



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique des Plasmas

Par :

Melle BENSALD SARRA

Sur le thème

Simulation magnétohydrodynamique d'un plasma d'arc de soudure stationnaire à géométrie cylindrique

Soutenu publiquement le 23juin2024. à Tlemcen devant le jury composé de :

Pr BOUSSAID Abdelhak	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr GOURARI Djamel Eddine	MCF	Centre universitaire de NAAMA	Encadrant
Pr LIANI Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur

BENSALD/2024

Année Universitaire : 2023 ~ 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

الحمد لله حبًا وشكرًا وامتنانًا، ما كنتُ لأفعلَ هذا لولاَ توفيقٍ من الله وفضلاً منه فاللهم لك الحمدُ حتى
ترضى ولك الحمدُ إذا رضيتَ ولك الحمدُ بعدَ الرضا
إلى من كلَّ العرقُ جبينه وعلمي أن النجاحَ لا يأتي إلى بالصبرِ والإصرارِ
إلى النورِ الذي أثارَ دربي والسراجَ لا ينطفئُ نوره بقلبي من بدلِ الغالي والنَفيس ولطالما استدميتُ قوتي
واعترازي بذاتي
تمنيثُ أن تكونَ حاضرا معي لتفخرَ بما وصلتُ إليه اليومَ فما هذا إلا حصادٌ لتعبك وجهودك جعلها الله
في ميزانِ حسناتك
والدي العزيز رحمة الله عليه

إلى من جعلَ الجنةَ تحتَ أقدامها وسهلتَ لي الشدائدَ بدُعائه
إلى من علّمتني القيمَ والمبادئَ إلى من كانتَ عونًا وسندًا عندَ الشدائدِ إلى من أضاءت في ليالي العتمة
طريقي على أن أحققَ طموحاتي إلى من أرادتَ دوماً أن تراني أتوج بقلادة الشرفِ التخرج
أمي الغالية اطل الله في عمرها وامدها بالصحة والعافية
إلى الصلحِ الثابت وأماني أيامي إلى من شددتْ عُصدي بهم فكانوا لي ينابيع أرتوي منها إلى خيرة أيامي
وصفوتها إلى قرة عيني....
إلى اخوتي واخواتي الغاليين وبأخص فاطمة الزهراء

لكل من كان عونًا وسندًا في هذا الطريق لأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين لأصحاب الشدائد والأزمات
قلمن أفاضني بمشاعره ونصائحه المخلصة إليكم عائلتي أهدىكم هذا الإنجاز وثمره نجاح التي لا طالما
تمنيتها أنا اليوم أكملت وأتممت أول ثمراته بفضلته سبحانه وتعالى فالحمد لله على ما وهبني وأن يجعلني
مباركا وأن يعينني أينما كنت فمن قال انا لها نالها.
واخر دعواهم أن ...

(الحمد لله رب العالمين)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **M. GOURARI Djamel Eddine**, mon encadrant de mémoire, pour son soutien indéfectible, ses conseils éclairés et son engagement sans faille tout au long de ce travail. Ses précieuses orientations ont grandement enrichi mes recherches et ont contribué de manière significative à la qualité de ce mémoire.

Je souhaite également remercier chaleureusement les membres du jury, **Professeur LIANI BACHIR**, et **Professeur BOUSSAID ABDELHAK** pour leur temps précieux, leurs remarques constructives et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Leurs suggestions pertinentes ont été cruciales pour l'amélioration de ce mémoire.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements au département physique de faculté science à Tlemcen pour son soutien logistique et administratif tout au long de ce parcours académique. Leur efficacité et leur professionnalisme ont grandement facilité la réalisation de ce projet.

Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous pour avoir rendu cette expérience enrichissante et mémorable. Vos contributions ont joué un rôle essentiel dans l'achèvement de ce travail de recherche.

Table des matières

I.1 Généralité et l'état de l'arc :	2
I.2 Le plasma :	2
I.3 Le plasma thermique :	3
I.4 La génération les plasmas thermiques :	4
I.5 Les applications industrielles de l'arc électrique :	6
I.5.1 Lampes à l'arc :	6
I.5.2 Les fours à arc électrique :	7
I.5.3 Les torches à plasma d'arc :	7
I.5.4 Bougie d'allumage :	8
I.5.5 La soudure :	8
Chapitre I : l'arc électrique	9
II.1 Présentation du procédé de soudage à l'arc TIG	9
II.2 Amorçage de l'arc TIG :	11
II.3 Les procédés de soudage TIG	11
II.4 Les paramètres modifiables par le soudeur	12
II.5 La modélisation du soudage à l'arc TIG	12
III Chapitre 3 : modèle mathématique	164
III.1 Géométrie du problème et domaine de calcul :	14
III.2 Les phénomènes physiques impliqués (l'aspect physique) :	15
III.2.1 L'effet joule :	16
III.2.2 La convection et la conduction (Loi de Fourier) :	16
III.2.3 Le rayonnement :	16
III.3 La force de Lorentz :	18
III.4 La force de Marangoni :	18

III.5Hypothèses :.....	18
III.6Équations gouvernantes	19
IV Chapitre IV : Résultat numérique	25
IV.1Validation du modèle :.....	25
IV.2Influence de la nature des gaz :.....	26
IV.2.1Température du plasma :.....	26
IV.2.2Changement de phase et température à la surface de l'anode :	28
IV.2.3Champs de vitesses :	30
IV.2.4Le potentiel électrique :.....	32
IV.2.5Les lignes des champs :.....	34
Conclusion	37
Référence	39

Introduction générale

L'arc électrique est « une forme de décharge à fort courant dans laquelle le courant peut croître pratiquement sans limite »[1], En 1753, Benjamin Franklin réussit à montrer la nature électromagnétique de la foudre[2], qui est un exemple d'arc naturel et elle correspond à un transfert de charges électriques d'origine atmosphérique. La maîtrise des arcs électriques par l'Homme remonte au XIXe siècle[1]. En 1813, Humphry Davy fit, pour la première fois, éclater une décharge continue entre deux charbons horizontaux. Les flux convectifs donnant à la colonne une forme courbée caractéristique, elle fut appelée « arc électrique »[3].

Le potentiel de convertir l'énergie électrique en énergie lumineuse ou thermique, ainsi que son utilisation comme réacteur dans certaines applications chimiques, a été rapidement réalisé par les ingénieurs. Malgré des travaux de recherche remarquables dès le début du XXe siècle, leur portée était limitée en raison du manque de données fondamentales de la physique moderne pour interpréter les phénomènes observés[3].

Ensuite, avec l'évolution des mathématiques appliquées aux équations de Navier-Stokes, des modèles théoriques unidimensionnels ont été introduits pour décrire le plasma d'arc. Cependant, ces modèles étaient limités dans les informations qu'ils pouvaient fournir en raison des hypothèses sous-jacentes à leur développement. Ce n'est qu'avec l'avènement des ordinateurs et des méthodes numériques que la recherche a connu une avancée majeure, rendant les modèles numériques bidimensionnels accessibles. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de mémoire pour modéliser un procédé de soudage à l'arc au gaz inerte de tungstène (TIG). Un modèle axisymétrique bidimensionnel de plasma d'arc intégrant un couplage fluide-solide a été développé en résolvant des équations électromagnétiques et thermiques à la fois dans le domaine gazeux et dans l'électrode solide. Ce modèle présente également la géométrie typique de la torche de soudure. Le modèle a été évalué à l'aide de nombreux exemples numériques liés à la distribution de la température, des champs de vitesse, du potentiel électrique dans le plasma.

Chapitre I : l'arc électrique.

I.1 Généralité et l'état de l'arc :

L'arc électrique concerne ses caractéristiques et son comportement dans différents contextes. Il s'agit d'une rupture diélectrique d'un gaz entre deux électrodes conductrices, connue également sous le nom de décharge d'arc, générant une décharge électrique prolongée et des températures très élevées capables de fondre ou vaporiser la plupart des matériaux. Les arcs électriques présentent des propriétés telles qu'une forte densité de courant, une température élevée et l'émission de lumière. Ces arcs sont influencés par des facteurs tels que la pression, la distance entre les électrodes et le type de gaz présent, et ils montrent une relation non linéaire entre le courant et la tension. Ils peuvent être entretenus par l'émission thermoïnique et l'émission de champ d'électrons à la cathode, avec des densités de courant très élevées. L'énergie des électrons dans l'arc se disperse rapidement dans les particules plus lourdes, créant un plasma en équilibre thermique. En somme, la généralité d'un arc électrique comprend sa forte densité de courant, sa relation tension-courant non linéaire, ses mécanismes d'initiation, ses températures élevées et la formation d'un plasma thermique. Ces caractéristiques définissent le comportement et les propriétés des arcs électriques dans diverses applications et environnements[4].

I.2 Le plasma :

Souvent désigné comme le quatrième état de la matière, le plasma est un gaz chaud partiellement ionisé. Il se compose d'un mélange d'ions, d'électrons et d'atomes, avec une charge électrique totale équilibrée. Ce mélange présente des propriétés physiques distinctes de celles de l'état gazeux, en particulier en ce qui concerne la conductivité électrique, qui atteint des valeurs beaucoup plus élevées. À une température de 15000K. Pour une échelle macroscopique donnée, appelée longueur de Debye, le plasma est électriquement neutre. Cette longueur est de l'ordre du micromètre pour un plasma d'argon à pression atmosphérique[2].

La longueur de Debye exprimée par :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} \quad (\text{II-1})$$

Ou n_e est la densité de la population d'électrons (m^{-3}). Ainsi, pour des volumes inférieures à $(\lambda_D)^3$ (sphère de Debye), la séparation locale des charges peut être observée, notamment aux abords du plasma et près des électrodes[2].

L'état physique d'un plasma homogène, contenu dans une enceinte isotherme à la température T , peut être décrit à l'aide de plusieurs variables macroscopiques (température, pression, concentration relative des différents constituants) sans qu'il soit nécessaire de connaître en détail tous les processus microscopiques mis en jeu. Dans ce cas, on dit que le plasma est en équilibre thermodynamique.

Lorsque cet état d'équilibre est atteint, la mécanique statistique permet de dériver un certain nombre de lois générales qui décrivent l'état de la matière et du rayonnement dans le milieu considéré.

- La loi de Maxwell régit la distribution de vitesse de chaque espèce (ion, électron, atome).
- La loi de Boltzmann exprime la densité des atomes excités à un niveau d'énergie.
- La loi de Saha lie les densités des différentes espèces.
- Le rayonnement émis suit la loi de Planck.

Quand la quatrième condition n'est plus valide, même si les trois premières le sont toujours, on ne parle plus d'ETC (Equilibre Thermodynamique Complet) ; on doit alors utiliser le terme ETL (Equilibre Thermodynamique Local).

I.3 Le plasma thermique :

Le plasma peut être créé dans diverses conditions, regroupées en deux grandes catégories : les plasmas chauds, qui sont en équilibre, et les plasmas froids, qui sont en déséquilibre. Dans notre travail, nous nous intéressons en particulier aux plasmas thermiques (un type de plasmas chauds) qui est un état de la matière dans lequel les particules sont suffisamment énergétiques pour être partiellement ionisées, créant ainsi un mélange de particules chargées (ions et électrons libres) et de particules neutres. Ce type de plasma est généré en chauffant un gaz à des températures très élevées, généralement plusieurs milliers de Kelvins ou plus et a une pression proche de la pression atmosphérique.[5].

I.4 La génération des plasmas thermiques :

Il est possible de générer un plasma thermique de différentes façons à partir d'un laser, par haute fréquence, par des micro-ondes ou par un passage d'un courant électrique à travers un gaz entre deux électrodes pour former une décharge électrique dans les gaz. Celle-ci évolue suivant une caractéristique courant-tension (figure 3.1). Différents types de décharges peuvent être identifiés : une phase initiale où la décharge n'est pas auto-entretenue, suivie d'une phase autonome. Initialement, la différence de potentiel entre les électrodes permet aux particules du gaz, initialement isolant, d'acquérir de l'énergie, produisant ainsi des charges libres. Cependant, ces charges libres sont initialement faibles et nécessitent une source externe pour maintenir la décharge, ce qui la rend non autonome[6].

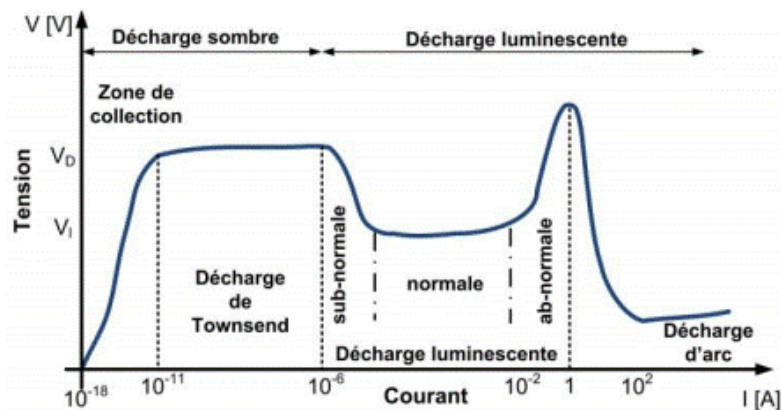


Figure II-1 : Evolution des types de décharges jusqu'à la formation de l'arc électrique[6].

La phase autonome, quant à elle, débute par la décharge dite de Townsend suivie de la décharge lumineuse pour aboutir à un arc électrique, les plasmas d'arc peuvent être classés selon le processus de génération de plasma par :

- **ARC Transféré D.C :**

Dans les réacteurs à arc transféré, Les électrodes (L'anode et cathode) sont très proches l'une de l'autre, à quelques millimètres à peine, maximums de 5 à 10 mm Pour éviter leur destruction due à la forte chaleur, elles sont refroidies par une circulation d'eau. L'arc ainsi créé chauffe un gaz plasmagène qui est soufflé entre les électrodes, formant un jet de plasma (voir la figure I.2). Ces chalumeaux ont la particularité de produire un plasma plus chaud et atteignant des vitesses plus élevées que les plasmas inductifs. Cependant, ils peuvent être contaminés par l'usure inévitable des électrodes. Ces chalumeaux sont également utilisés pour la déposition, et l'ajout d'une tuyère à la sortie du chalumeau est également possible[2].

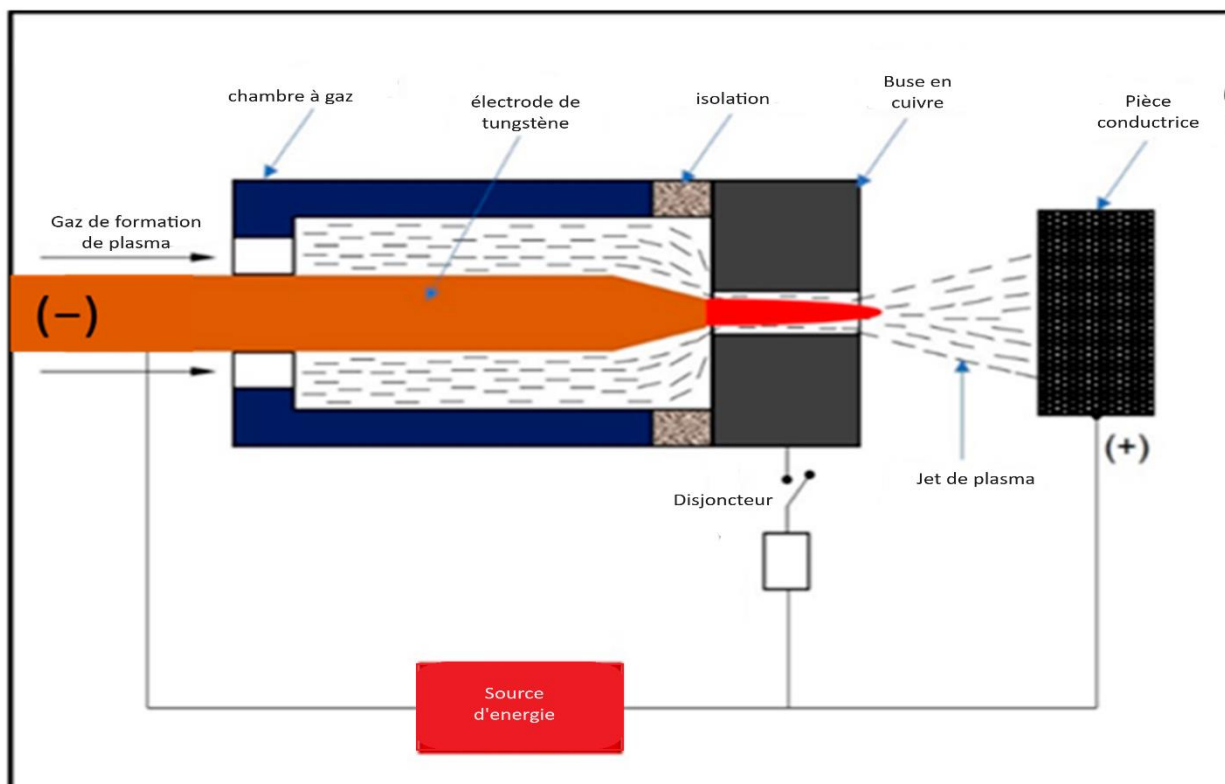


Figure II.2: Schéma de l'arc transféré[7]

- **ARC non transféré :**

Cette typologie de plasma d'arc se réfère à un système d'arc plasma non direct. Dans ce système, la buse en cuivre sert de cathode, connectée au terminal positif de la source d'alimentation en

courant continu, sans connexion directe à la pièce à travailler. L'arc électrique se forme entre l'électrode elle-même, le gaz plasmagène générant l'arc à travers la buse et le libérant à haute vitesse et haute température. Un jet de plasma peut atteindre des températures maximales de 30 kK et des vitesses allant jusqu'à 600 m/s. Différentes géométries d'électrodes sont utilisées dans ce système : la cathode est souvent une barre cylindrique, tandis que l'anode est un cylindre creux ou un ensemble de deux cylindres coaxiaux. Le refroidissement des électrodes est assuré par un système de refroidissement à eau. Les torches à arc non transféré peuvent atteindre des puissances de 1 à 6 MW. (Figure I.3) illustre un système d'arc non transféré[7].

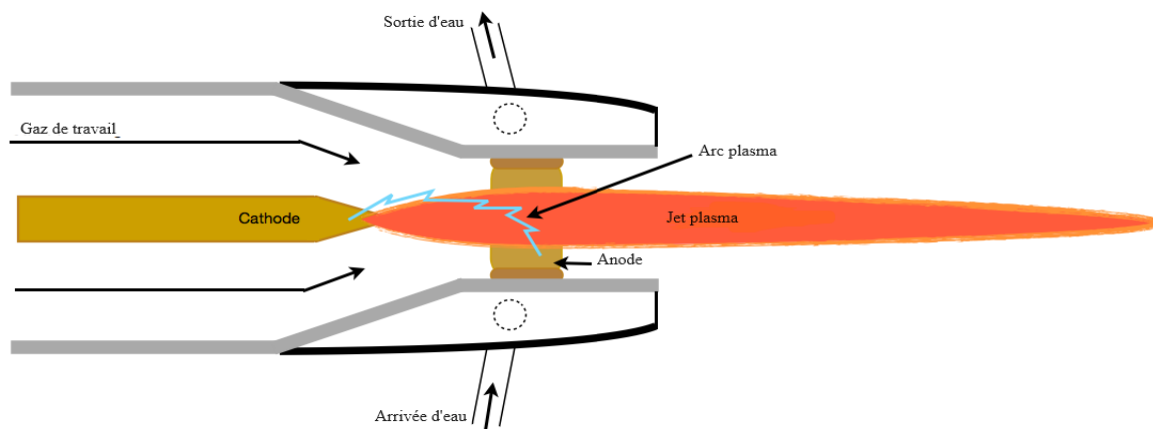


Figure I.3 : système d'arc non transférée[7]

I.5 Les applications industrielles de l'arc électrique :

La recherche sur les arcs électriques également stimulée par l'utilisation répandue de cette technologie dans l'industrie. En effet, les arcs électriques sont couramment employés dans divers domaines tels que :

I.5.1 Lampes à L'arc :

Une lampe à arc est un type de lampe électrique qui utilise un arc électrique pour produire de la lumière. Contrairement aux lampes à incandescence qui fonctionnent en chauffant un filament métallique jusqu'à ce qu'il émette de la lumière, les lampes à arc génèrent de la lumière en établissant un arc électrique entre deux électrodes. Dans une lampe à arc typique, les électrodes

sont placées dans un environnement rempli de gaz ou de vapeur, comme du mercure ou du xénon. Lorsqu'un courant électrique est appliqué entre les électrodes, il crée un arc électrique qui excite les atomes du gaz ou de la vapeur, produisant ainsi de la lumière. Les lampes à arc sont utilisées dans diverses applications, notamment l'éclairage de grands espaces, comme les stades et les terrains de sport, ainsi que dans les projecteurs de cinéma et les systèmes d'éclairage de scène. Elles offrent une luminosité élevée et une efficacité énergétique relativement bonne par rapport aux autres types de lampes. Cependant, elles peuvent nécessiter des dispositifs spéciaux pour démarrer et stabiliser l'arc électrique, ainsi qu'une ventilation adéquate pour dissiper la chaleur générée par l'arc.

I.5.2 Les fours à arc électrique :

Les fours électriques à arc sont largement employés dans la production d'acier ainsi que dans la fusion des métaux non ferreux. Au cœur des mini-aciéries, ces fours sont essentiels pour la transformation principalement de ferrailles en acier. Typiquement, ces fours fonctionnent à des niveaux de puissance variant de 1 MW à 100 MW, directement proportionnels au débit de production. Il est crucial de maintenir un contrôle précis de la puissance moyenne, minimisant ainsi les fluctuations, afin d'éviter tout dommage au four et d'éviter les déclenchements des disjoncteurs en cas de surtension. Pour cela, il est nécessaire de disposer de modèles dynamiques fiables pour les fours électriques à arc[8].

I.5.3 Les torches à plasma d'arc :

Les torches à plasma d'arc sont des systèmes dynamiques qui convertissent l'énergie électrique dissipée dans les gaz formant le plasma en jets de plasma à haute température. Identifiées au XXe siècle, elles se sont révélées être des systèmes de chauffage au gaz très efficaces pour la synthèse chimique et le traitement des matériaux, incluant des applications comme le découpage, le soudage, la fusion et même la pulvérisation[9]. Aujourd'hui, elles sont utilisées comme une solution de recyclage pour les déchets dangereux (résidus d'incinération, amiante, déchets faiblement radioactifs, poussières, déchets industriels, ...) afin d'éviter l'enfouissement en décharge et le recyclage des "déchets ultimes" (déchets de déchets)[10].

I.5.4 Bougie d'allumage :

Bougie d'allumage est une pièce responsable de créer l'étincelle dans le cylindre, déclenchant ainsi l'explosion du carburant dans un moteur à explosion, comme ceux utilisés dans nos motos et voitures actuelles. Autrefois, une seule et même bougie pouvait être utilisée pour tous types de véhicules, car il suffisait alors de produire une étincelle sans se préoccuper de ses caractéristiques spécifiques ni des problèmes de dissipation de chaleur du moteur[10].

I.5.5 La soudure :

Il existe plusieurs techniques de soudure, chacune adaptée à des applications spécifiques et des types de matériaux différents (Soudage à l'arc manuel (SMAW), l'arc sous flux (SAW), l'arc submergé (SAW), soudage à l'arc avec électrode de tungstène), la technique de soudage à l'arc manuel les plus courantes et polyvalentes, cette méthode utilise un arc électrique entre une électrode enrobée et la pièce à souder pour créer une fusion entre les matériaux. Cette application va être longuement développé tout au long de ce mémoire.

Chapitre II : La soudure TIG

II.1 Présentation du procédé de soudage à l'arc TIG

II.1.1 Présentation - Définition

Le procédé de soudage à l'arc (Tungsten Inerte Gas TIG) implique la fusion des surfaces de deux pièces pour les assembler, assurant ainsi une continuité métallique. Il peut être manuel ou automatisé, avec ou sans ajout de métal. Dans ce processus, un arc électrique est créé entre une électrode réfractaire (la cathode) et la pièce à souder (l'anode), dans un gaz de protection qui se transforme en plasma. L'énergie thermique est transférée au métal par le plasma, qui se propage sur la zone à souder. L'argon est généralement utilisé comme gaz inerte, mais il peut être mélangé à de l'hélium ou de l'hydrogène pour modifier les propriétés du joint. L'électrode n'est pas consommée. Pour les alliages légers comme l'aluminium, le soudage se fait en polarité alternée pour éliminer l'oxyde d'aluminium. Le soudage est un processus d'assemblage qui fond les bords des pièces pour obtenir un joint homogène ou hétérogène, selon les métaux utilisés. Cette opération peut être comparée à un traitement thermique local qui affecte la structure cristalline du métal. Ainsi, la soudure présente plusieurs zones distinctes après sa réalisation[11], [12].

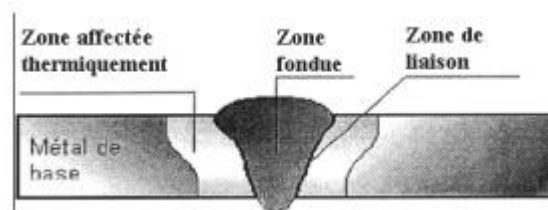


Figure II-1 : Cordon de soudure[11]

- **La zone fondue** : La région liquide appelée bain métallique est composée du métal de base et éventuellement du métal d'apport. Le liquide métallique est entraîné par les forces à la surface et à l'intérieur de cette zone, ce qui a un impact sur la forme du bain. Plusieurs dimensions géométriques distinguent cette zone fondue : la largeur, la longueur, la profondeur et la surface supérieure. L'évaluation des dimensions d'une soudure se fait

généralement en établissant le rapport entre la largeur et la profondeur. La forme en trou de serrure (keyhole) est utilisée lorsque la zone fondue est étroite mais profonde[13].

- **La zone affectée thermiquement (ZAT) :** Elle se trouve en bordure de la zone fondue et varie en largeur. Elle a augmenté de température mais n'a pas fusionné. Dans cette zone, le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement provoquent des changements plus ou moins importants de la structure métallurgique.
- **La zone de liaison :** Il se situe à la limite de la zone fondue et de la ZAT. Elle correspond à la zone où le métal fondu commence à se solidifier.
- **Le métal de base :** Dans ce secteur, l'augmentation de la température n'est pas assez importante pour entraîner des changements structurels. Elle est aussi appelée zone non touchée.

Le soudage possède également des propriétés thermiques particulières, telles que :

- Les fluctuations rapides de température (augmentation et diminution).
- Le temps de maintien de la température maximale est court.
- Le point chaud est localisé, ce qui entraîne un gradient de température important entre les zones chaudes et froides.

La structure métallurgique des différentes zones de la soudure est affectée par ce cycle thermique. Selon la chimie du matériau, un cycle rapide peut entraîner une structure fragile ou, au contraire, une structure douce et ductile. Le soudage est donc une opération métallurgique extrêmement complexe, qui demande l'attention à divers éléments :

- Le matériau de base, sélectionné en fonction des caractéristiques mécaniques et chimiques de la pièce à fabriquer.
- La composition chimique de la zone fondue est influencée par le trio comprenant le métal d'apport, le métal de base et le gaz de soudage. Le choix du métal d'apport est basé sur la qualité et les caractéristiques nécessaires pour la soudure.
- L'énergie de soudage, qui régule le flux de chaleur, a un impact sur la structure de la zone fondue et de la zone de fusion[11].

II.2 Amorçage de l'arc TIG :

Il est possible de commencer l'arc soit par contact direct, soit par une surtension entre les deux électrodes. Il est nécessaire que cette surtension dépasse une valeur critique, connue sous le nom de tension de claquage, qui dépend de la pression, de la distance entre les électrodes et de la nature du gaz plasmagène injecté autour de l'électrode réfractaire. L'arc et le générateur de courant sont soumis à une surtension d'environ 1000 V via un circuit haute fréquence (environ 1000 kHz), soit en série, soit en parallèle. On peut aussi effectuer l'amorçage par contact. Il est nécessaire que l'énergie fournie soit adéquate pour élever la température du gaz à 8000 K, ce qui entraîne la formation d'un plasma thermique[12].

II.3 Les procédés de soudage TIG

Le soudage consiste à fusionner ou à pressonner des matériaux, principalement des métaux, afin de créer une liaison permanente, souvent avec l'ajout d'un matériau d'apport. Il y a différentes méthodes de soudage, chacune offrant des applications et des bénéfices particuliers :

- **Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)** : Utilise une électrode non consommable en tungstène et un gaz inerte (comme l'argon ou l'hélium) pour protéger la soudure de l'oxydation. Ce procédé est connu pour sa précision et la qualité de ses soudures.
- **Soudage MIG (Metal Inert Gas)** : Une forme de soudage à l'arc utilisant un fil-électrode consommable et un gaz inerte ou semi-inerte pour protéger la zone de soudure. Idéal pour souder des métaux non ferreux comme l'aluminium.

II.4 Les paramètres modifiables par le soudeur

Les conditions de soudage varient selon l'assemblage à effectuer (matière, épaisseur, position de soudage). Avant de procéder à la soudure, le soudeur doit d'abord sélectionner le matériel à utiliser : soudure (automatique, manuelle),

-Une soudure de meilleure qualité. Plus précisément, il est nécessaire de sélectionner le type de courant (pulsé, continu...), ainsi que l'intensité (allant d'une dizaine d'Ampères à environ 400 A). La valeur de 100A est fréquente.

-L'arc a une hauteur de quelques millimètres. Les valeurs de 2 à 3 mm sont courantes.

-La tension peut atteindre une dizaine de volts si la hauteur d'arc est incorrecte.

-Le diamètre de l'électrode de soudage (angle d'adaptation, matériau) ainsi que le diamètre de la buse. {La sélection et la quantité de gaz de couverture (de 5 à 20 litres par minute).

-La rapidité de soudage (environ quelques dizaines de $cm. min^{-1}$)[12].

II.5 La modélisation du soudage à l'arc TIG

La solidification de la soudure entre les pièces à assembler durant le soudage constituent une des difficultés rencontrées, entraînant de grandes déformations qui nécessitent souvent des opérations de redressement, augmentant ainsi le temps de production. Ce sujet de recherche a été étudié pendant de nombreuses années, et de nombreux articles dans la littérature ont abordé des problèmes industriels et Pour modéliser les procédés de soudage de manière exhaustive, il est nécessaire d'analyser les phénomènes physiques qui se déroulent à différentes échelles [11].

À l'échelle macroscopique, qui concerne la pièce dans son ensemble, on étudie son évolution thermomécanique pour déterminer les contraintes et les distorsions résiduelles, À l'échelle mésoscopique, qui se concentre sur le bain liquide formé pendant le soudage, on analyse les interactions se produisant directement sous l'arc, telles que le plasma et la forme du bain liquide. Et à l'échelle microscopique, qui se focalise sur la structure du cordon de soudure au niveau des grains, on examine les phénomènes liés à la solidification rapide du matériau, comme la germination et la

croissance de grains dendritiques ou eutectiques, ainsi que les changements de phase à l'état solide[11].

Le soudage TIG (Tungstène Inerte Gas) est largement utilisé pour l'assemblage de pièces métalliques dans diverses applications industrielles, comme le souligne Tashiro et al. [14]. Une des principales difficultés rencontrées lors du soudage réside dans la fusion locale et la re-solidification du cordon de soudure, ce qui entraîne souvent de grandes déformations nécessitant des opérations de redressement, augmentant ainsi le temps de production. Ce problème a été largement étudié au fil des années et de nombreux articles de la littérature en discutent [15]. Par exemple, Brickstad et al. [16] ont examiné la formation de contraintes résiduelles dans les tuyaux soudés bout à bout utilisés dans les centrales nucléaires. Capriccioli et al. [17] ont développé un modèle par éléments finis en utilisant la technique de « naissance et mort » des éléments pour modéliser le matériau de remplissage. De même, Mousavi et al. [18] ont analysé l'effet de l'angle rainuré sur la répartition des contraintes résiduelles lors du soudage TIG. Lundbäck et al. [19] ont effectué des calculs et des expériences avec deux plaques sans matériau de remplissage et ont démontré la sensibilité du modèle au flambement. Honggang et al. [20] ont mis au point un modèle 3D d'un processus de soudage double face utilisant une torche à plasma d'un côté et une torche à arc de tungstène gazeux (GTA) de l'autre. Zhan et al. [21] ont développé un modèle 3D d'un procédé de soudage hybride laser-gaz inerte (MIG), basé sur différentes sources de chaleur sans considération de l'arc. Zhang et al. [22] ont étudié le soudage hybride laser-MIG en mode trou de serrure et développé une approche pour l'interface solide-liquide-gaz. Tchoumi et al. [23] ont examiné le rôle des paramètres de procédé dans le soudage de tôles d'acier inoxydable pour anticiper et réduire les déformations mécaniques. L'efficacité du transfert d'énergie, influençant les déformations, a été étudiée par Dupont et al. Pour plusieurs procédés de soudage, estimant l'efficacité moyenne de l'arc à $0,67 \pm 0,05$ pour le processus GTAW (TIG).

Une étude de dynamique des fluides computationnelle (CFD) de l'arc électrique est proposée dans le présent travail pour fournir les principales caractéristiques du flux de plasma pour le processus de soudage TIG et comprendre le comportement du gaz et du flux de plasma lors des opérations de soudage. Ceci fait actuellement l'objet de plusieurs travaux de recherche.

Chapitre III : modèle mathématique

III.1 Géométrie du problème et domaine de calcul :

Le schéma du dispositif étudié dans ce mémoire est représenté sur *Figure III.1* Il s'agit d'une cathode réfractaire pointue en tungstène, une pièce à souder, en acier inoxydable AISI 4340 constitue l'anode. Le dispositif possède une symétrie par rapport à l'axe vertical (oz), ainsi qu'une symétrie physique des conditions aux limites. Ces deux symétries nous permettent de réduire la nature tridimensionnelle (3D) à un problème (2D) axisymétrique.

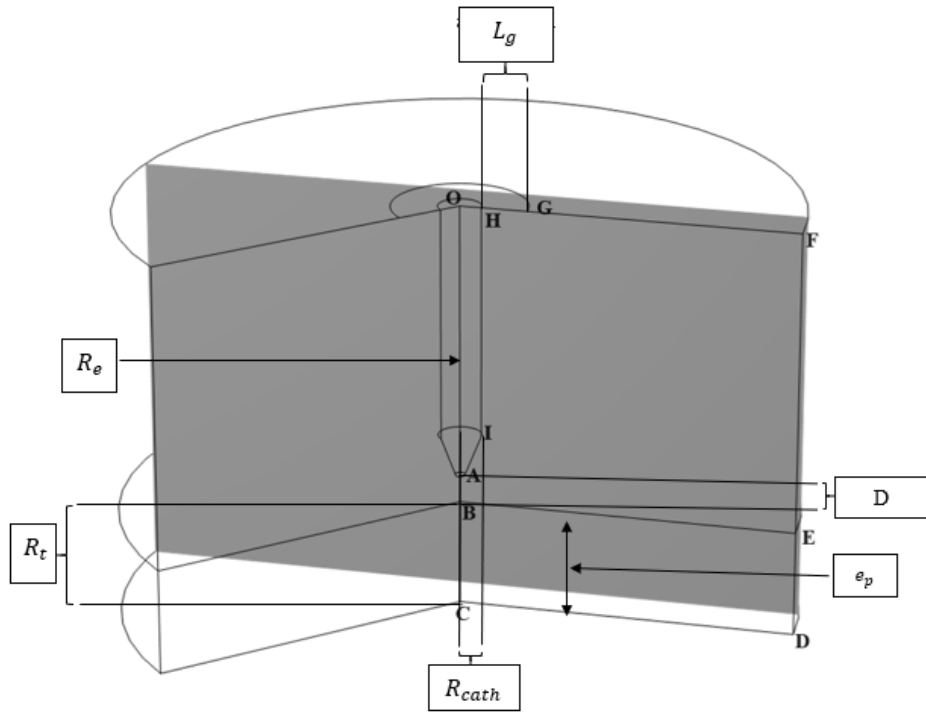


Figure III.1 : Géométrie (3D) de système soudure à TIG

La géométrie comprend à la fois la zone du plasma (ABEFGHIA) et du métal (BCDEB). Une coupe selon le plan (xz) est illustrée sur la Figure III-1. Segment (OHIAO) représente la limite de la cathode (qui n'est pas incluse dans le domaine).

On retrouve les grandeurs géométriques qui sont fixées :

R_{cath} : est le rayon de la cathode (1,6 mm).

R_t : est le rayon de la partie tronquée de l'anode (0,5 mm).

D : est la distance entre les deux électrodes (de 5 à 10 mm selon les simulations).

e_p : est l'épaisseur du métal (5 mm).

R_e : est le rayon extérieur de la géométrie (15 mm).

L_g : est la largeur d'entrée du gaz de protection (3 mm).

III.2 Les phénomènes physiques impliqués (l'aspect physique) :

Cette partie est consacrée à la description des phénomènes physiques gouvernant l'arc. Les différents phénomènes détaillés dans cette partie sont illustrés sur la Figure III.2. Nous nous sommes limités sur les phénomènes essentiels étudiés durant la simulation.

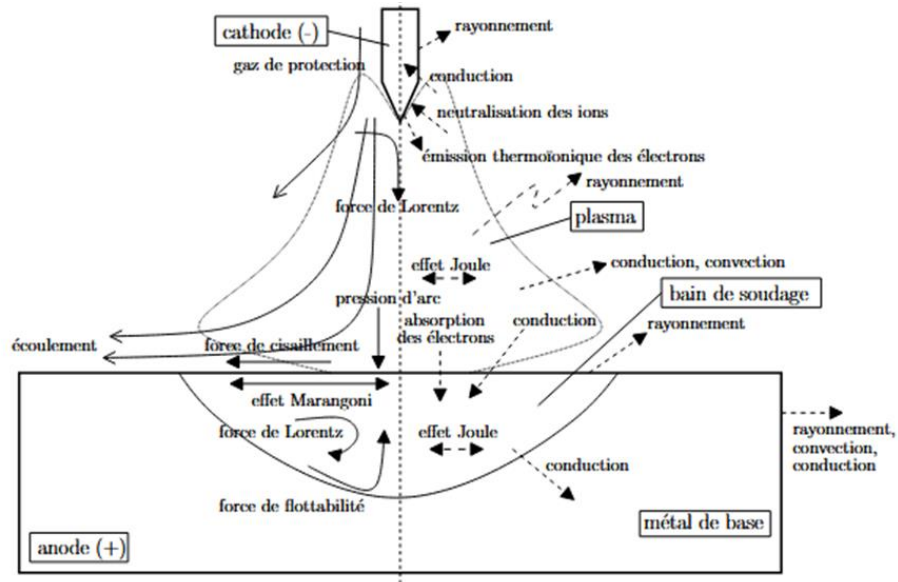


Figure III-2: phénomène physique pris en compte pour la description de l'arc et du bain de soudage[12]

III.2.1 L'effet joule :

L'effet Joule est la principale source d'énergie dans le plasma. Il contribue à 97 % dans la création de chaleur [12]. Il est le résultat des collisions des porteurs de charge qui assurent le passage du courant dans le milieu qu'ils traversent. L'énergie est ensuite distribuée par conduction (loi de Fourier), par convection et par rayonnement à l'ensemble du plasma. La température atteinte dans le plasma est élevée comparés à celles des électrodes (à cause de la valeur élevée de la conductivité électrique du métal constituant l'électrode par rapport à la conductivité du plasma).

III.2.2 La convection et la conduction (Loi de fourrier) :

Ces deux modes de transfert thermique sont très répandues dans le plasma à cause de la grande variation de la masse volumique de la masse fondue et du gaz plasmagène en fonction de la température. Le flux de conduction est lié au gradient de température entre les deux milieux. L'ensemble des modèles prennent en compte cette contribution soit par la loi de Fourier soit par un coefficient de transfert par conduction ou de convection.

III.2.3 Le rayonnement :

Lorsque la température augmente, les particules interagissent et produisent de nombreux processus d'émission, de sorte que le plasma rayonne et perd de l'énergie, en fonction de la nature du plasma et de ses propriétés.

Dans un plasma, les phénomènes radiatifs sont causés par le transfert d'énergie au niveau des électrons, qu'ils soient libres ou liés à un atome. Lorsqu'il y a une transition électronique entre deux orbitales d'un atome, cela donne lieu à une raie spécifique dans le spectre, car l'énergie des niveaux initial et final est fixe. On appelle cela une transition lié-lié.

Cependant, lorsque l'énergie de la transition n'est pas prédéterminée, on observe un continuum de rayonnement réparti sur une large zone du spectre. Cela se produit lorsque les électrons libres du plasma interagissent avec les atomes, créant des transitions libres-liées ou libres-libres.

Les transitions lié-lié donnent des raies de spectre distinctes et caractéristiques, permettant ainsi l'identification des éléments présents dans le plasma. Ces transitions sont souvent utilisées en spectroscopie pour l'analyse des plasmas.

D'autre part, les transitions libres-liées ou libres-libres donnent lieu à un rayonnement continu, sans raies discernables. Ce continuum de rayonnement peut être observé sur une large plage de longueurs d'onde dans le spectre et est souvent associé à des processus de recombinaison et d'ionisation dans le plasma.

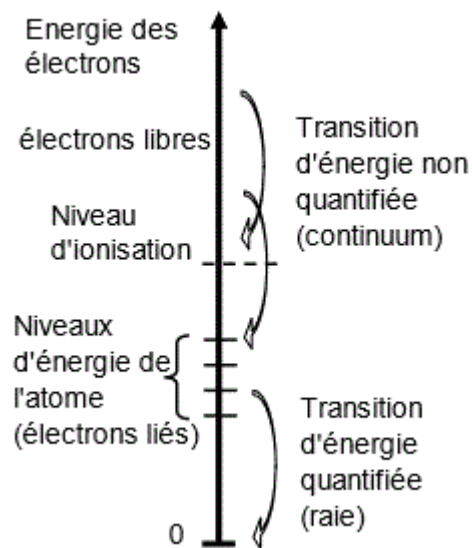


Figure III-3: les différents types de transitions électroniques donnant lieu à des phénomènes radiatifs.[1]

Le rayonnement issu de la soudure est élément considérable de perte d'énergie. En effet, il a été montré que la puissance rayonnée correspond environ à 1/4 de la puissance injectée dans le plasma [12]. La majorité des travaux actuels se limite souvent à l'utilisation d'un coefficient d'émission nette qui représente en général une bonne approximation de l'énergie que perdent par rayonnement les régions les plus chaudes du plasma (parce que les gradients de température y sont souvent les plus faibles), et il permet donc un calcul correct de la température dans ces régions.

III.3 La force de Lorentz :

La force de Lorentz est la force résultante de l'action de la composante magnétique et électrique sur ces porteurs de charge. Pour un plasma globalement neutre, la composante due au champ électrique s'annule. La force de Lorentz se ramène donc à la force de Laplace, Cette force volumique est directement proportionnelle à la densité de courant et à l'intensité du champ magnétique, L'effet de la force sur les porteurs individuels est illustré en haut de la figure suivante : la force entraîne un déplacement en fonction du signe de la charge de la particule[13].

III.4 La force de Marangoni :

La force de Marangoni est une force surfacique qui a son origine au niveau moléculaire. Elle pourrait être considérée comme une force de cisaillement (et donc incluse dans le tenseur des contraintes visqueuses à la surface). Cette force dépendante de la température ainsi que de la composition chimique des matériaux, elle influence directement le sens d'écoulement. Si le coefficient de thermo dépendance du gradient de tension de surface est positif, alors l'écoulement est dirigé vers l'extérieur du bain. Si ce terme est négatif, l'écoulement est dirigé vers le centre du bain.

III.5 Hypothèses :

La modélisation du plasma peut se faire suivant différentes approches : cinétique, en tenant compte de toutes les interactions entre les particules et leurs mouvements ; mono fluide, en supposant que le plasma est un gaz unique ; et multi fluides, en considérant chaque espèce comme un fluide à part entière. Dans notre étude, le plasma est considéré comme un fluide, aux vues de sa température suffisamment élevée. Le libre parcours moyen est par conséquent suffisamment bas, pour considérer les phénomènes d'un point de vue macroscopique et se baser sur les lois de la mécanique des fluides. Le plasma est donc assimilé à un fluide newtonien faiblement compressible, et est décrit par les équations hydrodynamiques auxquelles s'ajoutent les équations électromagnétiques. De plus, la gravité est négligée et l'écoulement est supposé laminaire. L'érosion de l'anode n'est

pas prise en compte contrairement à son changement de phase et le plasma en état stationnaire est supposé à l'ETL et composé des gaz purs qui sont : l'azote, l'hélium et l'argon.

III.6 Équations gouvernantes

Le plasma créé par l'arc électrique pour la soudure, est considéré comme un fluide Newtonien, nécessitant la résolution des équations hydrodynamiques (de Navier Stokes) couplées aux équations de l'électromagnétisme afin de décrire l'évolution du système.

Ces équations peuvent être mises sous la forme généralisée suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}}_{\text{Terme temporel}} + \underbrace{div(\rho\vec{v}\Phi)}_{\text{Terme convectif}} = \underbrace{div\left(\Gamma_{\Phi}\overrightarrow{grad}(\Phi)\right)}_{\text{Terme diffusif}} + \underbrace{S_{\Phi}}_{\text{Terme source}} \quad (III-1)$$

Avec :

Γ_{Φ} Le coefficient de diffusion.

S_{Φ} Le terme source.

Φ La grandeur que l'on souhaite à résoudre.

La description de l'état plasma nécessite alors la résolution des équations de conservation de la masse, des quantités de mouvements et de l'énergie. De plus, nous résolvons les équations de conservation électriques, pour tenir compte du potentiel électrique et du champ magnétique (à travers le potentiel vecteur).

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = s_m \quad (\text{III-2})$$

Comme nous avons évoqué précédemment, l'érosion de l'anode n'est pas prise en compte. Ceci nous mène à considérer que le terme source de l'équation de conservation de la masse, s_m , est nul. Notons aussi que la masse volumique ρ est une donnée de base nécessaire pour la suite de notre simulation, alors elle est supposée constante pour les solides (électrodes) et elle est tabulée [24] en fonction de la température pour les trois gaz étudiés comme le montre Tableau III.I et la Figure III.4.

Electrode	Masse volumique (kg/m ³)
Cathode (tungsten)	17800
Anode (Stainless steel)	7850

Tableau III.I : masse volumique des solides.

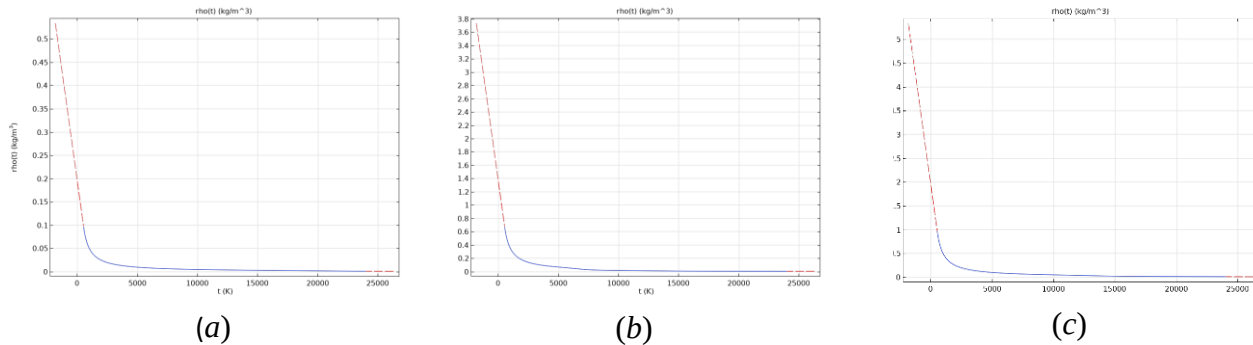


Figure III-4: la dépendance en température de la masse volumique des gaz étudiés : (a) : Azote 'N₂' ; (b) : Hélium 'He' ; (c) : Argon 'Ar' [25], [26]

Conservation de la quantité de mouvement :

D'après le principe fondamental de la dynamique, la variation de quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures qui s'exercent sur la particule fluide : des forces volumiques qui sont la force de gravité (négligé dans notre cas) et la force de Lorentz, les forces de contrainte volumiques (force due à la pression et forces visqueuses) représentées par la divergence du tenseur des contraintes et les forces surfaciques (négligés aussi dans notre étude) qui sont la force de Marangoni et la force de flottabilité. L'équation s'écrit alors :

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \cdot v) = \vec{\nabla} \cdot (\mu_e \vec{\nabla} v) + S_v \quad (\text{III-3})$$

Avec : $S_v = -\vec{\nabla}(P) + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \vec{F}_l$

Le tenseur des contraintes visqueuses : $\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}$ s'écrit sous la forme[24].

$$\vec{\tau} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \right) \quad (\text{III-4})$$

Où μ est la viscosité dynamique des gaz, elle est très dépendante de la température dans le plasma comme illustré sur Figure III.5.

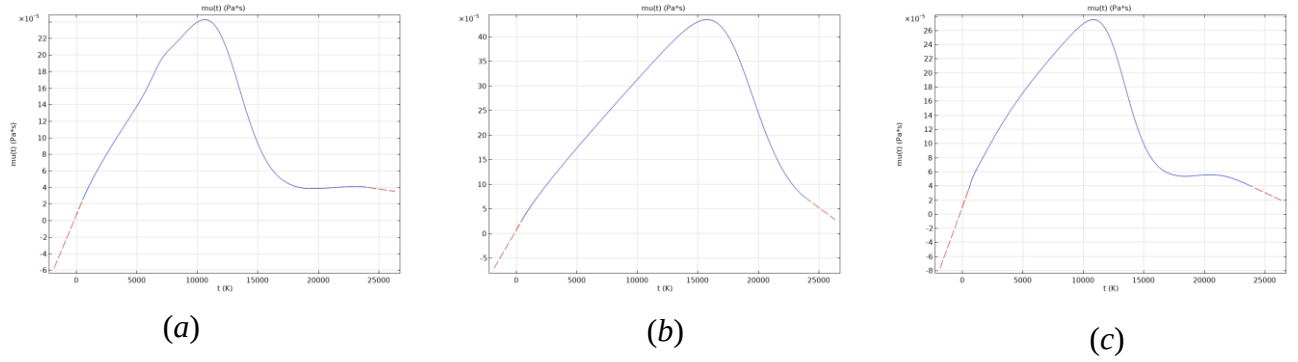


Figure III-5: la dépendance en température de la viscosité dynamique des gaz étudiés : (a) : Azote 'N2' ; (b) : Hélium 'He' ; (c) argon 'Ar'[25], [27]

Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{k}{c_p} \vec{\nabla} H \right) + S_{joule} - S_{ray} + S_{enth} \quad (\text{III-5})$$

- L'effet joule : $S_{joule} = \frac{j^2}{\sigma}$
- Les pertes par rayonnement : $S_{rad} = 4\pi\epsilon_N$
- Le flux enthalpique des électrons : $S_{enth} = \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} j \cdot \vec{\nabla} \left(\frac{T}{c_p} \right)$

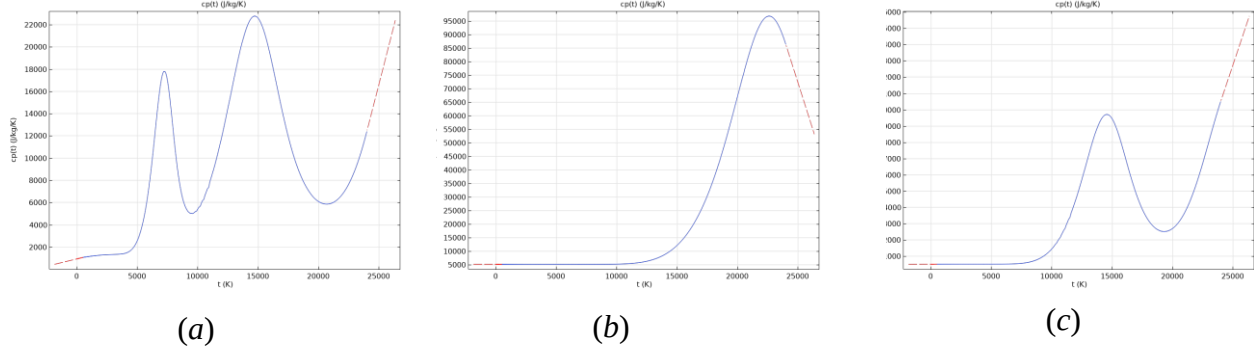


Figure III-6 : la dépendance en température de la capacité thermique des gaz étudiés : (a) : Azote 'N2' ; (b) : Hélium 'He' ; (c) : argon 'Ar'[25], [26]

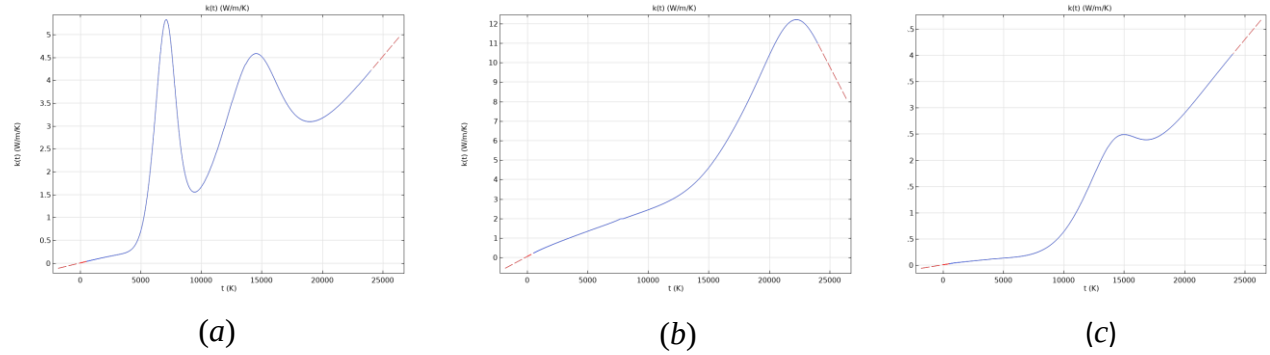


Figure III-7: la dépendance en température de la conductivité thermique des gaz étudiés : (a) : Azote 'N2' ; (b) : Hélium 'He' ; (c) : argon 'Ar'[25], [27]

Conservation du potentiels scalaire et vecteur :

Les deux équations supplémentaires pour considérer les couplages électromagnétiques et pour lesquelles une équation de conservation est résolue sont le potentiel électrique ϕ et la composante axiale A_z du vecteur potentiel magnétique :

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\sigma r \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] = 0 \quad (\text{III-6})$$

$$-\frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) = \mu_0 j_z \quad (\text{III-7})$$

Dans laquelle la conductivité électrique σ dépend de la température T comme illustré sur Figure III.8, et z et r représentent respectivement les directions axiale et radiale. μ_0 Est la perméabilité de vide, et j_z est la composante axiale de la densité de courant $\vec{j}$ (A/m²) :

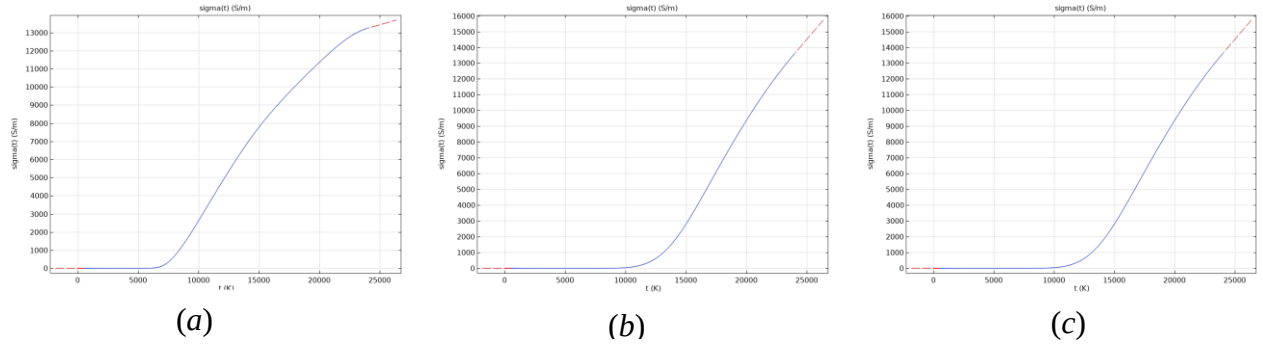


Figure III-8 : la dépendance en température de la conductivité électrique des gaz étudiés : (a) : Azote 'N₂' ; (b) : Hélium 'He' ; (c) : argon 'Ar' [25], [27]

$$\vec{j} = \begin{pmatrix} j_z \\ j_r \end{pmatrix} = -\sigma \begin{pmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi}{\partial r} \end{pmatrix} \quad (\text{III-8})$$

La première composante j_z de $\vec{j}$ est calculée à partir du champ de potentiel électrique ϕ obtenu à partir de l'équation (III.6) et est ajoutée en tant que terme source dans le côté droit de l'équation (III.7). De plus, la composante rotationnelle du champ magnétique est calculée à partir de :

$$B_\theta = -\frac{A_z}{\partial r} \quad (\text{III-9})$$

Les différentes composantes de la force de Lorentz $\vec{F}_l$ sont calculés à partir du produit vectoriel entre la densité de courant $\vec{j}$ et le champ magnétique $\vec{B}$:

$$\vec{F}_l = \begin{pmatrix} F_z \\ F_r \end{pmatrix} = \vec{j} \wedge \vec{B} = \begin{pmatrix} j_r B_\theta \\ -j_z B_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \\ -\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \end{pmatrix} \quad (\text{III-10})$$

Ce qui va être injecté comme membre de droite dans les équations de Navier-Stokes

- Conditions aux limites :

	PLASMA :(AB)	Anode :(BC)	Air Ambiant :(CE) et (HE)	Entrée de gaz :(GF)	Entrée de cathode :(OG)	Astuce cathodique :(AI)
u : vitesse axiale du plasma	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$	0	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$	$\frac{Q_m}{\rho A}$		$\frac{\partial u}{\partial n} = 0$
v : vitesse radiale du plasma	0	0	$\frac{\partial v}{\partial r} = 0$	0		$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$
T : Température	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	288K	288K Si entrant	288K	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	Couplage solide- fluide
ϕ : potentiel électrique	$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$	0	$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{j}{\sigma} = \frac{I}{\sigma S}$	Couplage solide- fluide
A_z : composante axiale du vecteur potentiel	$\frac{\partial A_z}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z}$	$\frac{\partial A_z}{\partial n} = 0$	0	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	Couplage solide- fluide
Y_{Ar} : fraction massique d'argon	$\frac{\partial Y_{Ar}}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial Y_{Ar}}{\partial z} = 0$	0 Si entrant	1		$\frac{\partial Y_{Ar}}{\partial n} = 0$

Tableau III-2 : conditions aux limites le long des Lognes définies par les lettres de la figure III.2

Chapitre IV : Résultat numérique

Les résultats numériques prédits avec le modèle ci-dessus sont présentés dans cette section, Tous les calculs sont effectués avec des intensité de courant de 100 ;150 et 200 A, une vitesse d'entrée du gaz $U_0=3\text{m/s}$ (la ligne GH Figure III.1) et une distance inter-électrode de 5 mm sauf pour des cas de confrontation avec la littérature où cette distance peut être variée à 1 ou 2 mm. Chaque sous-section est dédiée à une quantité physique spécifique, telle que les champs de température du plasma pour les 3 gaz plasmagène, la vitesse du plasma et son potentiel électrique, les gradients les plus forts sont observés entre la pointe de la cathode et l'anode. Des profils axiaux sont fournis le long de l'axe de symétrie de la torche (c'est-à-dire la ligne AB de la figure III.1). Le long de cette ligne, la pointe de la cathode est la position de départ ($x = 0 \text{ mm}$), tandis que la paroi de l'anode correspond à la position finale ($x = 5 \text{ mm}$). Un autre paramètre que nous avons jugé intéressant et la température en profondeur de la zone affecté thermiquement (c'est-à-dire la ligne BC de la figure III.1), donc les températures seront présentées sur cette ligne aussi. La température dans la zone de l'accrochage de l'arc sur l'anode traduit le transfert énergie arc-anode donc la température de cette zone sera présentée en fonction de la nature du gaz plasmagène (la ligne BE de la figure III.1).

IV.1 Validation du modèle :

La figure IV.1 présente une comparaison des champs de température et des isothermes, de 10 000 K à 26 000 K, calculés à partir du modèle décrit dans le chapitre précédent (à droite) avec les travaux de H. Wang et al. [28] (à gauche). Les simulations étaient faites sous les mêmes conditions de ce travail i.e. un arc de longueur 5cm sous atmosphère d'azote avec un courant de 200 A. On constate que les trois isothermes à moins de 18000K collent bien avec les résultats présentés dans[28], à partir de 18000 K i.e. dans le cœur de l'arc les isothermes présente les mêmes formes dans les deux cas et on remarque aussi que pour les profils de température de la colonne du plasma, les résultats de notre modèle sont en accord avec les résultats de la littérature faites sous les mêmes conditions.

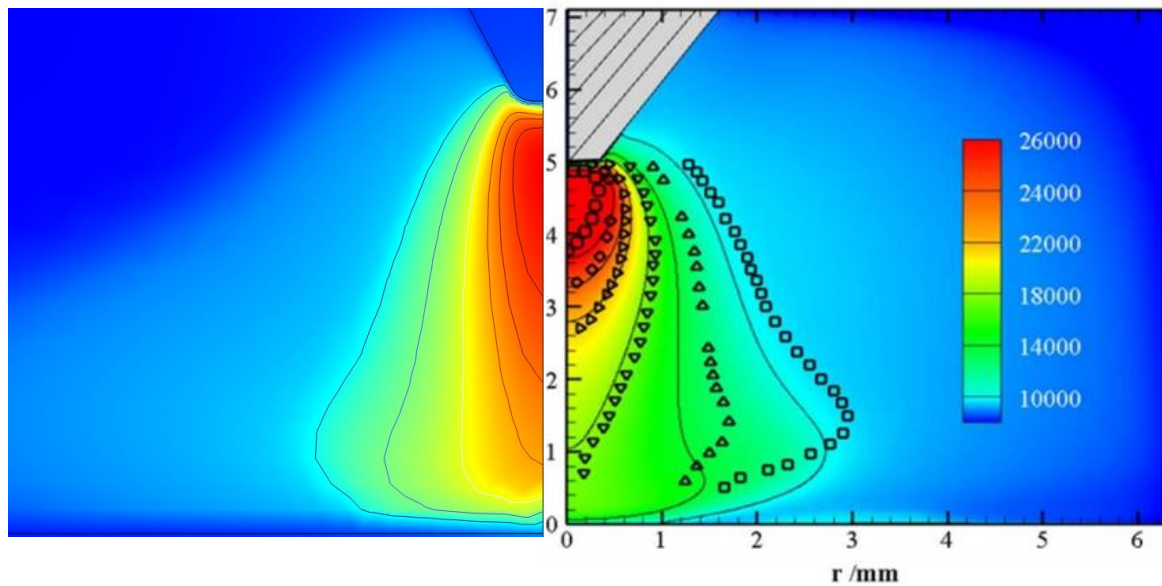


Figure IV-1 : Confrontation des isothermes et champs de température pour un plasma d'argon avec $I=200$ A et $d=5$ mm. À droite les résultats expérimentaux et simulations de H. Wang et al. [28]. À gauche, les résultats de notre modèle.

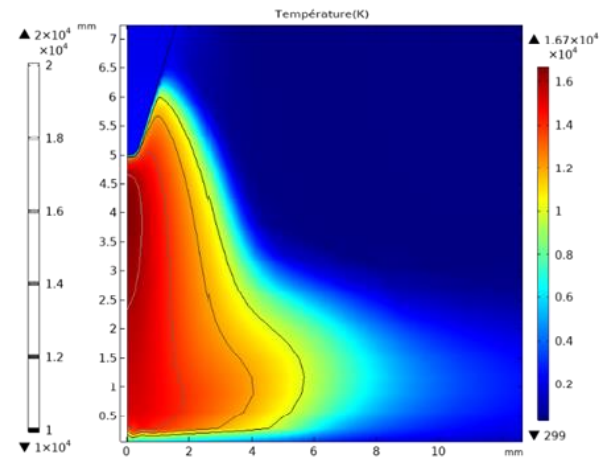
Après la validation du modèle nous avons effectué une étude paramétrique selon le courant pour 100, 150, et 200 aussi selon la nature de gaz de protection de la soudure (N_2 , Ar et He) et pour des distance inter-électrodes de 1 à 5 mm. Nous présentons dans ce qui suit les résultats essentiels pour le croisement de ses résultats.

IV.2 Influence de la nature des gaz :

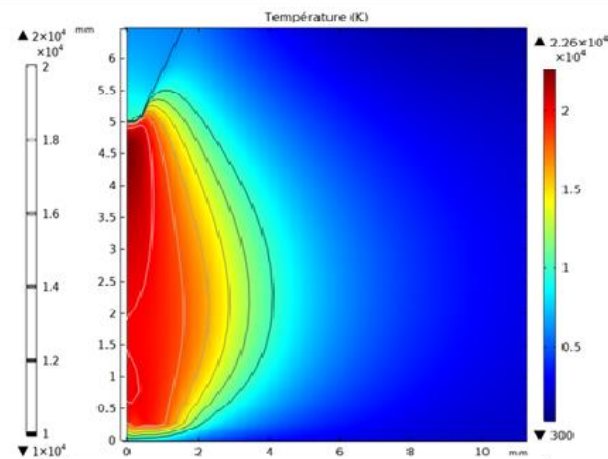
Nous avons fixé les autres paramètres de la soudure cités au-dessus à un courant de 200 A et un arc de longueur de 5 mm. et nous avons étudié l'influence de la nature du gaz de protection sur les champs de température, de vitesse, la zone fondue.

IV.2.1 Température du plasma :

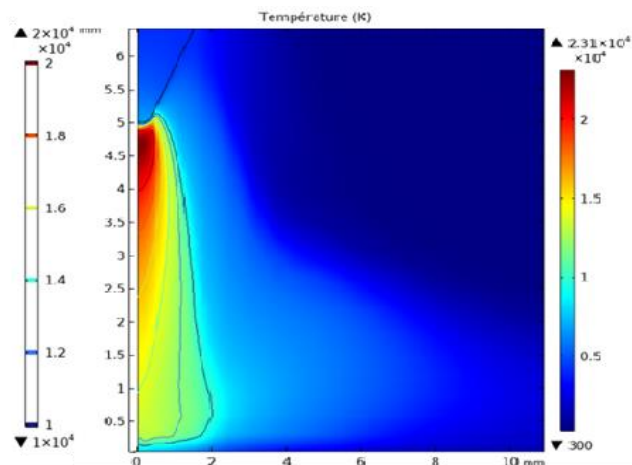
La figure IV.2 représente les champs de température et les isothermes pour l'Argon (a) l'hélium (b) et l'azote (c), Sous un courant de 200 A.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-2 : champ de température et isothermes (b) ; à 200 A ;(a) Argon (b) ; Hélium et (c) : Azote

Comme le montre la figure IV.2 ; les températures les plus élevées se trouvent à proximité immédiate de la pointe de la cathode et valent 23100 K pour l'azote, 22600 K dans l'hélium et 16700 K pour l'argon. Il convient de souligner que la cathode de tungstène fait partie du domaine de calcul. Lowke et al. [29] ont calculé une température maximale d'environ 23 000 K à la pointe de la cathode pour une intensité de courant de 200 A, tandis que Tanaka et al.[30] ont calculé une température maximale de 17 000 K à 150 A. Murphy et al. [31] ont calculé des températures maximales comprises entre 17 000 K (argon pur) et 21 000 K (avec des rapports H₂ et He dans le gaz plasma) à la pointe de la cathode pour 150 A. H. Wang et al. [Article] ont calculé une température maximale de 19 000 K pour l'azote pur à 200 A. Nos résultats sont donc cohérents avec tous ces résultats présentés. Plus on s'éloigne de l'axe vertical de soudage, plus la température est basse.

En ce qui concerne la forme du plasma, on reconnaît la forme caractéristique de poire dans l'argon, elle est un peu différente dans l'azote avec les isothermes de plus de 1000 K beaucoup plus allongés qu'avec l'argon. Ces isothermes sont plutôt circulaires dans l'hélium est le plasma perd sa forme de poire. Ces différences sont dû aux propriétés physiques des plasmas notamment la chaleur spécifique et la conductivité électrique propre à chaque gaz. Ceci traduit le mécanisme de transfert d'énergie électrique (effet joule) au plasma qui est propre à chaque gaz.

IV.2.2 Changement de phase et température à la surface de l'anode :

Ce mécanisme de transfert d'énergie électrique au plasma à travers l'effet joule, propre à chaque gaz, et à l'image aussi du transfert de l'énergie arc-anode à travers les différents phénomènes présentés sur la figure III.1. Ceci est traduit par la fraction liquide (le passage de l'acier constituant l'électrode à l'état liquide) comme illustré sur la figure IV.3 où note clairement l'image de ce transfert dont la fraction fondue la plus grande -figure IV.3 :(a) - est dans l'Argon et la plus faible est dans l'Azote -figure IV.3 :(c) – ceci peut-être expliqué par la taille de la zone d'accrochage du pied de l'arc ; en effet on constate bien sur la Figure IV.2, le champ thermique est plus large dans le cas de l'argon avec des isothermes plus étendues radialement sur la zone près de l'anode et resserrés près du cathode . Contrairement à l'azote où on remarque que les isothermes sont serrés aux prés de l'anode.

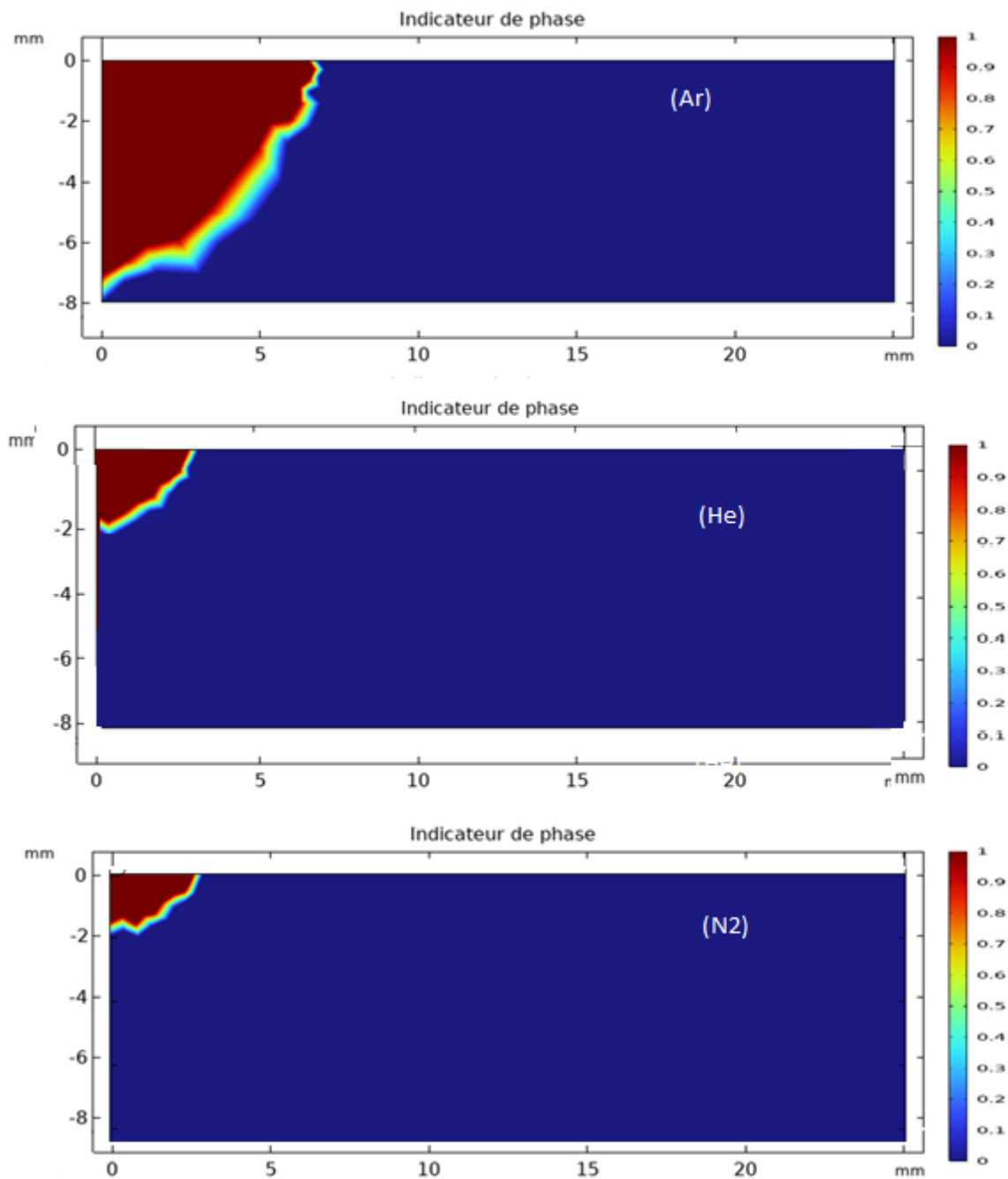


Figure IV-3 : distribution de fraction liquide au niveau de l'anode en présence des 3 gaz à 200

A.(a) : Argon 'Ar' ;(b) :Hélium 'He' et (c) :Azote 'N2'

Cette différence de la zone fondue de l'anode est aussi liée à la température sur la surface de l'anode Segment BE -Figure III.1- où on note que les températures les plus élevées sont dans l'hélium et dans l'azote (Figure IV.4) le long de l'axe de la décharge le point B -Figure III.1- et elle est la faible dans l'argon. Ce qui peut donner une illusion inverse de ce qu'on a remarqué dans la zone fondue, en effet, malgré les températures faibles dans l'argon mais le plasma est plus large dans son cas, ceci est traduit par un profil plat et un faible gradient sur toute la largeur de l'anode, contrairement aux deux autres gaz où on note un plasma plus serrée traduit par profil de température avec un fort gradient (8000 K sur l'axe et 2000 K à 10 mm)

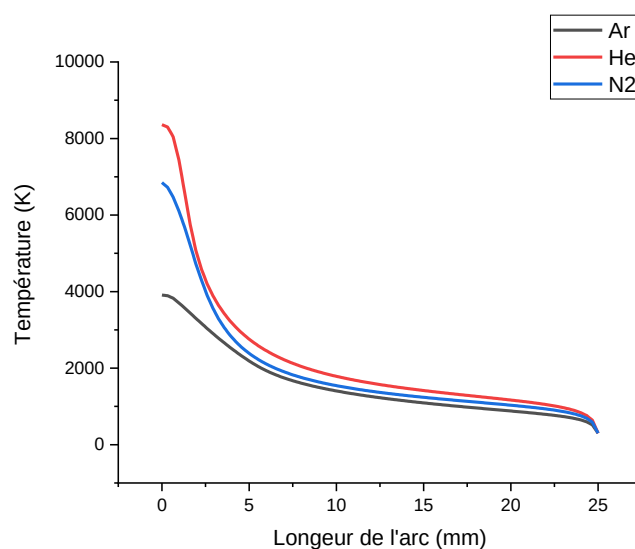


Figure IV-4 : température au niveau de la surface de l'anode en présence des 3 gaz à 200 A.

IV.2.3 Champs de vitesses :

La figure IV.5 montre la distribution des champs de la vitesse pour les trois gaz dans la région de l'arc. Le profil de vitesse le long de l'axe de symétrie entre les deux électrodes est également représenté sur la figure IV.6. On peut observer que la vitesse maximale revient à l'azote (942 m/s), causée par le fort échauffement et la dilatation subséquente du plasma, est située près de la pointe de la cathode. Cependant, la vitesse diminue au voisinage de l'anode. [28] ont calculé des vitesses maximales comprises entre 200 m/s (100 A) et 1000 m/s (200 A) près de la pointe de la cathode.

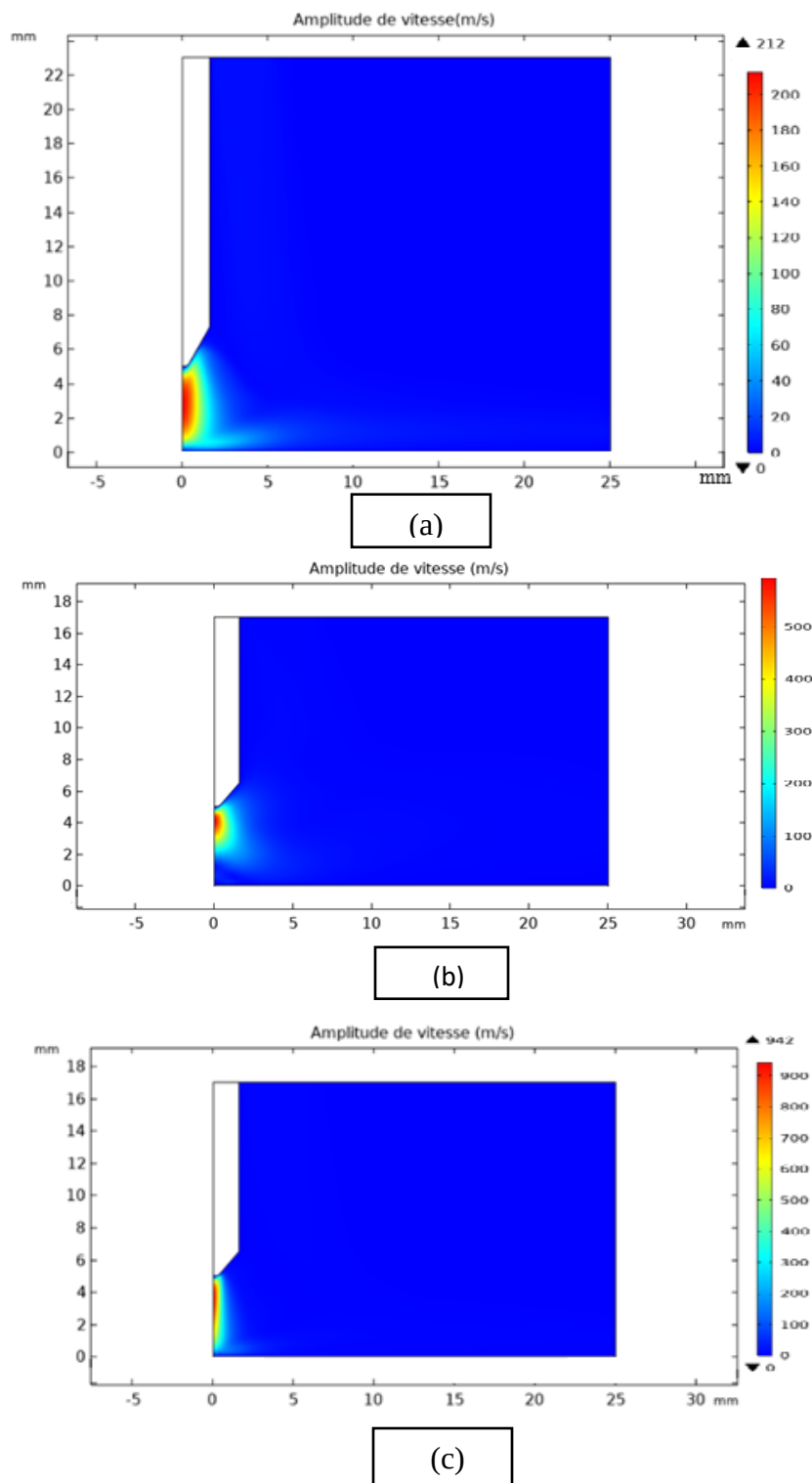


Figure IV-5 : distribution de champ vitesse au niveau de l'anode en présence des 3 gaz à 200 A.(a) : Argon 'Ar' ; (b) : Hélium 'He' et (c) : Azote 'N2'

Une vitesse maximale de 500 m/s est observé pour l'hélium tandis que dans l'argon on reporte une vitesse faible de 200 m/s comparés aux deux autres gaz.

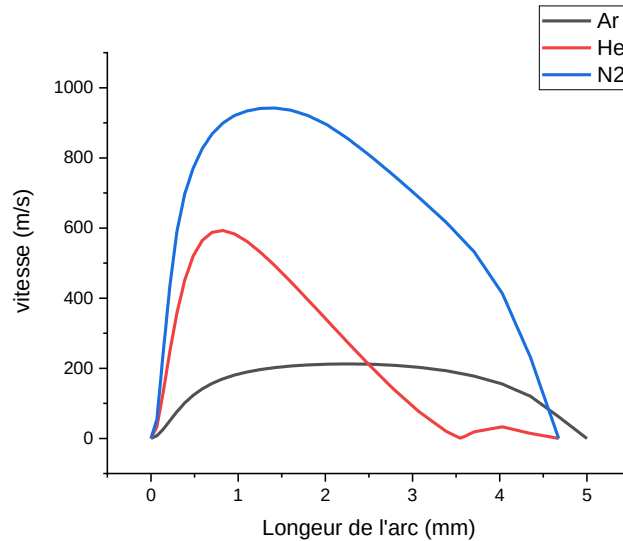


Figure IV-6 : Variation de la température le long de l'axe de symétrie de la torche entre la pointe de la cathode (position de départ : $x = 0$ mm) et la paroi de l'anode (position finale : $x = 5$ mm).

IV.2.4 Le potentiel électrique :

La distribution du potentiel électrique est illustrée dans la figure IV.7. D'après les conditions limites indiquées dans le tableau 2, le potentiel électrique est nul sur la paroi de l'anode (couleur rouge), puis il est ajusté automatiquement dans le domaine grâce à la chute de tension calculée dans le plasma.

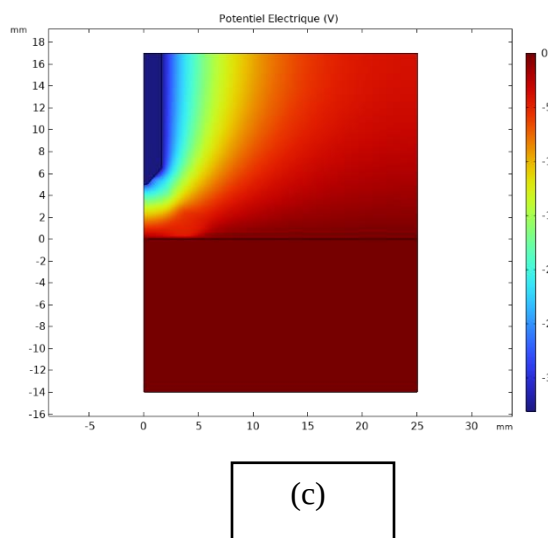
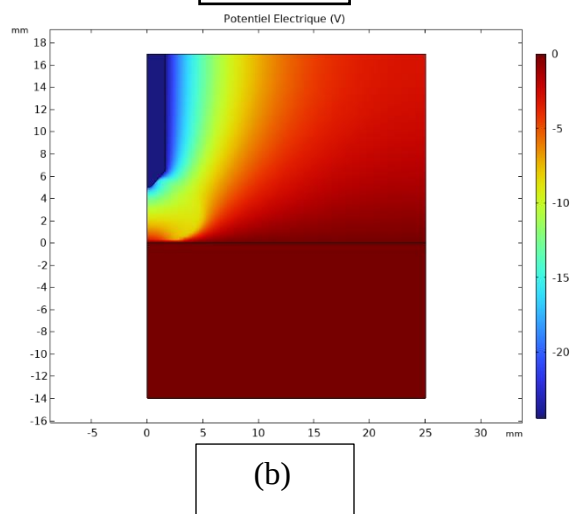
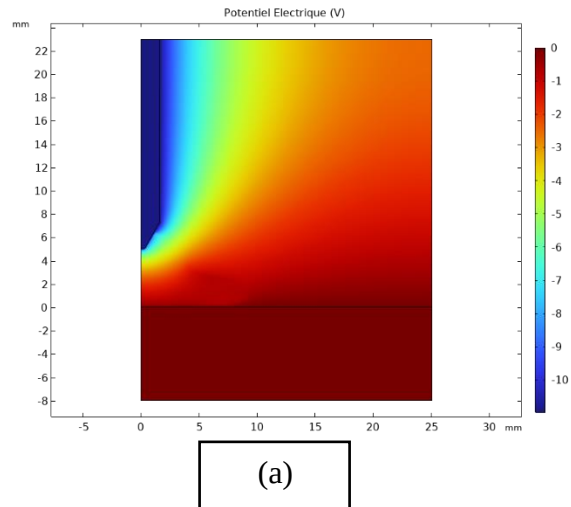


Figure IV-7 : distribution de potentiel électrique au niveau de l'anode en présence de (a) : Argon 'Ar' ;(b) : Hélium 'He' et (c) : Azote 'N2'

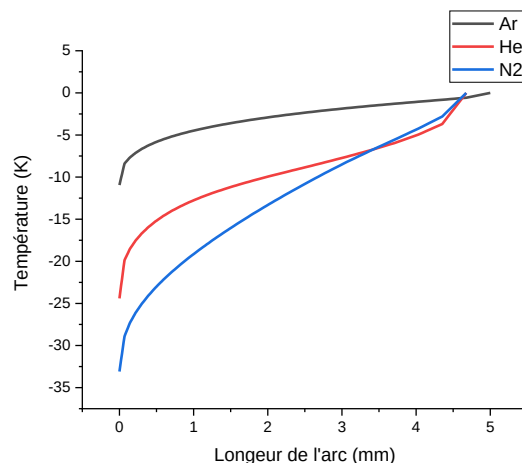


Figure IV-8 : Variation de potentiel électrique le long de l'axe de symétrie de la torche entre la pointe de la cathode (position de départ : $x = 0$ mm) et la paroi de l'anode (position finale : $x = 5$ mm).

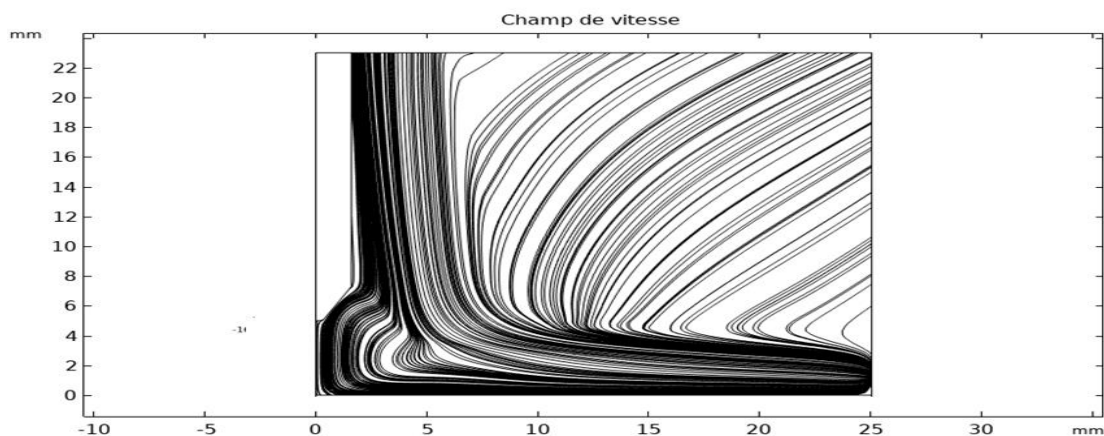
La figure IV.8 montre la distribution du potentiel électrique. Selon les conditions aux limites présentées dans le tableau III.1, le potentiel électrique est mis à zéro sur la paroi de l'anode, et il est automatiquement ajusté par la chute de tension calculée dans le plasma, causée par le courant électrique imposé à la cathode de tungstène. Le potentiel électrique le plus élevé se trouve dans la région de la cathode et il est dans le plasma d'azote (-30 V). Et le plus bas se trouve dans le plasma d'argon (-8 V)

En outre, une chute de tension de 5 V peut être observée à la pointe de la cathode dans l'azote et l'hélium et de 3 V dans l'argon, tandis qu'une chute de tension plus faible d'environ 1 V apparaît à la paroi de l'anode. Ce comportement est induit par la diminution de la température du plasma à proximité des parois de la cathode et de l'anode, entraînant une diminution de la conductibilité électrique. Tetyana et al. [32] ont également suggéré une chute de tension plus élevée à la pointe de la cathode par rapport à celle qui se produit à la surface de l'anode. Enfin, dans la région de transition (colonne d'arc), le potentiel électrique présente un comportement quasi-linéaire (c'est-à-dire un gradient presque constant).

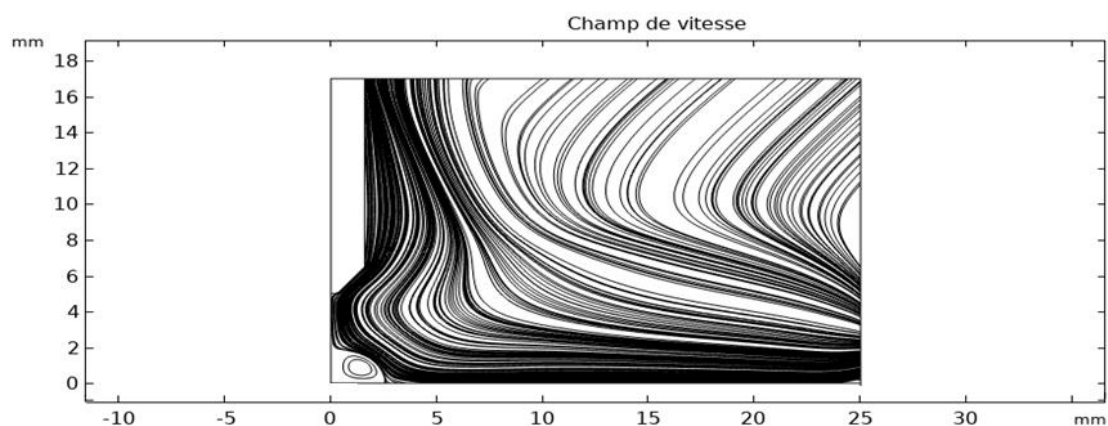
IV.2.5 Les lignes des champs :

La distribution des lignes de champ est illustrée dans la figure IV.9. En se référant aux conditions limites indiquées dans le tableau 2, on constate que :

- Pour l'argon, les lignes de courant sont projetées sur le plan (r-z) avec des composantes sur ces deux axes et que l'écoulement ne présente aucune zone de décollement ceci traduit que l'argon est un bon candidat comme gaz de protection de soudure. Contrairement à l'hélium qui présente une zone de décollement autour des électrodes.



(a)



(b)

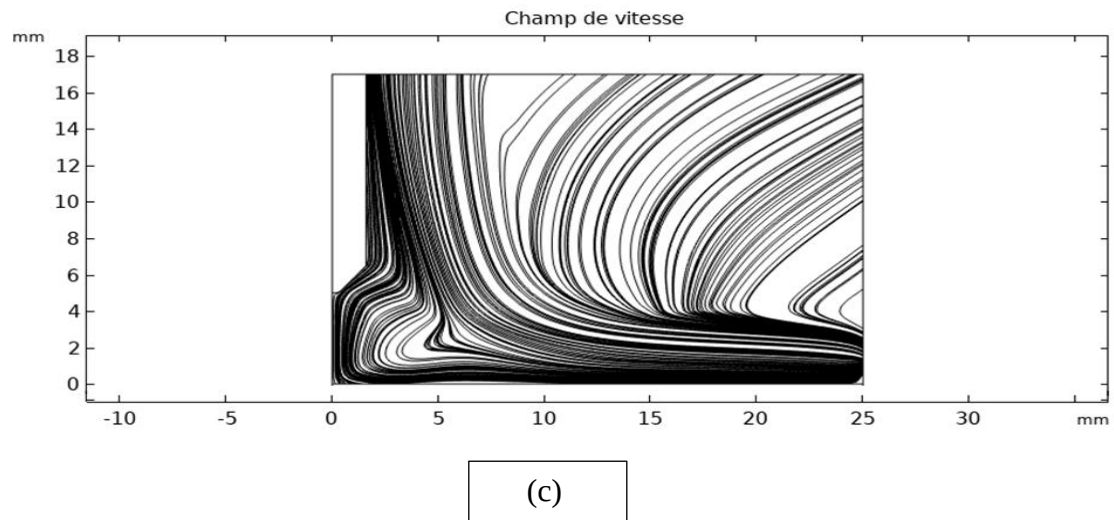


Figure IV-9: distribution de viscosité au niveau de l'anode en présence des 3 gaz à 200 A. (a) : Argon 'Ar' ; (b) : Hélium 'He' et (c) : Azote 'N2'

Conclusion

Conclusion

Nous avons développé une simulation axisymétrique bidimensionnel de l'arc de soudage TIG en utilisant. Ce modèle à volume fini permet de coupler les phénomènes électromagnétiques avec les équations de Navier–Stokes.

Tout d'abord, nous avons établi le contexte de ce modèle en détaillant la configuration du soudage TIG. Divers critères opératoires, tels que la longueur de l'arc, l'intensité et la nature du gaz, doivent être pris en compte. Ils influencent les transferts d'énergie et de mouvement entre le plasma et le métal, ainsi que la qualité de la soudure.

Dans une étude paramétrique sur l'influence des gaz de protection tels que l'argon, l'hélium et l'azote dans la soudure à l'arc, des différences notables ont été observées dans les caractéristiques du plasma, la distribution des champs de température et de vitesse, ainsi que le potentiel électrique.

Les températures maximales à la pointe de la cathode varient selon le gaz utilisé : l'azote atteint 23 100 K, l'hélium 22 600 K et l'argon 16 700 K. Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures, confirmant ainsi la validité du modèle utilisé.

La distribution des champs de température et la forme du plasma diffèrent également selon le gaz. Avec l'argon, le plasma prend une forme caractéristique en poire, avec des isothermes s'étendant radialement près de l'anode. En utilisant de l'hélium, les isothermes deviennent circulaires et le plasma perd sa forme en poire. Pour l'azote, les isothermes sont allongées et le champ thermique est concentré près de l'anode, suggérant des gradients de température plus élevés.

Concernant le changement de phase et la température à la surface de l'anode, la plus grande fraction fondue est observée avec l'argon, tandis que l'azote montre la plus faible. Cette différence est attribuée à la taille de la zone d'accrochage du pied de l'arc et à la distribution des isothermes. En effet, dans l'argon, les isothermes s'étendent radialement près de l'anode, tandis que dans l'azote, elles se concentrent près de l'anode.

Conclusion

La distribution du potentiel électrique révèle que l'azote présente le potentiel électrique le plus élevé (-30 V près de la cathode), l'hélium montre une chute de tension de 5 V à la pointe de la cathode, et l'argon possède le potentiel électrique le plus bas (-8 V) avec une chute de tension de 3 V à la pointe de la cathode.

Quant à la distribution des champs de vitesse, la vitesse maximale est atteinte avec l'azote (942 m/s), en raison du fort échauffement et de la dilatation du plasma. Dans l'hélium et l'argon, les vitesses sont moins élevées, avec des profils de vitesse différents.

Ces différences observées dans les comportements des gaz de protection ont des implications pratiques pour le processus de soudage. L'argon est idéal pour une fusion uniforme et une large zone fondue, bien que la température soit plus basse à la cathode. L'hélium offre une haute température sur l'anode avec des isothermes circulaires, ce qui est utile pour des applications nécessitant une chaleur concentrée. L'azote, avec la plus haute température et la vitesse maximale du plasma, convient aux applications nécessitant un fort échauffement.

Ces résultats permettent de choisir le gaz de protection en fonction des besoins spécifiques du processus de soudure, optimisant ainsi les performances et les résultats de la soudure à l'arc.

Référence

- [1] F. Baudoin, "Contribution à la modélisation d'un arc électrique dans les appareils de coupure basse tension," 2006. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00011591>
- [2] A. Blais, "Modélisation tridimensionnelle stationnaire d'un arc transféré influencé par un champ magnétique externe," <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/1148>, 2001.
- [3] SERGE VAQUIE, *Arc électrique*, EYROLLES CNRS. France , 2000.
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9lectrique, "Arc électrique ."
- [5] "L'homme n'invente pas une force, il la dirige, et la science consiste à imiter la nature."
- [6] M. Courrege, "Caractérisation des interactions plasma/parois dans un disjoncteur haute tension." [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01940433>
- [7] S. Samal and I. Blanco, "An Overview of Thermal Plasma Arc Systems for Treatment of Various Wastes in Recovery of Metals," *Materials*, vol. 15, no. 2, p. 683, Jan. 2022, doi: 10.3390/ma15020683.
- [8] B. Boulet, G. Lalli, and M. Ajersch, "Modeling and control of an electric arc furnace," in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, IEEE, pp. 3060–3064. doi: 10.1109/ACC.2003.1243998.
- [9] V. Rat, F. Mavier, and J. F. Coudert, "Electric Arc Fluctuations in DC Plasma Spray Torch," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 37, no. 3, pp. 549–580, May 2017, doi: 10.1007/s11090-017-9797-7.
- [10] G. Daveau, T. Martire, J. J. Huselstein, and P. Enrici, "Une application ludique des arcs électriques : le transformateur de Tesla," *J3eA*, vol. 8, p. 1027, Mar. 2009, doi: 10.1051/j3ea/2009001.
- [11] M. Hamide, "Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers." [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/tel-00317400>
- [12] M. Brochard, "Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG. A unified model of gas tungsten arc welding (GTAW) including electrode, arc plasma and molten pool."
- [13] Jonathan Mougenot, "Modélisation de l'interaction entre un arc électrique et matériau: application au soudage TIG ," 2013.
- [14] S. Tashiro, M. Tanaka, and A. B. Murphy, "Numerical analysis of non-equilibrium plasma property in anode boundary layer of argon Gas Tungsten Arc," *Surf Coat Technol*, vol. 205, pp. S115–S119, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.06.044.
- [15] M. Dal and R. Fabbro, "[INVITED] An overview of the state of art in laser welding simulation," *Opt Laser Technol*, vol. 78, pp. 2–14, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.09.015.

- [16] B. Brickstad and B. L. Josefson, "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, no. 1, pp. 11–25, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0308-0161(97)00117-8.
- [17] A. Capriccioli and P. Frosi, "Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation," *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, no. 2–6, pp. 546–553, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.fusengdes.2009.01.039.
- [18] S. A. A. Akbari Mousavi and R. Miresmaeili, "Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel," *J Mater Process Technol*, vol. 208, no. 1–3, pp. 383–394, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.01.015.
- [19] A. Lundbäck, H. Alberg, and P. Henrikson, "Simulation and Validation of TIG-Welding and Post Weld Heat Treatment of an Inconel 718 Plate."
- [20] D. Honggang, G. Hongming, and W. Lin, "Numerical simulation of fluid flow and temperature field in keyhole double-sided arc welding process on stainless steel," *Int J Numer Methods Eng*, vol. 65, no. 10, pp. 1673–1687, Mar. 2006, doi: 10.1002/nme.1513.
- [21] X. Zhan, Q. Zhang, Q. Wang, J. Chen, H. Liu, and Y. Wei, "Numerical simulation of flow field in the Invar alloy laser–MIG hybrid welding pool based on different heat source models," *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow*, vol. 28, no. 4, pp. 909–926, Apr. 2018, doi: 10.1108/HFF-02-2017-0069.
- [22] D. Zhang, Y. Wei, X. Zhan, J. Chen, H. Li, and Y. Wang, "Numerical simulation of keyhole behaviors and droplet transfer in laser-MIG hybrid welding of Invar alloy," *Int J Numer Methods Heat Fluid Flow*, vol. 28, no. 9, pp. 1974–1993, Oct. 2018, doi: 10.1108/HFF-07-2017-0266.
- [23] T. Tchoumi, F. Peyraut, and R. Bolot, "Influence of the welding speed on the distortion of thin stainless steel plates—Numerical and experimental investigations in the framework of the food industry machines," *J Mater Process Technol*, vol. 229, pp. 216–229, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.021.
- [24] Main, "Traidia_Roger_WASET_Dubai2011."
- [25] A. B. Murphy and J. J. Lowke, "Heat Transfer in Arc Welding," in *Handbook of Thermal Science and Engineering*, Springer International Publishing, 2017, pp. 1–72. doi: 10.1007/978-3-319-32003-8_29-1.
- [26] S. Ghorui, J. V. R. Heberlein, and E. Pfender, "Thermodynamic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 28, no. 4, pp. 553–582, Aug. 2008, doi: 10.1007/s11090-008-9141-3.

- [27] A. B. Murphy and C. J. Arundell, "Transport Coefficients of Argon, Nitrogen, Oxygen, Argon-Nitrogen, and Argon-Oxygen Plasmas," 1994.
- [28] Hai-Xing Wang et al, "Chemical nonequilibrium modelling of a free-burning nitrogen arc ," 2020.
- [29] J. J. Lowke, R. Morrow, and J. Haidar, "A simplified unified theory of arcs and their electrodes," 1997. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0022-3727/30/14/011>
- [30] M. Tanaka, H. Terasaki, M. Ushio, and J. J. Lowke, "A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten-Inert-Gas Welding Process."
- [31] A. B. Murphy, M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, J. J. Lowke, and K. Ostrikov, "Modelling of arc welding: The importance of including the arc plasma in the computational domain," in *Vacuum*, Nov. 2010, pp. 579–584. doi: 10.1016/j.vacuum.2010.08.015.
- [32] T. Kavka, "Study of Thermal Plasma Jets Generated by DC Arc Plasma Torches Used in Plasma Spraying in Plasma Applications," Jun. 2006.

Abstract: In this study, we modeled the electric arc interaction with a piece of stainless steel to predict the dynamic behavior and thermal state of the plasma. To achieve this, an unsteady and 2-dimensional axisymmetric model was developed, integrating the plasma (at low electron temperature, ETL). This model uses the finite volume method to solve the magnetohydrodynamic equations of fluids traversed by an electric current. Several adjustments were necessary to integrate the interaction between the plasma and the material and to solve the physical phenomena in the molten zone. The model was applied to helium, argon, and nitrogen arcs . It can predict the dimensions of the molten zone, the influence of forces on the distribution of velocities in the metal, the impact of changing the type of plasma gas, and thermal variations. These results represent a first step towards understanding and optimizing the different operational parameters influencing the TIG welding process.

Keywords : Thermal plasma - velocity fields in thermal plasma - CFD - temperature fields - arc reactor - flow .

Résumé : Dans cette étude, nous avons modélisé l'arc électrique en interaction avec une pièce en acier inoxydable afin de prédire le comportement dynamique et l'état thermique du plasma. Pour ce faire, un modèle stationnaire et axisymétrique a été développé intégrant le plasma (à basse température d'électrons, ETL). Ce modèle utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de la magnétodynamique des fluides traversés par un courant électrique. Plusieurs adaptations ont été nécessaires pour intégrer l'interaction entre le plasma et le matériau et pour résoudre les phénomènes physiques dans la zone fondue. Le modèle a été appliqué à des arcs d'hélium, d'argon et d'azote en interaction avec le métal. Il permet de prédire les dimensions de la zone fondue, l'influence des forces sur la distribution des vitesses dans le métal, l'impact du changement de type de gaz plasmagène, et les variations thermiques. Ces résultats constituent une première étape vers la compréhension et l'optimisation des différents paramètres opératoires influençant le procédé de soudage TIG.

Mot clés : Plasma thermique-champs de vitesse dans plasma thermique -CFD-champs de température-réacteur arc -écoulement.

ملخص: في هذه الدراسة، قمنا بنمذجة القوس الكهربائي المتفاعل مع قطعة من الفولاذ المقاوم للصدأ بهدف التنبؤ بالسلوك الديناميكي والحالة الحرارية للمنطقة المنصهرة والبلازما. لتحقيق ذلك، تم تطوير نموذج مستقر وثلاثي الأبعاد، يستخدم هذا النموذج طريقة الحجم المحدود لحل معادلات المغناطيسية الكهروديناميكية للسوائل التي يمر عبرها تيار كهربائي. متضمناً البلازما (عند درجة حرارة إلكترونية منخفضة) كانت هناك حاجة إلى العديد من التعديلات لدمج التفاعل بين البلازما والمادة وحل الظواهر الفيزيائية في المنطقة المنصهرة تم تطبيق النموذج على أقواس الهيليوم، والارجون، والنيتروجين المتفاعلة مع المعدن. يمكن لهذا النموذج التنبؤ بأبعاد المنطقة المنصهرة، وتأثير القوى على توزيع السرعات في المعدن، وأثر تغيير نوع غاز البلازما، والتغيرات الحرارية. تمثل TIG هذه النتائج خطوة أولى نحو فهم وتحسين مختلف المعايير التشغيلية التي تؤثر على عملية اللحام.

كلمات مفتاحية: البلازما الحرارية - حقول السرعة في البلازما الحرارية - CFD - حقول درجة الحرارة - مفاعل القوس - التدفق .