller a été utilisé pour tous les essais de soudage SMAW. Il délivre un courant pouvant aller jusqu'à 400 A en cours de soudage pour les différentes configurations de contrôle de courant et de tension de l'arc (continu ou alternatif).

Le poste de soudage produit un puissant courant électrique qui circule entre l'extrémité de l'électrode et le métal de base à souder. Le courant électrique produit un arc d'une chaleur si intense (environ de 3900 degrés à 5500 degrés Celsius) que l'extrémité de la baguette de métal d'apport ainsi que la surface du métal de base sont portées à la fusion. La force de l'arc dirige le métal d'apport fondu vers le bain de fusion de façon à former le cordon de soudure.



Figure 3- 10:Le poste de soudage SMAW.

4.2 Paramètres de soudage

Les paramètres opératoires du soudage ont été définis au niveau de l'entreprise COSIDER. Ce choix de paramètres est lié, d'une part, à la géométrie du chanfrein (il faut éviter les problèmes de manque de liaison collages et obtenir un bon cordon de soudure), et d'autre part, aux moyens matériels dont l'entreprise dispose (la tension et intensité de poste de soudure). Les paramètres de soudage utilisés dans ce cas sont regroupés dans le *Tableau 3-1*.

Table 3- 1:Paramètres opératoires du soudage SMAW.

Paramètres	Valeurs
Vitesse de soudage [mm/s]	10
Intensité [A]	115
Tension [V]	29.5
Diamètre de l'électrode [mm]	3.25
Polarité	CC-E

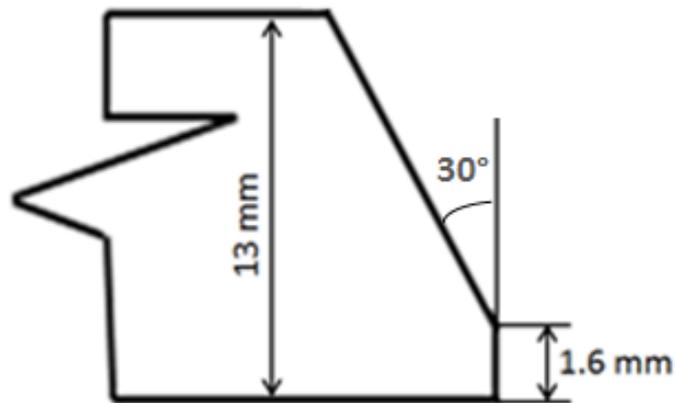


Figure 3- 11:Dimensions du chanfrein.

4.3 Matériaux

4.3.1 L'acier API 5L X70

Le matériau utilisé pour l'étude est un acier contient une faible teneur de carbone. Sa dénomination suivant la normalisation américaine est l'acier API 5L X70. La composition chimique de l'acier X70 est présentée dans le *Table 3-2*. Selon la norme l'API5L et les normes internationales comparables, les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

- Limite d'élasticité $e Re$: 485-605 MPa.
- Résistance à la traction Rm : 570-605MPa.
- Pourcentage d'allongement après rupture A : $\geq 18\%$.

4.3.2 E6010 Electrode

Nous avons utilisé dans cette étude une électrode E6010, Pour le soudage de pipeline, le soudage hors position et les applications sur le terrain, cela signifie utiliser des électrodes SMAW (bâton) E6010 et des sources d'alimentation de soudage spécialement conçues pour faire fonctionner cette électrode. Les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

- La limite élastique : $Re=420MPa$.
- La résistance maximale à la traction : $Rm=500MPa$.
- L'allongement: $A\%= 27\%$.

Table 3- 2: Compositions chimiques du métal de base et de l'électrode (% en poids).

Matériaux	Compositions chimiques (en poids %)										
	C	Ni	Ti	S	P	Cu	Mn	Si	V	Cr	Fe
Métal de base	0.07	0.05	0.04	0.003	0.013	0.03	1.58	0.29	0.06	0.05	Bal
Electrode	0.13	0.07	0.013	0.010	0.006	0.04	0.43	0.20	0.007	0.05	Bal

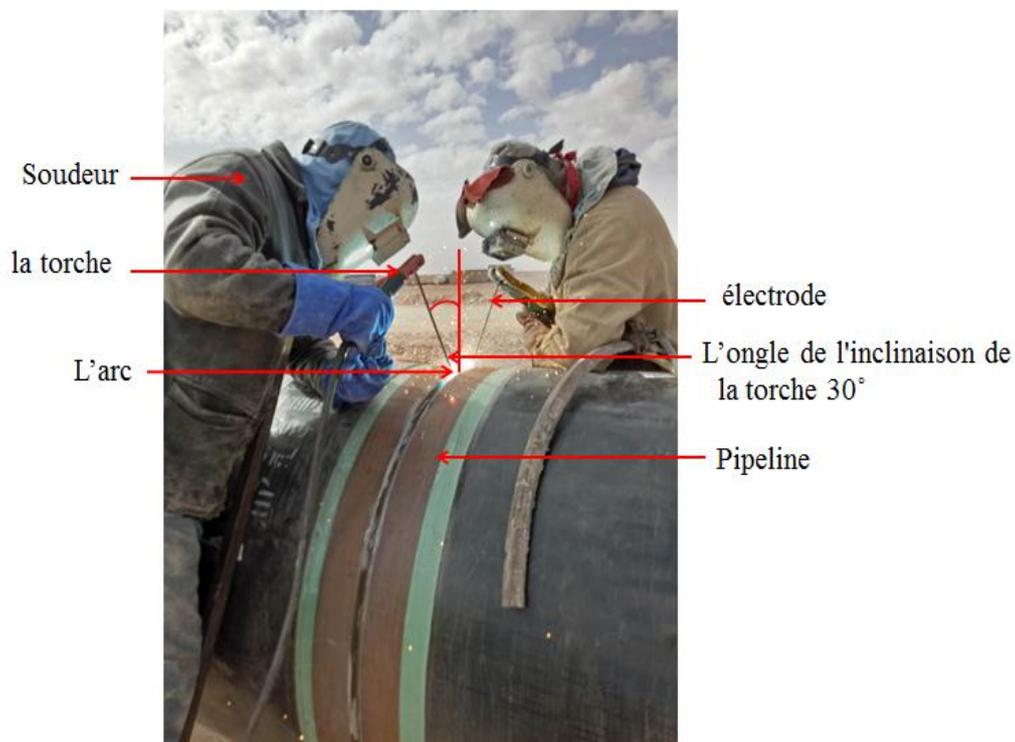


Figure 3- 12: Description générale de l'opération de soudage SMAW.

4.4 Prélèvement de l'échantillon

Pour cette étude la coupe est réalisée, généralement en deux étapes dans le sens traversé la soudure.

❖ Première étape : On prélève un échantillon de (213.11cm) de longueur comme il est illustré ci-dessous. Nous le divisons par deux pour faciliter le travail (Figure3-13)



Figure 3- 13:Les deux morceaux prélevés à partir pipelines soudé manuellement.

- ❖ Deuxième étapes : On découpe deux échantillon de (10 cm) de longueur à l'aide d'une scie électrique à 17 échantillons (16 essais et point centrale) (Figure3-14).



Figure 3- 14:Les échantillons de l'étude.

4.5 Examen Métallographique

L'attaque chimique d'un échantillon pour relever la structure macrographique fait apparaître entre les zones constitutives de la soudure qui se manifestent par des intensités d'attaque ou de coloration différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution et de structure engendrées par l'opération de soudage.

De plus l'examen macrographique fournit des informations sur les anomalies (défauts) géométriques, compte tenu des renseignements qu'il fournit l'examen macrographique des soudures.

4.5.1 Découpage des échantillons

De chaque éprouvette soudée nous avons prélevé à l'aide d'une coupe transversale au cordon de soudure (à froid) un échantillon.

4.5.2 Polissage

Après le découpage, nous passons les échantillons sur une surfaceuse à disque abrasif. C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Dans un premier temps, nous faisons un pré-polissage qu'il s'effectue en plusieurs étapes avec des disques à grains abrasif de plus en plus fins (180, 400, 1200) qui tourne avec une vitesse de 150 tr/mn.

4.5.3 Attaque chimique

Pour révéler la microstructure, l'échantillon est attaqué par un réactif d'attaque très utilisé pour les aciers qui est le Nital de 4%. C'est une solution composée de 96% d'éthanol C_2H_5OH et 4% d'acide nitrique HNO_3 . La méthode la plus courante consiste à immerger l'échantillon dans cette solution chimique. La durée d'attaque varie entre de 15 et 20 secondes à température ambiante, et ceci selon l'état de l'échantillon.

4.5.4 Observations macrographiques

Grâce à un appareil photographique standard, nous avons pris la macrographie représentée ci-dessous (*Figure 3-15*) afin d'analyser la structure dans les différentes zones (zone fondue, zone affecté thermiquement, matériaux de base).

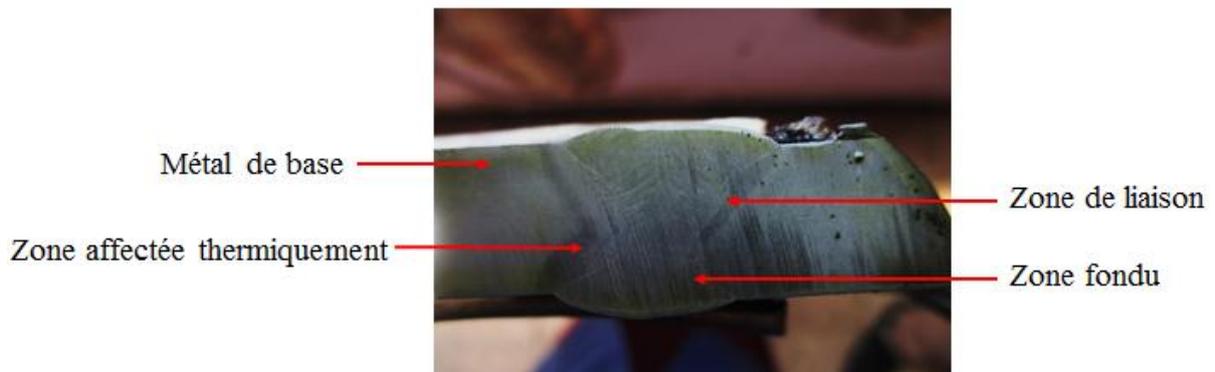


Figure 3- 15: Macrographie de joints soudés à trois passes au soudage SMAW.

5. Approche plans d'expériences

Un problème fréquemment rencontré dans l'étude d'un objet, phénomène ou processus est d'établir, basé sur les résultats expérimentaux, la dépendance fonctionnelle (ou "par des équations de régression) entre une fonction "objectif" et les facteurs d'influence. La particularité de ce problème réside du fait que les erreurs aléatoires de mesure impliquent la recherche de la dépendance fonctionnelle afin d'éliminer, dans une mesure le plus élevée possible, le « bruit » expérimental (généralisé par ces erreurs aléatoires) et pas dans la direction de décrire exactement les résultats expérimentaux. Cette affirmation, résultat du principe des moindres carrés, suppose que la courbe correspondante à l'équation qui estime la fonction objectif (nommée "équation de régression") doit passer, le plus proche possible de l'ensemble des points dont les coordonnées sont [(valeurs des facteurs d'influence), (valeurs de la fonction objectif)].

On doit mentionner que la méthode des moindres carrés est appliquée couramment dans l'interprétation des résultats des mesures par analyse régressionnelle. La méthode donne la possibilité d'établir les coefficients de régression pour une forme imposée de la relation fonctionnelle entre les variables indépendantes et la variable dépendante. La détermination des valeurs des coefficients se fait à partir de la condition de minimisation, pour l'ensemble des points expérimentaux, des écarts entre les valeurs mesurées et celles estimées de la fonction objectif.

L'étude d'un phénomène ou d'un processus suppose l'analyse de l'évolution d'une grandeur en fonction de la variation de différents paramètres. Sous une forme mathématique, on peut écrire que la grandeur d'intérêt appelé « **fonction objectif** », est une fonction de plusieurs variables appelées « **facteurs d'influence**. Le choix des fonctions objectifs a été fait en tenant compte du fait que le procédé de soudage des pipes est principalement caractérisé par sa productivité et par la qualité des cordons de soudures obtenus. Les fonctions objectives choisies pour cette étude sont : la hauteur du dépôt de matière H [mm], largeur du cordon face envers $L1$ [mm] et la largeur au milieu du cordon (pénétration latérale) $L2$ [mm]. Nous avons

réalisé une étude complète de ces trois fonctions objectives. Cette étude nous permet aussi d'analyser tous les effets des interactions entre les paramètres opératoires de soudage. L'objectif de ce plan d'expériences est de mettre en évidence l'influence de 4 facteurs que sont : la vitesse de soudage - $V_s [mm.s^{-1}]$, la tension - $T [V]$, l'intensité - $I [A]$ et le diamètre de l'électrode - $D [mm]$ sur les trois fonctions $H [mm]$, $L1 [mm]$, $L2 [mm]$ afin de fournir des modèles empiriques polynomiaux.

L'étude expérimentale a été menée à l'aide d'un plan d'expériences complet PEC 2^4 (plan factoriel complet à 4 facteurs et 2 niveaux). Le modèle expérimental associé à ce plan est dénommé modèle linéaire ou de premier degré explicité par un polynôme de la forme :

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^4 b_j x_j + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^4 b_{ij} x_i x_j \quad (3-1)$$

Avec y : fonction objectif correspondante, x_j, x_i : valeurs codifiées des facteurs d'influence (± 1), b_0, b_j : coefficients de régression (termes linéaires) et b_{ij} : coefficients de régression (termes d'interaction).

5.1 Facteurs d'influences (FI)

Parmi de nombreux facteurs qui ont une influence directe ou indirecte sur la forme de la zone fondue, nous avons choisi de retenir les paramètres opératoires suivants : la Vitesse de soudage $V_s [mm/s]$, la Tension du courant $T [V]$, l'Intensité du courant $I [A]$, le Diamètre de l'électrode $D [mm]$. Ce choix a été fait en se basant sur des expériences antérieures réalisées au niveau de l'entreprise nationale COSIDER chargée de la réalisation des pipelines pour le compte de l'entreprise nationale SONATRACH. Nous avons attribué 2 niveaux à chacun des 4 paramètres (Table 3-3). Le choix de ces niveaux a été défini grâce à l'expertise acquise par l'entreprise COSIDER dans le domaine de soudage de pipes.

Table 3- 3: Facteurs d'influences et les domaines de variation.

Facteurs d'influences (IF)	Domaine de variation
Vitesse de soudage $V_s [mm/s]$	[5 ; 15]
La tension $T [V]$	[26 ; 32]
L'intensité $I [A]$	[80 ; 120]
Diamètre de l'électrode $D [mm]$	[3.2 ; 4]

5.2 Fonctions objectifs (FO)

Le choix des fonctions objectifs (FO) a été établi en tenant compte du fait que le soudage des pipes a été réalisé grâce au procédé SMAW dans la configuration chanfrein étroit, est principalement caractérisé par sa productivité en termes de dépôt de matière et par les exigences d'un point de vue industriel (qualité des cordons, résistance des assemblages, etc.). Dans ce cas, afin d'étudier l'influence des paramètres du procédé SMAW sur la productivité et sur la qualité des cordons, nous avons choisi les fonctions objectifs suivantes : la hauteur du dépôt de matière H [mm] correspondant à la productivité, la largeur du cordon face envers $L1$ [mm] et la largeur du cordon au milieu $L2$ [mm] qui caractérisent la pénétration latérale, qui est une grandeur très importante d'un point de vue industriel. La Figure 3-16 présente les trois fonctions objectives étudiées ainsi que le chanfrein d'origine.

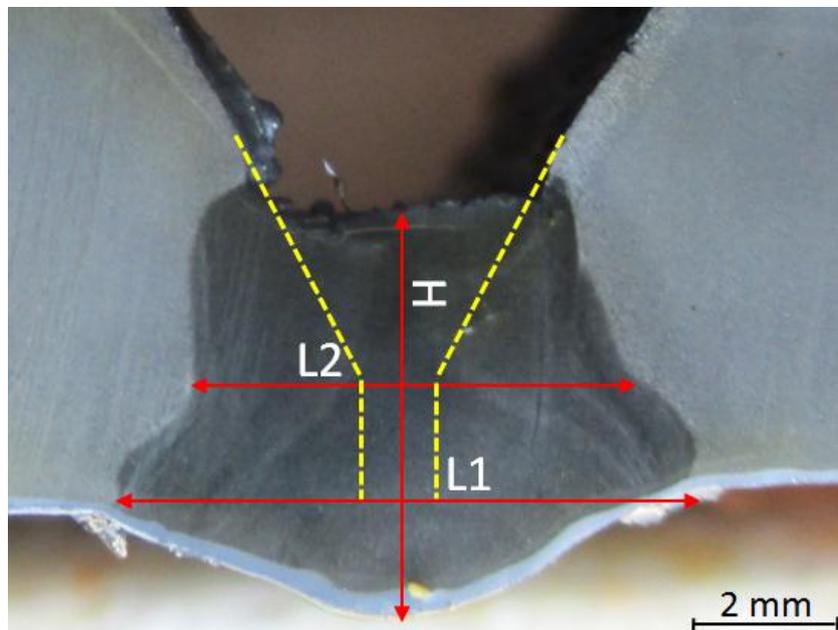


Figure 3- 16: Présentation des fonctions objectifs (H , $L1$, $L2$).

5.3 Matrice expérimentale

La matrice expérimentale pour les conditions expérimentales retenues (04 facteurs d'influence avec 2 niveaux et 03 fonctions objectifs) comporte 16 essais (2^4 essais). Les niveaux codifiées et physiques des facteurs d'influence tant que les valeurs mesurées des fonctions objectifs (H [mm], $L1$ [mm] et $L2$ [mm]) sont présentés dans le Table 3- 4. Les essais expérimentaux ont été réalisés par un soudeur hautement qualifié (homologué) et dans un ordre aléatoire.

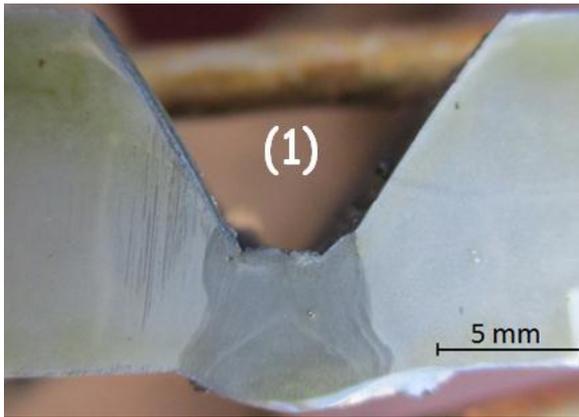
Table 3- 4: Matrice expérimentale et valeurs mesurées des fonctions objectif.

Test N°	Facteur d'influence (IF)								Fonctions objectif (FO)		
	Valeurs codifiées				Valeurs physiques				H [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]
	T	I	V	D	T [V]	I [A]	V _s [mm/s]	D [mm]			
1	-1	-1	-1	-1	26	80	5	3.2	5.61	7.96	6.37
2	+1	-1	-1	-1	32	80	5	3.2	5.62	8.34	6.29
3	-1	+1	-1	-1	26	120	5	3.2	5.49	8.14	6.59
4	+1	+1	-1	-1	32	120	5	3.2	5.87	10.15	7.47
5	-1	-1	+1	-1	26	80	15	3.2	3.84	7.50	5.67
6	+1	-1	+1	-1	32	80	15	3.2	4.18	7.61	5.57
7	-1	+1	+1	-1	26	120	15	3.2	1.83	5.93	5.12
8	+1	+1	+1	-1	32	120	15	3.2	4.35	10.25	6.46
9	-1	-1	-1	+1	26	80	5	4	5.24	5.03	4.19
10	+1	-1	-1	+1	32	80	5	4	5.69	5.82	5.43
11	-1	+1	-1	+1	26	120	5	4	4.50	5.99	5.59
12	+1	+1	-1	+1	32	120	5	4	4.99	4.63	4.61
13	-1	-1	+1	+1	26	80	15	4	4.58	3.35	2.95
14	+1	-1	+1	+1	32	80	15	4	4.61	5.98	4.39
15	-1	+1	+1	+1	26	120	15	4	6.00	6.85	5.60
16	+1	+1	+1	+1	32	120	15	4	4.97	8.10	6.28

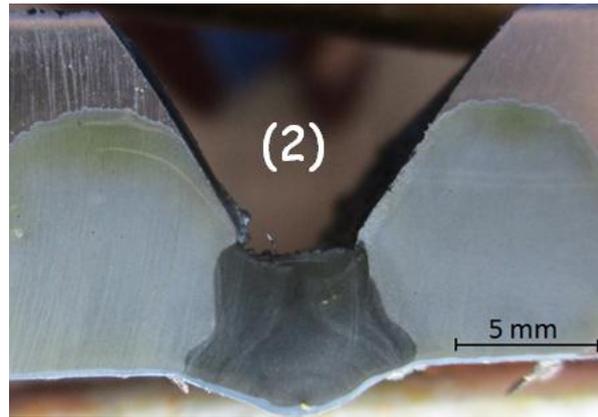
6. Résultats et discussion

6.1 Analyse des macrographies

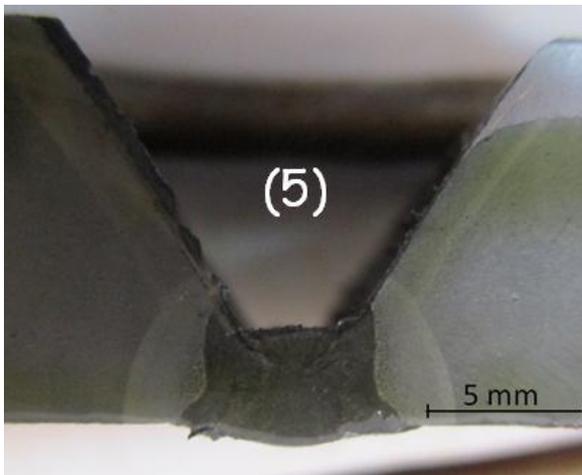
Les macrographies sont les premières informations permettant de nous renseigner sur la forme et la taille de la zone fondue. Elles permettent, d'une part, de valider les modèles numériques, et, d'autre part, d'étudier la qualité du cordon de soudure (soufflures, fissures, collages, etc.). Avec les paramètres opératoires choisis la pénétration est totale (soudage « débouchant »). La *Figure 3-17* présente une grande diversité de résultats concernant la morphologie du cordon de soudure. Sur l'ensemble des essais réalisés et compte tenu des domaines de variation des paramètres opératoires de soudage, l'ensemble des cordons de soudure présente une bonne qualité (pas de collage et pénétration suffisante). En revanche, dans notre cas la morphologie de la zone fondue obtenus est différente par rapport à la morphologie de la zone fondue issue de d'autres procédés de soudage [94], [53], [65], [73], [71], [95]. Habituellement on trouve une forme plus élargie en face supérieure avec une forme de tête de clou [96], ceci est probablement lié aux mouvements hydrodynamiques du bain de fusion. Par contre dans notre cas cette forme est inversée, probablement est liée à des phénomènes multiphasiques ainsi qu'à l'étalement de l'énergie due à l'arc électrique sur une faible épaisseur du talon.



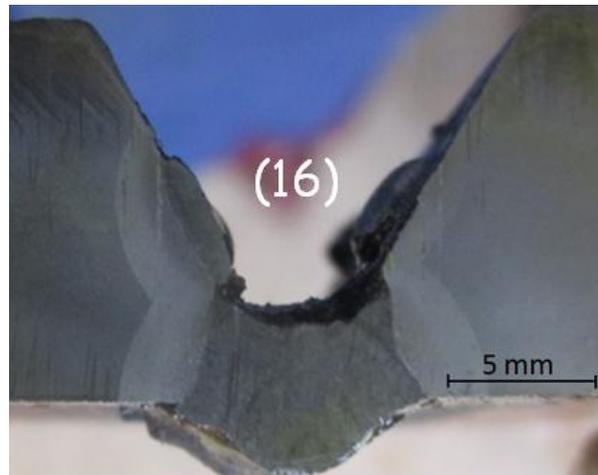
T= 26V; I= 80A; V= 1,2 mm/s;D=3,2mm;
H= 5,62mm ; L1= 8,34mm ; L2=6,19mm



T= 32V; I= 80A; V= 1,2 mm/s; D=3,2 mm;
H= 5,49mm ; L1= 8,14mm ; L2=6,59mm



T= 26V; I= 80A; V= 2mm/s ; D=3,2mm ;
H= 4,18mm; L1= 7,61mm ; L2=5,57mm



T= 32 V; I= 90 A; V= 2mm/s ; D=4mm ;
H= 5,61 mm; L1= 7,86mm; L2=6,42mm

Figure 3- 17:Diversité des résultats et des morphologies obtenues.

6.2 Analyse de l'influence des facteurs sur les fonctions objectives

Les résultats des effets sont présentés sous forme des histogrammes de PARETO. *Les Figures (3-18,3-19,3-20)* représentent les effets provoqués par les Facteurs d'Influence et leurs interactions sur les Fonctions Objectifs étudiées. On observe sur *la Figure 3-18*, que le facteur *H* (hauteur du dépôt) est principalement influencé par la vitesse de soudage (*V_s*) et une interaction entre la vitesse et le diamètre de l'électrode (*D*), suivi par le diamètre de l'électrode. Si la vitesse varie de 5 à 15 mm.s⁻¹, la hauteur de dépôt de matière *H* diminue en moyenne de 1.081 mm, en revanche, si le diamètre *D* varie de 3.2 à 4 mm le dépôt *H* augmente en moyenne de 0.473 mm. Pratiquement tous les travaux qui abordent l'étude des

effets des paramètres opératoires de soudage sur la forme du cordon de soudure, montrent que la vitesse d'avance est le paramètre le plus d'influant parmi les autres paramètres[65],[74].

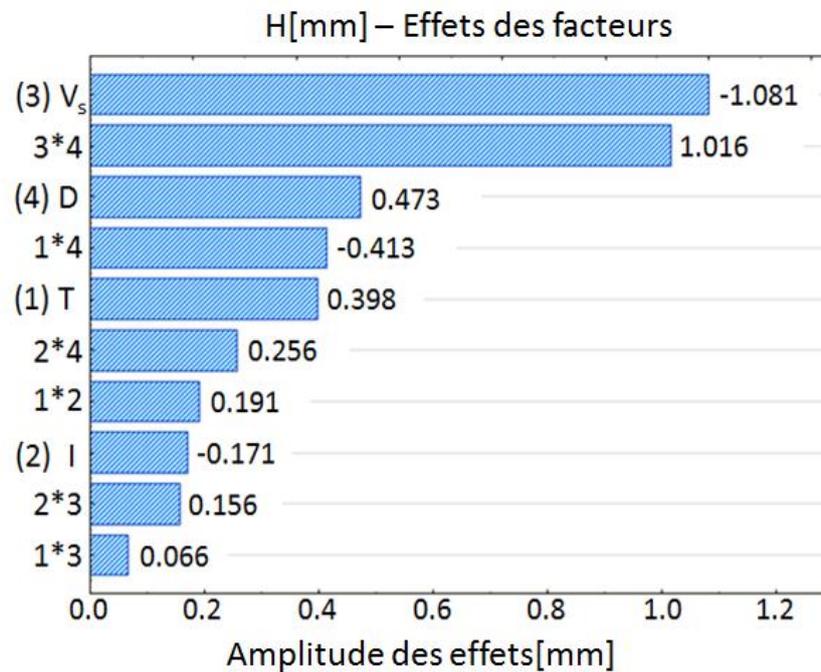


Figure 3- 18:Influence des facteurs sur la hauteur du dépôt H[mm].

Dans le cas de $L1$ (la largeur du cordon face envers), on observe que l'augmentation du diamètre du fil D génère une diminution de la largeur de la zone fondue face envers. En regardant les hiérarchisations des facteurs d'influence (Figure 3-19), on observe que le facteur le plus influent est le diamètre de l'électrode D [mm], suivi par les paramètres de l'énergie, la tension T et l'intensité I . Des interactions complexes entre V_s et les autres facteurs d'influence (principalement la tension, le diamètre de l'électrode et l'intensité) ont aussi des influences significatives sur la largeur du cordon face envers ($L1$). On remarque que l'effet de la vitesse (V_s) sur $L1$ n'est pas significatif (très faible) en revanche, on observe que les effets indirects dues aux interactions entre la vitesse et T , D et I sont plutôt significatifs.

En ce qui concerne la largeur au milieu du cordon (pénétration latérale) $L2$ [mm], on observe de nouveau que le facteur le plus influent est le diamètre de l'électrode D (Figure 3-20). Suivi cette fois ci par l'intensité I , la vitesse d'avance V_s et la tension T .

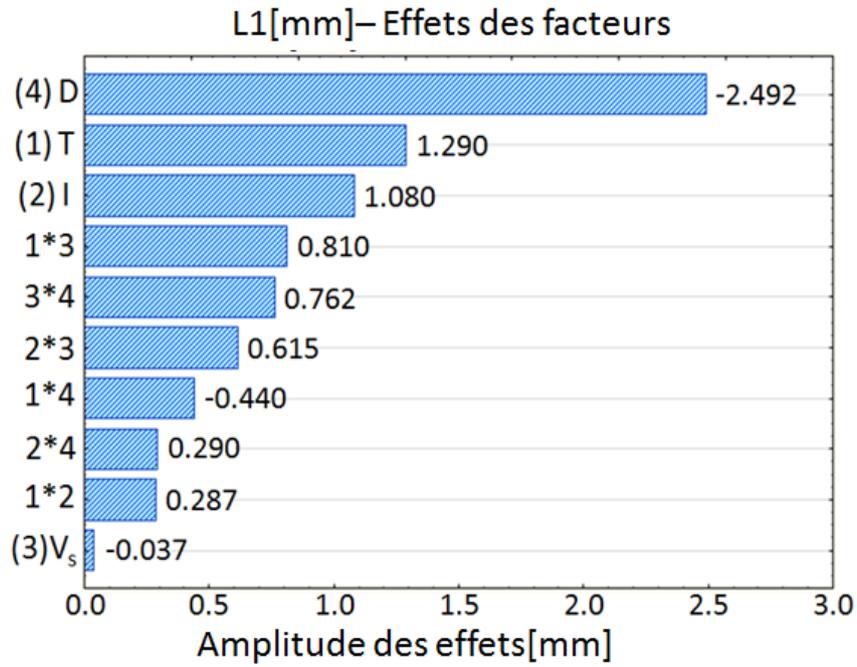


Figure 3- 19: Influence des facteurs sur la largeur du cordon face envers L1 [mm].

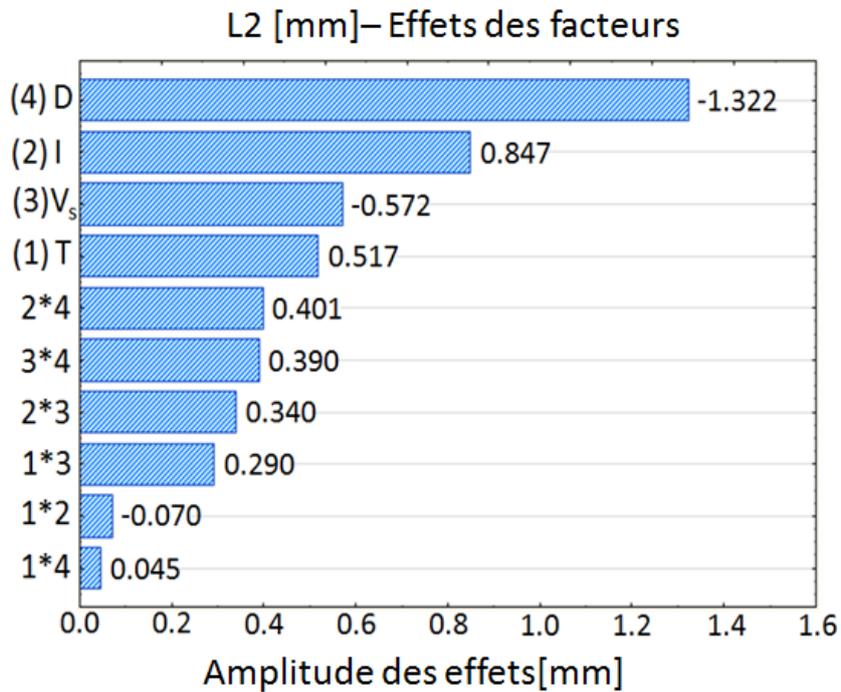


Figure 3- 20: Influence des facteurs sur largeur au milieu de cordon L2 [mm].

6.3 Analyse des surfaces de réponse

La variation de la hauteur de dépôt de matière H en fonction des facteurs d'influence significatifs peut être observée sur la *Figure 3-21* et *Figure 3-22*. On peut mettre en évidence plusieurs interactions significatives entre les facteurs d'influence, sur H des cordons (*Figure 3-21*, *Figure 3-22*) : l'interaction entre la vitesse de soudage V_s et le diamètre de l'électrode D (en fonction du diamètre de l'électrode choisi, l'effet de la vitesse de soudage se modifie, dans le sens que, si pour un diamètre $D=3.2\text{ mm}$ on observe une forte diminution de la hauteur H avec l'augmentation de la vitesse V_s , dans le cas d'un diamètre $D=4\text{ mm}$, la variation de la vitesse n'influe pratiquement pas sur la hauteur du dépôt H) ; l'interaction entre la tension T et le diamètre de l'électrode D (en fonction du diamètre de l'électrode choisi, l'effet de la tension se modifie, dans le sens que, si pour un diamètre $D=3.2\text{ mm}$ on observe une augmentation importante de la hauteur H avec l'augmentation de la tension T , dans le cas d'un diamètre $D=4\text{ mm}$, la variation de la tension T , influe très peu sur la hauteur H).

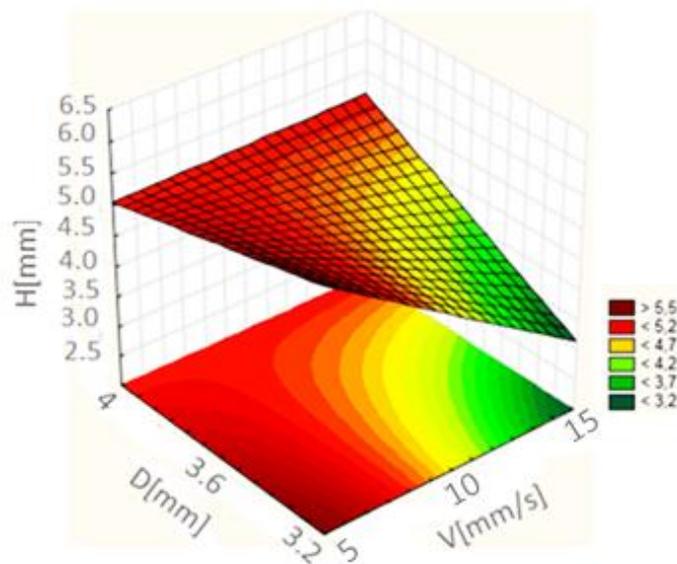


Figure 3- 21:Variation de la hauteur du cordon H avec V_s et D .

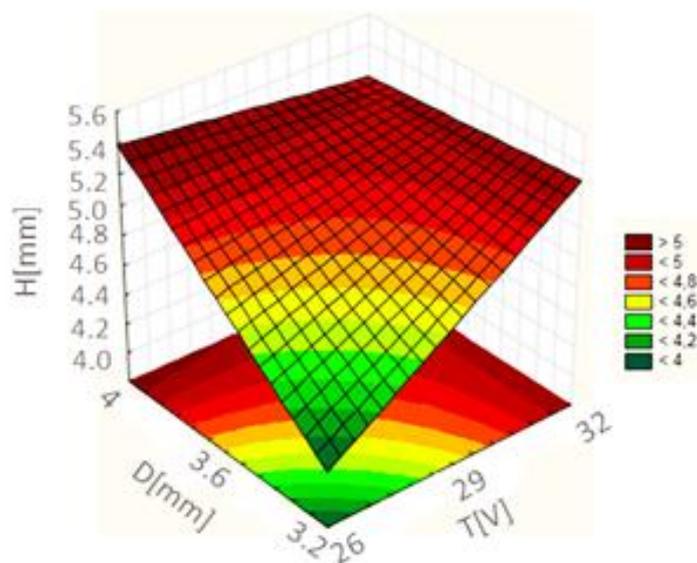


Figure 3- 22:Variation de la hauteur du cordon H avec T et D .

L'analyse des surfaces de réponse pour la grandeur $L1$ montre que, pour un diamètre de l'électrode $D=3.2\text{ mm}$, la vitesse de soudage V_s a peu d'influence sur $L1$, par contre, pour un diamètre de $D=4\text{ mm}$, l'augmentation de la vitesse de soudage implique une augmentation du $L1$, donc on a une interaction entre D et V_s (Figure 3-23). De plus, on observe la présence d'une forte interaction entre V_s et T , dans le sens que les niveaux du T influent l'effet du V_s sur $L1$: pour $T=26\text{ V}$ on observe une diminution de $L1$ avec l'augmentation de V_s , tandis que pour $T=32\text{ V}$ l'effet du V_s sur $L1$ est inverse, $L1$ augmente avec l'augmentation du V_s (Figure3-24).

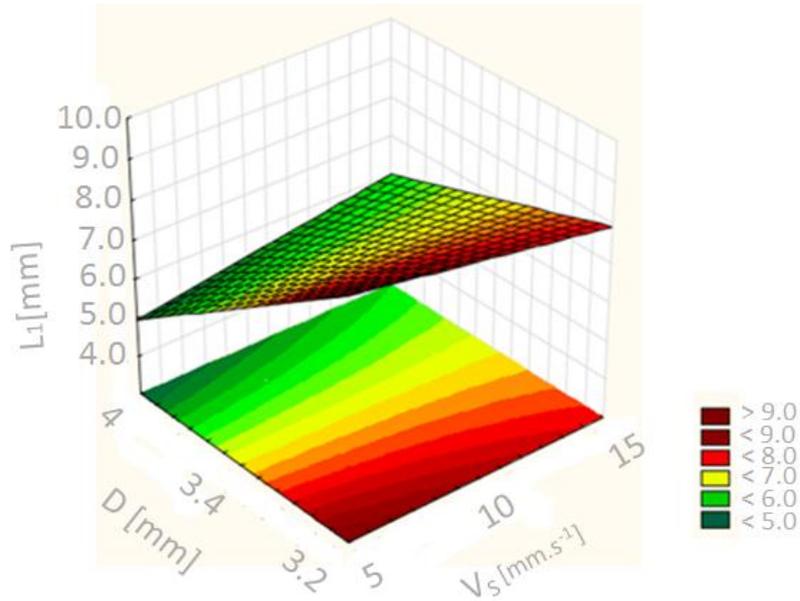


Figure 3- 23:Variation de la largeur du cordon face envers $L1$ avec D et V_s .

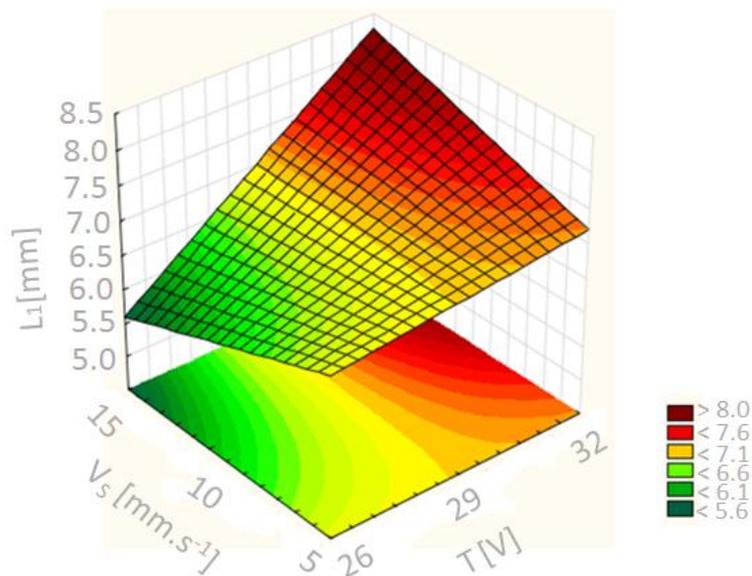


Figure 3- 24:Variation de la largeur du cordon face envers $L1$ avec V_s et T .

Concernant la grandeur L_2 , on peut mettre en évidence une certaine interaction entre le diamètre de l'électrode D et l'intensité du courant I (Figure 3-25) : pour une valeur $I=80\text{ A}$ on constate une forte augmentation du L_2 avec la diminution du diamètre de l'électrode D . Par contre, cette augmentation du L_2 est bien moins importante avec la diminution du D , pour une valeur de $I=120\text{ A}$.

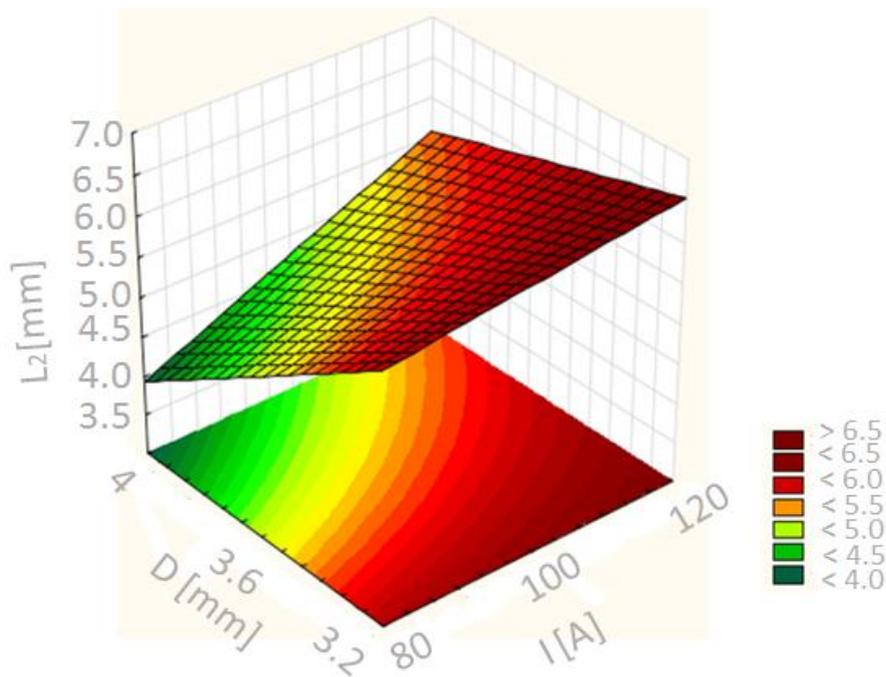


Figure 3- 25: Variation de la largeur au milieu du cordon L_2 avec D et I .

Enfin, une assez faible interaction est présente aussi entre D et V_s (Figure 3-26), en ce que concerne L_2 : pour une vitesse d'avance $V_s=5\text{ mm.s}^{-1}$, L_2 augmente d'une manière importante avec la diminution du D , mais cette augmentation est moins importante pour une vitesse $V_s=15\text{ mm.s}^{-1}$.

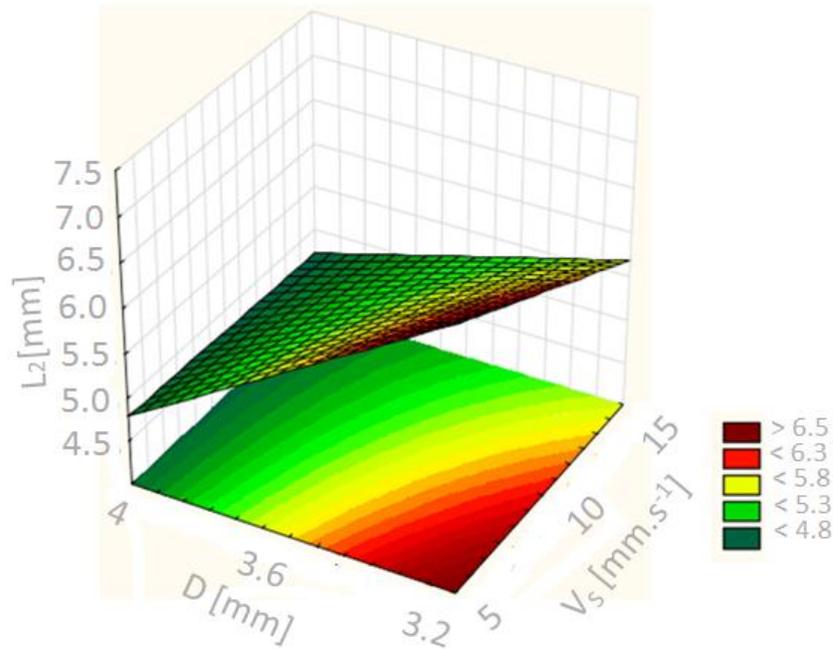


Figure 3- 26:Variation de la largeur au milieu du cordon L2 avec D et Vs.

7. Développement du modèle expérimental

A partir des histogrammes de PARETO (Figure.3-18, Figure 3-19 et Figure 3-20) et des coefficients des facteurs d'influence, nous pouvons écrire la loi de variation des trois fonctions objectifs (hauteur du dépôt H [mm], la largeur du cordon face envers $L1$ [mm], la largeur au milieu de cordon $L2$ [mm] en fonction des paramètres opératoires de soudage et de leurs interactions (T , I , V_s et D).

$$H = 4.81 - 0.540 V_s + 0.508 V_s D - 0.236 D - 0.206 T D + 0.199 T \quad (3-2)$$

$$L1 = 6.976 - 1.246 D + 0.645 T + 0.54 I + 0.405 T V_s + 0.381 V_s D + 0.307 I V_s \quad (3-3)$$

$$L2 = 5.525 - 0.661 D + 0.423 I - 0.286 V_s + 0.258 T + 0.200 I D \quad (3-4)$$

Pour valider le modèle expérimental, nous avons comparé les valeurs des trois fonctions objectifs estimées (H , $L1$, $L2$) par le modèle aux valeurs celle mesurées sur les macrographies. Nous constatons un bon accord entre les mesures et les valeurs estimées avec les équations (3-2, 3-3 et 3-4).

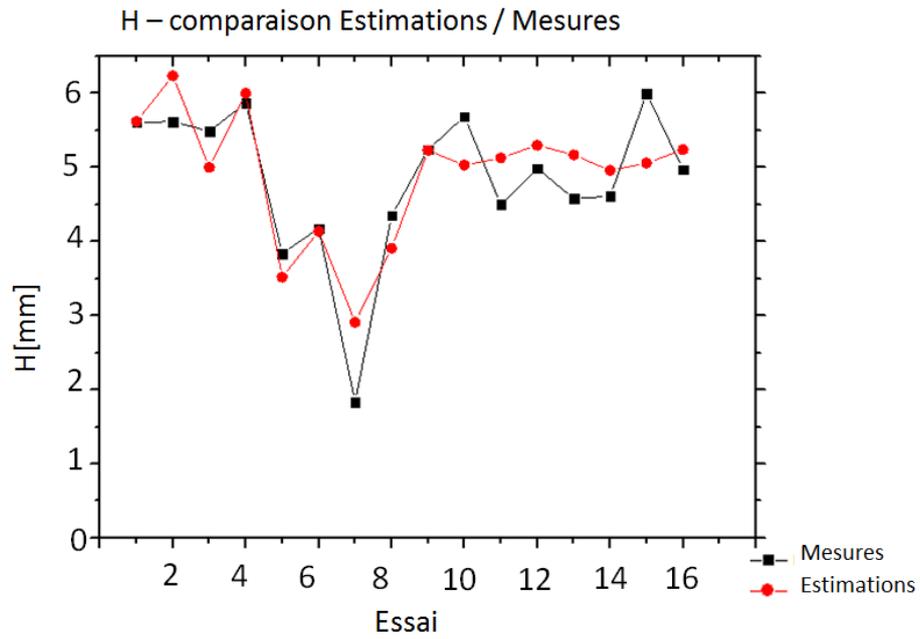


Figure 3- 27: Comparaison entre les mesures et les valeurs estimées de hauteur de dépôt (H).

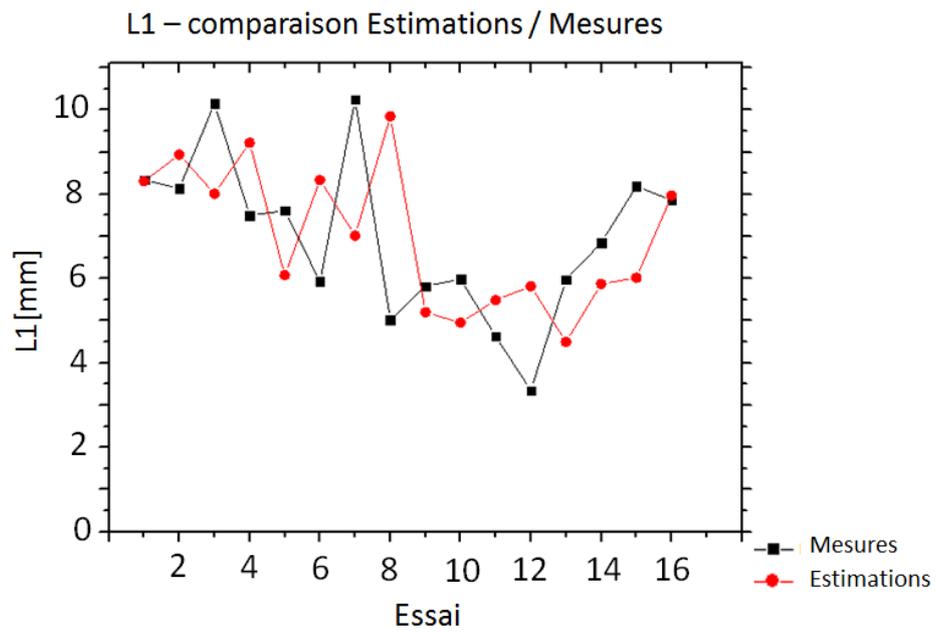


Figure 3- 28: Comparaison entre les mesures et les valeurs estimées de la largeur du cordon de soudure (L1).

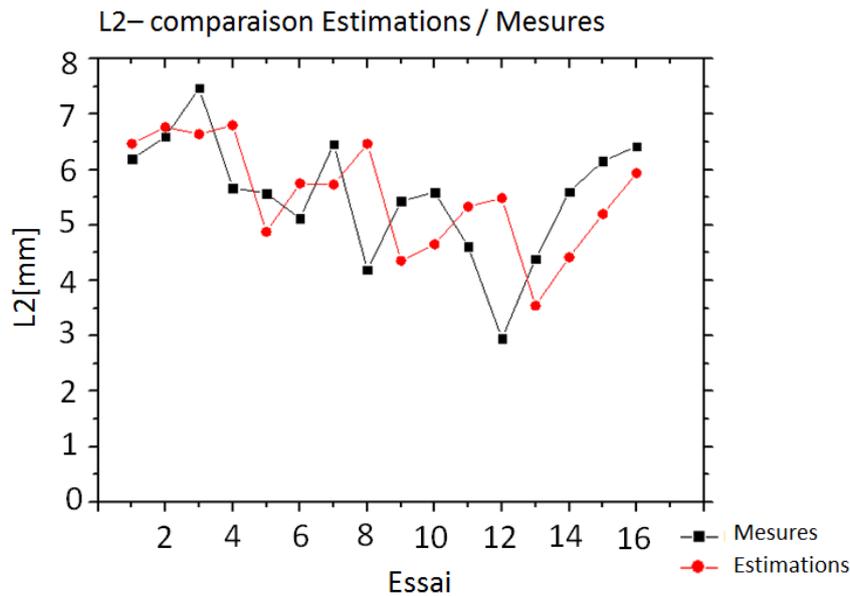


Figure 3- 29: Comparaisons entre les mesures et les valeurs estimées de pénétration latérale (L_2).

8. Conclusion

L'étude présentée dans ce troisième chapitre s'intéresse à l'analyse expérimentale du soudage par soudage à l'arc électrique SMAW afin de remplir la première passe du chanfrein en v- pour une pipe de 13mm d'épaisseur. Les résultats obtenus sont résumés dans ce qui suit.

- La morphologie de la zone fondue obtenus (cas de remplissage des chanfreins étroit par soudage SMAW) est différente par rapport aux autres formes issues de d'autres procédés de soudage. D'habitude on trouve la forme d'une tête de clou en face endroit. Par contre, dans le cas de soudage SMAW la formes est inversée, probablement est liée à des phénomènes multiphysiques et à l'étalement de l'énergie due à l'arc électrique sur une faible épaisseur.
- La hauteur de dépôt de matière H est principalement influencé par la vitesse de soudage et une interaction entre la vitesse de soudage et le diamètre de l'électrode. La largeur de la zone fondue face envers L_1 et la largeur au milieu de la zone fondue (pénétration latéral) L_2 sont t'influencé principalement par le diamètre de l'électrode.
- L'effet de la vitesse de soudage sur la largeur du cordon face envers L_1 n'est pas significatif (très faible) contrairement à la hauteur de dépôt de matière H . En revanche, en observe que l'interaction entre la vitesse de soudage V_s et les trois autres paramètres (la tension T , le diamètre de l'électrode D et l'intensité du courant I) sont significatif.

- Selon le diamètre de l'électrode choisi, l'effet de la vitesse de soudage se modifie, dans le sens que, si pour un diamètre $D=3.2 \text{ mm}$ on observe une forte diminution de la hauteur de dépôt de matière H avec l'augmentation de la vitesse V_s , dans le cas d'un diamètre $D=4 \text{ mm}$, la variation de la vitesse n'influe pratiquement pas sur la hauteur H .
- L'effet de la tension T se modifie, dans le sens que, si pour un diamètre $D=3.2 \text{ mm}$ on observe une augmentation importante de la hauteur H avec l'augmentation de la tension T , dans le cas d'un diamètre $D=4 \text{ mm}$, la variation de la tension T , influe très peu sur la hauteur H .
- Pour un diamètre de l'électrode $D=3.2 \text{ mm}$, la vitesse de soudage V_s a peu d'influence sur $L1$, par contre, pour un diamètre de $D=4 \text{ mm}$, l'augmentation de la vitesse de soudage implique une augmentation du $L1$, donc il existe une interaction entre D et V_s . De plus, on observe la présence d'une forte interaction entre V_s et T , dans le sens que les niveaux du T influent l'effet du V_s sur $L1$: pour $T=26 \text{ V}$ on observe une diminution de $L1$ avec l'augmentation de V_s , tandis que pour $T=32 \text{ V}$ l'effet du V_s sur $L1$ est inverse, $L1$ augmente avec l'augmentation du V_s .
- Pour une valeur $I=80\text{A}$ on constate une forte augmentation du $L2$ avec la diminution du diamètre de fil D . Par contre, cette augmentation du $L2$ est bien moins importante avec la diminution du D , pour une valeur de $I=120 \text{ A}$.
- Les modèles mathématiques développés reproduisent fidèlement le comportement des trois fonctions (H , $L1$, $L2$) qui caractérisent la morphologie de la zone fondue (résultats très proches entre les mesures et la modélisation expérimentales).
- Les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce travail, peuvent contribuer d'une part pour la validation des modèles numériques. Et d'autre part aide à la compréhension des phénomènes qui interviennent lors des opérations de soudage SMAW, afin de les prendre en considération lors du développement des modèles numériques.

Chapitre 4 : Etude numérique du procédé de soudage SMAW

1. Introduction

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. Cependant plusieurs phénomènes intervenant dans les procédés de soudage sont multiples, couplés, et demandent une compréhension approfondie. L'idéal serait donc de développer des modèles numériques prédictifs qui permettraient d'analyser les comportements des assemblages pendant et après le soudage et donc de réduire le nombre d'essais. L'objectif de la simulation numérique du soudage est généralement de décrire les effets mécaniques (tels que les champs de contrainte et les déformations) qui sont directement dépendants des évolutions de températures imposées par le procédé de soudage. Il est donc impératif d'accéder à la définition de l'apport de chaleur qui peut être décrit suivant deux approches : l'approche multiphysique et l'approche « source équivalente ».

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons choisi l'approche source équivalente, elle est facile à mettre en place avec un temps de calcul acceptable. Cette approche consiste généralement à résoudre un problème de conduction non linéaire dans les pièces à assembler. Notre choix de sources est fondé sur une combinaison deux types de sources équivalentes. La première est une source surfacique gaussienne. La deuxième est une source de chaleur volumique proposée par Goldak[38]. Lorsque les expérimentations sont coûteuses, il arrive de plus en plus fréquemment que l'on étudie d'abord les phénomènes à l'aide de simulations numériques. Les calculs sont souvent complexes et nécessitent des temps de calcul très longs. Il est alors avantageux d'organiser les simulations de la même manière que les essais des plans d'expériences. L'utilité de ces plans numériques, d'une part est de quantifier l'influence des paramètres du modèle sur les Fonctions Objectifs choisies, afin de minimiser le nombre de paramètres à étudier, et d'autre part, essayer de trouver la plage des paramètres d'entrée du modèle, afin de juger de la robustesse du modèle numérique. Nous avons choisi trois paramètres des sources équivalentes (r_{sur_inf} , r_{sur_sup} , r_0), et la conductivité thermique λ et quatre fonctions objectif dans le plan transverse : L_{inf} , L_m , L_{sup} et H .

2. Généralités sur les modélisations

2.1 Analyse phénoménologique

Un des objectifs de ce travail est de proposer un modèle thermique, à la fois simple et pertinent, qui permet de retrouver les évolutions temporelles et spatiales de la température des deux pièces à assembler, aux alentours du cordon, au cours du soudage. Ce modèle thermique est ensuite intégré dans un modèle multiphasique afin de déterminer les déformations, ainsi que les contraintes résiduelles dans la pièce soudée.

L'analyse phénoménologique nous guide dans le choix de ou des modèles de source équivalente (*Figure 4-1*).

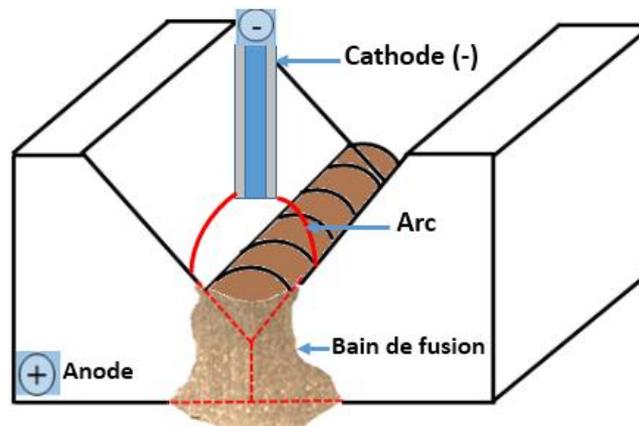


Figure 4- 1:Principe du procédé de soudage SMAW.

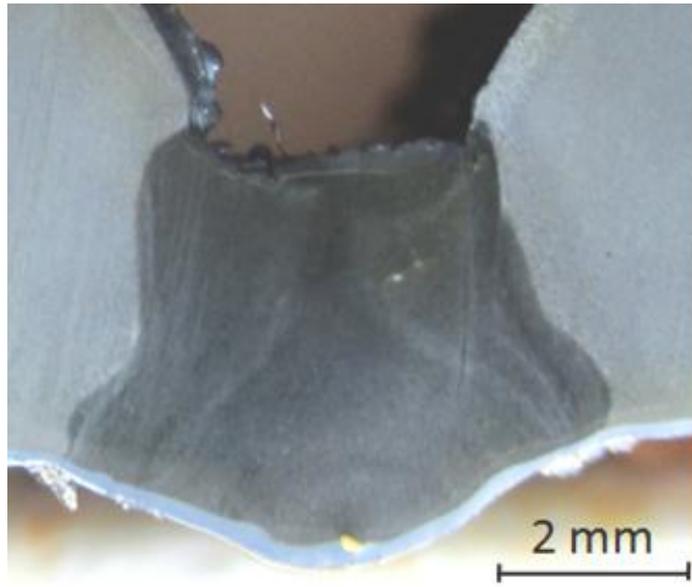
En effet, la description de la (ou des) source de chaleur doit tenir compte des phénomènes physiques suivants :

Le rôle du SMAW est de déposer du métal qui permet de remplir le chanfrein. Nous pouvons ainsi considérer que son rôle principal est en grande partie d'apporter un dépôt énergétique volumique. Cependant, il faut souligner que l'énergie apporté par le SMAW provient de l'arc électrique et du métal fondu. Cette analyse va nous permettre d'orienter notre choix concernant la modélisation de l'apport de chaleur par le procédé de soudage SMAW.

Dans le cadre de ce travail, nous avons expérimenté un modèle de sources de chaleur équivalentes, et ceci afin de décrire les différents phénomènes qui intervient lors des opérations de soudage :

Le modèle est une combinaison de trois types sources de chaleurs : la première est une source surfacique gaussienne pariétale en face supérieure, la seconde est une source volumique de type gaussien distribuée dans l'épaisseur dans une forme conique. En fin une source surfacique gaussienne en face inférieure.

La macrographie transverse représentée sur la (*Figure 4-2*), est la première information permettant de nous renseigner sur la morphologie de la zone fondue (forme et taille de la zone fondue). Elle permet, d'une part, de nous guider dans le choix des sources de chaleurs équivalentes, afin de valider le modèle numérique développé. Et d'autre part, d'étudier la qualité des cordons de soudures en termes de défauts tels que : les fissures, les soufflures, les problèmes de collages,). La forme élargie en bas de la zone fondue est probablement lié aux mouvements hydrodynamiques du bain de fusion.



*Figure 4- 2 : Macrographie d'un cordon à la première passe obtenue par le SMAW
 $T= 32 V$; $I= 80 A$; $V= 1,2 mm/s$; $D=3,2 mm$.*

L'objectif de notre étude est de développer un modèles thermique, à la fois simple et pertinent, qui permet de retrouver la cartographie du champ des températures des pièces à assembler. Ce modèle thermique par la suite sera intégré dans un modèle multiphasique afin de déterminer les déformations et les contraintes résiduelles dans la pièce soudée. A cet effet nous avons développé une démarche de travail qui consiste tout d'abord à réaliser des essais préliminaires afin d'approcher au mieux les paramètres opératoires validés par l'analyse macrographiques des coupes transverses des cordons de soudure. Le travail se poursuit par une analyse phénoménologique du soudage dans le but d'extraire le maximum d'informations afin de développer un modèle représentant l'apport de chaleur. Le modèle numérique peut alors construit sous un code de calcul numérique, ici COMSOL Multiphysics 3.5. Après validation du modèle par comparaison des coupes macrographiques théoriques et expérimentales, un jeu optimal des paramètres de la source équivalente étant connu, des Plans d'Expérience Numériques sont mis en place permettant d'analyser le comportement du modèle vis-à-vis des paramètres de la source. *La Figure 4-3* résume la démarche développée dans ce travail.

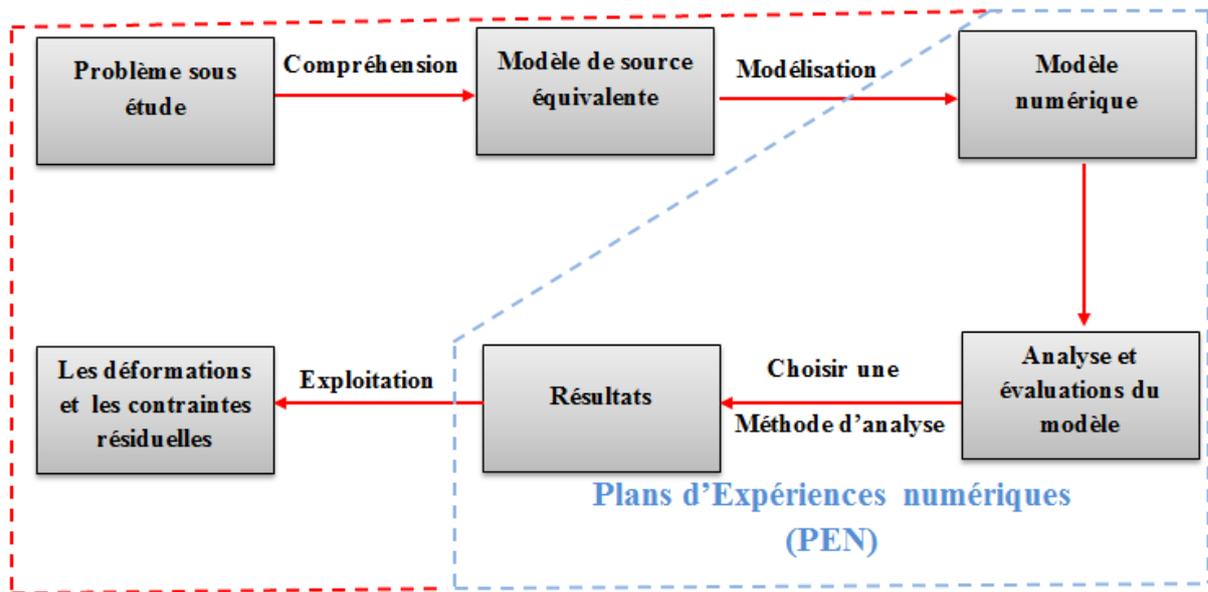


Figure 4- 3 : Le problème à étudier.

2.2 Propriétés thermo physiques

Lors du soudage, le matériau s'échauffe, ce qui a pour conséquence de faire évoluer les propriétés thermo physiques. Donc, pour la suite de l'étude il a été choisi d'appliquer lors de la modélisation une évolution des propriétés thermo physiques (conductivité thermique, masse volumique et chaleur latente). Lors du soudage, le matériau s'échauffe, ce qui a pour conséquence de faire évoluer les propriétés thermophysiques. Donc, pour la suite de l'étude il a été choisi d'appliquer lors de la modélisation une évolution des propriétés thermophysiques (conductivité thermique, masse volumique, capacité thermique massique) fonction de la température. La Figure 4-4 regroupe les propriétés thermophysiques de l'acier API 5L X70 [97].

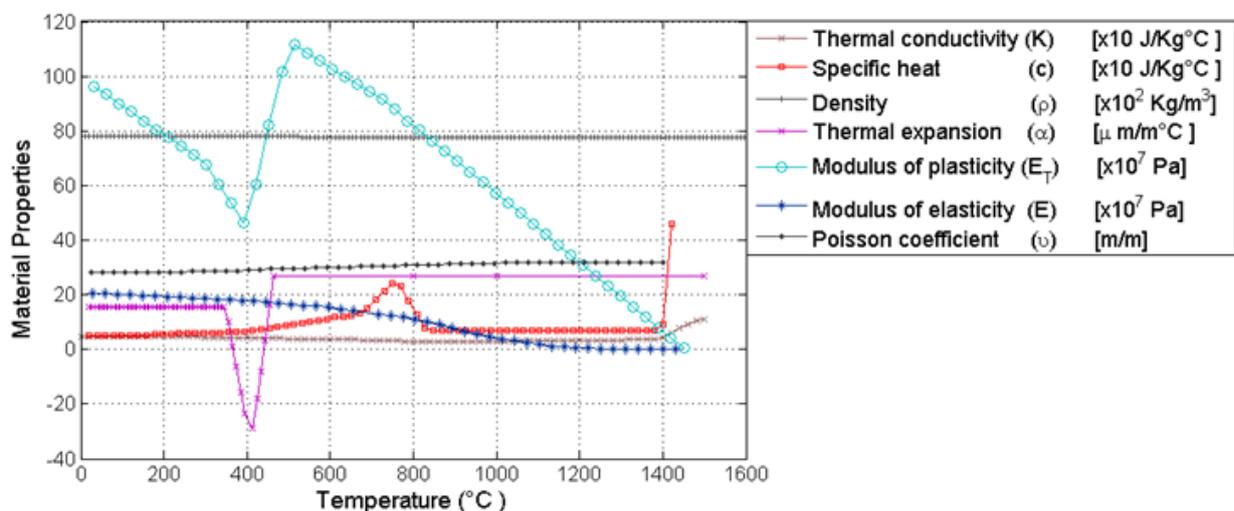


Figure 4- 4: Propriétés thermophysiques et mécaniques de l'acier API 5L X70 fonction de la température. [97]

2.3 Modélisation du changement de phase

Lorsque le matériau passe de solide à liquide, une énergie de changement de phase apparaît appelée chaleur latente de fusion. Il est important de la faire intervenir dans le modèle car celle-ci permet d'évacuer une partie de l'énergie contenue dans le matériau et donc de diminuer la température. La solution retenue pour l'incorporer a été de la faire apparaître dans la chaleur spécifique sous la forme d'une gaussienne qui agit autour de la température de fusion. Cette distribution gaussienne est ensuite multipliée à la chaleur latente de fusion et rajouter à la chaleur spécifique. Nous appellerons cette chaleur spécifique « chaleur spécifique apparente ».

La prise en compte des chaleurs latentes (fusion et/ou vaporisation) est réalisée par l'introduction d'un terme supplémentaire D dans le modèle (équation 4-2).

$$\rho(cp + D.L_f) \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (-K \vec{\nabla}) = 0 \quad (4-1)$$

$$D = \frac{\exp\left(-\frac{(T - T_{trans})^2}{\delta T^2}\right)}{\sqrt{\pi\delta T^2}} \quad (4-2)$$

Avec D fonction gaussienne normalisée : demi-largeur (Figure 4-5)

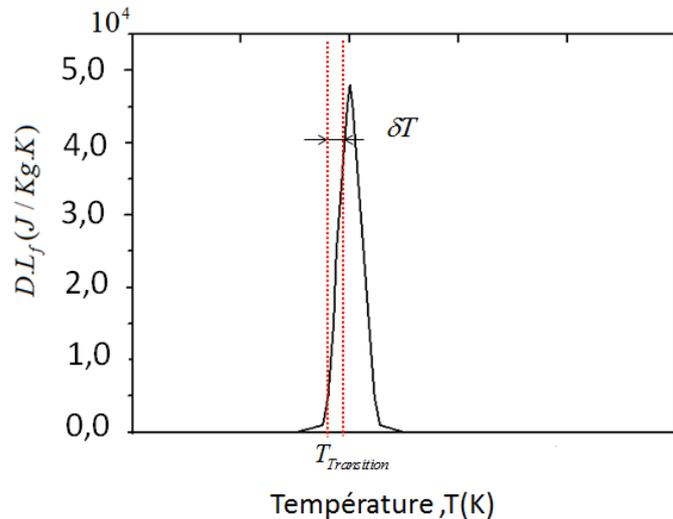


Figure 4- 5:Prise en compte de la chaleur latente de fusion.

L'autre problématique a été de faire évoluer les propriétés thermo physiques lors du passage d'un état solide à un état liquide sans engendrer de problème de convergence. La solution a donc été de faire évoluer les propriétés d'une courbe à l'autre de façon progressive. Pour cela,

il a été utilisé une fonction de COMSOL et Matlab appelée fonction d'Heavyside (flc2hs). La mise en place de cette équation peut s'écrire dans le cas conductivité thermique sous la forme suivante :

$$x_s + (x_l - x_s) \cdot \text{flc2hs}(T - T_f, \Delta T) \quad (4-3)$$

x_s : L'état solide

x_l : L'état liquide,

T_f : La température de fusion du matériau.

ΔT : La demi-largeur de l'intervalle sur lequel la fonction change de valeur (Figure 4-6.)

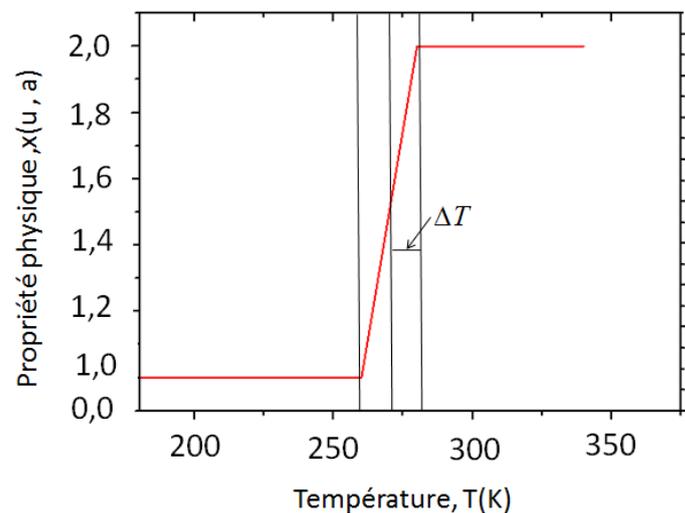


Figure 4- 6: Evolution de la propriété physique « x » avec la fonction flc2hs.

Le but cette fonction est donc de faire passer un paramètre d'une valeur à une autre d'après un critère. Dans notre cas le critère choisi est celui de la température de fusion. Afin d'éviter des passages trop brusques, la fonction étale le changement sur un écart (ΔT) qui se cale autour de la température de changement de phase. Lorsque dans l'équation la température T est égal à la température de fusion T_f , la fonction se met à 1, ce qui va permettre de faire passer la propriété sur la seconde équation, comme il est possible de le voir sur l'équation.

2.4 Modélisation en régime quasistationnaire

Les phénomènes intervenants durant les différents procédés de soudage sont de type transitoire. Cependant une modélisation dans ces conditions est très coûteuse en mémoire et temps de calcul. L'une des solutions permettant de contourner ce problème est de modéliser les phénomènes en régime quasi stationnaire ou repère mobile. Cette résolution a pour avantage de tenir compte indirectement du phénomène transitoire en réalisant un changement

de repère qui aura pour effet de se déplacer à la vitesse de la pièce. La modélisation en régime quasistationnaire rend une réponse à un instant donnée lorsque le régime est établi. Ce changement de repère entraîne une modification de l'équation de la chaleur. Cette nouvelle formulation peut se présenter de la façon suivante pour le cas où la source se déplace suivant l'axe x.

$$\rho(T)c_p(T)V_s \frac{\partial T}{\partial x} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad}T) + Q_{vol}(x, y, z) \quad (4-4)$$

Le terme à gauche de l'équation sera directement incorporé dans le terme source du sous-domaine de la pièce et correspond au terme convectif, le terme du milieu correspond aux phénomènes conduits et celui à droite au terme source.

2.5 Géométrie et conditions aux limites thermiques

La géométrie utilisée s'appuie sur celle du modèle expérimental. Elle est cependant simplifiée à la (Figure 4-7) qui suit :

- Sur les faces 4, 7, 8, 9 : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{inf}})$ (4-5)

- Sur la face 2 : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (*symétrie*) (4-6)

- Sur la face 1, 5 : $T = T_0$ (4-7)

- Sur la face 10, 11 : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (*flux convectif*) (4-8)

- Sur la face 3, 6 : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{\text{inf}}) + q_{\text{surf}}$ (4-9)

Le coefficient d'échange h utilisé dans les conditions aux limites et globalisant les transferts convectifs et radiatifs est proposé par Goldak [98], avec : ε l'émissivité de 0.4.

$$h = 24,1 \times 10^{-4} \varepsilon T^{1.61} \quad (4-10)$$

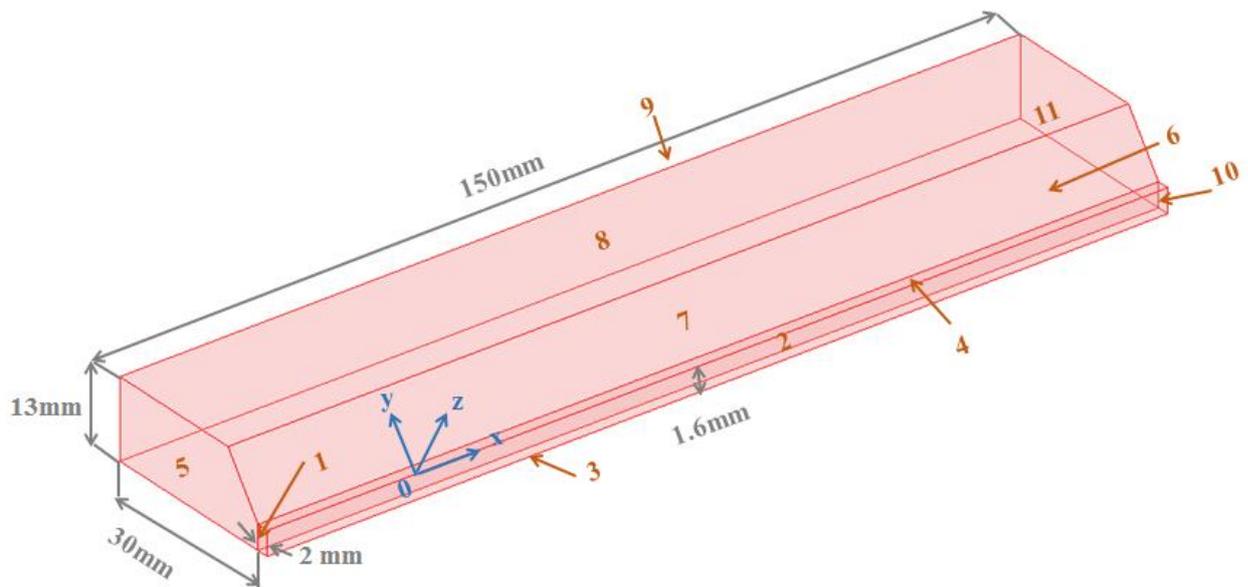


Figure 4- 7: Géométrie de la pièce.

2.6 Maillage du modèle

Le maillage de la géométrie prend une part importante dans la validité des résultats. En effet un maillage suffisamment raffiné dans la zone sollicitée permettra d'avoir une simulation non influencée par celui-ci et donc un modèle correct ou l'importance de diminuer suffisamment la géométrie pour raffiner la zone d'apport d'énergie.

Dans le cas du soudage SMAW, on choisira de raffiner le maillage dans la zone où l'on vient appliquer la source de chaleur.

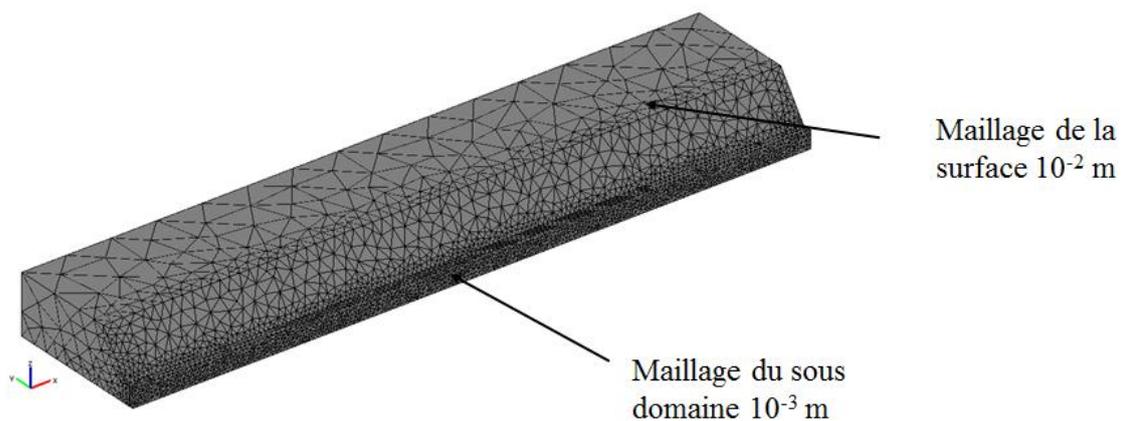


Figure 4- 8: Maillage utilisé pour la création de la géométrie 3D du procédé SMAW.

2.7 Termes sources

Le choix de sources est fondé sur une combinaison de trois types de sources de chaleur : La première est une source surfacique gaussienne pariétale (élargissement du bain face envers) :

$$q_{surf}(x, y, z) = \frac{E_1 \eta}{2\pi r_{surf}^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2r_{surf}^2}\right)} e^{-\left(\frac{z^2}{dz^2}\right)} \quad (4-11)$$

E_1 : fraction F_1 de l'énergie de l'arc électrique.

η : rendement de la source surfacique,

r_{surf} : rayon de la source surfacique face supérieur

dz la hauteur de la distribution pariétale.

La seconde est une source volumique de type gaussien distribuée dans l'épaisseur dans une forme conique proposée par Goldak[38]:

$$Q_{vol}(x, y, z) = \frac{9E_2 \eta}{\pi h (r_0^2 + r_0 r_1 + r_1^2)} e^{-\left(\frac{-3x^2+y^2}{r_z^2}\right)} [1-u(z+h)] \quad (4-12)$$

Avec :

E_2 : fraction F_2 de l'énergie de l'arc électrique.

η : rendement de la source volumique

r_0 : rayon de fusion en $z = 0$.

h : profondeur de pénétration.

r_1 : rayon de fusion en $z = -h$.

h : épaisseur du talon à souder

La troisième est une source surfacique de type gaussien :

$$q_{surf} = \frac{E_3 \eta}{2\pi r_{surf}^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2r_{surf}^2}\right)} \quad (4-13)$$

Avec :

E_3 : fraction F_3 de l'énergie de l'arc électrique.

η : rendement de la source surfacique,

r_{surf} : rayon de la source surfacique face inferieur

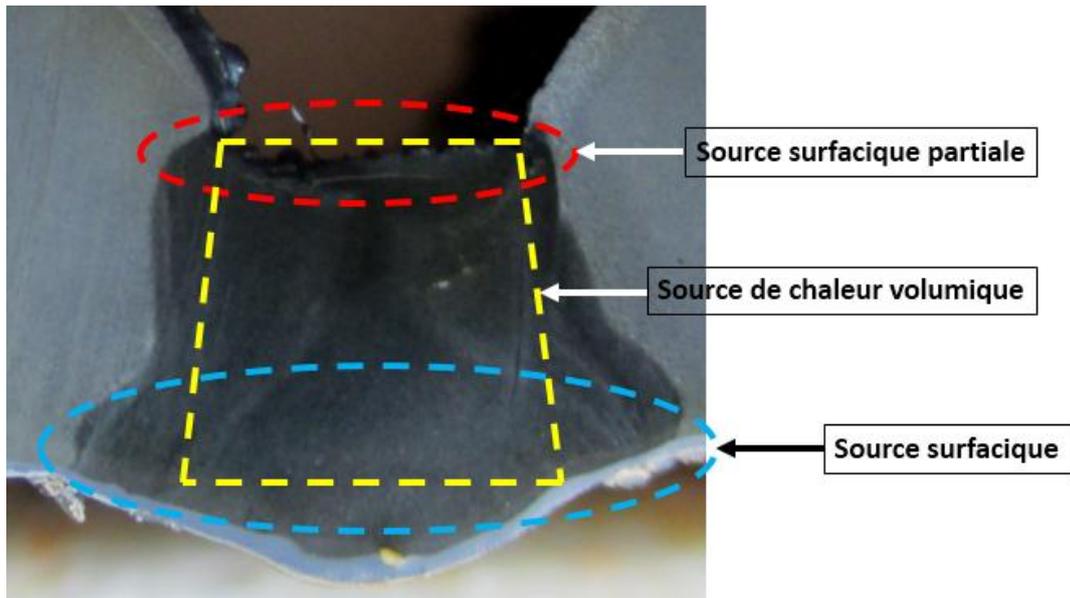


Figure 4- 9 : Formulation mathématique du problème thermique.

3. Résultats des simulations

3.1 Résultats

Les sources de chaleurs équivalentes utilisées dans le cas de cette étude ont permis de reproduire fidèlement la forme de la zone fondue expérimentale issu d'une opération de soudage à l'arc électrique SMAW. Le calcul numérique sous COMSOL multiphysics a permis d'extraire deux types d'informations, la première est la forme de la géométrie de la zone fondue et la seconde est les gradients de température dans la pièce à souder. L'accès aux gradients de température, va permettre par la suite de calculer les contraintes et les déformations à travers un couplage multiphasique. La Figure 4-10 présente les gradients de température dans la pièce ainsi que l'isotherme de fusion.

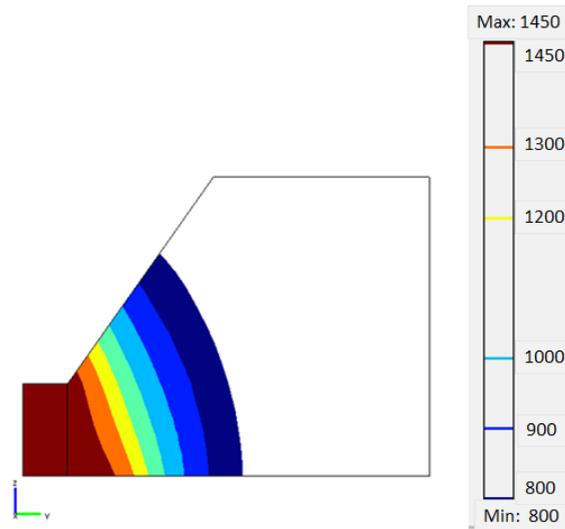


Figure 4- 10: Gradients de température dans la pièce.

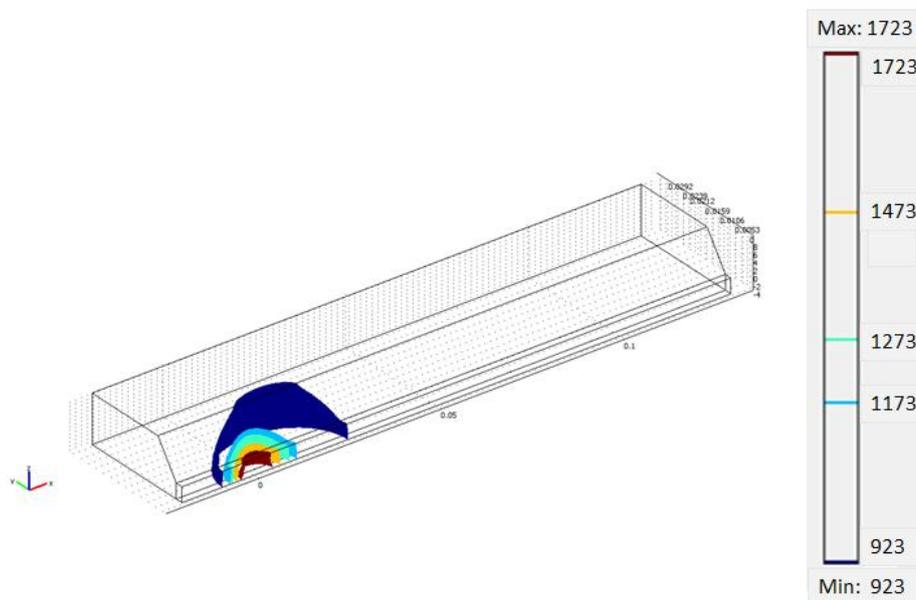


Figure 4- 11: Champ de température obtenu à l'aide du modèle numérique SMAW.

3.2 Validation du modèle numérique

Une étude comparative des grandeurs de de la zone fondue simulée et celle observée expérimentalement est nécessaire pour tester la pertinence de la réponse du modèle développé. La validation de ce calcul est obtenue en comparant, d'une part, les dimensions H , L_{sub} , L_m et L_{inf} prises sur la coupe macrographique transverse. Dans ce cas, on note une bonne adéquation entre le modèle direct et les dimensions relevées sur les coupes macrographiques (Table 4-1).

Table 4- 1: Comparaison entre géométrie expérimentale et le modèle numérique.

Grandeurs	Expérience	Modèle	Ecart (%)
H [mm]	0.57	0.55	3.5
L _{sup} [mm]	2.74	2.67	2.5
L _m [mm]	3.05	3.25	6.1
L _{inf} [mm]	3.91	4.14	5.80

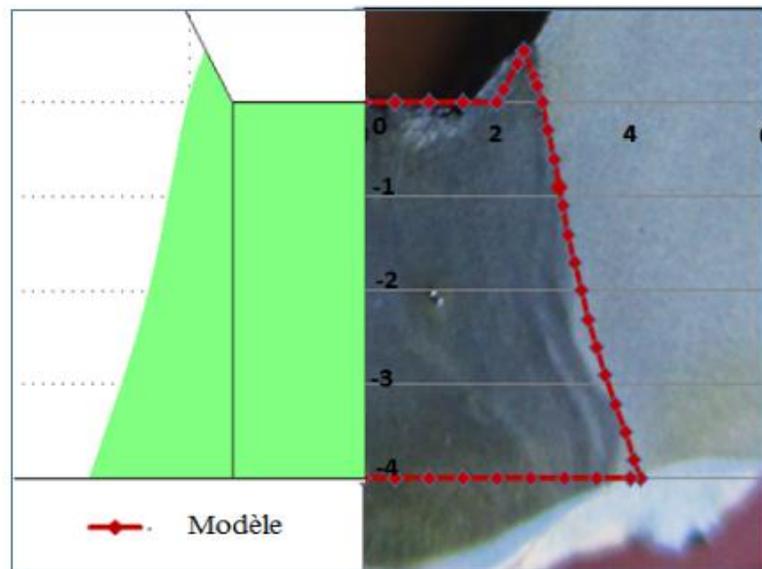


Figure 4- 12: Comparaison des zones fondues obtenus avec le modèle numérique et l'expérience.

Au vue, de l'importance du champ de température dans le calcul du comportement thermophysiques des pièces a soudées et afin d'étudier le comportement thermique (l'évolution de la température) selon les différentes positions, nous avons obtenus grâce au modèle numérique sous COMSOL multiphysique les évolutions de températures calculées par le modelé dans quatre positions (Figure 4-13).

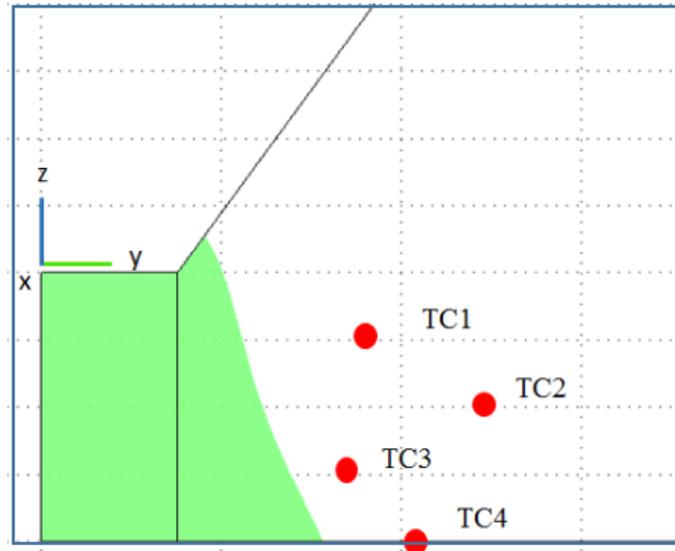


Figure 4- 13: Positions des thermo grammes numériques.

Table 4- 2 : les coordonnées des points thermo grammes numériques

N° TC	Position
TC1	$x = [-20 ,100] ; y = [9, 9] ; z = [-2, 2]$
TC2	$x = [-20 ,100] ; y = [5, 5] ; z = [-1, 1]$
TC3	$x = [-20 ,100] ; y = [4.2, 4.2] ; z = [-3, 3]$
TC4	$x = [-20 ,100] ; y = [6.5, 6.5] ; z = [-4, 4]$

3.3 Analyse des évolutions de la température

Les Figures (4-14,4-15, 4-16 ,4-17) présentent les évolutions de la température dans le cas des opérations de soudage. On observe trois phases dans les thermogrammes numériques :

- ❖ **La première phase** : représente l'échauffement par conduction de la pièce jusqu'à l'obtention du pic de température qui représente la **seconde phase**.
- ❖ **La troisième phase** est la plus importante dans le cas du soudage, elle permet de décrire la vitesse de refroidissement des joints de soudures.

L'analyse des thermogrammes permet de comprendre plusieurs phénomènes qui interviennent lors d'une opération de soudage.

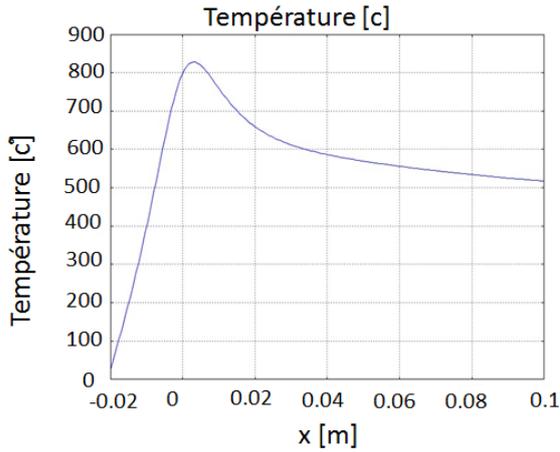


Figure 4- 14: Evolution de température dans la position ($y = 9 \text{ mm}$; $z = -2 \text{ mm}$).

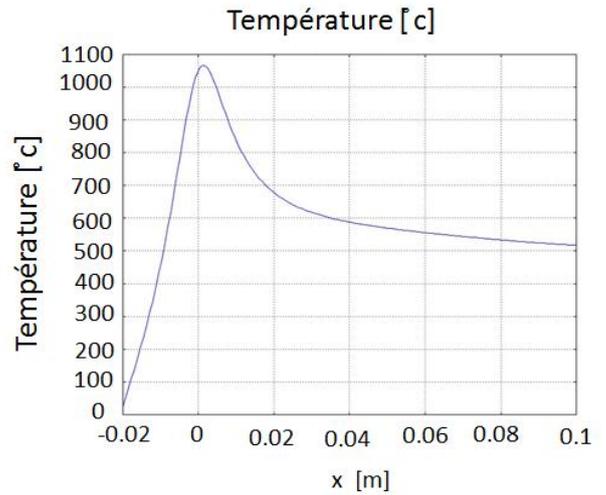


Figure 4- 15: Evolution de température dans la position ($y = 5 \text{ mm}$; $z = -1 \text{ mm}$).

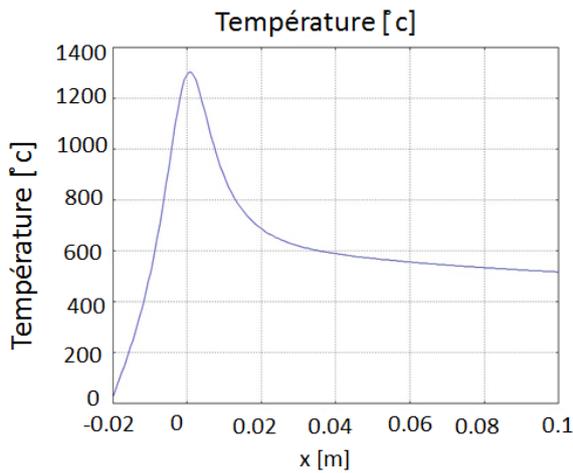


Figure 4- 16: Evolution de température dans la position ($y = 4.2 \text{ mm}$; $z = -3 \text{ mm}$).

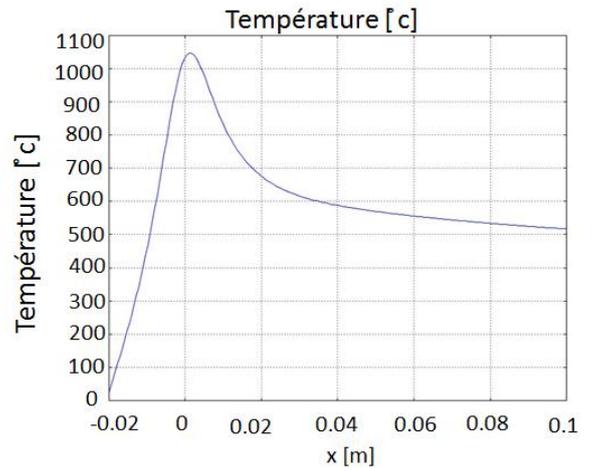


Figure 4- 17: Evolution de température dans la position ($y = 6.5 \text{ mm}$; $z = -4 \text{ mm}$).

4. Optimisation à l'aide d'un plan d'expériences numériques (PEN)

Les difficultés liées à l'identification des paramètres de sources équivalentes nous ont poussés à utiliser une méthode d'optimisation des paramètres, simple à mettre en place et robuste : il s'agit de la méthode des plans d'Expériences numériques (PEN). Elle permet d'estimer, à l'aide d'un nombre de calculs limité, les effets des facteurs d'influence du modèle (paramètres des expressions analytiques des sources équivalentes) sur les fonctions objectifs (FO) (caractéristiques de la zone fondue numérique). La Figure 4-18 présente un organigramme du

déroulement de l'algorithme de résolution du problème de sensibilité des paramètres par la méthode des plans d'Expériences numériques (PEN).

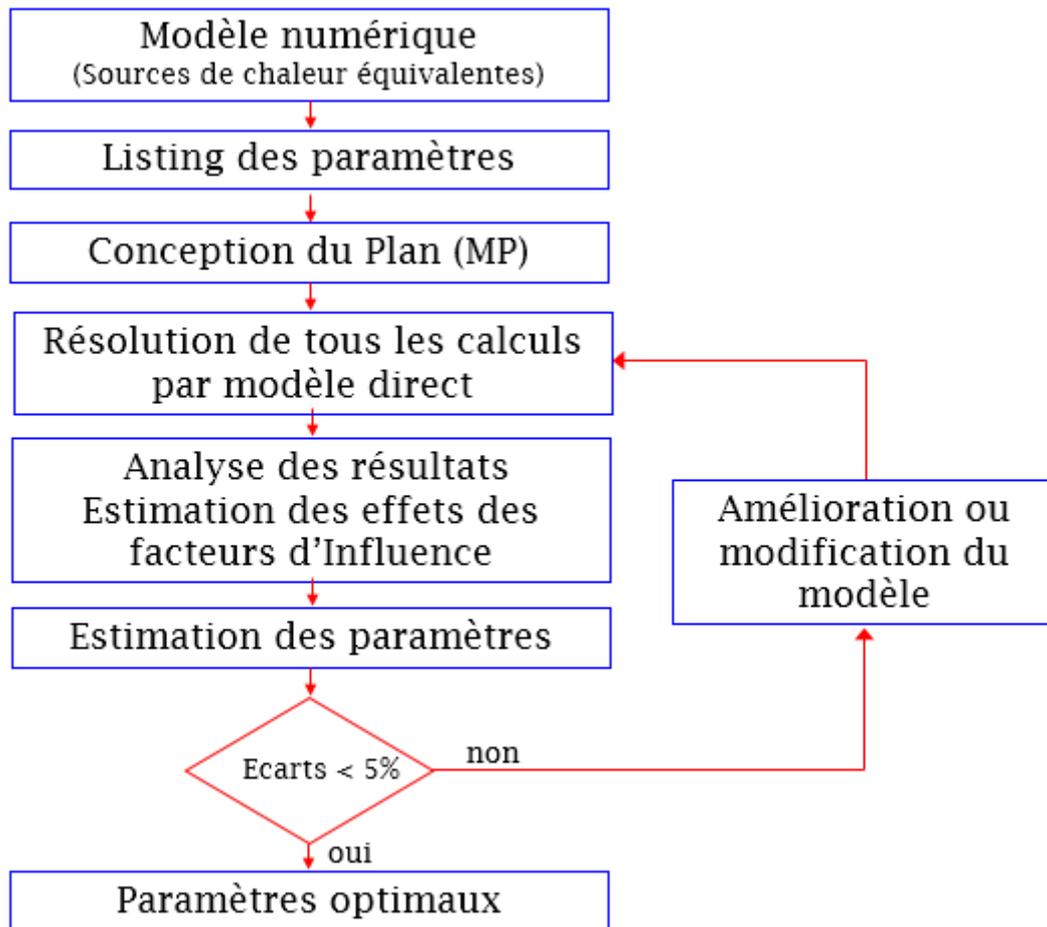


Figure 4- 18:Diagramme de résolution du problème de sensibilité des paramètres par la méthode des plans d'Expériences numériques (PEN).

4.1 Fonctions objectifs (FO)

Afin de caractériser la forme de la zone fondue numériquement, nous avons choisi : trois fonctions objectif (FO) dans le plan transverse : L_{inf} , L_m , L_{sup} et H (Figure 4-19).

- L_{inf} : Largeur de la zone fondue côté inférieur.
- L_m : Largeur au milieu du cordon.
- L_{sup} : Largeur de la zone fondue côté supérieur.
- H : Hauteur de dépôt.

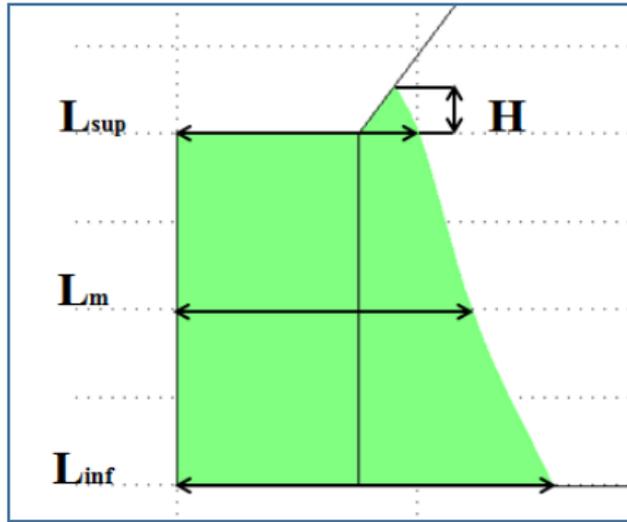


Figure 4- 19:Présentation des FO.

4.2 Facteurs d'influences (FI)

Nous avons choisi d'étudier trois paramètres des sources de chaleur équivalentes (r_{sur_inf} , r_{sur_sup} , r_0), et la conductivité thermique λ (w/m. k), le tableau 4-3 présente les quatre paramètres avec leurs domaines de variations. Le choix de ces niveaux a été défini pour préserver la forme de la zone fondue initiale (macrographie).

Table 4- 3: Facteurs d'influence et leurs niveaux de variation.

Facteurs d'influence	domaine de variation
Rayon de la source surfacique r_{sur_fsup} [mm]	[2 ;4]
Rayon de la source surfacique r_{surf_inf} [mm]	[2 ;4]
Rayon face endroit de la source volumique r_0 [mm]	[0.060 ; 0.064]
La conductivité : λ [w/m.k]	[48 ; 52]

4.3 La matrice programme (MP)

La matrice programme pour les conditions numériques retenues (4 facteurs d'influence avec 2 niveaux et cinq fonctions objectifs) comporte 16 essais (2^4 essais) [99], [100], [101]. Les niveaux codifiés et physiques des facteurs d'influence tant que les valeurs mesurées des Fonctions Objectifs (L_{inf} , L_m , L_{sup} , H) sont présentés dans le *Tableau 4-4*.

Table 4- 4: La matrice programme (PM).

N° essai	Facteurs d'Influence								Fonctions Objectives			
	Valeurs codifiées				Valeurs physiques				L_{sup}	L_m	L_{inf}	H
	$r_{surfsup}$	r_{surfin} f	r_0	λ	$r_{surfsup}$ [w1] [mm]	$r_{surfinf}$ [w3] [mm]	r_0 [mm]	λ [w/m.k]				
1	-1	-1	-1	-1	2	2	0.060	48	3.15	3.8	4.38	0.96
2	+1	-1	-1	-1	4	2	0.060	48	2.64	3.46	4.2	0.20
3	-1	+1	-1	-1	2	4	0.060	48	2.72	3.05	3.82	0.63
4	+1	+1	-1	-1	4	4	0.060	48	2.16	2.56	3.5	0.011
5	-1	-1	+1	-1	2	2	0.064	48	3.5	4.15	4.63	1.21
6	+1	-1	+1	-1	4	2	0.064	48	3.14	3.9	4.5	0.84
7	-1	+1	+1	-1	2	4	0.064	48	3.1	3.52	4.3	0.92
8	+1	+1	+1	-1	4	4	0.064	48	2.6	3.2	4.1	0.43
9	-1	-1	-1	+1	2	2	0.060	52	2.71	3.3	3.95	0.60
10	+1	-1	-1	+1	4	2	0.060	52	2.21	2.9	3.8	0.18
11	-1	+1	-1	+1	2	4	0.060	52	2.32	2.42	3.12	0.30
12	+1	+1	-1	+1	4	4	0.060	52	1.81	1.9	2.7	0.00
13	-1	-1	+1	+1	2	2	0.064	52	3	3.65	4.2	0.85
14	+1	-1	+1	+1	4	2	0.064	52	2.6	3.4	4.1	0.44
15	-1	+1	+1	+1	2	4	0.064	52	2.65	2.95	3.6	0.55
16	+1	+1	+1	+1	4	4	0.064	52	2.15	2.5	3.35	0.096

4.4 Résultats

❖ Estimation des effets des Facteurs d'Influence sur les Fonctions Objectif

L'analyse des résultats du Plan d'Expériences Numériques nous a permis d'estimer les effets des 4 Facteurs d'Influence (paramètres du modèle) sur les 4 Fonctions Objectif (caractéristiques de la zone fondue) et de tracer les diagrammes des effets (Diagrammes PARETO)(Figure 4-20, Figure 4-23). L'analyse des diagrammes des effets nous permet d'énoncer les commentaires suivants :

- Le facteur r_{surf_sup} est le plus influent sur H , et L_{sup} (Figures 4-20 ;Figure 4-23), et que son influence est « inverse » : si r_{surf_sup} augmente, H , et L_{sup} diminuent.
- Le facteur λ (Lambda) est lui aussi influent sur L_{sup} , L_m et L_{inf} , son influence est directe pour L_{inf} et inverse pour L_{sup} , L_m : si λ augmente, L_{inf} augmentent, par contre L_{sup} , L_m diminuent.
- Les grandeurs L_m et L_{inf} (Figure 4-21 ;Figure4-22), sont influencées principalement par r_{surf_inf} , et que son influence est « inverse » : si r_{surf_inf} diminue, H , et L_{sup} augmentent.

En connaissant l'amplitude et le sens des effets estimés des Facteurs d'Influence sur les Fonctions Objectif, on dispose de l'information nécessaire pour savoir quels FI, dans quel sens, et de quelle quantité il faut ajuster les niveaux des FI pour atteindre simultanément les valeurs « ciblées » des FO. Dans notre cas, les valeurs cibles des Fonctions Objectif sont les valeurs mesurées.

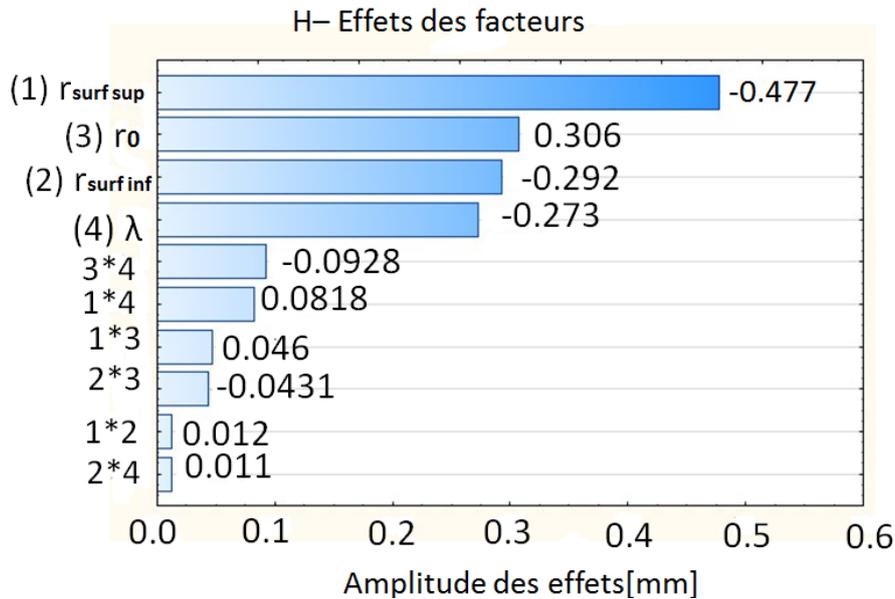


Figure 4- 20:Influence des facteurs sur la hauteur du dépôt H [mm].

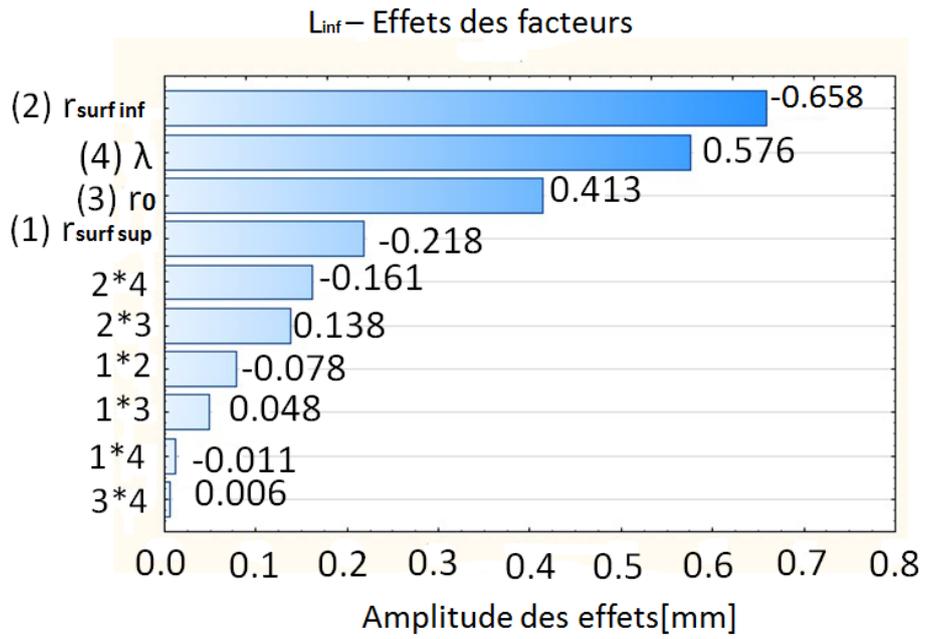


Figure 4- 21: Influence des facteurs sur largeur de la zone fondue côté inférieur.

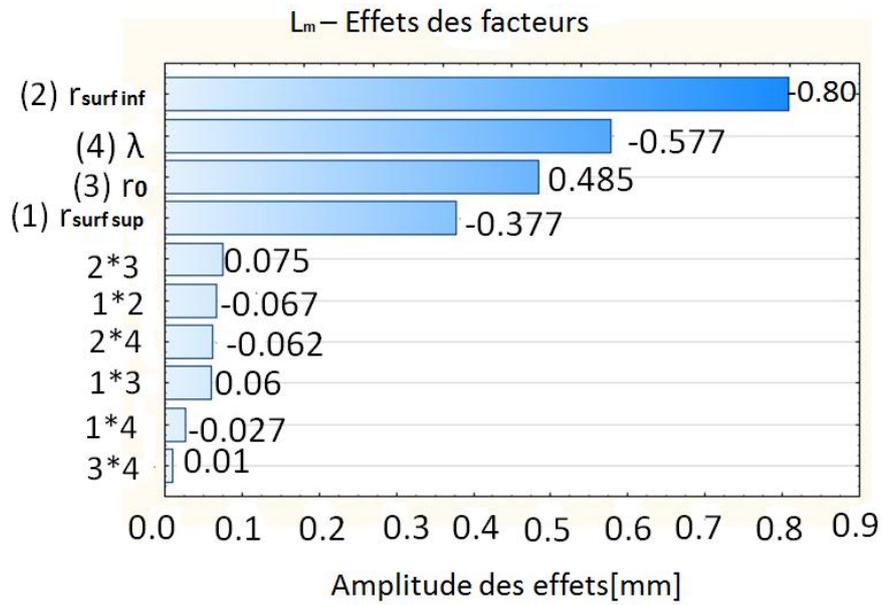


Figure 4- 22: Influence des facteurs sur largeur aux milieux du cordon.

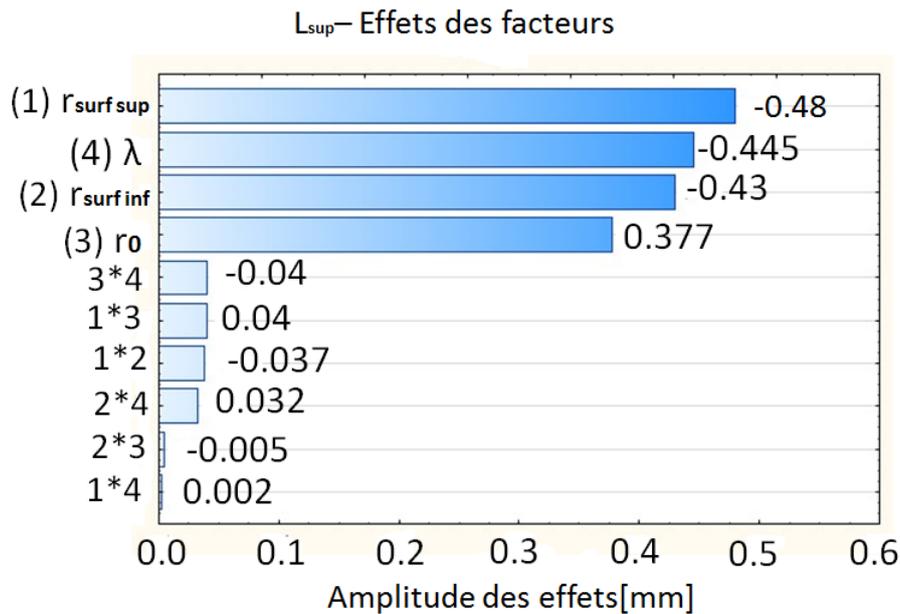


Figure 4- 23:Influence des facteurs sur largeur de la zone fondue côté supérieur.

En connaissant l’amplitude et le sens des effets estimés des Facteurs d’Influence sur les Fonctions Objectif, on dispose de l’information nécessaire pour savoir quels FI, dans quel sens, et de quelle quantité il faut ajuster les niveaux des FI pour atteindre simultanément les valeurs « ciblées » des FO. Dans notre cas, les valeurs cibles des Fonctions Objectif sont les valeurs mesurées.

5. Validation du modèle numérique

Dans cette partie, nous présentons des comparaisons réalisées à partir de coupe macrographique. Quelques paramètres de modèle sont modifiés. La géométrie de cordon de soudure obtenue en soudage SMAW, a été correctement reproduite par le modèle (Figure 4-24). Un léger écart entre les résultats expérimentaux et numériques peut inférieure à 5(%) (Table 4-5).

Table 4- 5:Grandeurs dimensionnelles de comparaisons (expériences – modèle) après optimisation.

Grandeurs	Mesures	Modèle	Ecart (%)	Ajustement	Ecart (%)
H [mm]	0.57	0.55	3.5	0.58	1.7
L _{sup} [mm]	2.74	2.67	2.5	2.68	2.1
L _m [mm]	3.05	3.25	6.5	3.09	1.2
L _{inf} [mm]	3.91	4.15	5.80	3.93	0.5

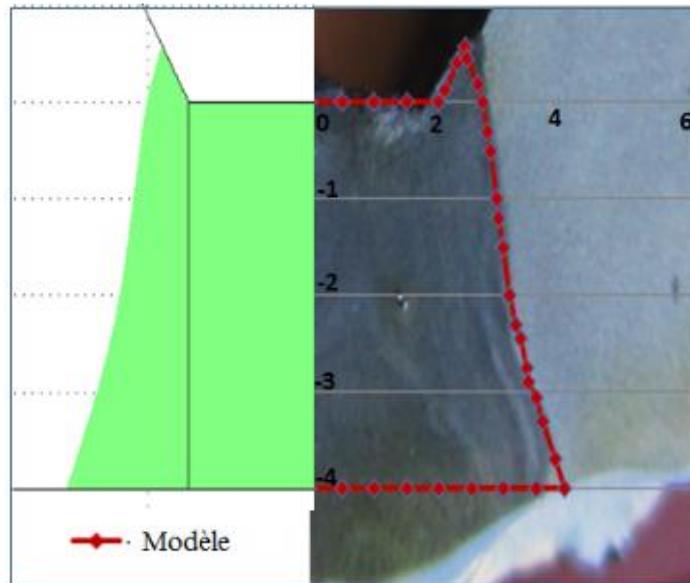


Figure 4- 24: Comparaison entre géométrie expérimentale et le modèle numérique après optimisation..

Pour rappel, afin d’obtenir une meilleure adéquation des grandeurs de bain de fusion expérimentales et numériques, il a été nécessaire de modifier la valeur de la conductivité thermique. La modification de la conductivité entraîne de très faibles modifications de la largeur au milieu du bain fondu et largeur de la zone fondue côté inférieur. Tan que ces grandeurs influencées principalement par le rayon de la source surfacique r_{surf_inf} et la conductivité, donc il faut faire une modification précisé pour ces deux paramètres afin de diminuer l’écart 6.5% pour largeur au milieu du bain fondu et 5.8% pour largeur de la zone fondue côté inférieur. Pour cela nous avons augmenté la valeur de la conductivité de 50 à 52 [w/m.k] et diminué la valeur du rayon de la source surfacique de 3 à 2 mm (Table 4-6), ces variations nous permet d’obtenir un écart de 1.2% pour L_m et 0.5% pour L_{inf} .

Table 4- 6: Les valeurs des paramètres après optimisation

Parameter	valeur
Rayon de la source surfacique r_{surf_sup} [mm]	[3]
Rayon de la source surfacique r_{surf_inf} [mm]	[2]
Rayon face endroit de la source volumique r_0 [mm]	[0.062]
La conductivité : λ [w/m.k]	[52]

6. Conclusion

- Un modèle thermique tridimensionnel spécifique au procédé de soudage à l'arc électrique SMAW a été développés dans le cas d'une configuration de soudage par remplissage des chanfreines en régime quasistationnaire. Ce modèle nous permet à faire l'analyse comparative de la géométrie de zone fondu.
- La réalisation d'un plan d'expériences numériques nous a permis d'estimer à l'aide de 16 « essais » (simulations numériques) les effets des 4 paramètres du modèle sur les 4 Fonctions Objectif.
- Les domaines de variations des Facteurs d'Influence ont été choisis de manière satisfaisante, les valeurs mesurées des Fonctions Objectif se trouvant toujours à l'intérieur des intervalles des valeurs simulées pour les 16 « calculs » numériques. Les effets de chaque FI sur les FO et le sens de l'influence peuvent être estimés à l'aide des diagrammes des effets.
- Pour assurer un bon accord (écarts inférieurs à 5%) entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées, nous avons réalisé des ajustements des valeurs des Facteurs d'Influence (paramètres du modèle), en utilisant les informations obtenues sur les effets des FI, grâce à l'analyse des résultats du plan d'expériences numériques.
- En analysant les résultats des simulations, les Plans d'Expériences Numériques ont permis de proposer des valeurs satisfaisantes pour les paramètres difficilement estimables des modèles, pour rapprocher au mieux les calculs et les mesures.
- La comparaison de la forme du bain de fusion montre une bonne concordance entre les valeurs déterminées numériquement à partir de modèle numérique et celles mesurées expérimentalement (macrographie).

Conclusion et perspectives

La technologie de soudage à l'arc électrique Shielded Metal Arc Welding (SMAW) est un atout majeur pour l'industrie depuis sa création, elle a trouvé des applications répandues dans divers secteurs industriels. Parmi les secteurs connus par l'utilisation intensive de cette technologie, le secteur des hydrocarbures. En Algérie, des dizaines d'usines de traitement des hydrocarbures liquides et gazeux sont implantés ainsi que des milliers de kilomètres de gazoducs et oléoducs transportant du gaz, du pétrole brut, du condensat et du GPL, et on entend toujours parler de nouveaux ouvrages tel que le gazoduc qui va relier le Nigeria avec l'Europe en traversant le Niger et l'Algérie. Tous ces ouvrages sont construits à l'aide des procédés de soudage par électrode SMAW et d'autres technologies de soudage.

L'étude menée dans cette thèse porte sur la modélisation et la simulation numérique du procédé de soudage à l'arc électrique SMAW. Pour aider à la compréhension des phénomènes intervenant au cours du soudage, différentes parties sont abordées dans cette thèse.

Une synthèse bibliographique était nécessaire pour introduire le principe du procédé d'assemblage et pour cerner les paramètres opératoires les plus influents sur les caractéristiques des assemblages soudés et en particulier sur la morphologie de cordon de soudure. Ensuite nous avons mis l'accent sur plusieurs points, étudiés dans la littérature, caractérisant le procédé de soudage à l'arc électrique SMAW. Dans un premier temps, à l'aide d'un Plan d'Expériences Expérimental, nous avons recherché les paramètres de soudage SMAW qui ont une influence sur les dimensions de la géométrie du cordon de soudure. L'utilisation d'une approche statistique nous a permis, avec un minimum d'essais, de faire un tri entre les facteurs significatifs et ceux non significatifs pour le processus soudage à l'arc électrique SMAW. Ainsi, en partant d'essais préliminaires de hiérarchisation et en passant par des essais exploratoires, des combinaisons de paramètres de soudage ont été déterminées, afin de déterminer un modèle empirique fiable qui relie les paramètres opératoires aux dimensions du cordon de soudure. Ensuite, à l'aide des informations ainsi obtenues, nous avons développé un modèle numérique direct 3D à partir d'observations de la forme de la zone fondue issue des coupes macrographiques. Ce modèle est basé sur une combinaison de 3 types de sources de chaleurs équivalentes. La première est une source surfacique gaussienne pariétale, la seconde est une source volumique de type gaussien distribuée dans l'épaisseur dans une forme conique, et la troisième une source surfacique gaussienne. Ce modèle nous a permis de réaliser une première comparaison entre la forme de la zone fondue expérimentalement et numériquement. Ensuite, afin d'affiner les résultats, nous avons procédé à l'optimisation des différents paramètres des sources équivalentes à l'aide de Plans d'Expériences Numériques (PEN), qui consiste à étudier les effets des paramètres des sources équivalentes sur la forme du bain de fusion. L'exploitation de ces effets permet d'ajuster ces paramètres. La méthode des Plans d'Expériences Numériques a permis ainsi de rendre l'écart mesures-calculs de la forme de la zone fondue inférieur à 5 %.

L'ensemble de ces données a permis de réaliser une base de données expérimentale et d'obtenir des expressions analytiques des données de sortie (la hauteur du dépôt de matière correspondant à la productivité, la largeur du cordon face envers et la largeur du cordon au milieu) en fonction des données d'entrée (la Vitesse de soudage, la Tension du courant, l'Intensité du courant et le Diamètre de l'électrode). Ces expressions permettront d'éviter de réaliser des essais supplémentaires pour déterminer les caractéristiques du cordon de soudure pour une configuration de soudage inconnue. De plus, cette base de données a permis de valider les modèles numériques développés au cours de ce travail de thèse.

Une analyse comparative a révélé une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et ceux numériques qui traduit une réponse satisfaisante des modèles numériques proposés. En effet, d'une part la comparaison la forme de bain de fusion déterminées par simulation numérique et celles mesurées expérimentalement a conduit à la validation du modèle thermique. D'autre part, l'optimisation de différents paramètres de source équivalente par Plans d'Expériences Numériques (PEN) sur les grandeurs géométriques caractérisant la forme du bain de fusion afin de faire sortir une forme la plus proche possible au coupe macrographique et d'améliorer les écarts mesures-calculs de toutes les grandeurs géométriques (écart inférieurs à 5 %).

Nous pouvons dire que, malgré les difficultés rencontrées, les objectifs initiaux que nous nous étions fixés ont été atteints, puisque des modèles de sources équivalentes ont été proposés.

L'originalité de ce travail consiste, dans le cadre de l'étude expérimentale, en l'utilisation les coupes macrographiques, pour caractériser la géométrie de la zone fondue. Du point de vue optimisation des modèles numériques basé sur l'approche source de chaleur équivalente, nous avons créé une nouvelle méthode d'ajustement des paramètres du modèle, appelée « méthode des Plans d'Expériences Numériques », inspirée de la méthode des Plans d'Expériences Expérimentaux. Cette dernière méthode permet, de plus, de juger de la faculté d'un modèle à fournir des résultats se rapprochant au mieux des observables choisies. Cette approche peut donc ainsi permettre de mettre en œuvre des calculs thermomécaniques dans la phase solide, dans le but de prédire des contraintes et des déformations.

En conclusion, les développements de ce travail sont nombreux. La démarche utilisant la méthode des Plans d'Expériences Expérimentaux peut en effet être utilisée pour l'étude de divers types de soudage ou de rechargement. Enfin, il peut aussi être envisageable de mettre en œuvre une méthode d'ajustement des paramètres à partir d'autres fonctions que les caractéristiques géométriques observées, telles que les niveaux maximums de température atteints au sein des pièces.

A l'issue de ce travail, nous pouvons relever quelques observations et présenter quelques perspectives.

- Du point de vue expérimental, une mesure des températures par thermocouples en cours de soudage afin d'obtenir les cycles thermiques est en cours de réalisation. Ces résultats permettraient de valider les champs de température issus de la modélisation numérique.
- Du point de vue numérique, le développement d'un modèle multiphysique thermomécanique afin de déterminer les déformations et les contraintes résiduelles.

Références

- [1] E. L. GUEN, "Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique," thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud, 2010.
- [2] Perry, "soudage A-TIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables," 2000.
- [3] G. Ruckert, "Etude de la contribution des flux activants en soudage A-TIG : application de la silice au soudage de différents métaux et alliages.," Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2005.
- [4] A. KECHAOU, "Etude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage," Thèse de doctorat, Université de Liège, 2013.
- [5] J.-P. Planckaert, "Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc.," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2008.
- [6] M. Hamide, "Modélisations numérique du soudage à l'arc des aciers," vol. Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 2008
- [7] A. BELHAD, "Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : application aux alliages de magnésium," Ecole nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2009.
- [8] M. AISSANI, "Etude du comportement thermique et mécanique des Matériaux aéronautiques par des méthodes numériques : Application au soudage de structures métalliques.," Thèse de doctorat, Université saad dahlab de Blida, 2012/2013.
- [9] J. M. V. T. Zacharia, J. A. Goldak, T. A. Debroy, M. Rappaz, "Modelling of fundamental phenomena in welds," *Modelling Simul.Mater.Eng*, vol. 3, pp. 265-288, 1995.
- [10] K. C. Hsu, "Study of the free-burning high-intensity argon arc," *Journal of Applied Physics*, vol. 54, pp. 1293-1301, 1983.
- [11] K. C. Hsu, "Two temperature modelling of the free-burning high-intensity arc," *Journal of Applied Physics*, vol. 54 (8), pp. 4359-4366., 1983.
- [12] C. Delalondre, " Numerical modelling of high intensity arcs including a flow turbulence model," *Rapport technique Electricité de France*, 1992.
- [13] A. Kaddani, " Modélisations 2D et 3D des Arcs Electriques dans l'argon à la Pression Atmosphérique avec la prise en compte du couplage thermique et Electrique Arc-Electrodes et de l'influence des vapeurs," thèse de doctorat, Université Paris 6, 1995.
- [14] J. J. G. J. M. Bauchire, and A. Gleizes, "Modeling of a DC Plasma Torch in Laminar and Turbulent Flow," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 17, pp. 409-432., 1997.
- [15] J. G. Gonzalez, "Mathematical modelling of a free-burning arc in the presence of metal model," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, pp. 3065-3070, 1993.
- [16] J. J. Gonzalez, "The influence of iron vapour on an argon transferred arc," *Plasma Sources Sci. Technol*, vol. 6, pp. 20-28, 1997.
- [17] F. Lago, J. J. Gonzalez, P. Freton, and A. Gleizes, "A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, pp. 883-897, 2004.
- [18] J. L. Gonzalez, "Numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: part II. The three-dimensional model – influence of external forces on the arc column," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 38, pp. 306-318, 2005.

- [19] J. H. a. J. J. L. L Sansonnens, "Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, pp. 148-157, 2000.
- [20] H. T. Manabu Tanaka, Masao Ushio, and John J. Lowke, "Numerical study of a free-burning Argon arc with anode melting," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 23, pp. 585-605, 2003.
- [21] I. T. r. STA/LMS/95-NT757/DdP/MLL, " rapport STA/LMS/95-NT757/DdP/MLL," avril 1995.
- [22] M. Brochard, "Modèle couple cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG," Thèse de doctorat, C.E.A. et Université de Provence (Aix-Marseille I), 2009.
- [23] G. O. a. J. Szekely, "Heat and fluid flow phenomena in weld pools," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 147, pp. 53-79, 1984.
- [24] S. A. D. T. Zacharia, J. M. Vitek, "Effect of evaporation and temperature dependent material properties on weld pool development,," *Metall. Trans. B*, vol. 22, pp. 233-241, 1991.
- [25] C. S. W. a. L. Dorn, "Computer simulation of fluid dynamics and heat transfer in full-penetrated TIG weld pools with surface depression," *Com. Mat. Sci*, vol. 2, pp. 341-349., 1994.
- [26] V. P. a. U. Dilthey, "A numerical and experimental study of fluid flow and heat transfer in stationary GTA weld pools," *Mathematical modelling of weld phenomena*, vol. 5, pp. 135-163, 2000.
- [27] F. Roger, "Etude et modélisation de la formation d'un cordon de soudure arc," thèse de l'école polytechnique, 2000.
- [28] K. P. a. N. T. M. Hughes, "Modelling the fluid dynamics and coupled phenomena en arc weld pool," *Mathematical modelling of weld phenomena*, vol. 6, pp. 63-81, 2002.
- [29] D. Rosenthal, "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting," *Welding Journal*, vol. 20, n°5, pp. 220-234, 1941.
- [30] T. H. a. F. MATSUDA, "Trans. Natn. Res. Inst. Metals," vol. 7, n°3, p. 22, 1965.
- [31] A. Kaplan, "A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile," *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 27, pp. 1805-1814, 1994.
- [32] R. F. a. K. CHOUF, "keyhole modelling during laser welding," *Appl. Phys. journal*, vol. 87, n°9, pp. 4075-4083, 2000.
- [33] D. C. P. Rogeon, P. LEMASSON and J.J. QUEMENER,, *Numerical simulation of electron beam welding of metals: sensitivity study of a predictive model, Mathematical modelling of welding of weld phenomena 5*, Edition by H. CERJAK, Materials modelling series ed., 2001.
- [34] N. N. Rykalin, *Berechnung der warmevorgänge beim scheiben*. Verlag, Berlin, 1957.
- [35] S. K. J. a. H. S. CHO, "An analytical solution to predict the transient distribution in fillet " *arc welding Journal*, pp. 223s-232s, June 1997.
- [36] N. Kerrouault, " Fissuration en soudage d'un acier inoxydable austénitique," Thèse de doctorat, C.E.A. et École centrale de Paris, 2001.
- [37] A. C. J. Goldak, et M. Bibby,, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources " *Metallurgical transition*, vol. 13, pp. 299-305, 1984.
- [38] M. B. J. Goldak, J. MOORE, R. HOUSE, B. PATEL, "Computer modelling heat flow in welds," *Metallurgical transactions B*, vol. 17b, 1986.
- [39] M. A. W. P.N. Sabapathy, M.J. PAINTER,, "The prediction of burn through during in service welding of gas pipelines," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 77, pp. 669 – 677, 2000.

- [40] M. A. W. P.N. Sabapathy, M.J. PAINTER., "Numerical models of in service welding of gas pipelines," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 118, pp. 14 – 21, 2001.
- [41] E. R. a. a. Pocwiardowski, "An analytic-numerical evaluation of the thermal cycle in the HAZ during welding," in *Mathematical modelling of weld phenomea 4*, ed H Cerjak: The Institute of Materials ,London, 1998.
- [42] M. H. Gareth A. TAYLOR, Nadia STRUSEVICH and Koulis PERICLEOUS, "Finite volume methods applied to the computationnal modelling of welding phenomena.," *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, , Melbourne, Australia, 6-8 December 1999.
- [43] W. Li, R. Yu, D. Huang, J. Wu, Y. Wang, T. Hu, and J. Wang, "Numerical simulation of multi-layer rotating arc narrow gap MAG welding for medium steel plate," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 45, pp. 460-471, 2019.
- [44] D. Gery, H. Long, and P. Maropoulos, "Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, pp. 393-401, 2005.
- [45] A. K. Mishra and A. Kumar, "Numerical and experimental analysis of the effect of volumetric energy absorption in powder layer on thermal-fluidic transport in selective laser melting of Ti6Al4V," *Optics & Laser Technology*, vol. 111, pp. 227-239, 2019.
- [46] M. Aissani, H. Maza, B. Belkessa, and B. Maamache, "Contribution à la modélisation du soudage TIG des tôles minces d'acier austénitique 304L par un modèle source bi-elliptique, avec confrontation expérimentale," *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 124, pp. 213-220, 2005.
- [47] S. Rouquette, J. Guo, and P. Le Masson, "Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg–Marquardt method: Application to the electron beam welding," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 128-138, 2007.
- [48] Y. Danis, E. Lacoste, and C. Arvieu, "Numerical modeling of inconel 738LC deposition welding: Prediction of residual stress induced cracking," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 2053-2061, 2010.
- [49] V. M. Varma Prasad, V. M. Joy Varghese, M. R. Suresh, and D. Siva Kumar, "3D Simulation of Residual Stress Developed During TIG Welding of Stainless Steel Pipes," *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 364-371, 2016.
- [50] M. Zubairuddin, S. K. Albert, M. Vasudevan, S. Mahadevan, V. Chaudhari, and V. K. Suri, "Numerical simulation of multi-pass GTA welding of grade 91 steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 27, pp. 87-97, 2017.
- [51] O. Obeid, G. Alfano, H. Bahai, and H. Jouhara, "Numerical simulation of thermal and residual stress fields induced by lined pipe welding," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 5, pp. 1-14, 2018.
- [52] N. S. Shanmugam, G. Buvanashakaran, K. Sankaranarayanan, and S. Ramesh Kumar, "A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4528-4542, 2010.
- [53] L. Bidi, S. Mattei, E. Cicala, H. Andrzejewski, P. Le Masson, and J. Schroeder, "The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modelling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes," *Optics & Laser Technology*, vol. 43, pp. 537-545, 2011.
- [54] I. Bendaoud, S. Mattei, E. Cicala, I. Tomashchuk, H. Andrzejewski, P. Sallamand, A. Mathieu, and F. Bouchaud, "The numerical simulation of heat transfer during a hybrid laser–MIG welding using equivalent heat source approach," *Optics & Laser Technology*, vol. 56, pp. 334-342, 2014.

- [55] F. Kong, J. Ma, and R. Kovacevic, "Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser–GMA welding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 1102-1111, 2011.
- [56] F. Pichot, M. Danis, E. Lacoste, and Y. Danis, "Numerical definition of an equivalent GTAW heat source," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1241-1248, 2013.
- [57] H.-C. Tran and Y.-L. Lo, "Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 255, pp. 411-425, 2018.
- [58] A. Artinov, M. Bachmann, and M. Rethmeier, "Equivalent heat source approach in a 3D transient heat transfer simulation of full-penetration high power laser beam welding of thick metal plates," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 122, pp. 1003-1013, 2018.
- [59] K. Antony, N. Arivazhagan, and K. Senthilkumaran, "Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, pp. 345-355, 2014.
- [60] E.F. Cicală, "Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale," Editura Politehnica, ed, 1999, p. 303.
- [61] D.C Montgomery, "Design and analysis of experiments," *John Wiley & Sons, Singapore*, 1991.
- [62] E. F. Cicală, "Metoda experimentelor factoriale, proiectarea experimentelor, modelare, optimizare,," ed: Editura Politehnica Timișoara,, 2005, p. 320.
- [63] Jacques Goupy, "Introduction aux plans d'expériences," 2e Edition, Dunond, ed, Paris, 2001.
- [64] H. Bensiali, L. Bidi, E. Cicala, P. Le Masson, M. E. B. Chibani, and M. S. Boulahlib, "Effects of operating parameters on weld bead morphology with welding operations of API 5L X70 steel pipes by SMAW process," *Welding in the World*, vol. 65, pp. 1119-1129, 2021.
- [65] L. Bidi, P. Le Masson, E. Cicala, and C. Primault, "Experimental design method to the weld bead geometry optimization for hybrid laser-MAG welding in a narrow chamfer configuration," *Optics & Laser Technology*, vol. 89, pp. 114-125, 2017.
- [66] L. K. Pan, C. C. Wang, Y. C. Hsiao, and K. C. Ho, "Optimization of Nd: YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis," *Optics & Laser Technology*, vol. 37, pp. 33-42, 2005.
- [67] H.-K. Lee, H.-S. Han, K.-J. Son, and S.-B. Hong, "Optimization of Nd: YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 415, pp. 149-155, 2006.
- [68] A. Bagchi, S. Saravanan, G. S. Kumar, G. Murugan, and K. Raghukandan, "Numerical simulation and optimization in pulsed Nd: YAG laser welding of Hastelloy C-276 through Taguchi method and artificial neural network," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 146, pp. 80-89, 2017.
- [69] M. R. Pakmanesh and M. Shamanian, "Optimization of pulsed laser welding process parameters in order to attain minimum underfill and undercut defects in thin 316L stainless steel foils," *Optics & Laser Technology*, vol. 99, pp. 30-38, 2018.
- [70] N. Ghosh, R. Rudrapati, P. K. Pal, and G. Nandi, "Parametric Optimization of Gas Metal Arc Welding Process by using Taguchi method on Ferritic Stainless Steel AISI409," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 2213-2221, 2017.
- [71] H.-Y. Huang, "Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 31, pp. 2488-2495, 2010.

- [72] N. Murugan and R. Parmar, "Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 41, pp. 381-398, 1994.
- [73] E. J. Martinez-Conesa, J. A. Egea, V. Miguel, C. Toledo, and J. L. Meseguer-Valdenebro, "Optimization of geometric parameters in a welded joint through response surface methodology," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 105-114, 2017.
- [74] I. A. Ibrahim, S. A. Mohamat, A. Amir, and A. Ghalib, "The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Processes on Different Welding Parameters," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1502-1506, 2012.
- [75] S. Srivastava and R. Garg, "Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS: 2062 mild steel using response surface methodology," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 296-305, 2017.
- [76] J. Dhas and M. Satheesh, "Sensitivity analysis of submerged arc welding parameters for low alloy steel weldment," 2013.
- [77] R. P. Singh, R. Garg, and D. K. Shukla, "Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 14-22, 2016.
- [78] M. T. Hayajneh, A. F. Al-Dwairi, and S. F. Obeidat, "Optimization and control of bending distortion of submerged arc welding I-beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 142, pp. 78-85, 2018.
- [79] M. Sailender, G. C. Reddy, and S. Venkatesh, "Influences of process parameters on weld strength of low carbon alloy steel in purged SAW," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 2928-2937, 2018.
- [80] Y. Tarng and W. Yang, "Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method," *The International Journal of advanced manufacturing technology*, vol. 14, pp. 549-554, 1998.
- [81] T. S. Kumar, V. Balasubramanian, and M. Sanavullah, "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy," *Materials & design*, vol. 28, pp. 2080-2092, 2007.
- [82] G. Padmanaban and V. Balasubramanian, "Optimization of pulsed current gas tungsten arc welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy," *Transactions of Nonferrous metals society of China*, vol. 21, pp. 467-476, 2011.
- [83] M. Manikandan, M. N. Rao, R. Ramanujam, D. Ramkumar, N. Arivazhagan, and G. Reddy, "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding process parameters for alloy C-276 using the Taguchi method," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 767-774, 2014.
- [84] P. Bharath and V. Sridhar, "Optimization of 316 stainless steel weld joint characteristics using Taguchi technique," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 881-891, 2014.
- [85] G. Casalino, M. Mortello, P. Leo, K. Benyounis, and A. Olabi, "Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy," *Materials & Design*, vol. 61, pp. 191-198, 2014.
- [86] G. Ugrasen, G. Bharath, G. K. Kumar, R. Sagar, P. Shivu, and R. Keshavamurthy, "Optimization of Process Parameters for Al6061-Al7075 alloys in Friction Stir Welding using Taguchi's Technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 3027-3035, 2018.
- [87] G. Ugrasen, G. Bharath, G. K. Kumar, R. Sagar, P. R. Shivu, and R. Keshavamurthy, "Optimization of Process Parameters for Al6061-Al7075 alloys in Friction Stir

- Welding using Taguchi's Technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 3027-3035, 2018.
- [88] V. S. J. A.A.Shukla, A.chel, B.A.Shukla, "Analysis of Shieldedmetal arc welding parameter on Depth of Penetration on AISI 1020 plates using Response surface methodology," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 239–246, 2018.
- [89] U. S. P. P.G. Ahire, and M.S. Kadam ,, "Genetic Algorithm Based Optimization of the Process Parameters for Manual Metal Arc Welding of Dissimilar Metal Joint," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 106-112, 2018.
- [90] U. S. Patil and M. S. Kadam, "Multiobjective optimization of MMAW process parameters for joining stainless steel 304 with mild steel by using response surface methodology," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 305-310, 2020.
- [91] N. L. M. S. D. Vigneshkumar, "Optimisation des paramètres de processus dans le soudage ARC de métaux différents," *Science et technologie Asie* . vol. 15 No 3, 2010.
- [92] P. K. Singh, D. Patel, and S. Prasad, "Optimization of process parameters during vibratory welding technique using Taguchi's analysis," *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 399-402, 2016.
- [93] "Code reseau de Transport par canalisation," Décembre 2015.
- [94] R. P. Singh, R.K.Garg, and D. K. Shukla, "Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 14-22, 2016.
- [95] S. Srivastava and R. K. Garg, "Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 296-305, 2017.
- [96] J. Ahn, L. Chen, E. He, J. P. Dear, and C. M. Davies, "Optimisation of process parameters and weld shape of high power Yb-fibre laser welded 2024-T3 aluminium alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, pp. 70-85, 2018.
- [97] J. Da Nóbrega, D. Diniz, A. Silva, T. Maciel, V. de Albuquerque, and J. Tavares, "Numerical Evaluation of Temperature Field and Residual Stresses in an API 5L X80 Steel Welded Joint Using the Finite Element Method," *Metals*, vol. 6, p. 28, 2016.
- [98] J. Goldak, M. Akhlaghi, Computational welding mechanics, Ed Springer Science + Business, 2005.
- [99] Cicala, E. (2005).Metoda experimentelor factoriale, Ed. Politehnica, Timisoara.
- [100] Montgomery, DC. (2009).Design and Analysis of Experiments, John Wiley : New York.
- [101] Goupy, J. (2001).Introduction aux plans d'expériences, 2e edition, Dunond : Paris.

ملخص

يتعلق العمل المقدم بالنمذجة التجريبية والرقمية لعملية تجميع خطوط الأنابيب بواسطة لحام القوس الكهربائي SMAW. أجريت الدراسة على مادة من الصلب API5L X70.

ان الغرض من النمذجة التجريبية هو الحصول على نماذج إحصائية لتطور الوظائف الموضوعية كدالة للعوامل المؤثرة. ان العدد الكبير من العوامل التي تتدخل أثناء عملية اللحام بالقوس الكهربائي SMAW بالإضافة إلى تعقيد الظواهر الفيزيائية التي تحدث أثناء التفاعل هذه العملية أدى إلى استعمال طريقة مستويات التجارب. لقد سمحت هذه الطريقة بتقليل عدد الاختبارات مع الحصول على دقة جيدة للنتائج التي تم الحصول عليها. باستخدام طريقة تصميم التجارب من جهة لتقدير تأثيرات معاملات التشغيل (سرعة اللحام والجهد والكثافة وقطر قطب اللحام) وتفاعلاتها على عدة وظائف تميز شكل وصلة اللحام (ارتفاع الحافة). ترسبات المادة H ، عرض وصلة اللحام المواجهة L1 والعرض في منتصف وصلة اللحام (الاختراق الجانبي) (L2) ، ومن ناحية أخرى لتوفير نموذج رياضي يربط معاملات تشغيل اللحام بالوظائف الموضوعية المدروسة .

يهدف جزء النمذجة الرقمية إلى إكمال المعلومات المكتسبة من خلال النمذجة التجريبية بمعلومات عن تطور الظواهر الفيزيائية أثناء تفاعل اللحام SMAW. الهدف هو محاكاة ظواهر انتقال الحرارة باستخدام نهج مصدر الحرارة المكافئ ، وتطوير نموذج مباشر باستخدام برنامج العناصر المحدودة COMSOL Multiphysics. ما يسمى بنهج "المصدر المكافئ"، والذي يتكون من حل مشكلة التوصيل غير الخطي في الأجزاء المراد تجميعها. في هذه الحالة ، يمكن إعطاء شكل تحليلي مسبق للمصدر يمثل توزيع مدخلات الحرارة بواسطة عملية اللحام SMAW. لقد التحق من صحة النموذج العددي المقترح من خلال المقارنة بين الكميات ذات الأبعاد المتعددة والتي تميز شكل المنطقة الذائبة التجريبية مع شكل المنطقة الذائبة المحسوبة.

من أجل التحقق من صحة النموذج العددي الذي تم تطويره ، تم استخدام طريقة الخطط التجريبية العددي لتقدير تأثيرات معلمات النموذج العددي من خلال معلمات مصادر الحرارة (نصف قطر مصدر السطح العلوي ، ونصف قطر مصدر السطح السفلي ، نصف قطر الوجه الأيمن لمصدر الحجم و ناقلية حرارية) وتفاعلاتها على العديد من الوظائف التي تميز مورفولوجيا تجمع اللحام الرقمي (عرض المنطقة المنصهرة على الجانب السفلي L_{inf} ، العرض في منتصف وصلة اللحام L_m ، عرض المنطقة المنصهرة على الجانب العلوي L_{sup} وارتفاع الإيداع H). أعطى هذا التحسين ارتباطاً جيداً بين شكل البركة المنصهرة للنموذج المطور والشكل التجريبي (الماكروغرافيا).

الكلمات المفتاحية: لحام SMAW، طريقة تصميم التجارب (PEE)، النموذج الرقمي، المصدر المكافئ، طريقة التصميم الرقمي للتجارب (PEN).

Résumé

Le travail présenté concerne la modélisation expérimentale et numérique du processus d'assemblage des pipelines par le soudage à l'arc électrique SMAW. L'étude a été menée sur un matériau de type acier API5L X70.

Le but de la modélisation expérimentale est d'obtenir des modèles statistiques d'évolution des fonctions objectifs en fonction des facteurs d'influences. Le grand nombre de facteurs qui intervient au cours du processus de soudage à l'arc électrique SMAW ainsi la complexité des phénomènes physiques se produisant lors de l'interaction au cours de ce procédé, nous ont amené à faire appel à la méthode des plans d'expériences. Cette méthode nous a permis de réduire le nombre d'essais tout en ayant une bonne résolution des résultats obtenus. En utilisant la méthode des plans d'expériences d'une part pour estimer les effets des paramètres opératoires (vitesse de soudage, tension, intensité et diamètre de l'électrode) et leurs

interactions sur plusieurs fonctions caractérisant la morphologie du cordon de soudure (la hauteur du dépôt de matière H , largeur du cordon face envers $L1$ et la largeur au milieu du cordon (*pénétration latérale*) $L2$), et d'autre part pour fournir un modèle mathématique qui relie les paramètres opératoires de soudage aux fonctions objectifs étudiées.

La modélisation numérique a pour compléter les informations acquises par le biais de la modélisation expérimentale avec des informations sur l'évolution des phénomènes physiques lors de l'interaction de soudage SMAW. Il s'agit de simuler des phénomènes de transfert de chaleur en utilisant l'approche source de chaleur équivalente, où l'objectif de la modélisation est de développer un modèle direct à l'aide du logiciel par éléments finis COMSOL Multiphysics. L'approche dite « source équivalente », qui consiste à résoudre un problème de conduction non linéaire dans les pièces à assembler. Dans ce cas, on peut se donner a priori une forme analytique de la source représentant la distribution de l'apport de chaleur par le procédé de soudage SMAW. Le modèle numérique proposé a été validé par une comparaison entre plusieurs grandeurs dimensionnelles qui caractérisent la forme de la zone fondue expérimentale avec la forme de la zone fondue calculée.

Afin de valider le modèle numérique développé nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences numérique pour estimer les effets des paramètres du modèle numérique à travers les paramètres des sources de chaleurs (rayon de la source surfacique supérieure, rayon de la source surfacique inférieure, rayon face endroit de la source volumique et la conductivité) et leurs interactions sur plusieurs fonctions caractérisant la morphologie du bain de fusion numérique (largeur de la zone fondue côté inférieur L_{inf} , largeur au milieu du cordon L_m , largeur de la zone fondue côté supérieur L_{sup} et la hauteur de dépôt H). Cette optimisation a donné une bonne corrélation de forme de bain de fusion du modèle développé et de celle expérimentale (macrographie).

Mot clé : Soudage SMAW, Méthode des Plans d'Expériences (PEE), Modèle numérique, source équivalente, Méthode des Plans d'expériences Numérique (PEN).

Abstract

The work presented concerns the experimental and numerical modeling of the pipeline assembly process by SMAW electric arc welding. The study was conducted on an API5L X70 steel type material.

The purpose of the experimental modeling was obtaining statistical models of the objective functions evolution as influencing factors function. The large number of factors which intervene during the welding process with the electric arc SMAW as well as the complexity of the physical phenomena occurring during the interaction during this process, led us to appeal to the experimental designs. This method allowed reducing the number of tests while having a good resolution of the obtained results. By using the design of experiments method on the one hand to estimate the effects of the operating parameters (welding speed, voltage, intensity and the electrode diameter) and their interactions on several functions characterizing the morphology of the weld bead (the height of the deposit of material H , width of the bead facing towards $L1$ and the width in the middle of the bead (lateral penetration) $L2$), and on the

other hand to provide a mathematical model which links the operating parameters of welding to the objective studied functions.

The numerical modeling part aims is to complete the information acquired through experimental modeling with information on the evolution of physical phenomena during the SMAW welding interaction. The aim is to simulate heat transfer phenomena using the equivalent heat source approach, and to develop a direct model using the finite element software COMSOL Multiphysics. The so-called “equivalent source” approach, which consists of solving a nonlinear conduction problem in the parts to be assembled. In this case, an analytical form of the source representing the distribution of the heat input by the SMAW welding process could be given. The numerical model proposed was validated by a comparison between several dimensional quantities which characterize the shape of the experimental melted zone with the shape of the calculated melted zone.

In order to validate the numerical model developed, the method of numerical designs is used to estimate the effects of the numerical model parameters through the heat sources parameters (radius of the upper surface source, radius of the lower surface source, radius face location of the volume source and the conductivity) and their interactions on several functions characterizing the morphology of the digital weld pool (width of the molten zone on the lower side L_{inf} , width in the middle of the bead L_m , width of the molten zone on the upper side L_{sup} and the height of deposit H). This optimization gave a good correlation of the molten pool shape of the developed model and the experimental one (macrography).

Key word: SMAW welding, Experimental designs, Numerical model, Equivalent source, Numerical designs.