

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

**Simulation numérique des phénomènes de transfert
thermique au sein d'un réacteur a plasma d'arc électrique**

Présenté par :

-Figuigui Sofiane

-Badaoui Mohamed

Date de Soutenance : 19/06/2018

Devant le jury composé de :

- Mr Gourari Djamel Eddine
- Mr Benameur Benameur
- Dr Kaid Noureddine
- Dr Naima Khatir

Encadreur
Encadreur
President
Examineur

Année universitaire 2017-2018

Remerciement

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à :

Nos encadrant de thèse Mr Benameur Benameur et Mr Gourari Djamel Eddine, pour leur précieux conseils et leur orientations ficelées tout au long de notre recherche.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury :

Dr Kaid Noureddine et Dr Naima Khatir pour l'intérêt qu'ils ont portée à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

· Mes parents :

Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et soeurs et mes amies qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs de centre universitaire de Naama qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Figuigui Sofiane

DEDICACES

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

Mohamed badaoui

Résumé

Résumé

Notre travail porte sur une simulations d'un réacteur à arc électrique, La géométrie du réacteur est une forme cylindrique avec deux électrodes électriques entouré d'une paroi en aluminium avec une cloche en verre sur la partie supérieure dans la zone inter-électrode est généré un plasma thermique, ce plasma est à l'origine de différents phénomènes de transfert de chaleur et de masse et donc une simulation des phénomènes hydrodynamiques et thermique est faite pour mieux comprendre ces phénomène au sein de réacteur et adapter au besoin les points traités dans cette étude .

Mots clés : plasma thermique –arc électrique –écoulement hors plasma-hydrodynamique dans les recteurs à arc.

Abstract

Our work focuses on simulations of an electric arc reactor, The geometry of the reactor is a cylindrical shape with two electric electrodes surrounded by an aluminum wall with a glass bell on the top in the inter-electrode area is generated a thermal plasma, this plasma is at the origin of various heat and mass transfer phenomena and therefore a simulation of the hydrodynamic and thermal phenomena is made to better understand these phenomena within the reactor and adapt as necessary the points treated in this study .

Keywords: Thermal plasma-arc discharge - out-of-plasma flow- hydrodynamics in arc reactors.

Liste des tableaux

Tableaux IV.1 :Les Propriétés des Matériaux Solide.

Tableaux IV.2 :Les dimensions de réacteur .

Tableaux IV.3 Les nombres de Rayleigh pour les deux profils de température montrent que le régime de convection de gaz plasmagène est **laminaire** ($< 10^9$).

Liste des figures

Figure II.1 : schéma de transfert thermique par conduction

Figure II.2 : Bilan thermique pour un système unidirectionnel

Figure III.1 : schéma du réacteur à arc

Figure III.2 : Schéma de l'alimentation électrique

Figure III.3 : Schéma de l'anode

Figure IV.1 : géométrie bidimensionnel de réacteur avec les dimensions et les différents composants

Figure V-1 : Comparaison des profils de vitesse pour les 3 gaz : Hélium (He), Azote (N₂) et Argon (Ar) ; au milieu de plasma ($z=140$) mm

Figure V-2 : Comparaison des profils de vitesse Avec les deux gaz fictif et Argon

Figure V-3 : Comparaison des profils de vitesse Avec les trois gaz réels

Figure V-4 : champ des modules des vitesses (a) , (b) : champ des vecteurs vitesse dans l'Hélium à 65 A

Figure V-5 : champ des modules des vitesses (a) , (b) : champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

Figure V-6 : champ des modules des vitesses (a) , (b) : champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

Figure V-7 : Comparaison des lignes de courant pour les trois gaz : (a) Hélium (b) Azote et (c) : Argon à 65 A

Figure V-8 : champ de température (a) et isothermes (b) ; à 65 A dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hélium (He)

Figure V-9 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Azote (N₂)

Figure V-10 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Argon (Ar)

Figure V-11 : distribution de fraction liquide au niveau des électrodes en présence des gaz (a): He, (b): N₂ et (c):Ar

Figure V-12 : champ de température dans l'Hélium Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A

Figure V-13 : champ de température dans l'Azote Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A

Liste des figures

Figure V-14 : champ de température dans l'Argon Avec (a) : profil de température 65 A et

(b) : profil de température 80 A

Figure V-15 : Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes (a)

et (a)': He ; (b)et(b)': N₂ et (c) et (c)':Ar

Figure V-16 : Comparaison du champs de température dans l'azote à 80 A

(a) :électrode du bas en graphite et (b) en cuivre

Figure V-17 : Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes dans l'azote à 80 A (a) :anode en graphite et (b) en cuivre.

Nomenclature

Nomenclature	Symboles Désignation	Unités
α	le taux d'ionisation du plasma	
n_e	densités électroniques et atomiques	
n_a	densités électroniques et chimique	
Ra	nombre de Rayleigh	
r_D	la longueur de Debye	
Te	la températures des électrons	K°
Tg	la température des éléments lourdes	K°
Φ	flux de chaleur	w
P	pression	[Pascale]
Rth	La résistance thermique	
λ	la conductivité thermique	
S	la surface d'échange thermique	
H	le coefficient de transfert de chaleur	
Cp	Chaleur spécifique à pression constante	J/K°.Kg
ρ	la masse volumique	Kg/ m ³
Ts	la température de surface d'échanges	K°
Tf	la température de fluide	K°
r	le réons	
F	le facteur de forme	
ε	l'émissivité	
σ	la constante de Stéphane-Boltzmann	
v	la viscosité cinématique	
g	la gravité	

Liste d'abréviation

ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Métal Inert Gaz
AEPT	Arc Electrique et Procédés Plasma Thermiques
SWCNT	Single-Walled Carbon Nanotubes

Table de matières

Remercîment	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
Liste Des Tableaux	V
Liste Des Figures.....	VI
Nomenclatures.....	VIII
Liste des Abréviation	IX
Table de Matières	X
Introduction.....	1
I. Introduction aux plasmas :	5
I.1. L'état plasma :	5
I.2. Les différents types de plasmas :	6
I.3. Utilisation des plasmas dans l'industrie :	7
I.3.1. Le soudage à l'arc :	8
I.3.2. La découpe de matériaux métalliques par torche à plasma.....	8
I.3.3. La projection plasma	9
I.3.4. Les disjoncteurs haute-tension	9
I.3.5. Les disjoncteurs basse-tension.....	9
I.3.6. Les fours à arc en métallurgie	10
II. Phénomène de transfert thermique	12
II.1. Transfert Thermique par conduction.....	12
II.1.1. Loi de Fourier	12
II.1.2. Equation de Chaleur.....	12
II.2. Transfert Thermique par convection.....	15
II.2.1. L'expression du flux de chaleur.....	15

Table de matières

II.2.2.L'expression du résistance thermique de convection.....	15
II.3.Transfert par rayonnement	15
II.3.1.La loi de Stefan-Boltzmann.....	15
II.3.2.Flux thermique.....	16
II.3.3.Densité de flux thermique.....	16
III.1.La chambre à arc	19
III.2.Alimentation électrique	20
III.3.Les électrodes	21
III.4.Le gaz plasmagène.....	22
IV.1 Définition de Problème :.....	24
IV.2 Régime de l'écoulement au sein du réacteur :.....	26
IV.3 Hypothèse simplificatrice :.....	27
IV.4. Modèle Mathématique et condition aux limites	28
V.1. Influence du gaz plasmagène:	31
V.1.1. champs de vitesses :	31
V.1.2. Lignes de courant :	35
V.1.3. champs de température :	36
V.2. Influence de la température du plasma :.....	40
V.2.1. champs de température :	40
V.3. Influence variation de conductivité thermique d'anode.....	43
Conclusion Générale	45

Bibliographique

Introduction générale

Introduction

Les arcs électriques et les plasmas thermiques sont très utilisés dans de nombreux procédés industriels. En effet, une croissance importante et remarquable des applications utilisant les plasmas thermiques. Ceci est manifesté par une augmentation remarquable des équipements de production utilisant ces plasmas (aux Etats-Unis représentant 350 millions de dollars en 1984, à quelques dizaine de milliards Aujourd'hui).

Les plasmas thermiques sont utilisés pour la synthèse de nanomatériaux, le soudage à l'arc, la découpe de matériaux métalliques par torche à plasma, la projection plasma, les disjoncteurs haute et moyenne tension, les fours à arc en métallurgie, les lampes haute pression ou la vitrification et le traitement de déchets. Ils sont aussi rencontrés lors d'un foudroiement (ce qui peut entraîner des dégâts au sol ou sur un avion en vol) ou à l'avant du bouclier thermique d'un engin spatial en phase d'entrée atmosphérique. Ils font, par conséquent, l'objet de nombreuses études et recherches visant à mieux les connaître et anticiper les conséquences physiques qu'ils engendrent.

Néanmoins, plusieurs obstacles d'origine technique s'opposent à une utilisation plus large des plasmas. Tout d'abord, les inhomogénéités des écoulements plasmas rendent le traitement de produits très dépendant de leur trajectoire ce qui est difficile voir impossible à maîtriser. À titre d'exemple les travaux de V. Ramarozatovo [Ram-1] dont la présence effective de l'azote durant l'établissement de l'arc dans le procédé dédié à la synthèse de nanomatériaux dopés a été discuté. D'une autre part, les vitesses de l'écoulement sont grandes et limitent beaucoup les temps de séjour dans les zones chaudes ce qui limite par exemple l'homogénéisation de la température dans les procédés qui nécessitent une température de synthèse homogène et contrôlée [Mon-1]. ajoutant à ça la complexité du point de vue physico-chimique et théorique du plasma (les phénomènes aux électrodes, la turbulence, les écarts à l'équilibre thermodynamique local ETL, la composition du plasma à 2T engendré par cet écart à ETL, les transferts de chaleur et de quantité de mouvement plasma/particules, et la cinétique chimique.

La résolution de ces problèmes pourrait se révéler décisive pour une large utilisation et contrôle de nouveaux procédés plasmas dans l'industrie chimique notamment dans la production en masse et en qualité de nanomatériaux ou autre applications utilisant les plasmas.

Introduction générale

C'est dans cette optique que nous avons mené notre étude. Une modélisation hydrodynamique valide, robuste et générale nous a parus un outil décisif pour le développement, la mise au point et l'optimisation du procédé de synthèse dans le réacteur à arc implémenté au sein de l'équipe AEPPT du laboratoire LAPLACE à Toulouse et dédié à l'étude de la formation des nanomatériaux carbonés (nanotubes, fullerène et graphène).

Un code de calcul en éléments finis a servi de base à notre modèle, où le caractère aussi général que possible et l'approche physique ont été préservés, en limitant au maximum tout empirisme.

Généralités sur les Plasmas

I. Introduction aux plasmas :

I.1. L'état plasma :

Dans les conditions usuelles de température et de pression sur Terre, les milieux qui nous entourent peuvent se présenter sous trois états très différents : solide (roche), liquide (eau) et gazeux (air). Et cela est valable quel que soit l'élément considéré, chaque molécule ou espèce chimique ayant son diagramme de phases propre en pression et température. Chaque état représente en fait une structure d'agencement différente à l'échelle microscopique.

Cependant il existe un quatrième état possible pour la matière : le plasma. Il est essentiellement composé de particules chargées (ions et électrons). Son existence nécessite des conditions de température et de pression particulières que l'on ne retrouve pas en général sur Terre, ou seulement lors de phénomènes très précis tels que les arcs de foudre par exemple.

Le terme plasma sera utilisé pour décrire les états dilués de la matière analogues à un gaz mais ayant une énergie thermique suffisante pour contenir une quantité non négligeable de particules chargées et d'atomes ionisés [Rax-1].

La différence entre un gaz neutre et un plasma provient principalement de l'importance relative des interactions coulombiennes impliquant les particules chargées et des interactions collisionnelles entre particules neutres. Pour cela on utilise habituellement le degré d'ionisation α :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_a} \quad (\text{II.1})$$

Où n_e et n_a représentent les densités électroniques et atomiques.

Généralités sur les Plasmas

Un plasma est surtout remarquable pour les propriétés suivantes :

- Il est macroscopiquement neutre malgré la présence importante de charges (pour un plasma de dimension supérieure à la longueur de Debye r_D [Bou-1]).
- Contrairement aux gaz, c'est un milieu électriquement conducteur du fait de la présence d'électrons libres. Sa conductivité électrique peut être du même ordre que celle du cuivre.
- C'est un milieu fortement compressible et à chaleur massique élevée.

I.2. Les différents types de plasmas :

Les plasmas sont généralement classés en plusieurs catégories selon leurs propriétés. Pour les différencier, on compare généralement la température électronique T_e (reliée à l'énergie cinétique d'agitation thermique des électrons) et la température moyenne des éléments plus lourds T_g tels que les atomes ou ions composant le plasma. De plus on s'intéresse à la densité électronique n_e du plasma qui sera fortement reliée aux propriétés physiques et chimiques observées car, du fait de leur agitation thermique importante, ce sont les électrons qui seront prépondérants au niveau des réactions chimiques. Ceci va nous permettre de déterminer différentes classes de plasma en fonction de leurs propriétés physiques.

Notons que lorsque la densité et la température électroniques T_e sont peu élevées on parlera de **gaz ionisés** plutôt que de plasma. Le degré d'ionisation est alors faible ($\alpha < 10^{-3}$) et les particules chargées se déplacent dans une « mer » de particules neutres. C'est par exemple le cas de l'ionosphère terrestre, des flammes en combustion ou des gaz interstellaires.

Lorsque le degré d'ionisation devient important ($\alpha > 10^{-3}$), on parle alors de plasma. Il existe une multitude de classification possible en fonction du type de caractéristiques propres que nous souhaitons mettre en évidence. Dans un souci de clarté et pour situer notre étude, nous définirons 3 catégories principales de plasmas :

- **Les plasmas « chauds »** : ils représentent les milieux dilués complètement ionisés. La température est de l'ordre de 10^7 K. L'agitation thermique des particules est très élevée et peut atteindre l'énergie nécessaire aux réactions de fusion. C'est ce type de plasma que l'on rencontre au cœur des étoiles ou dans les projets de fusion contrôlée comme le projet ITER

- **Les plasmas « froids » hors d'équilibre** : ils se caractérisent par une pression faible, ce qui limite fortement les interactions collisionnelles. L'équilibre entre l'agitation thermique des électrons « chauds » ($T_e \sim 10^4$ K) et des particules lourdes « froides » ($T_g \sim T_{\text{ambiante}}$) n'est pas établi dans ce type de milieu.

- **Les plasmas « froids » thermiques** : ils se caractérisent le plus souvent par une pression et une densité importantes ($P > 0.1$ Atm). Ainsi les collisions au sein du plasma sont nombreuses et jouent un rôle prépondérant dans l'établissement rapide de l'équilibre thermique du plasma ($T_e \sim T_g$). L'objet de notre étude utilisera ce type de plasma. Il se rencontre principalement lors de la présence d'arcs électriques. La température électronique est de l'ordre de 10^4 K et la densité électronique peut atteindre 10^{23} m³ pour un arc électrique à fort courant par exemple.

Cet état de la matière, peu connu car très rare dans notre environnement quotidien, représente cependant en réalité plus de 99% de la matière visible de l'Univers. Ceci explique pourquoi cet état joue un rôle fondamental dans une multitude de domaines en sciences. Il est également largement exploité dans le milieu industriel.

I.3. Utilisation des plasmas dans l'industrie :

Les premières applications des plasmas furent principalement la synthèse de molécules chimiques comme l'acétylène par HENRY et DALTON en 1797, le calcium, le carbure de calcium, le graphite, le phosphore par Robert HARE en 1839 grâce à l'arc électrique. Les plasmas d'arc ont également fait l'objet d'applications utilisant leurs propriétés thermiques comme le four à arc de fusion de Paul HEROULT en 1900 mais aussi leurs propriétés lumineuses comme pour les sources d'éclairage par Léon FOUCAULT en 1844 [*Lar-1*].

Généralités sur les Plasmas

Il existe aujourd'hui de très nombreux procédés industriels mettant en jeu des arcs électriques et des plasmas thermiques comme :

I.3.1. Le soudage à l'arc :

En soudage, le principe de l'arc transféré est essentiellement utilisé. Ce procédé ne peut être exploité que sur des matériaux conducteurs de l'électricité car c'est la plaque de métal à souder qui sert d'anode. L'arc fait alors fondre le métal et permet de souder deux parties métalliques entre-elles. La torche de soudage, elle, contient un gaz plasmagène et un gaz de protection arrivant en périphérie du plasma permettant de protéger le bain de métal fondu du contact avec l'air ambiant.

Les deux principales techniques de soudage sont :

- Le soudage TIG (*Tungsten Inert Gas*). Il s'agit d'un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible. *Tungsten* (tungstène) désigne l'électrode de la torche et *Inert Gas* (Gaz inerte) désigne le type de gaz plasmagène utilisé dans lequel on dépose le métal d'apport. Ce gaz neutre permet d'éviter l'oxydation instantanée lors de la fusion du métal soudé et protège l'électrode de la torche. Ce type de soudage donne une qualité d'assemblage irréprochable surtout dans les faibles épaisseurs (1 mm).

- Le soudage MIG (*Métal Inert Gaz*) qui utilise également un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu. Mais contrairement à la technique TIG, le métal d'apport (qui sert d'électrode) est placé au centre de la torche. Le gaz neutre est injecté en continu sur l'arc afin d'isoler complètement le métal d'apport en fusion de l'air ambiant. Cette technique permet l'assemblage de pièces très épaisses.

I.3.2. La découpe de matériaux métalliques par torche à plasma

Pour effectuer le coupage thermique en utilisant un plasma d'arc, on emploie généralement une torche à arc transféré où la plaque à découper joue le rôle d'anode. Le jet de plasma est alors en mesure de fondre tout métal rencontré sur sa trajectoire et sa force vive

Généralités sur les Plasmas

permet d'éjecter le métal fondu de la saignée. Ce procédé de découpe ne peut s'utiliser que sur les matériaux conducteurs de l'électricité.

I.3.3. La projection plasma

Ce procédé fait appel à des torches à arc soufflé. Des particules de faible taille (1 à 50 μm) le plus souvent métalliques sont injectées dans le jet de plasma en extinction en sortie de tuyère. Les particules fondues sont alors projetées sur un substrat, ce qui permet la réalisation d'un dépôt à sa surface.

En prévention ou en réparation, le revêtement devient partie constitutive de la pièce et peut avoir pour objet la tenue au frottement, la résistance à l'usure, la protection anti-corrosion, la décoration ou des fonctions plus spécifiques.

I.3.4 Les disjoncteurs haute-tension

Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège). Il est constitué de deux électrodes en contact : une immobile et l'autre se déplaçant lorsque le courant devient trop important. La séparation des contacts crée alors un arc électrique de forte puissance (à cause de la très forte différence de potentiel).

La technique mise en place pour éteindre l'arc utilise le passage du courant alternatif par zéro (moment où l'arc reçoit le moins de puissance). Ainsi, à cet instant, l'arc est soufflé par un gaz à l'aide de pistons et le passage du courant est alors interrompu.

Le gaz utilisé est principalement le SF_6 car il possède de bonnes propriétés isolantes [Koc-1]. En effet, le caractère électronégatif de cette molécule entraîne une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds et peu mobiles ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique et donc la conduction de l'électricité. De plus, la conductivité thermique du SF_6 est bien inférieure à celle de l'air et son coefficient global de transfert de chaleur est excellent ce qui entraîne un refroidissement très rapide de l'arc pendant la phase d'extinction.

I.3.5. Les disjoncteurs basse-tension

Le disjoncteur basse tension est un appareillage électrique destiné à assurer en toute sécurité la coupure du courant dans les cas d'une opération volontaire sur commande ou d'une

protection automatique lors d'un court-circuit ou d'une surintensité [*Bau-1*]. Lorsqu'un courant plus élevé que la norme est mesuré, il y a séparation des contacts et formation d'un arc électrique (de plus faible puissance que pour le disjoncteur haute tension). Une fois créé, l'arc se déplace sur des rails métalliques (sous l'action des forces magnétiques) vers la chambre de coupure où il est étiré et segmenté ce qui fait augmenter sa tension de maintien (qui devient supérieure à celle du disjoncteur) et entraîne son extinction.

I.3.6. Les fours à arc en métallurgie

L'énergie du plasma est utilisée pour améliorer la performance des hauts fourneaux. L'objectif des procédés plasmas associés à ces hauts fourneaux est de substituer de l'énergie électrique et du charbon bon marché à du coke métallurgique onéreux, tout en augmentant la productivité. Les systèmes font appel à des générateurs plasmas à arc non transféré pour produire la chaleur nécessaire.

Les plasmas sont aussi utilisés pour la fusion de ferrailles, la fonderie et les fours à arcs électriques sont les équipements les plus couramment utilisés pour l'élaboration d'acier à partir de ferrailles.

Ces différents phénomènes ou procédés liés aux plasmas thermiques font aujourd'hui l'objet de nombreuses études tant expérimentales que théoriques indispensables pour la compréhension physique et la simulation de la dynamique de ces plasmas. Il existe donc de nombreux travaux de modélisation résultant de ce besoin notamment sur les arcs de disjoncteurs, les torches de découpe à plasmas, les procédés de soudage ou le foudroiement de bâtiments ou d'aéronefs.

Phénomènes de Transfert thermique

II. Phénomène de transfert thermique

Il existe 3 moyens fondamentaux de transfert de température :

II.1. Transfert Thermique par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur qui se réalise sans déplacement de matière. et transfert de chaleur est rencontré le plus souvent dans des matériaux solides, mais il peut aussi être étudié dans des fluides, liquide ou gaz. est spécifique aux solides (bois, métaux, etc), Le mouvement d'agitation thermique (flux de chaleur) va toujours des zones chaudes vers les zones froides. Les mauvais conducteurs (gaz, laine de verre ou polystyrène) sont appelés isolants.

- Flux de chaleur :

Quantité de chaleur transférée par unité de *temps*

$$\Phi = dQ/dt \quad (\text{II.6})$$

- Densité de flux de chaleur :

Quantité de chaleur transférée par unité de temps par unité de surface

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Comment calculer flux de chaleur conductive :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}} \quad (\text{II.8})$$

R_{th} : La résistance thermique = e/λ

λ la conductivité thermique unité (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

II.1.1. Loi de Fourier

La Loi de Fourier exprime que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température :

$$\Phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II.9})$$

la conductivité thermique λ s'exprime en $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ou, soit des $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Phénomènes de Transfert thermique

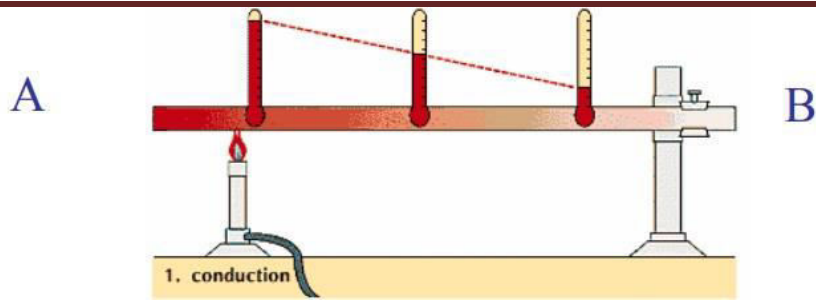


Figure II.1 : schéma de transfert thermique par conduction

Dans cette barre métallique chauffée en son extrémité A, on observe un gradient longitudinal de température $T(x)$: $T(A) > T(B)$. Cette différence du potentiel température $T(A) - T(B)$ provoque un flux de chaleur Φ :

$$\Phi = h S [T(A) - T(B)] en \frac{J}{s} \quad (II.9)$$

(h) : est défini comme un coefficient de transfert de chaleur

II.1.2. Equation de Chaleur

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan :

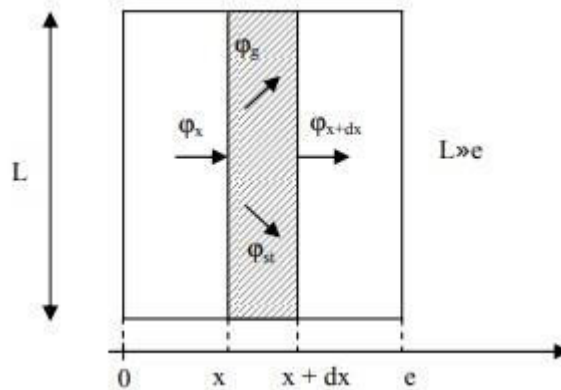


Figure II.2 : Bilan thermique pour un système unidirectionnel

Phénomènes de Transfert thermique

-Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\phi_x + \phi_g = \phi_{x+dx} + \phi_{st} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$\phi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \quad \text{et} \quad \phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} \quad (\text{II.12})$$

$$\phi_g = \dot{q} S dx \quad (\text{II.13})$$

$$\phi_{st} = \rho c_p S dx \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.14})$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx, nous obtenons :

$$\frac{-\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x}{dx} + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.15})$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.16})$$

nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas tridimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.17})$$

-Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.18})$$

-Equation de la chaleur en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r T)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.19})$$

II.2. Transfert Thermique par convection

La convection thermique est un transfert de chaleur qui se réalise avec déplacement de matière. est spécifique aux fluides (liquide, gaz, air), ainsi qu'aux éléments déformables (comme les roches à hautes pressions dans le manteau terrestre), elle est liée au mouvement du fluide, donc à un transport de matière.

II.2.1. L'expression du flux de chaleur en convection est la suivante (Loi de Newton) :

$$\Phi = h \cdot s(T_s - T_\infty) \quad (\text{II.20})$$

(Φ) : Flux de chaleur transmis par convection [W].

(h) : Coefficient de transfert [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$].

(T_s) : Température de la surface d'échange [K, °C].

(T_∞) : Température du fluide loin de la surface d'échange [K, °C].

(S) : La surface d'échange solide/fluide [m^2].

II.2.2. L'expression de la résistance thermique de convection :

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} = \frac{1}{h \cdot s} \quad (\text{II.21})$$

II.3. Transfert par rayonnement

est une émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud, le rayonnement a la particularité de se déplacer dans le vide (rayonnement solaire). L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur).

II.3.1. La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) :

$$\varphi = F \varepsilon \sigma (\Delta T)^4 \quad (\text{II.22})$$

Soit, le flux rayonné (noté Φ) :

$$\Phi = S \times \varphi = S F \varepsilon \sigma (\Delta T)^4 \quad (\text{II.23})$$

(S) : La surface de ce corps est.

(F) : Le facteur de forme.

Phénomènes de Transfert thermique

(ε) : L'émissivité.

(σ) : La constante de Stephan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

II.3.2.Flux thermique

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface isotherme par unité de temps. Il est appelé « puissance thermique » pour les équipements thermiques tels que les radiateurs.

$$\Phi = \frac{\sigma Q}{dt} \quad (\text{II.24})$$

II.3.3.Densité de flux thermique

La densité de flux thermique (ou flux thermique surfacique), c'est le flux thermique par unité de surface.

$$\varphi = \frac{d\Phi}{ds} = \frac{1}{s} \frac{\sigma Q}{dt} \quad (\text{II.25})$$

Si la densité de flux est uniforme sur la surface considérée :

$$\varphi = \frac{\Phi}{s} \quad (\text{II.26})$$

**Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du
LAPLACE**

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du LAPLACE

Les nanostructures de carbone et nanomatériaux, y compris le carbone nanotubes, fullerènes et graphène, ont connus un engouement scientifique énorme, en raison de leurs propriétés uniques et leur potentiel d'applications prometteurs [Ost-1]. Ces nanostructures entièrement composées de carbone ont propriétés physiques exceptionnelles (prix Nobel pour le graphène en 2010) et leur applications potentielles en tant que matériaux optiques, en tant que supraconducteurs, dans les polymères renforcés et dans d'autres produits biologiques et applications médicaux ont suscité beaucoup d'intérêt dans la littérature scientifique récente [Oh-1]-.

Le scaling-up ou la production en masse de ces nanostructures avec une très bonne qualité est une condition préalable à l'étude de la structure, les tests de performance, la recherche et applications pratiques. L'un des principaux candidats pour une telle production est le processus de décharge d'arc [Gou-1], en utilisant des électrodes en graphite dans la chambre de réaction dans lesquelles un gaz inerte comme l'argon ou d'hélium est introduit .

L'équipe AEPPT est la seule équipe qui démarque à l'international et qui garde l'utilisation des plasmas d'arc pour la synthèse de ces nanomatériaux en profitant du savoir-faire notamment de la physique des plasmas (diagnostic du plasma-champs de température-champs de concentration...). Mais leurs études restent restreint qu'à l'étude du plasma lui-même et non pas à l'étude de toute l'hydrodynamique et les phénomènes thermique au sein du réacteur. Or la modélisation de processus tels que ceux mentionnés ci-dessus peut aider à l'optimisation de la conception du procédé, ainsi que donner une meilleure compréhension des phénomènes impliqués dans la croissance de ces nanomatériaux. Dans cette optique que nous avons initié notre étude de modélisation du réacteur arc de L'équipe AEPPT-LAPLACE.

Dispositif de synthèse

III.1.La chambre à arc

Nous avons représenté sur la Figure le schéma du réacteur à arc électrique utilisé. Il s'agit d'un cylindre d'une trentaine de centimètres de diamètre et d'environ 1 mètre de hauteur muni de deux hublots en quartz diamétralement opposés et placés face au plasma permettant d'observer l'arc et d'effectuer une étude spectroscopique. Nous pouvons disposer de trois volumes du réacteur (60l, 25l et 18l) grâce à plusieurs "cloches" de différentes hauteurs pouvant être placées à l'intérieur de la chambre à arc. L'influence du volume de la chambre d'arc sur le rendement en SWCNTs et leur propreté a déjà été étudiée dans les travaux de thèse de A. Mansour [Man-1], [Man-2]. Le réacteur possède deux vannes, l'une permettant d'effectuer le vide primaire (10^{-1} Pa) à l'intérieur de la chambre d'arc, l'autre permettant le remplissage en gaz à la pression de travail désirée. Il est également doté d'une électrovanne permettant de maintenir la pression constante durant chaque expérience. Signalons cependant que, bien que ce dispositif soit intéressant car il permet de disposer d'une durée d'expérience plus importante (l'augmentation de la pression pendant deux minutes est d'environ 15%), il s'est malheureusement avéré manifestement néfaste pour la synthèse des SWCNTs en raison des perturbations dans la chambre d'arc causées par le pompage automatique. Pour cette raison, nous avons donc limité la durée d'une expérience à environ 2 minutes. Le volume choisi pour les expériences est de 18 L.

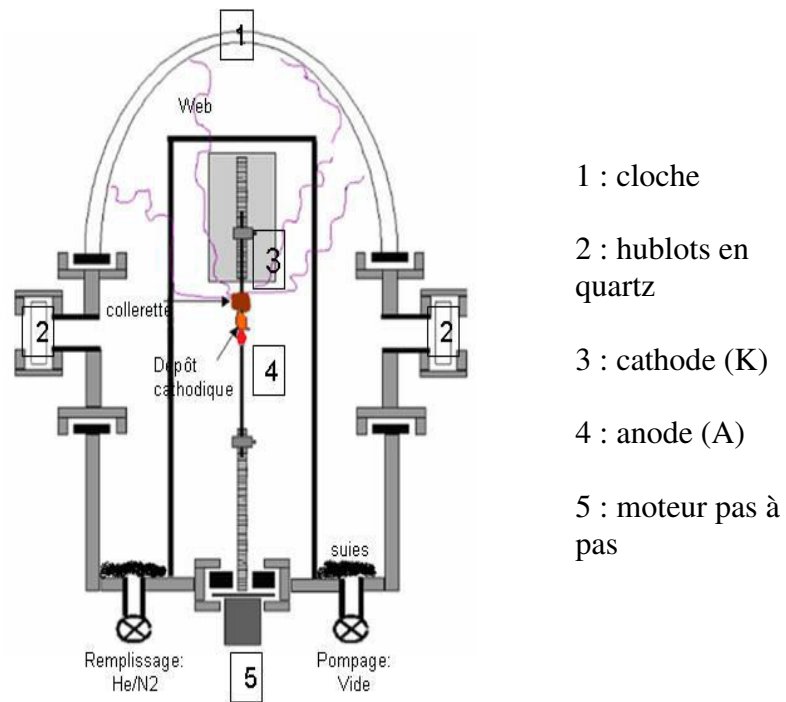


Figure III.1: Schéma du réacteur à arc.

III.2. Alimentation électrique

Le montage électrique est schématisé sur la Figure. L'alimentation électrique est assurée au moyen de trois alimentations stabilisées (110V-100A) branchées en série et pouvant délivrer une tension continue maximale de 330V et un courant maximal de 100A. Une résistance ballast R permet de limiter le courant lors de l'amorçage de l'arc. Un potentiomètre permet de fixer le courant d'arc à la valeur souhaitée. Dans la configuration de référence le courant est réglé à 80 A.

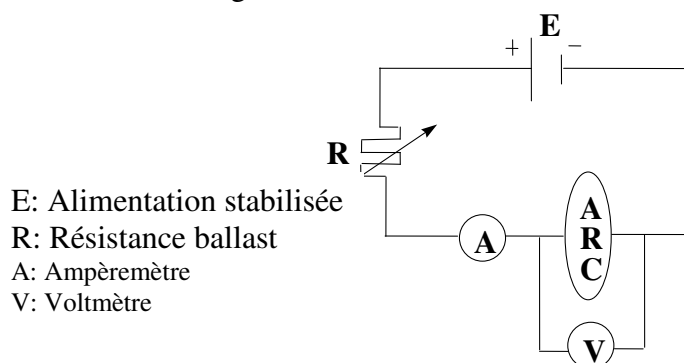


Figure.III.2 : Schéma de l'alimentation électrique.

III.3. Les électrodes

Les électrodes sont disposées verticalement au centre du réacteur contrairement à la grande majorité des dispositifs utilisés dans la littérature adoptant plutôt une disposition horizontale des électrodes [Jou-1, Huc-1, Lau-1]. Elles sont fixées sur deux supports asservis par deux moteurs indépendants permettant de les déplacer verticalement. La cathode placée en position supérieure (en #3 sur la Figure) est un barreau de graphite pur de 6 mm de diamètre et de 6 cm de longueur. L'anode placée en position inférieure (en #4 sur la Figure) est un barreau de graphite identique à la cathode mais percé co-axialement (Figure) et rempli soit avec des poudres de graphite et de catalyseurs (nickel et yttrium) pour la synthèse de nanotubes de carbone pur et soit d'un mélange de poudres de graphite, de catalyseurs et de composés borés ou azotés pour la synthèse de nanotubes hétérogènes.

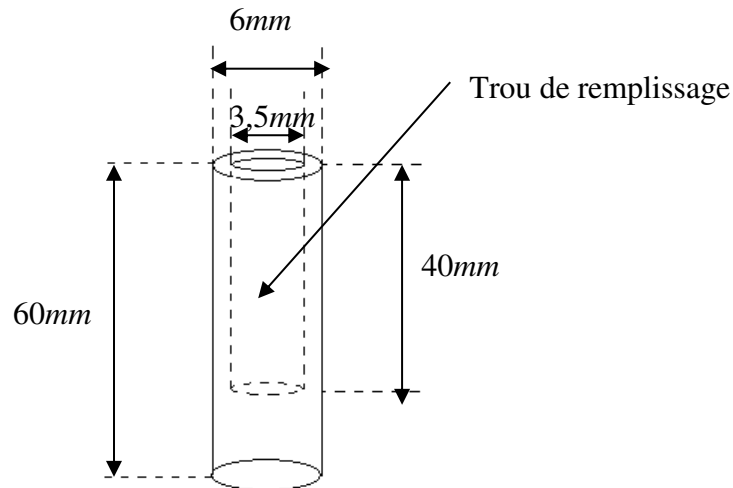


Figure.III.3. : Schéma de l'anode.

Pendant toute la durée de l'expérience, l'anode s'érode et la cathode se charge simultanément, la vitesse d'érosion de l'anode pouvant être relativement importante en fonction du mélange de poudres de remplissage utilisé. Ceci fait partie des nombreuses contraintes auxquelles nous sommes confrontés car il est essentiel non seulement de maintenir la distance inter-électrode constante mais également de les garder à leurs position en hauteur initiale afin de permettre le diagnostic du plasma pendant toute la durée de l'expérience. Afin de minimiser l'incertitude sur la distance inter-électrode, l'image de l'arc agrandie est projetée sur un écran.

III.4. Le gaz plasmagène

Le choix du gaz plasmagène est déterminant vis-à-vis de la propriété et du rendement des nanotub

SWCNTs obtenus. Dans la littérature, l'hélium est largement utilisé comme gaz plasmagène pour la synthèse des nanotubes et d'autres phases carbonées par arc [Wan-5, Iij-3, Jou-1, Pac-1]. Dans ce travail, le gaz plasmagène est systématiquement constitué d'un mélange d'hélium avec d'autres gaz (azote ou Argon). Dans tous les cas la pression est de 60 kPa- .

**Modèle mathématique et équations
gouvernantes**

IV.1 Définition de Problème :

Le réacteur étudié dans ce mémoire possède une géométrie cylindrique avec une symétrie par rapport à l'axe, ainsi qu'une symétrie physique des conditions aux limites. Ces deux symétries nous permettent de réduire la nature tridimensionnelle (3D) à un problème axisymétrique.

Le réacteur est constitué de deux compartiments (figure IV-1). Le premier est principal avec une paroi en Aluminium, où il est rempli de gaz plasmagène à une pression de 600 *mbar* et il comporte la majorité des éléments (supports en cuivre, électrodes en graphite). Le deuxième est auxiliaire avec une couverture en verre où la pression de gaz est de 10 *mbar*.

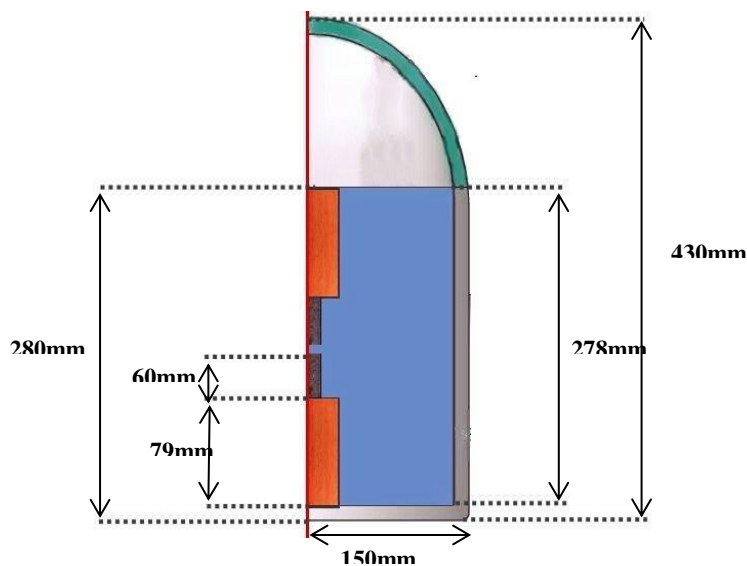
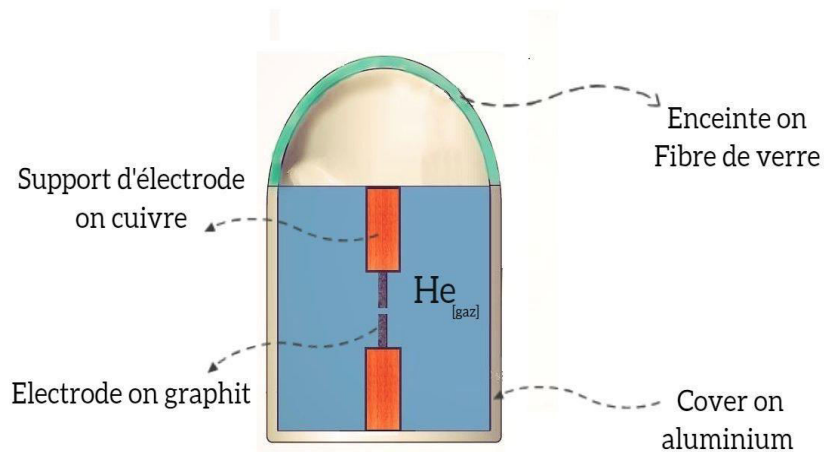


Figure IV.1 : géométrie bidimensionnel de réacteur avec les dimensions et les différents composants

Modèle mathématique et équations gouvernantes

Tableaux IV.1.Les Propriétés des Matériaux Solide :

Matériaux Utilisé	Propriété		
	Densité (ρ) kg/m^3	c_p j/kg.k	Conductivité thermique(λ) w/m.k
Fibre de verre	32	835	0.038
Cuivre	8933	385	401
Aluminium	2702	903	237
Graphite	2210	709	5.70

Tableaux IV.2.Les dimensions de réacteur :

Solide	Les Dimension		
	Diamètre	Hauteur	Epaisseur
Enceinte	300 mm	150mm	2 mm
Support d'électrode	12mm	79mm	12mm
Électrode	6mm	60mm	6mm
Paroi	300mm	280mm	2mm

IV.2 Régime de l'écoulement au sein du réacteur :

Les phénomènes mis en jeu au niveau de réacteur sont des phénomènes de transfert thermique conjugué solide (électrodes, supports, paroi)/ fluide (gaz plasmagène). Le mode de convection est naturel où la force motrice est la force d'Archimède due au changement de densité généré par la haute température du plasma. Deux profils de température de plasma à 65 A et 80 A (figure IV-2) sont considérés où les températures maximales sont respectivement 6000 et 9000 K.

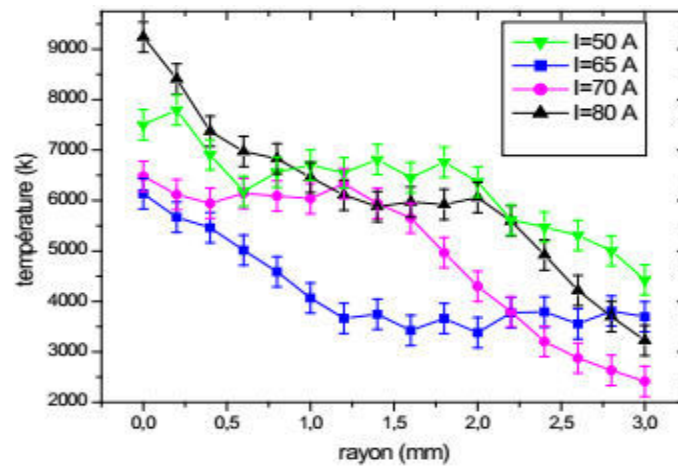


Figure IV.2 : profil des températures de plasma pour différentes intensité électrique [Go-1]

En considérant une température initiale de gaz plasmagène de 293.15 K, on peut déterminer le régime de convection naturelle à la base de corrélation suivante :

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Modèle mathématique et équations gouvernantes

Le domaine de plasma est représenté par des lignes verticales de température imposée dans l'espace inter-électrode où la longueur de chaque verticale est de 1.2 mm.

Le calcul des propriétés ainsi que le nombre de Rayleigh sont présentés dans le tableau suivant :

Type de gaz	Température de plasma (T_s)	Température de gaz (T_∞)	Température de film (T_f)	Coefficient de dilatation ($\beta = \frac{1}{T_f}$)	Viscosité cinématique ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$)	Diffusivité thermique ($\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$)	Nombre de Rayleigh (Ra)
He	9000	293.15	4646.575	2.152×10^{-4}	0.0234	0.0358	3.7892×10^{-4}
He	6000	293.15	3146.575	3.178×10^{-4}	0.0117	0.0179	1.4744×10^{-4}

Tableaux IV.3 Les nombres de Rayleigh pour les deux profils de température montrent que le régime de convection de gaz plasmagène est **laminaire** ($< 10^9$).

IV.3 Hypothèse simplificatrice :

Pour modéliser les phénomènes de transfert thermique au sein de réacteur à plasma d'arc électrique présenté ci-dessus, on a considéré les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le problème est axisymétrique.
- Le fluide est incompressible.
- Le régime d'écoulement est laminaire
- L'échange radiatif au sein de réacteur est négligeable.
- Les électrodes subissent un changement de phase.

IV.4. Modèle Mathématique et condition aux limites :

En reposant sur les hypothèses simplificatrices mentionnées ci-dessus, le modèle mathématique qui gouverne les phénomènes physiques au sein de réacteur est comme suivant :

► Gaz Plasmagène : (He, Ar, N₂)

Le gaz plasmagène subit une convection naturelle où les équations sont comme suivantes :

Equation de continuité :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + \frac{\partial(U_z)}{\partial z} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

Equations de Naïve Stocks :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + U_z \frac{\partial(rU_r)}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (\text{IV.2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -g + \beta g(T - T_\infty) - \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} \right) \end{array} \right. \quad (\text{IV.3})$$

Equation d'énergie :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{Gaz} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{Gaz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.4})$$

► Electrodes : (Graphite)

Les électrodes subissent un changement de phase, donc l'équation d'énergie s'écrit comme suivant :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial H}{\partial t} + U_r \frac{\partial H}{\partial r} + U_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{Gr} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{Gr} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.5})$$

► Les supports: (Cuivre)

L'équation d'énergie s'écrit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{Cu} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{Cu} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.6})$$

► Les parois: (Aluminium)

Modèle mathématique et équations gouvernantes

L'équation d'énergie s'écrit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{Al} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{Al} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.7})$$

► La couverture: (vitre)

L'équation d'énergie s'écrit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{vitre} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{vitre} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{IV.8})$$

Les conditions aux limites:

$U_z = 0$ et $U_r = 0$ si :

$r = 150$, $0 \leq z \leq 280$

$6 \leq r \leq 150$, $z = 0$

$r = 0$, $0 \leq z \leq 79$

$3 \leq r \leq 6$, $z = 79$

$r = 3$, $79 \leq z \leq 139$

$0 \leq r \leq 3$, $z = 139$

$0 \leq r \leq 3$, $z = 141$

$r = 3$, $141 \leq z \leq 201$

$3 \leq r \leq 6$, $z = 201$

$r = 6$, $201 \leq z \leq 280$

$6 \leq r \leq 150$, $z = 280$

$0 \leq r \leq 150$, $z = 282$

$\sqrt{r^2 + (3 - 282)^2} = 150$, $0 \leq z \leq 150$

Les conditions initiales :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \begin{cases} r = 0 & , 139 \leq z \leq 141 \\ r = 0 & , 282 \leq z \leq 432 \end{cases}$$

$$U_r(r, z, 0) = 0 \quad U_z(r, z, 0) = 0 \quad P(r, z, 0) = P_0 = 600 \text{ mbar} \quad T = 9000 \text{ K} \quad \text{ou :} \\ 0 \leq r \leq 3, \quad z = 140$$

Résultat et discussion

Résultat et discussion

V.1. Influence du gaz plasmagène:

Dans ce paragraphe, l'influence de la nature du gaz plasmagène utilisé est étudiée sur la température et la vitesse du plasma ainsi que la fraction liquide dans la zone fondue des électrodes. Ces influences sont comparées dans les trois cas Hélium, Azote et Argon.

V.1.1. champs de vitesses :

L'impact du changement de la nature du plasma sur le champ des vitesses est discuté à partir du profil des modules vitesses à l'axe de la décharge ($r=0$) et à la sortie du plasma ($r=3$ mm).

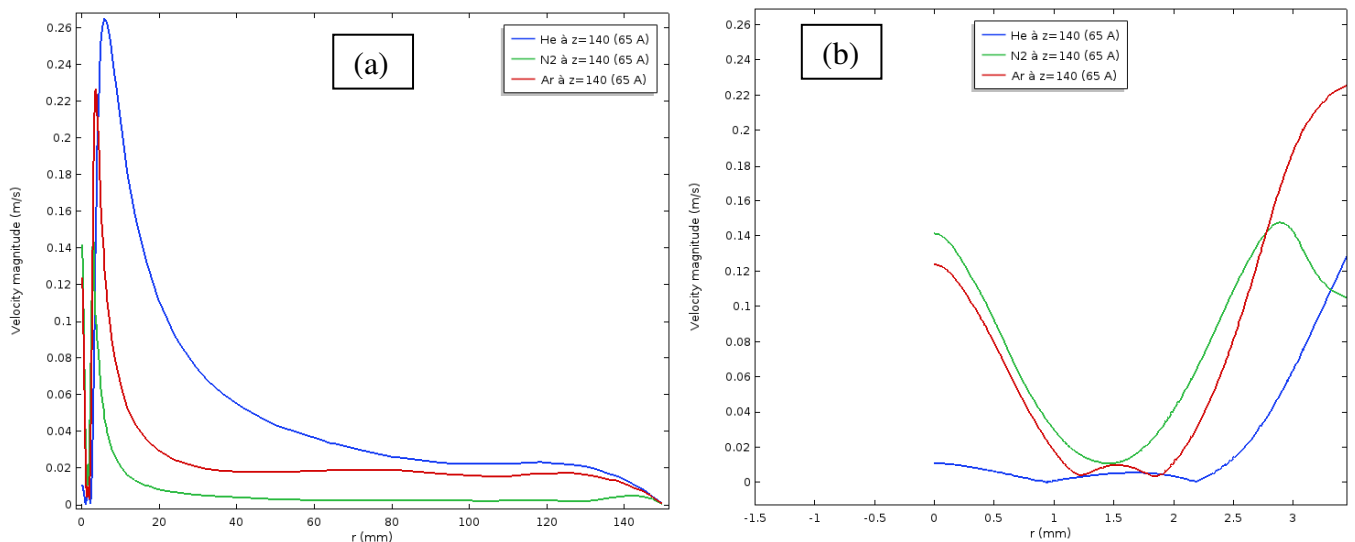


Figure V-1 : Comparaison des profils de vitesse pour les 3 gaz : Hélium (He), Azote (N2) et Argon (Ar) , au milieu de plasma ($z=140$ mm)

Vitesses sur l'axe z :

La figure V-1 : (b) illustre les profils axiaux des vitesses. Le plan $z=141$ mm correspond au milieu de l'espace inter-électrodes (milieu du plasma). Pour les trois gaz plasmagènes Hélium Azote et Argon, les valeurs maximales (respectivement de 1 cm.s^{-1} , 14 cm.s^{-1} et 12 cm.s^{-1}) sont atteintes à l'axe de la décharge et ne présente aucun changement dans leurs profils axiaux jusqu'à la sortie du plasma ($r > 3$ mm) où un changement de profil vitesse pour l'Hélium et l'Argon est nettement constaté -figure V-1 : (a)-, ce changement est manifesté par des vitesses nettement supérieures comparées à celles d'Azote, qui avait la

Résultat et discussion

vitesse maximale à l'intérieure du plasma comparée à la vitesse des deux autres gaz. En effet, La norme de la vitesse résultant dépend principalement de la masse volumique, l'Hélium (Azote) qui a la plus faible (grande) masse volumique a les vitesses les plus élevées (faible). Ce comportement est inversé au sein du plasma.

Pour comprendre l'origine de cet inversement on a suivie l'évolution des modules de vitesse avec L'argon et deux autres gaz fictifs qui ont les mêmes propriétés que l'argon et on a changé une fois la viscosité dynamique qu'on a remplacé par celle de l'Hélium et une autre fois la densité, donc deux gaz d'argon une fois un argon avec une viscosité de l'Hélium et un argon avec la densité de l'Hélium et on a suivie l'évolution de la vitesse au sein du plasma. Cette évolution est reporté sur la figure V-2 et figure V-3

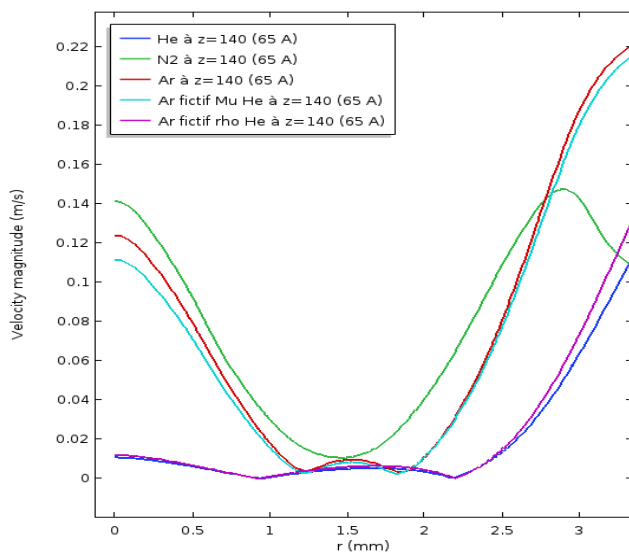


Figure V-2 : Comparaison des profils de vitesse
Avec les deux gaz fictif et Argon

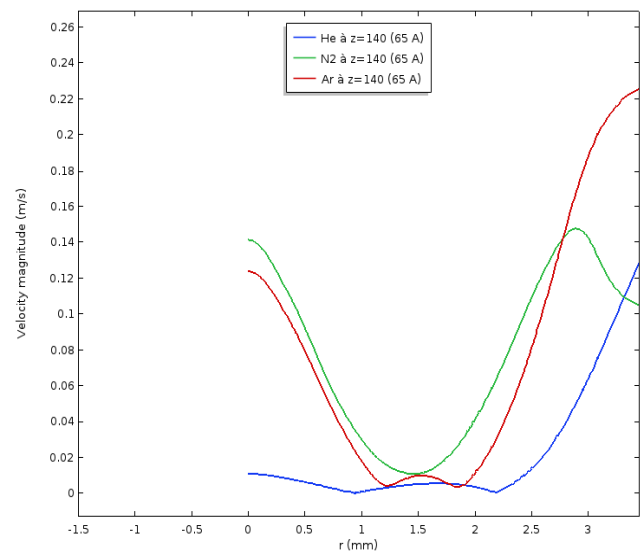


Figure V-3 : Comparaison des profils de
vitesse Avec les trois gaz réels

On constate que l'effet de la viscosité dynamique n'as pas trop d'influence si on compare l'argon réel (courbe rouge dans la figure V-2) et l'argon fictif avec une viscosité d'hélium (courbe Cyan dans figure V-2) où la vitesse diminue et passe de 0.12 m/s à 0.1 m/s, par contre si on compare l'argon réel avec l'argon fictif qui a la même densité que l'Hélium on constate que l'allure rejoint celui de l'Hélium (bleu et mauve).la cause de ce comportement peut-être expliqué par la source du quantité de mouvement (rapport de masse entre Ar et He est égale à 10).

Résultat et discussion

L'effet de la masse volumique et la viscosité sur la dynamique du plasma est nettement visible sur les champs de vitesses et pour les trois types de gaz utilisés ((a) dans la figure V-4 , V5 et V-6).

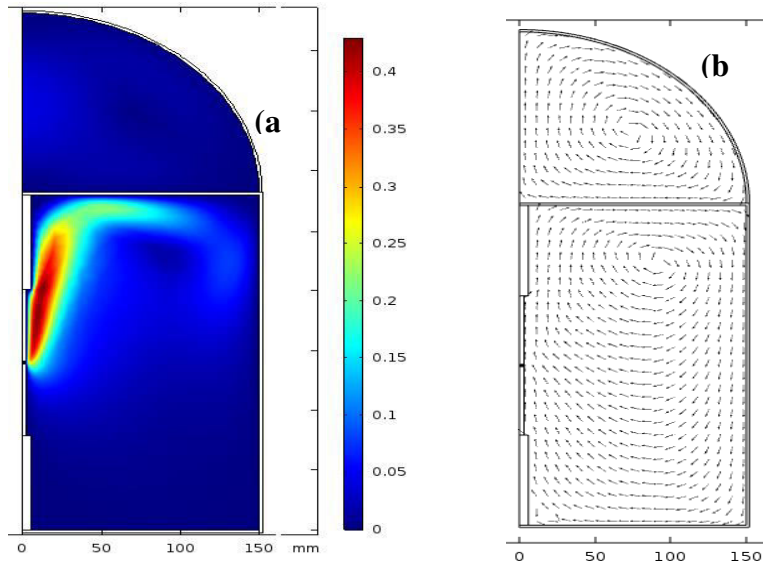


Figure V-4 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Hélium à 65 A

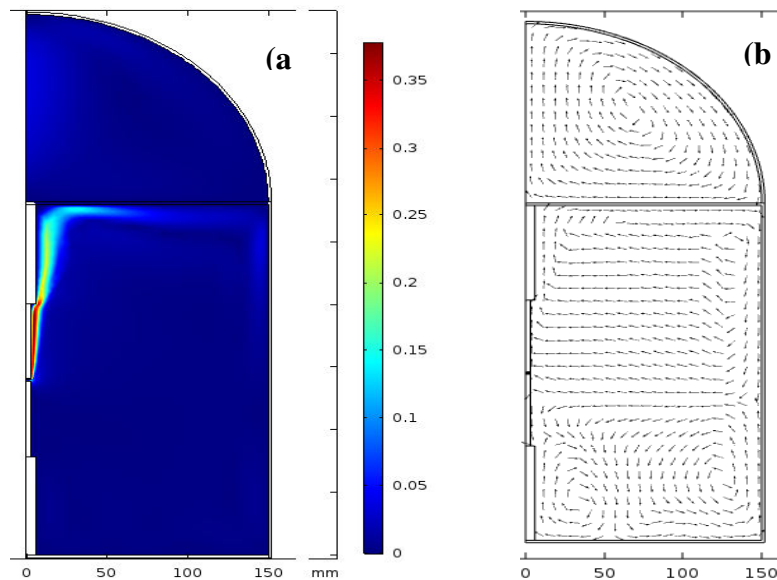


Figure V-5 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

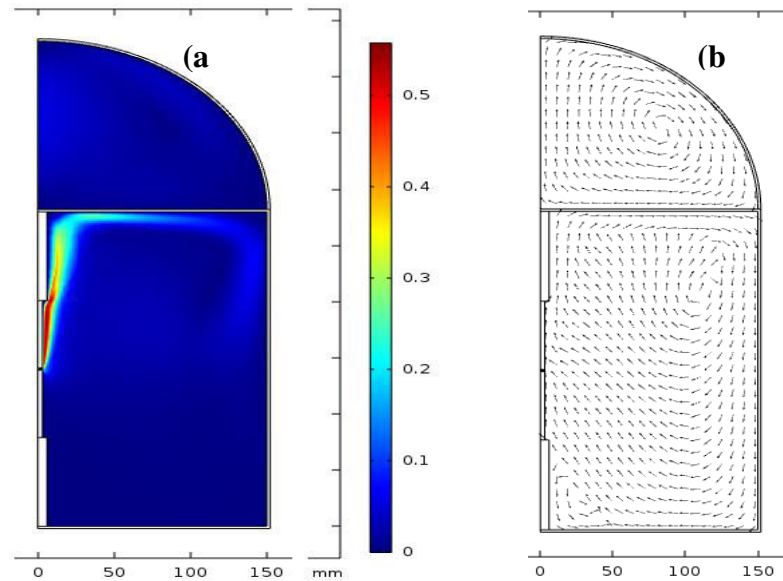


Figure V-6 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

Dans (b) dans la figure V-4 , V-5 et V-6) on a représenté les champs de vitesses. On remarque que l'allure générale du champ de vitesses est très différente suivant le gaz plasmagène utilisé. Pour l'Argon et l'Hélium l'écoulement est projetée selon l'axe de la décharge (une composante en z prépondérante), ceci peut favoriser une bonne recirculation (juste une petite zone de décollement en bas gauche du réacteur en cas d'Argon) et provoque une remontée du gaz ou réactifs échappées en bas du réacteur.

L'allure du champ de vitesses pour l'Azote est illustrée sur la figure V-5(b),on constate que l'écoulement est projetée vers la parois à droite càd une composante radiale prépondérante et la présence "deux tourbillons" en bas de réacteur ceci peut défavoriser la recirculation et donc un stockage de gaz ou réactif en bas de réacteur. Cette zone est donc reste mal réalimenté par la cinétique et la dynamique crée par le plasma dans la chambre à arc.

Cette différence de comportement peut être expliquée par la différence d'impulsions pour chaque gaz à l'échappée du plasma.

Résultat et discussion

V.1.2. Lignes de courant :

la figure V-7 montre les lignes de courant dans la chambre à arc pour les trois gaz utilisés .

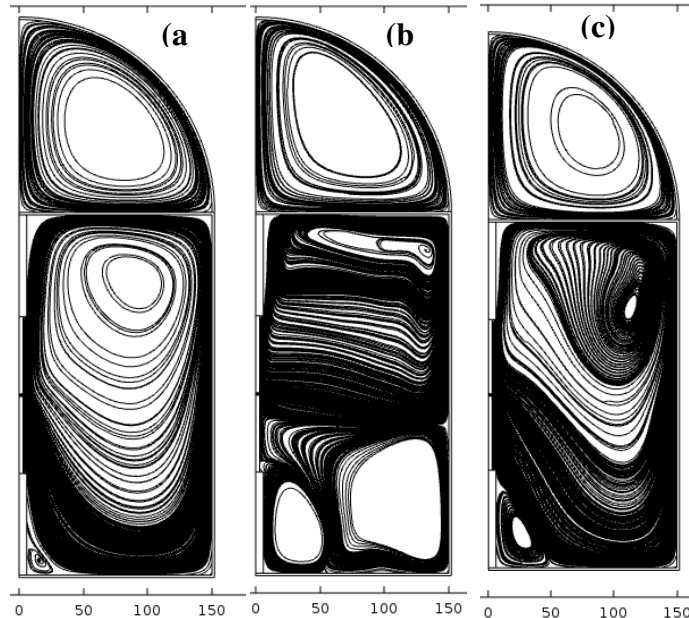


Figure V-7 : Comparaison des lignes de courant pour les trois gaz : (a) Hélium (b) Azote et (c) : Argon à 65 A

On remarque que l'écoulement présente beaucoup de symétrie est donc une bonne recirculations dans l'Hélium et l'Argon .Il en suit nos commentaires sur les champs de vitesses dans ces deux gaz. Néanmoins, on peut notifier la présence d'une petite zones de décollement (une petite zone en bas gauche du réacteur dans chacun) cette zone est un peu plus marquée pour l'Argon que pour l'Hélium). On note aussi que les lignes de courant sont un peu plus serrées dans l'Argon.

L'Azote montre deux "tourbillons" en bas de réacteur et des lignes horizontales au milieu et en haut de la chambre, ces lignes de courants sont beaucoup serrées comparées aux deux autres gaz où elles rejoignent l'allure des champs de vitesse dans ce gaz.

Résultat et discussion

V.1.3. champs de température :

Dans cette section, les champs de température obtenus pour chaque type de gaz plasmagène utilisé sont discutés. Nous rappelons ici que les températures au sein du plasma sont des températures imposées (cf. chapitre 3).

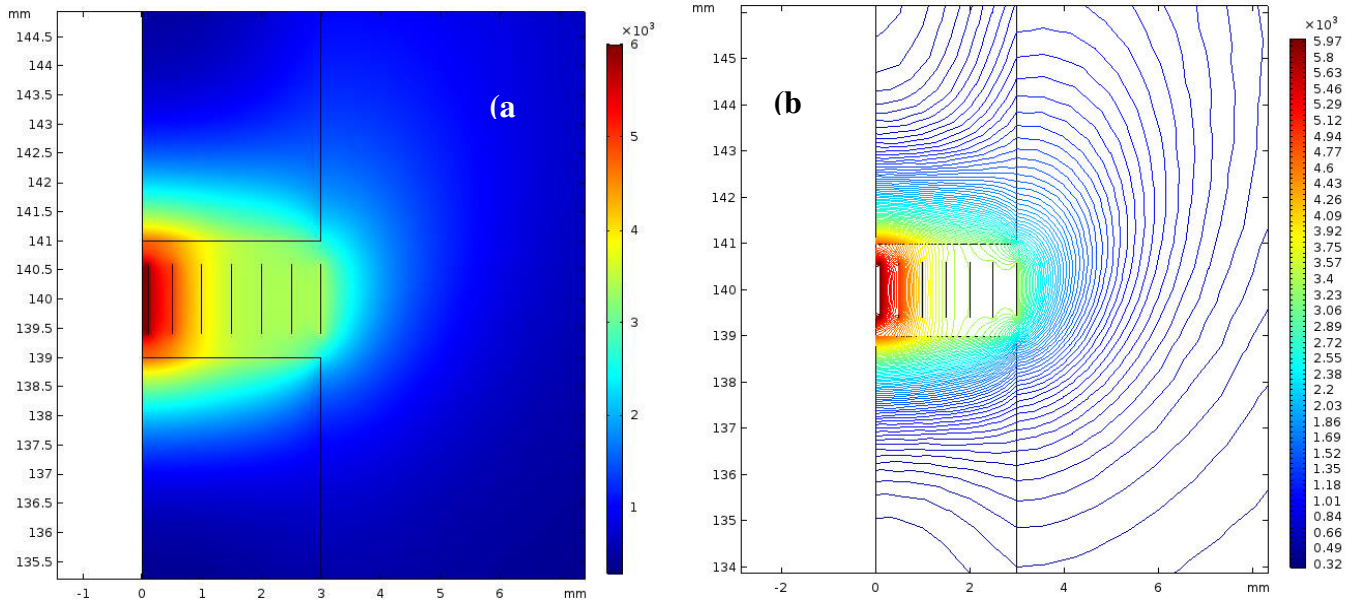


Figure V-8 : champ de température (a) et isothermes (b) ; à 65 A dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hélium (He)

Les figure (a) dans V-8, V-9 et V-10 : illustrent les champs de température dans les trois gaz, nous observons que la distribution de la température suit la forme imposée dans le plasma c.à.d. (à $r < 3$ mm) ceci est pareil pour tous les gaz plasmagène utilisés. Dans le cas d'Hélium on note une symétrie axiale et surtout radiale. Cette configuration peut traduire une meilleur équipartition de l'énergie dans l'Hélium et peut être l'origine des phénomènes convectifs ordonnés présentés dans ce gaz. La symétrie radiale est absente dans l'Azote (figure V-9 (a)). Cette absence est moins accentuée dans l'Argon (figure V-10 (a)).

Résultat et discussion

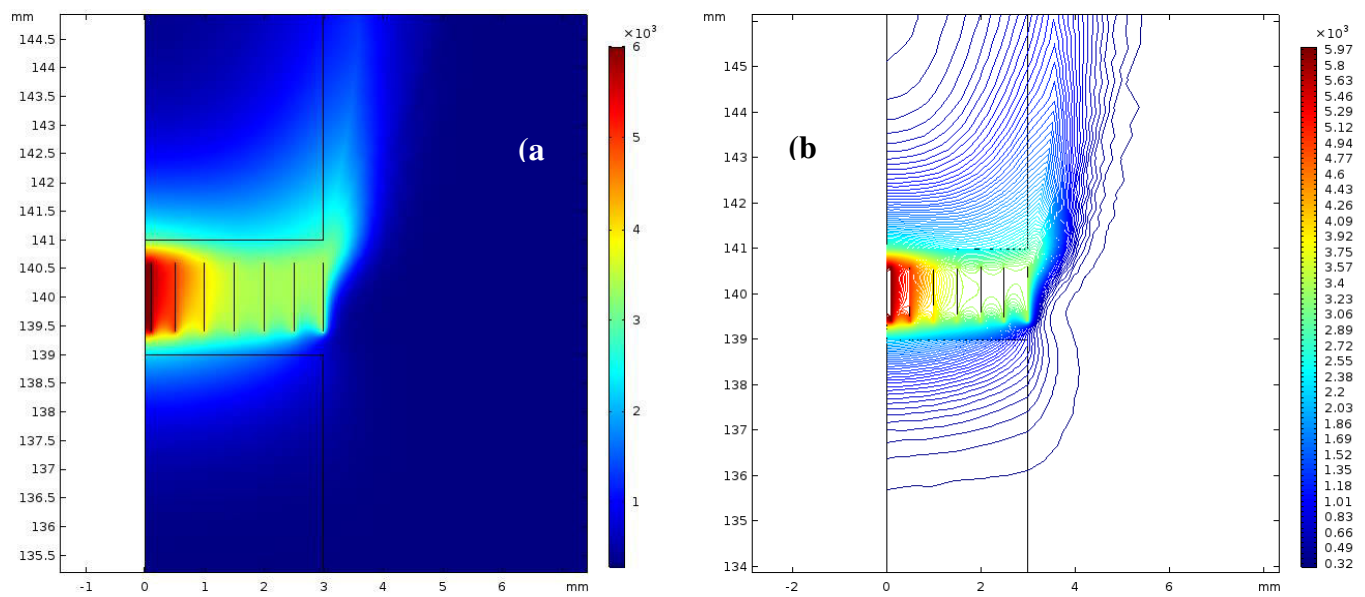


Figure V-9 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Azote (N₂)

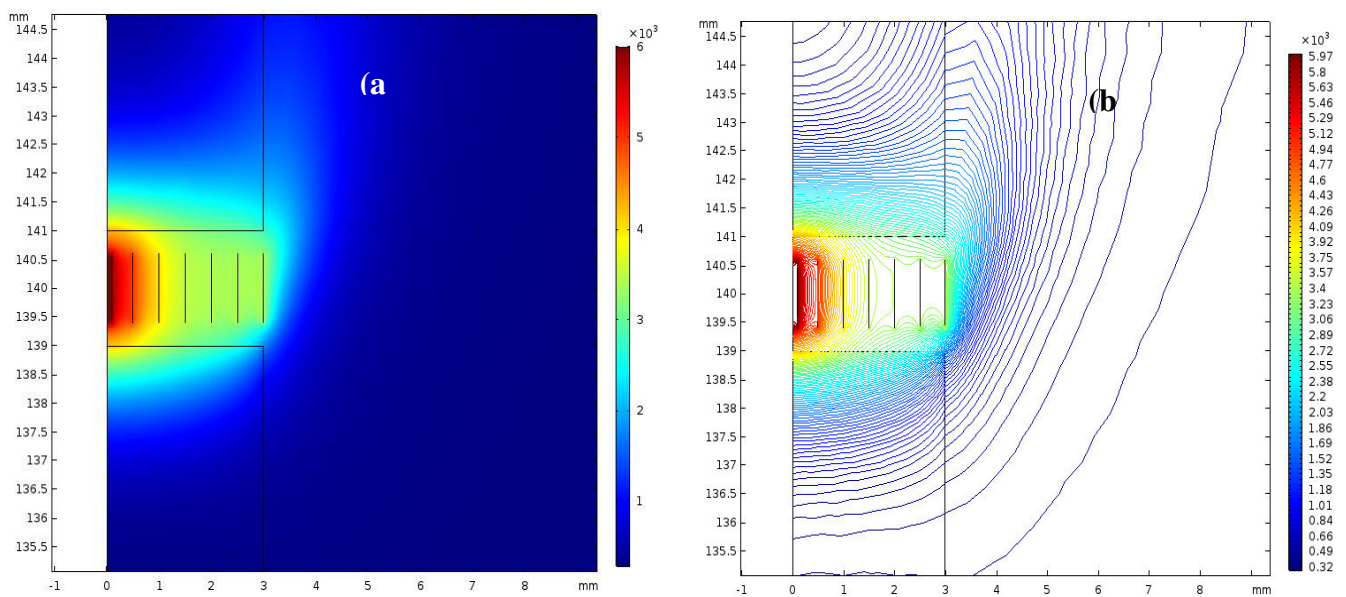


Figure V-10 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Argon (Ar)

Résultat et discussion

On note aussi une différence dans la morphologie de la zone thermique où on observe un « confinement thermique » dans l'Azote régit par une minimisation de la zone de contact entre le plasma et les électrodes, cet effet est moins marqué pour l'Argon et inversé dans l'Hélium où on rencontre une « expansion thermique » montrée sur la figure Les figure V-8 (a) avec une couleur cyan-verte dans la zone compris entre $z=139$ et $z=141$ pour $r > 3$ mm. Ces différences dans ces zones traduisent un mécanisme de transfert d'énergie du gaz chaud vers l'électrode et ce mécanisme est propre à chaque gaz.

Ce transfert d'énergie est aussi observé sur la fraction liquide (le passage du graphite dans l'électrode à l'état liquide) comme illustré sur la figure V-11 où en reconnaît clairement l'image de ce transfert dont la fraction fondue la plus grande -figure V-11 :(a) - est dans l'Hélium et la plus faible est dans l'Azote -figure V-11 :(b) – ces commentaires vient rejoignent nos constats sur la morphologie dans les champs de température notamment la minimisation (maximisation) de la zone de contact dans l'Azote (Hélium).

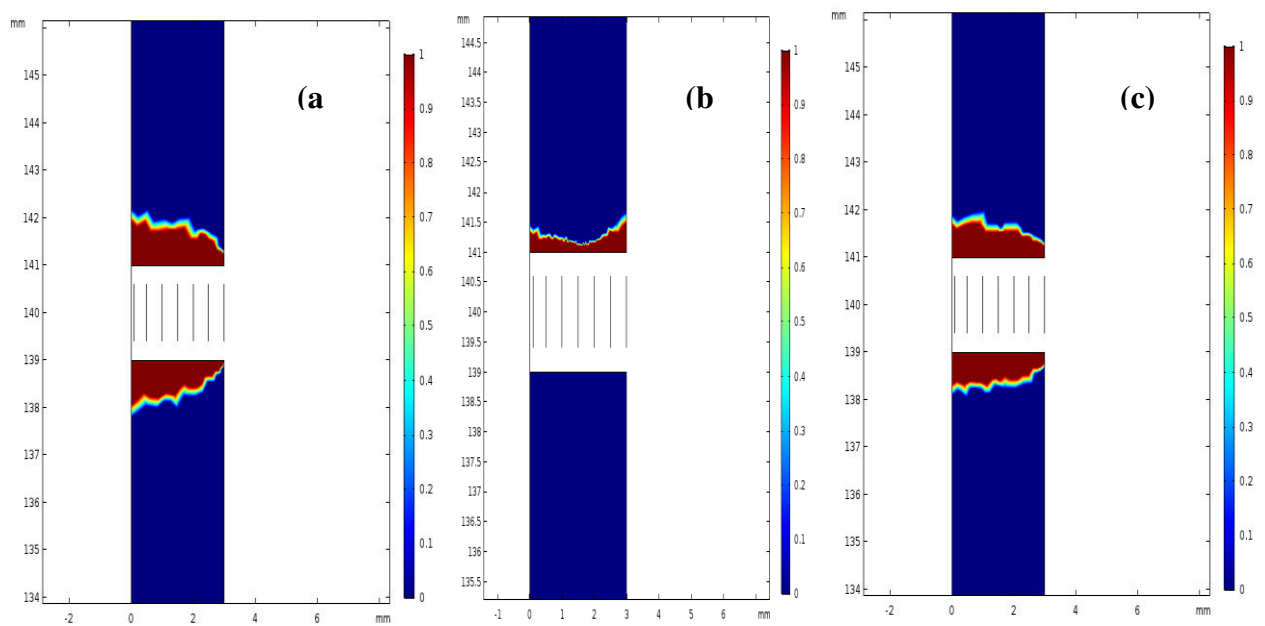


Figure V-11 : distribution de fraction liquide au niveau des électrodes en présence des gaz
(a): He, (b): N2 et (c):Ar.

Résultat et discussion

Pour essayer d'expliquer les différences dans les comportements des gaz et connaître l'origine de ce mécanisme de transfert d'énergie différent dans les trois gaz nous avons pensé à une différence dans la conductivité thermique et donc un gaz avec une mauvaise conductivité thermique engendre une résistance thermique importante et donc une énergie déposée envers l'électrode un peu plus importante aussi, ce qui n'était pas le cas, en effet dans la gamme des température imposées dans la zone inter-électrode l'Azote représente la conductivité thermique la plus élevée pour un transfert d'énergie et une taille du champ thermique la plus faibles et l'allure de la conductivité thermique ne peut pas justifié le comportement thermique des gaz .une explication sera donnée en paragraphe V.3.

On a montré sur les figures (b) dans V-8, V-9 et V-10 les isothermes dans les différents gaz plasmagènes où on observe une différence dans leurs formes en dehors de la zone du plasma, formes sphériques pour l'Hélium sont un peu espacés (un peu moins marqué la forme sphérique pour l'Argon et plus espacés en dehors du plasma) contre des isotherme trop serrées et de formes longitudinales dans l'Azote.

Résultat et discussion

V.2. Influence de la température du plasma :

Afin de mieux comprendre le phénomène de transfert d'énergie on a étudié dans les trois gaz utilisés dans l'étude précédente l'effet de deux profils de températures plasma différente un profil qui présente un profil plat et une faible température 6000K l'axe (65 A) et un autre profil qui présente un fort gradient une température de 9000 K sur l'axe et une température de 3000 K (80A) sur les bords de plasma -cf.figureIV-2-.

V.2.1. champs de température :

L'évolution des champs de température pour les deux profils du plasma 65 A et 80 A est représenté sur les figures ci-dessous.

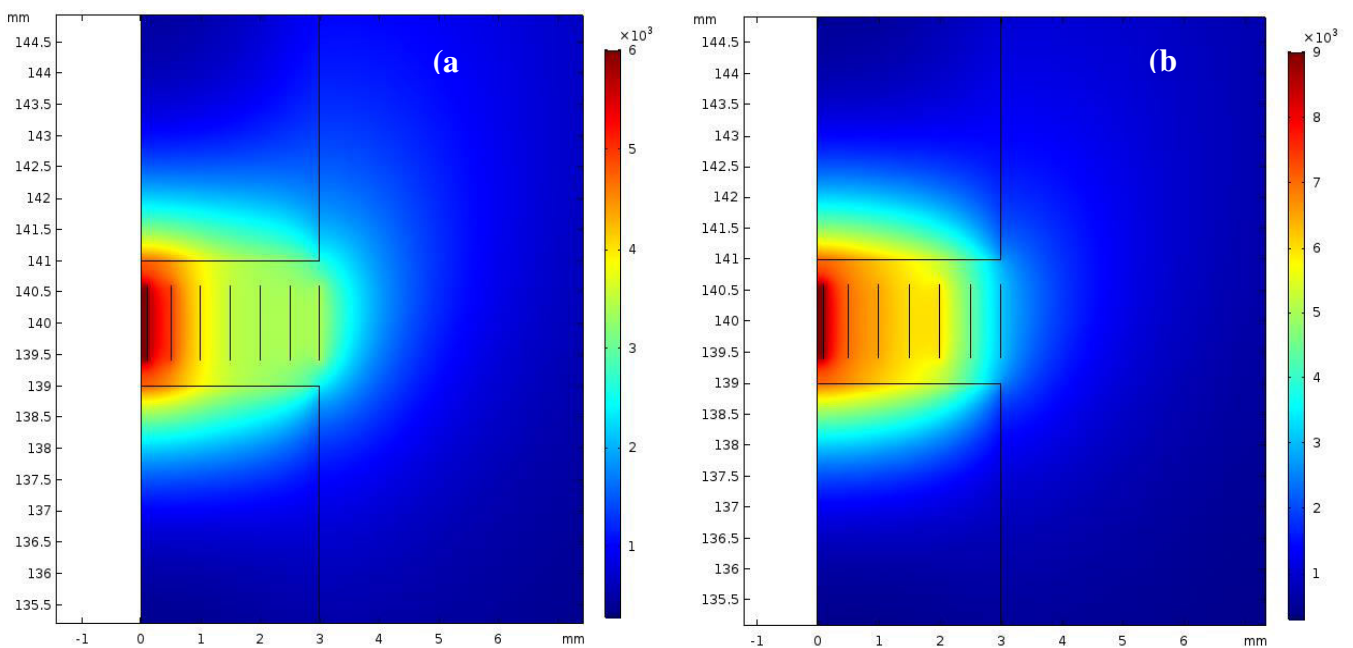


Figure V-12 : champ de température dans l'Hélium

Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A

Résultat et discussion

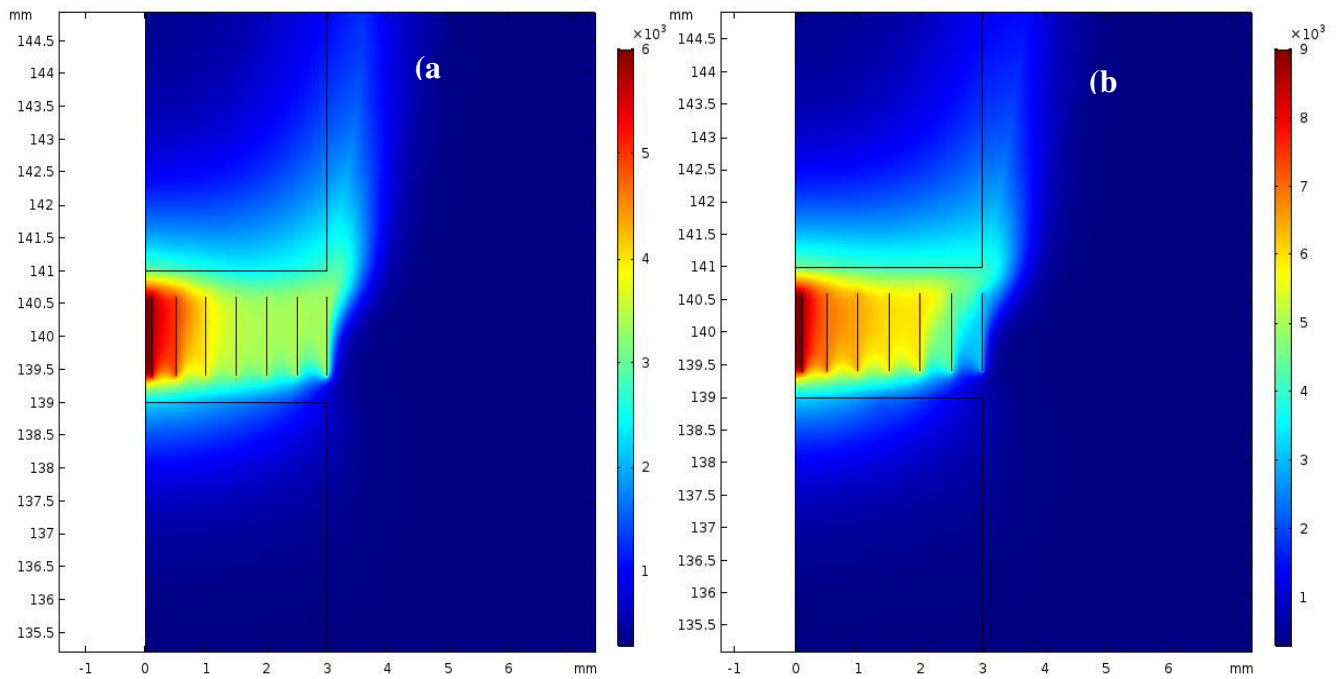


Figure V-13 : champ de température dans l'Azote

Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A

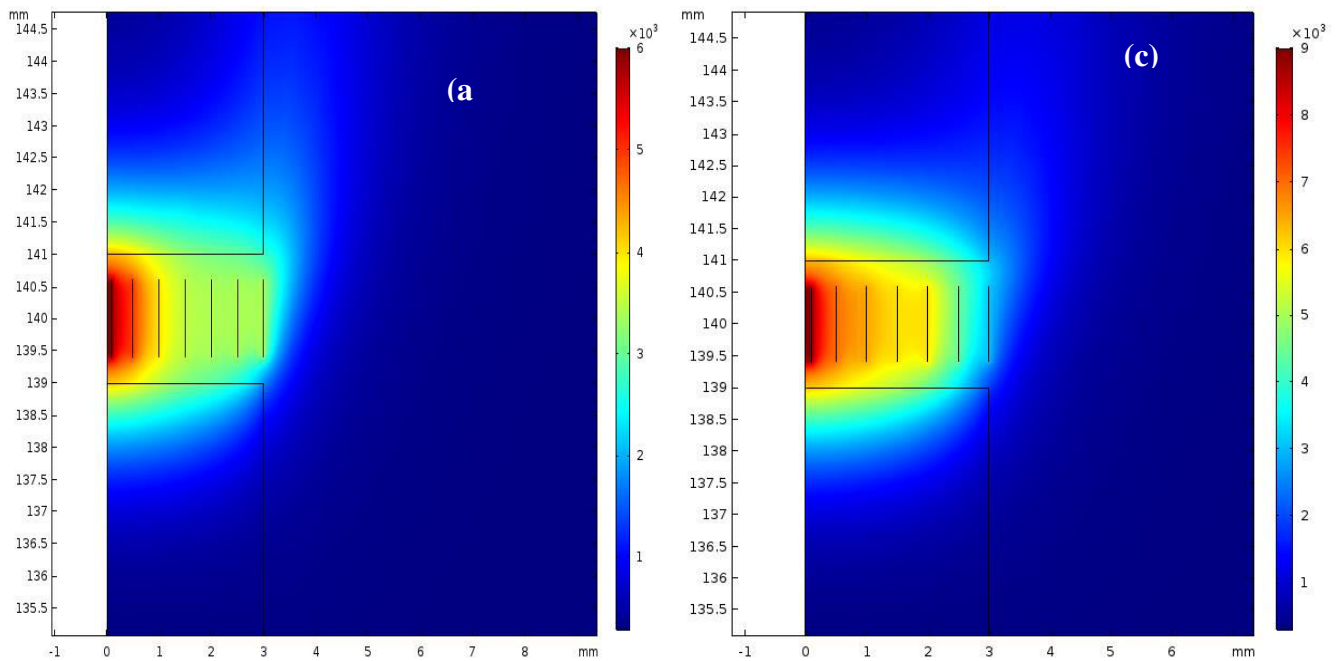


Figure V-14 : champ de température dans l'Argon

Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A.

Résultat et discussion

On remarque que l'allure générale est la même pour les deux profils étudiés dans les trois gaz étudiés sauf quelque changement d'intensité qui est dû au différence de température maximale atteinte dans les deux cas et donc on n'a pas pu tirer des conclusions sur ce point-là, Nous avons cherché l'évolution de la fraction liquide dans la zone fondue des électrodes puisque on a des températures élevées imposées dans ce profils (80 A). La comparaison de la fraction liquide pour les trois gaz dans les deux conditions de température plasma est illustrée sur la figure V-15 ci-après.

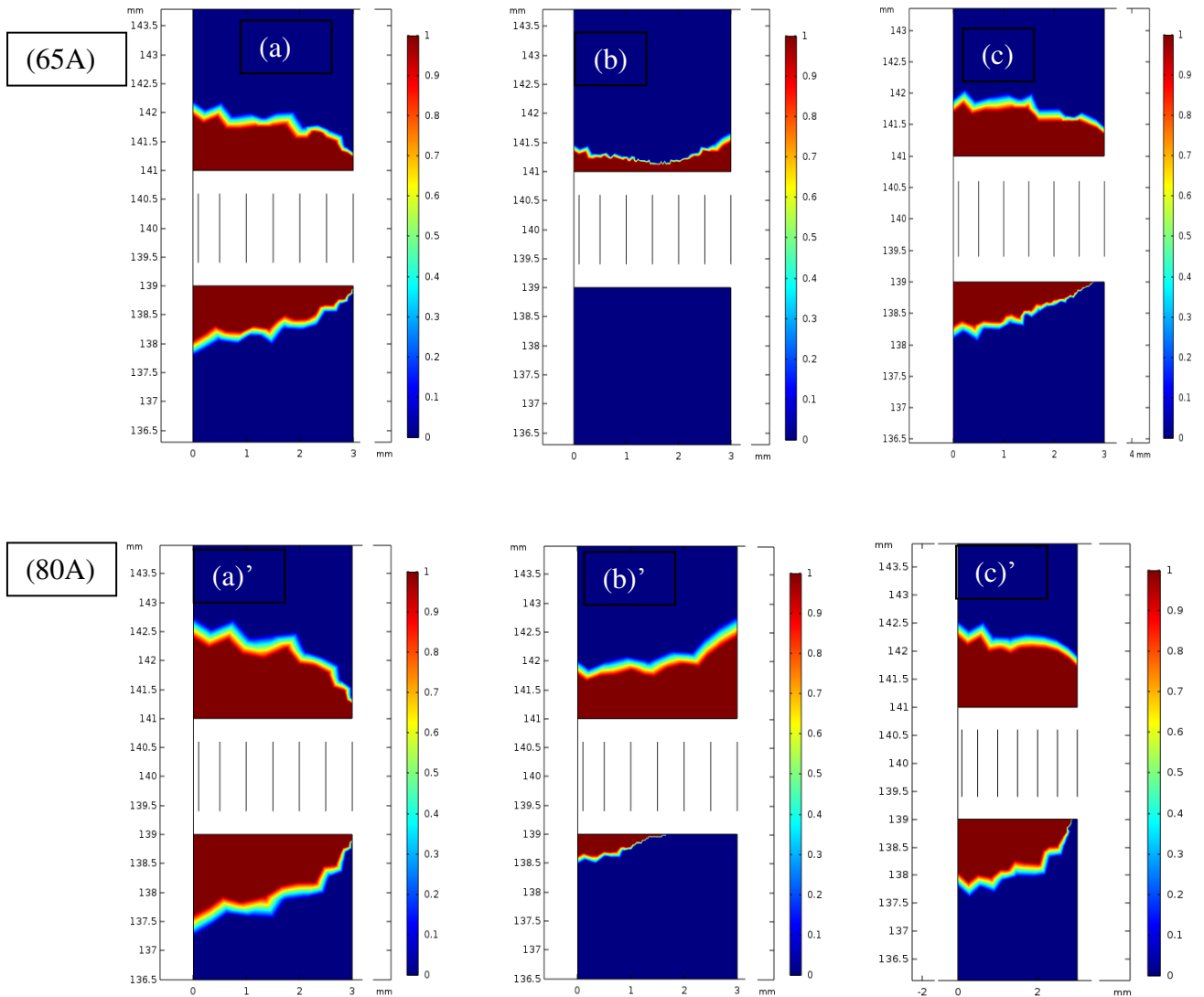


Figure V-15 : Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes (a) et (a)': He ; (b)et(b)': N2 et (c) et (c)':Ar.

Résultat et discussion

On remarque sur la figure que même avec un changement de température dans la région du plasma la fusion des électrodes garde la même allure pour dans l'Hélium et l'Argon (a) et (a') et dans l'Argon (b) et (b') avec une légère augmentation de la fraction liquide (un demi millimètre de l'électrode fondu de plus) avec le profil 80 A comparé au profil du plasma à 65 A. ce qui est tout à fait normal parce que on a une énergie déposée sur les électrode légèrement grande avec 65A qu'avec 80 A en démontrant une même image de transfert d'énergie gaz-chaud/électrode quel que soit le profil de température du gaz. Pour l'Azote – *figure V- (b) et (b)'* - on a un tout petit changement avec les deux profils de température où on remarque qu'avec le gaz le plus chaud on commence à avoir de la fusion (en haut à gauche de l'électrode du bas) mais ça reste trop faible qu'avec les deux autres gaz.

V.3. Influence variation de conductivité thermique d'anode:

Pour comprendre le comportement thermique de l'azote (confinement thermique et absence du changement de phase de l'électrode du bas), on a pensé à changer le matériaux de l'électrode en graphite du bas par une électrode en cuivre et on a suivi l'évolution du champs de température avec un profil du plasma 80 A anisi l'évoution de la fraction liquide dans ces conditions.

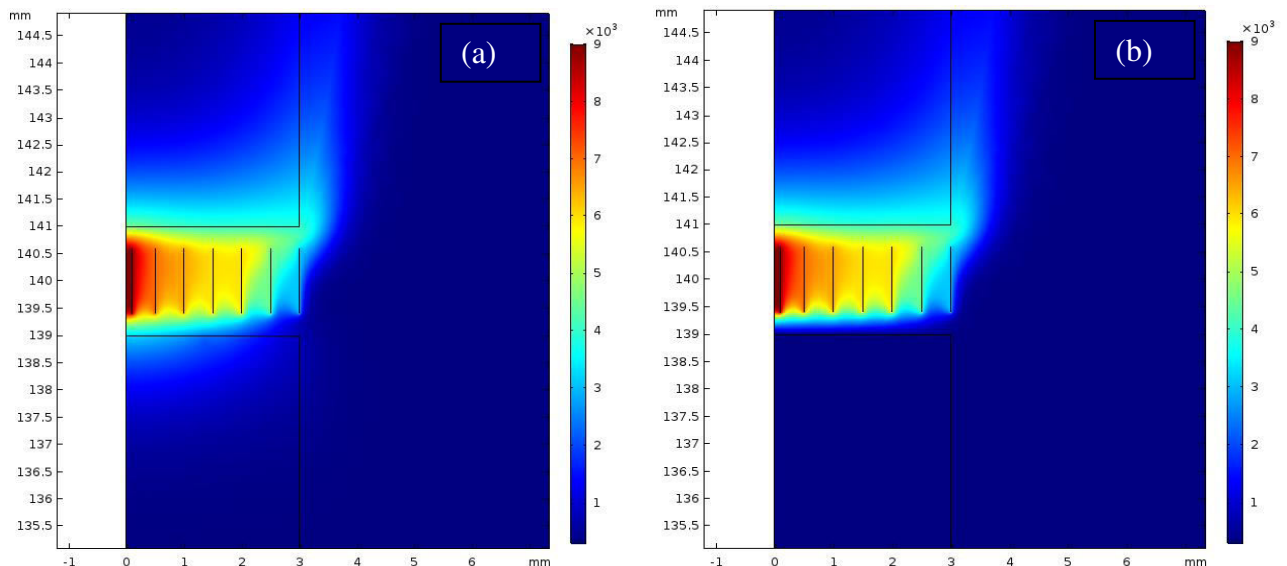


Figure V-16 : Comparaison du champs de température dans l'azote à 80 A

(a) :électrode du bas en graphite et (b) en cuivre .

Résultat et discussion

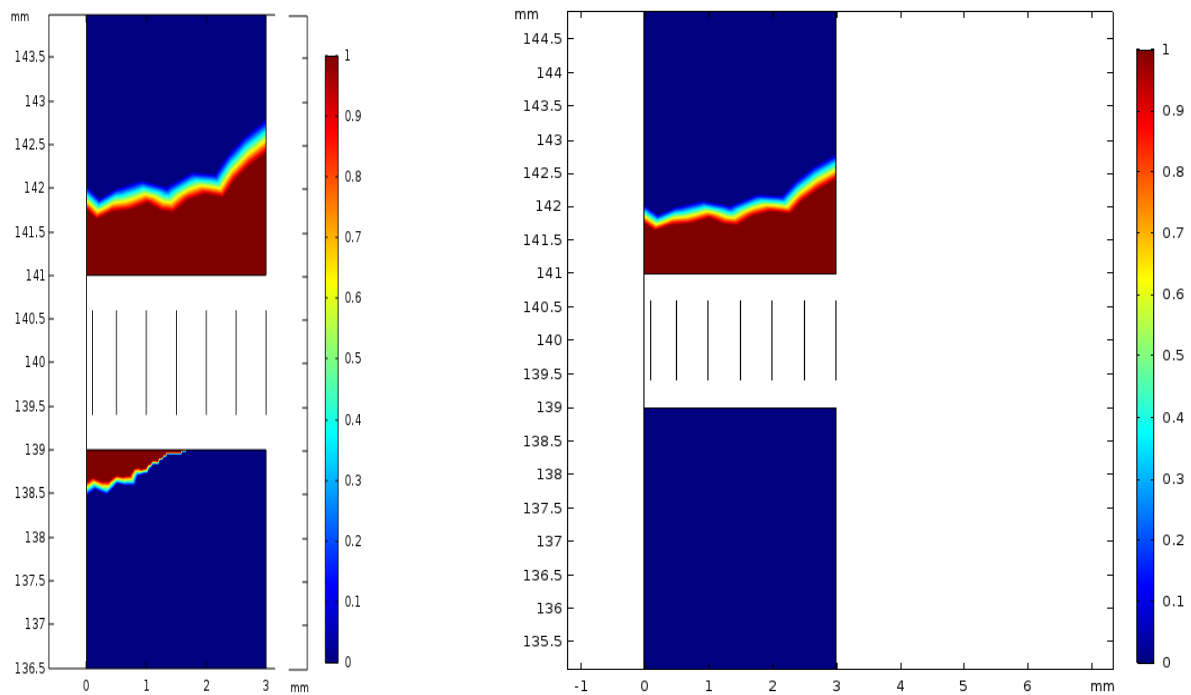


Figure V-17 : Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes dans l'azote à 80 A (a) :anode en graphite et (b) en cuivre.

On a remarqué que meme avec un électrode en cuivre (une meilleure conductivité thermique) la température reste faible et le comportement de l'azote n'a pas changé ainsi dans la zone fondue aucun changement de phase est observée, en effet notre étude est menée dans le régime instationnaire et on a essayé de voir la diffusivité thermique de chaque élément essentielle dans l'étude (gaz-solide) et on a pu conclure que l'azote à une capacité de stockage volumique à des température > 6000 K la plus élevée $\approx 52 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ contre $\approx 37 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ dans l'argon et l'Helium , et donc sur la séquence considérée la montée en température et l'évolution de la fraction liquide dans le cas de l'utilisation d'azote ne peut pas être observée.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Pour une utilisation plus large des plasmas thermique, notamment l'utilisation des procédés de synthèse, tel les réacteurs à arc électrique, nécessite une bonne maîtrise de tout aspect physique mis en jeux au sein du réacteur, ainsi une meilleure compréhension des phénomènes de transfert de l'énergie et de masse est nécessaire. Dans ce mémoire une simulation hydrodynamique et thermique du réacteur a été abordée.

Un modèle instationnaire est étudié, nous avons démontré tout au long du travail l'influence des paramètres que nous avons jugés essentielles (nature de gaz plasmagène, le profil de température plasma et la conductivité électrique de l'électrode du bas) sur les champs, les modules et les vecteurs de vitesse et aussi nous avons étudié l'influence de ces paramètre sur les champs de température et les lignes de courant.

Nous avons pu constater que l'Hélium assure une bonne recirculation dans la chambre à arc et donc une bonne réalimentation du milieu par les réactifs et les produits misent en jeux lors du processus, ce qui n'était pas avec l'azote où la présence des zones de décollement peut être présentent.

Nous avons vu aussi que l'azote a une grande capacité de stockage de chaleur et donc une mauvaise diffusivité ceci peut être utile pour dans les procédés qui nécessite un bon temps de séjour, quant à l'Hélium, une bonne répartition de la chaleur dans la chambre est rencontrée.

Le transfert d'énergie arc-matériaux est aussi étudié. Ce transfert est une image directe de la distribution de la fraction liquide étudiée et comparée dans chaque étape de l'étude, nous avons constaté que le transfert est efficace dans l'Hélium et Argon, est minimal avec l'utilisation de l'azote, nous avons étudié aussi l'influence de la conductivité thermique sur ce transfert ou nous avons pu voir que même avec l'utilisation du cuivre (une très bonne conduction thermique) n'influence pas énormément la fraction liquide dans les électrodes dans la durée de simulation considérés ainsi une étude stationnaire apparait nécessaire pour pouvoir déterminer le rôle de la conductivité thermique ceci est dû de la bonne diffusivité du cuivre et donc l'influence sur la durée de simulation considérée dans notre cas reste à discuter.

Une des prespective proche de ce travail est la modélisation du plasma ainsi le problème peut être entourée et une bonne maîtrise du procédé peut être atteinte.

Bibliographie

Bibliographiques

- [Bau-1] **J M Bauchire, D Hong, F Gentils et C Fievet**, « *Le disjoncteur basse-tension et l'arc électrique* », 5^{ème} journée du réseau plasmas froid, Bonascre (2006)
- [Bou-1] **M I Boulos, P Fauchais et E Pfender**, « *Thermal plasmas : Fundamental and Applications* », Plenum Press, New York (1994)
- [Bra-1] **K P Brand et J Kopainsky**, « *Particle densities in a decaying SF₆ plasma* », *Appl. Phys.***16**, 425-432 (1978)
- [Koc-1] **D Koch**, « *Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils MT et HT* », cahier technique n°188, Schneider Electric (2003)
- [Lar-1] **G Laroche**, « *Les plasmas dans l'industrie* », Collection Electra, Dopee, Avon, ISBN 2-86995-017-9 (1991)
- [Mon-1] M. Monthioux, *Introduction to Meta-Nanotubes*, pp. 1-5. In ***Meta-Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications*** (editor: M. Monthioux), Wiley-Blackwell (UK), (2012).
- [Oh-1] Oh I K, Jung J H, Jeon J H and Sridhar V 2010 Electro-chemo-mechanical characteristics of fullerene-reinforced ionic polymer–metal composite transducers *Smart Mater. Struct.* **19** 075009
- [Ram-1] Ramarozatovo, Vonjy. « *Elaboration in-situ et caractérisation de nanotubes hétérogènes par plasma d'arc électrique* » Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier –France (2011).
- [Rax-1] **J M Rax**, « *Physique des plasmas : cours et applications* », Dunod, Paris (2005)
- [Ost-1] Ostrikov K, Cvelbar U and Murphy A B 2011 Plasma nanoscience: setting directions, tackling grand challenges *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 174001