



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

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique des plasmas

Par : Berrah Roumaissae

Sur le thème

---

**Simulation des écoulements dans un réacteur à arc et étude des phénomènes de transfert thermique plasma-gaz.**

---

Soutenu publiquement le 02 juillet 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme BEDRANE Zeyneb	Professeure	Université de Tlemcen	Présidente
Mr GOURARI Djamel Eddine	MCF	Centre Universitaire de Naama	Encadrant
Mme BENSALAH Rahma	MCF	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr LIANI Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Berrah/2022

*Année Universitaire : 2022 ~ 2023*

## Remerciements :

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mes travaux : au Professeur BEDRANE ZEYNEB pour avoir accepté de présider mon jury de mémoire, Professeur LIANI BACHIR et Mme BENSAID RAHMA pour avoir accepté la tâche d'être examinateurs de ce travail de recherche.

Merci également à mon Encadrant M. Gourari Djamel Eddine pour le temps qu'il est consacré à mon encadrement. Qui a codirigé ce travail de mémoire. Leur disponibilité, leur encouragement dans les moments difficiles et leur qualité humaines est permis l'aboutissement de cette mémoire.

Les mots me trahissent quand je remercie mes parents, donc mes plus hautes expressions de gratitude ne sont pas assez d'appréciation et de respect pour les deux personnes les plus chères de ma vie, pour ceux qui ont éclairé mon chemin avec leurs conseils et étaient une mer débordante d'amour et sourires, pour ceux qui m'ont donné la force et la détermination de continuer à étudier, pour ceux qui m'ont appris la patience et la volonté. MA Mère et MON Père. Je leur dédie le fruit de mon humble effort, qui ne peut jamais être comparé à ce qu'ils m'ont donné.

A mon frère Hammam et mes deux sœur Rayhana et Assma, à ma joie de vivre qui j'ai passé les plus beaux moments de ma vie. Merci de me soutenir dans les moments difficiles et de partager ma joie dans les bons moments. Je vous souhaite à tous succès et réussite dans tous les domaines de la vie et atteindre les plus hauts rangs et grades. Je serai toujours ta grande sœur aimante et solidaire.

Je remercie spécialement et affectueusement mon mari Ahmed Ammar Djamel pour leur patience et leur compréhension et tout ce qu'il a fait pour moi, je lui souhaite tout le meilleur et j'espère que la joie de l'obtention du diplôme sera le début de plus de joies et de succès dans nos vies. Merci pour tout.

Je remercie particulièrement tous les membres de la famille Ahmed Ammar, Le père, Les frères et Les sœurs.

الى روح ام زوجي الطاهرة الزكية. رحمها الله واسكنها فسيح جنته وألحقنا بها مسلمين

## Table des matières

Introduction générale :.....	7
Chapitre 1 : .....	9
Etudes bibliographique de l'arc électrique.....	9
1. Généralité sur l'arc :.....	10
2. La notion plasma thermique :.....	10
3. Différents types de plasma :.....	11
4. Génération de plasmas thermiques :.....	12
5. Conditions de formation :.....	15
6. Propriétés physiques de l'arc : .....	15
7. Applications et utilisations majeures : .....	16
7.1. Lampe à arc : .....	16
7.2. Four à arc :.....	16
7.3. Soudure à arc :.....	16
7.4. Bougies d'allumage : .....	17
7.5. Appareils de coupure : .....	17
7.6. Torche à plasma :.....	17
Chapitre 2 : .....	18
Simulation de transfert thermique dans un réacteur à arc .....	18
1. Contexte de l'étude : .....	19
2. Dispositif de synthèse : .....	19
2.1. La chambre à arc .....	20
2.2. Le gaz plasmagène .....	22
3. Les phénomènes physiques impliqué (l'aspect physique) .....	22
3.1. Le rayonnement : .....	22
3.2. La convection et la conduction (Loi de fourrier) : .....	24
3.3. L'effet joule :.....	24
3.4. La force de Marangoni : .....	24

3.5. La force de Lorentz : .....	25
4. Définition de Problème : .....	25
4.1. Les propriétés thermiques des matériaux solides : .....	26
4.2. La capacité thermique des gaz : .....	27
4.3. La viscosité dynamique des gaz : .....	29
4.4. Les dimensions de réacteur : .....	30
5. Régime de l'écoulement au sein du réacteur : .....	31
6. Hypothèse simplificatrice : .....	32
6. Modèle Mathématique et condition aux limites : .....	33
7.1. Gaz Plasmagène : (He, Ar, N2) .....	33
7.2. Electrodes : (Graphite) .....	33
7.3. Les supports : (Cuivre) .....	34
7.4. Les parois : (Aluminium) .....	34
7.5. La couverture : (vitre) .....	34
Chapitre 3 : .....	35
Résultats et discussions .....	35
1. Influence du gaz plasmagène : .....	36
1.1. Champs de vitesses : .....	36
1.1.1. Vitesses sur l'axe z : .....	36
1.2. Lignes de courant : .....	41
1.3. Champs de température : .....	42
2. Influence de la température du plasma : .....	45
2.1. Champs de température : .....	45
3. Influence de la conductivité thermique de l'anode : .....	49
Conclusion générale .....	51

# **Introduction générale**

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 dizaines 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 voire impossible à maîtriser. À titre d'exemple les travaux de V. Ramarozatovo [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 [1]. Ajoutant à ça la complexité du point de vue physicochimique 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 autres applications utilisant les plasmas.

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 les réacteurs à arc avec une configuration utilisés dans beaucoup des équipes et laboratoires et qui sont 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.

# **Chapitre 1**

## **Etudes bibliographique de l'arc électrique.**

## 1. Généralité sur l'arc

Les arcs électriques sont actuellement considérés comme un outil pour certaines applications et dans de nombreux domaines de recherches, notamment les disjoncteurs, le soudage, le découpage, les fours métallurgiques, la dépollution, l'étude de la foudre sur les aéronefs ou la fabrication de nanostructures. Pour appréhender les processus pertinents pour ces applications directement liées aux arcs électriques, les scientifiques se tournent vers le domaine de la simulation dans la physique des plasmas.

Le plasma généré par arc appartient à la catégorie des plasmas thermiques. Il s'agit d'un état spécial de matière électriquement neutre et conductrice dans lequel les températures des ions, des électrons et de la matière neutre qui la composent sont considérées comme étant presque les mêmes, généralement de l'ordre de dix mille Kelvin.

Ce type de plasma se caractérise par une température élevée, une densité d'énergie élevée et un rayonnement élevé. Dans le cas d'un arc à pression atmosphérique et à courte distance inter-électrodes (environ un millimètre à plusieurs centimètres), la tension et le courant d'arc peuvent être respectivement de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de volts et de quelques ampères à plusieurs dizaines de milliers d'ampères.

Ainsi, comme pour toute décharge électrique, l'amorçage entre la cathode (collecteur de charges positives et émetteur d'électrons) et l'anode (collecteur des électrons) nécessite une énergie électrique minimale de quelques centaines de joules à quelques kilojoules. Selon l'application recherchée, cette énergie peut être injectée en impulsions, en alternance ou en continu sur des échelles de temps très variables (de la dizaine de nanosecondes à la seconde).

## 2. La notion plasma thermique

Le plasma est un gaz ionisé qui, contrairement à un gaz ordinaire, est électriquement conducteur en raison de la présence de porteurs de charge libres. Un plasma est constitué généralement d'électrons, d'ions et de neutres à l'état fondamental, d'espèces excitées et de photons. Un tel mélange n'est qualifié de plasma que si les charges négatives et positives s'équilibrent, c'est-à-dire que globalement un plasma doit être électriquement neutre. Cette propriété est connue sous le nom de quasi-neutralité. L'état plasma est souvent considéré comme le quatrième état de la matière dans la séquence : solide, liquide, gaz et plasma. Cette

Classification est justifiée par le fait que plus de 99% de l'univers connu est à l'état de plasma.

Le soleil est un exemple typique, dont les températures intérieures dépassent  $10^7 K$ . Le contenu énergétique élevé d'un plasma par rapport à celui des solides, des liquides ou des gaz ordinaires se prête à un certain nombre d'applications importantes.

### 3. Différents types de plasma

Les plasmas sont classés soit comme des plasmas naturels ou artificiels. Comme mentionné précédemment, les plasmas naturels représentent plus de 99% de l'univers connu aujourd'hui. Deux des premiers phénomènes de plasma connus sont la foudre et les aurores boréales. Ces deux phénomènes de plasma se produisent respectivement à des pressions relativement élevées et extrêmement basses, ce qui entraîne des différences drastiques dans leur apparence. Dans le cas de la foudre, des canaux étroits à haute luminosité, tandis que les aurores boréales apparaissent comme un événement diffus, répandu (de dimensions astronomiques) et à faible luminosité. La pression d'un plasma affecte non seulement sa luminosité mais aussi l'énergie (ou température) des différents composants du plasma et leur état thermodynamique.

Les plasmas se produisent sur une si large gamme de pressions, il est donc habituel de les classer en termes de températures électroniques et de densités électroniques. Les plasmas extrêmement confinés (que l'on trouve, par exemple, dans la couronne solaire) peuvent prendre des températures supérieures à  $10^6 K$ , tandis que les plasmas de densités similaires dans l'ionosphère peuvent avoir des températures de  $10^3 K$  ou même moins. Les flammes, qui peuvent également être classées comme des plasmas, présentent des densités d'électrons et des températures un peu plus élevées. Dans une flamme à pression atmosphérique, le degré d'ionisation  $\xi = n_e / (n_e + n)$  est cependant de l'ordre de  $10^{-10}$ .

Les décharges luminescentes, qui sont typiquement opérées dans une plage de pression de  $10^{-4}$  à  $1 kPa$ , révèlent des températures d'électrons de l'ordre de  $10^4 K$  et des températures de particules lourdes proches de la température ambiante. Dans une lampe fluorescente, par exemple, la température des électrons peut atteindre  $2.5 \times 10^4 K$ , mais la température des particules lourdes reste proche de  $300 K$ . Des conditions extrêmes en termes de densité électronique et de température existent dans les plasmas de fusion thermonucléaire. Dans le cas des plasmas de fusion à confinement inertiel, les densités d'électrons et d'ions peuvent dépasser  $10^{26} m^{-3}$ , et les températures des plasmas à confinement magnétique et à confinement inertiel sont généralement supérieures à  $10^6 K$  et peuvent atteindre  $10^8 K$ .

#### 4. Génération de plasmas thermiques

Les plasmas peuvent être générés en faisant passer un courant électrique à travers un gaz où un nombre suffisant de porteurs de charge doit être généré pour rendre le gaz électriquement conducteur. Ce processus est connu sous le nom de claquage qui établit un chemin conducteur entre une paire d'électrodes. Le passage d'un courant électrique à travers le gaz ionisé entraîne une série de phénomènes appelés décharges électrique dans les gaz. De telles décharges sont le moyen le plus courant, mais pas le seul, pour produire des plasmas. La discussion dans ce mémoire sera limitée aux plasmas thermiques générés par arc électrique. Les plasmas qui ne sont pas produits par des décharges électriques (c'est-à-dire ceux produits par laser, des faisceaux de particules à haute énergie ou par des ondes de choc ...) ne seront pas inclus.

Les arcs électriques peuvent être classés selon le processus de génération de plasma par :

- **Arcs non transférés :**

Dans les arcs non transférés, les deux électrodes ne participent pas au processus et sont utilisées pour la génération de plasma. Il produit un jet de plasma à haute température qui permet au matériau à traiter d'être injecté pour l'opération de fusion. Les jets de plasma ont une température maximale de l'ordre de 12000 K et des vitesses aussi élevées. Le couple d'électrodes pourrait avoir une géométrie différente ; un barreau cylindrique (cathode) et un cylindre creux (anode) ou deux cylindres coaxiaux pouvant fonctionner avec des polarités opposées. Les électrodes sont généralement refroidies à l'eau. Les torches à arc non transféré sont disponibles avec des puissances comprises entre 1 kW et 6 MW [2]. La Figure 1. montre le schéma de principe de l'utilisation des réacteurs à arc non transféré dans la synthèse par plasma thermique de nanoparticules[3].

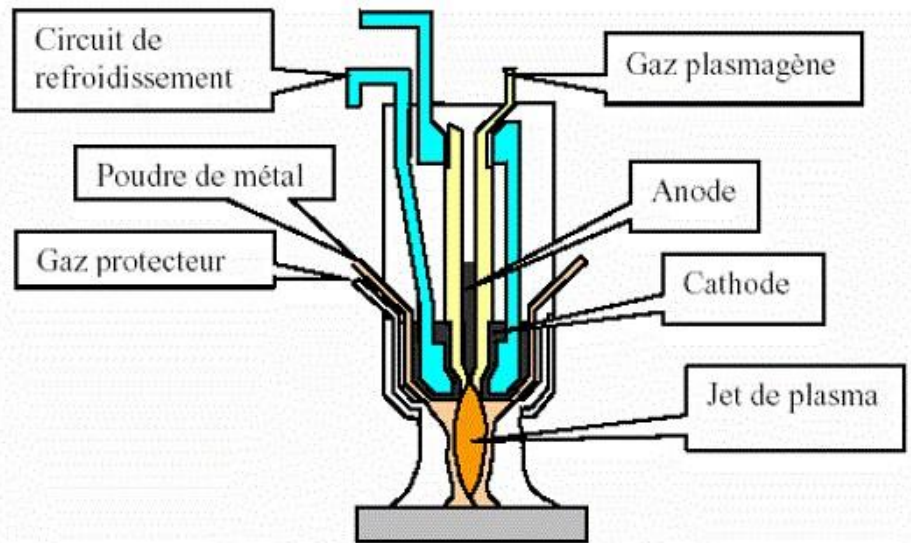


Figure 1 : schéma de l'arc non transféré.

- **Arcs transférés DC:**

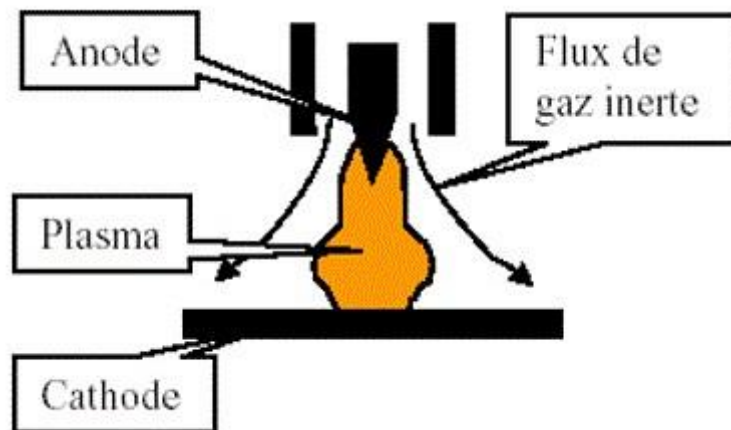


Figure 2 : schéma de l'arc transféré [4]

Dans les réacteurs à arc transféré, l'une des électrodes (anode) est externe, de sorte que l'arc a transféré à l'anode externe constituée d'un matériau conducteur. Cela permet d'utiliser des flux thermiques extrêmement élevés pour les traitements de la matière (fusion des métaux). Dans l'arc transféré, la séparation physique entre la cathode et l'anode est relativement grande. La longueur de l'arc plasma peut aller de quelques centimètres à près d'un mètre dans les fours industriels de forte puissance. De tels dispositifs de génération de plasma peuvent fonctionner avec un débit de gaz plasma minimal pour un niveau de puissance donné par rapport aux torches à arc non transféré à courant continu.

La cathode peut être constituée d'un métal refroidi à l'eau ou d'un matériau conducteur consommable par sublimation. La cathode consommable généralement en graphite présente les avantages qu'elle ajoute quelque temps comme réducteur dans l'extraction des métaux. L'inconvénient est qu'il contamine les produits avec du carbone et nécessite une substitution plus fréquente. Les électrodes non consommables ont généralement une durée de vie plus longue mais nécessitent plus d'attention pour empêcher l'érosion de provoquer des fuites de fluide à l'intérieur de la torche. La Figure 2. Présente le diagramme schématique du réacteur à arc transféré à lit statique[4].

- **Décharges à couplage inductif RF :**

Les plasmas dans les torches à induction radiofréquence (RF) sont générés grâce au champ électromagnétique de la bobine d'induction. Le gaz plasma n'entre pas en contact avec les électrodes, éliminant ainsi la contamination possible. Les torches à plasma peuvent fonctionner avec une large gamme de gaz, notamment des atmosphères inertes, réductrices, oxydantes et autres. La puissance d'entrée varie de 30 kW à 1 MW au niveau industriel. La figure 3 montre le diagramme schématique de la décharge à couplage inductif RF. Le plasma est considérable en plus grand volume que les jets de plasma dc correspondants au même niveau de puissance[3].

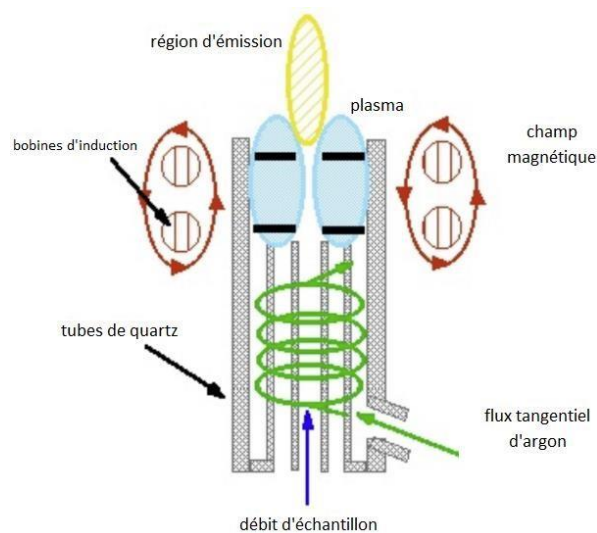


Figure 3 : Diagramme schématique d'une décharge à couplage inductif RF

## 5. Conditions de formation

- ✓ L'arc apparaît dans un milieu gazeux.
- ✓ Par claquage diélectrique entre deux électrodes.
- ✓ Au-delà d'une valeur de champ électrique  $E = U/d$ , fonction de la forme des Électrodes, de la nature et de la densité du gaz ( $d =$  distance entre l'électrode).
- ✓ Dès l'ouverture d'un circuit électrique parcouru par un courant : même si le circuit est purement résistif, une certaine distance est nécessaire pour éviter le claquage diélectrique. Et, de plus, si le circuit est selfique, la distance nécessaire est plus importance, du fait du fort  $L.di/dt$  (dû à la rapide variation d'intensité du courant).

## 6. Propriétés physiques de l'arc

Dès la séparation de deux contacts, l'un (cathode) émet des électrons, l'autre (anode) les reçoit. Le phénomène d'émission des électrons étant par nature énergétique, la cathode sera chaude. Le pied d'arc devenant ainsi thermo-émissif, les électrons sont majoritairement émis au point chaud, d'où un phénomène de stagnation de l'arc pouvant créer des vapeurs métalliques. Ces vapeurs et le gaz ambiant vont dès lors être ionisés, d'où :

- D'avantage d'électrons libres.
- Création d'ions positifs qui retombent sur la cathode et entretiennent son échauffement.
- Création d'ions négatifs qui bombardent l'anode provoquent son échauffement.

L'ensemble de toute cette agitation se fait dans une colonne de plasma à haute température, 4 000 à 20 000 K, suivant le courant et le confinement de celle-ci.

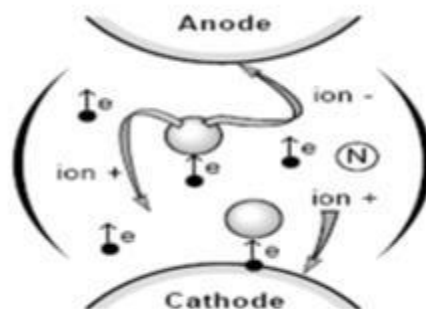


Figure 4 : Analyse de l'arc électrique et son phénomène physique [4].

## 7. Applications et utilisations majeures

Les applications utilisant ce procédé d'arc électrique seront décrites dans cette partie.

### 7.1. Lampe à arc :

Les lampes à arc produisent de la lumière en faisant scintiller une étincelle qui passe d'une électrode à l'autre. Cette lumière est plus brillante que n'importe quelle source d'éclairage inventée auparavant. Aujourd'hui, les lampes à arc sont développées et fabriquées pour des applications industrielles spécifiques telles que le pompage laser, la photographie de puissance moyenne à élever, la médecine, la simulation solaire, les lampes anticollision pour l'aviation... Les lampes à arc apparaissent également dans le domaine des consommateurs pour des applications d'éclairage à haut rendement. Lampes au sodium (éclairage jaune de la ville), lampes aux halogénures métalliques (éclairage des bancs de la ville), lampes fluorescentes et de faible puissance (éclairage intérieur), lampes aux halogénures métalliques (éclairage blanc du stade), lampes au xénon (certains phares de voiture, projecteur de cinéma).

### 7.2. Four à arc :

C'est Henri Moissan qui proposa le premier l'application des arcs électriques pour le chauffage à haute température, et en 1892 il réalisa un four jusqu'à 3500°C. Dès lors, il sépara divers métaux et développera la fabrication de divers composés, comme les carbures. Au début des années 2000, les premiers fours à arc électriques industriels sont apparus, conçus pour fondre le métal primaire (généralement de la ferraille) pour obtenir de l'acier. Depuis, les fours électriques à arc ont connu des évolutions importantes, tant d'un point de vue technologique que d'un point de vue capacité de production, bien qu'ils reposent sur les mêmes principes de base. En effet, les fours modernes ont une capacité d'environ 200 tonnes et consomment entre 400 et 500 kWh/tonne [4].

### 7.3. Soudure à arc :

Le soudage à l'arc est le procédé de soudage le plus connu. Il existe différentes méthodes de soudage électrique (électrodes enrobées, électrodes non fusibles, électrodes eutectiques). Le plus utilisé est le soudage à l'arc avec électrodes enrobées. A l'approche de l'électrode enrobée de la pièce à assembler, un arc est généré, dégageant une forte chaleur et faisant fondre l'électrode [5].

#### **7.4. Bougies d'allumage :**

La bougie d'allumage joue un rôle crucial en générant l'étincelle nécessaire à l'explosion du carburant dans le cylindre. Cependant, au début du siècle, une seule bougie pouvait être utilisée pour tous les types de véhicules, car à cette époque, la seule préoccupation était de produire une étincelle, sans se soucier des caractéristiques spécifiques de la bougie ni des problèmes liés à la dissipation de la chaleur du moteur [5].

#### **7.5. Appareils de coupure :**

La coupure d'un courant électrique est réalisée en séparant les contacts dans un gaz (comme l'air ou le SF<sub>6</sub>) ou dans un milieu isolant. Une fois les contacts séparés, un arc électrique se forme entre eux, permettant au courant de continuer à circuler dans le circuit. L'objectif est alors de contrôler et d'éteindre cet arc aussi rapidement que possible. Pour y parvenir, différentes méthodes peuvent être utilisées, comme l'utilisation d'un gaz sous pression pour "souffler" l'arc. L'arc généré lors de l'ouverture du disjoncteur est donc éliminé grâce à l'action d'un gaz sous pression qui présente d'excellentes propriétés diélectriques [5].

#### **7.6. Torche à plasma :**

Une torche à plasma est un dispositif conçu pour atteindre des températures extrêmement élevées, jusqu'à 1600°C. Son développement trouve son origine dans la recherche de matériaux capables de protéger les missiles et les engins spatiaux lors de leur entrée dans l'atmosphère. De nos jours, les torches à plasma sont utilisées comme solution de recyclage pour divers déchets dangereux tels que les résidus d'incinération, l'amiante, les déchets faiblement radioactifs, les poussières, les déchets industriels, et bien d'autres encore. L'objectif est d'éviter l'enfouissement de ces déchets en décharge et de recycler les déchets dits "ultimes" issus du processus de traitement des déchets. Pour générer le plasma, le gaz est mis en contact avec un arc électrique. Cet arc est initié entre deux électrodes, la cathode et l'anode, selon le principe de l'arc soufflé [5].

# **Chapitre 2**

## **Simulation de transfert thermique dans un réacteur à arc**

## 1. Contexte de l'étude

Les nanostructures de carbone et nanomatériaux, y compris le carbone nanotubes, fullerènes et Graphene, ont connus un engouement scientifique énorme, en raison de leurs propriétés uniques et leur potentiel d'applications prometteurs [6]. Ces nanostructures entièrement composées de carbone ont des propriétés physiques exceptionnelles (prix Nobel pour le Graphene en 2010) et leur applications potentielles en tant que matériaux optiques, supraconducteurs, dans les polymères renforcés et dans d'autres produits biologiques et applications médicaux ont suscité beaucoup d'intérêt dans la littérature scientifique récente [7].

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[8], en utilisant des électrodes en graphite dans la chambre de réaction dans laquelle un gaz inerte comme l'argon ou d'hélium est introduit.

Nombreuses équipes de recherches 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 restreintes 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 simulation de phénomènes hydrodynamique dans le réacteur à arc.

## 2. Dispositif de synthèse

Cette partie est consacrée à la présentation du matériel, du dispositif expérimental pour caractériser l'arc électrique et le comportement de la phase gazeuse créée dans différentes conditions expérimentales.

Le dispositif expérimental est composé d'une chambre à arc, une alimentation électrique, les électrodes (anode et cathode) et le gaz plasmagène.

Néanmoins nous nous focalisons dans notre étude sur ce dernier et à la chambre à arc seulement, parce qu'elle est le siège de différentes formes de transfert thermique et utilisé puisque ces transferts thermiques seront entre le plasma et le gaz plasmagène, Ces éléments sont détaillés ci-après.

### **2.1.1. La chambre à arc**

Nous avons représenté sur 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. Le réacteur possède deux vannes, l'une permettant d'effectuer le vide primaire ( $10^{-1}\text{Pa}$ ) 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 de nanomatériaux en raison des perturbations dans la chambre d'arc causées par le pompage automatique. Pour cette raison, la durée d'une expérience est limitée à environ 2 minutes. Le volume choisi pour notre étude est de 18 L.

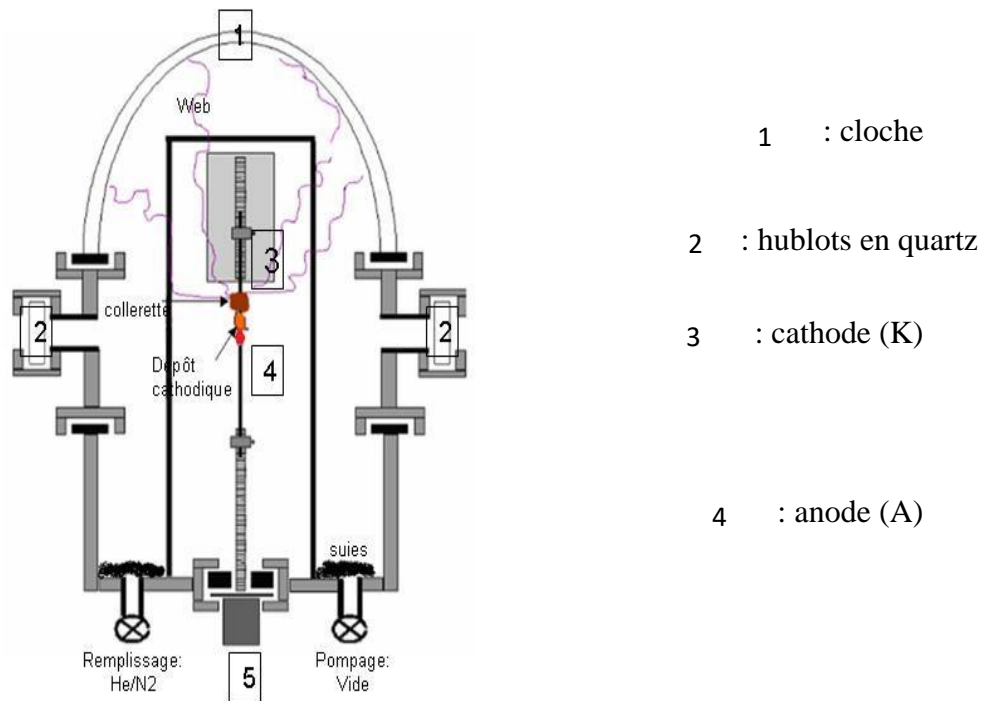


Figure 5 : Schéma du réacteur à arc [8]



Figure 6 : la forme réelle de du réacteur et la chambre a arc.

## 2.2. Le gaz plasmagène

Le choix du gaz plasmagène est déterminant vis-à-vis de la propreté et du rendement de nanomatériaux obtenus. Dans la littérature, l'hélium est largement utilisé comme gaz plasmagène pour la synthèse des nanotubes et d'autres phases carbonées par arc [9,10]. Dans ce travail, le gaz plasmagène est systématiquement constitué de l'Argon, l'Azote ou l'Hélium. Dans tous les cas la pression est de 60 kPa.

## 3. 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 7.

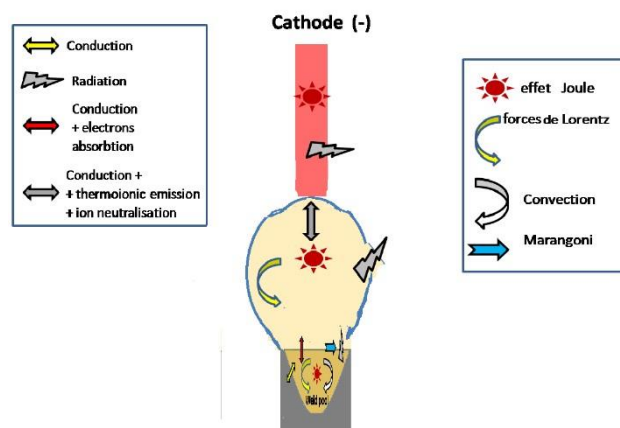


Figure 7 : Détails des phénomènes physiques étudiés dans cette partie.

### 3.1. 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.

La présence de ces phénomènes radiatifs dans un plasma est d'une grande importance dans de nombreux domaines, tels que la physique des plasmas, l'astrophysique, la fusion nucléaire contrôlée, ainsi que dans diverses applications industrielles et technologiques où les plasmas sont utilisés.

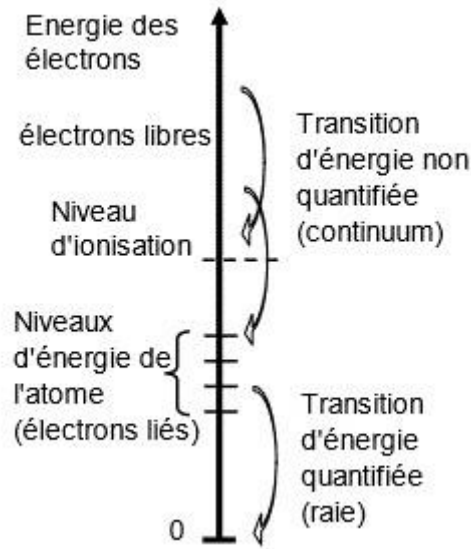


Figure 8 : les différents types de transitions électroniques donnant lieu à des phénomènes radiatifs.

### 3.2. La convection et la conduction (Loi de fourrier) :

Cette force dépend de la variation de la masse volumique de la masse fondue en fonction de la température. Le flux de conduction est lié à la différence 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.

### 3.3. L'effet joule :

L'effet Joule est la principale source d'énergie dans le plasma. 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. Les températures atteintes dans le plasma sont élevées. L'effet Joule est cependant faible (à cause de la valeur élevée de la conductivité électrique du métal).

### 3.4. 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.

### 3.5. 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.

## 4. Définition de Problème

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

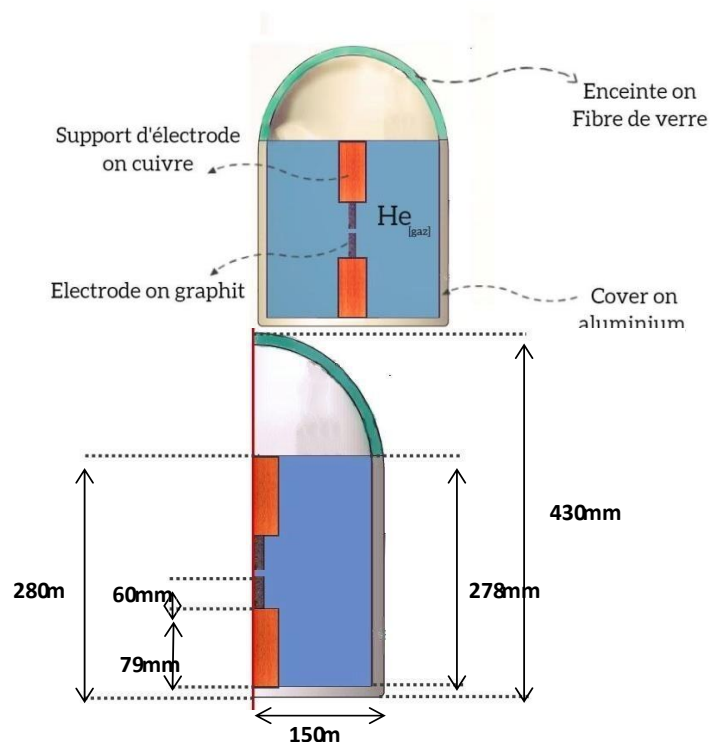


Figure 9 : géométrie bidimensionnelle de réacteur avec les dimensions et les différents composants

Le réacteur est constitué de deux compartiments (figure 9). 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*

#### 4.1. Les propriétés thermiques des matériaux solides: [11]

##### 4.1.1. Fibre de verre :

Propriété	Variable	Valeur	Unité
Masse volumique	$\rho$	32	$\text{Kg/m}^3$
Conductivité thermique	$\lambda$	0.038	$\text{W/m.k}$
Capacité thermique	$C_p$	835	$\text{J/kg.k}$

Tableau 1: propriété thermique de verre

##### 4.1.2. Cuivre :

Propriété	Variable	Valeur	Unité
Densité	$\rho$	8933	$\text{Kg/m}^3$
Conductivité thermique	$\lambda$	401	$\text{W/m.k}$
Capacité thermique	$C_p$	385	$\text{J/kg.k}$

Tableau 2: Propriété thermique de cuivre.

##### 4.1.3. Aluminium :

Propriété	Variable	valeur	Unité
Densité	$\rho$	2702	$\text{Kg/m}^3$
Conductivité thermique	$\lambda$	903	$\text{W/m.k}$
Capacité thermique	$C_p$	237	$\text{J/kg.k}$

Tableau 3: Propriété thermique d'Aluminium.

#### 4.1.4. Graphite :

Propriété	Variable	valeur	Unité
Densité	$\rho$	2210	$\text{Kg}/\text{m}^3$
Conductivité thermique	$\lambda$	709	$\text{w}/\text{m.k}$
Capacité thermique	$C_p$	5.70	$\text{j}/\text{kg.k}$

Tableau 4: Propriété thermique de graphite.

## 4.2. La capacité thermique des gaz : [12]

### 4.2.1. Argon :

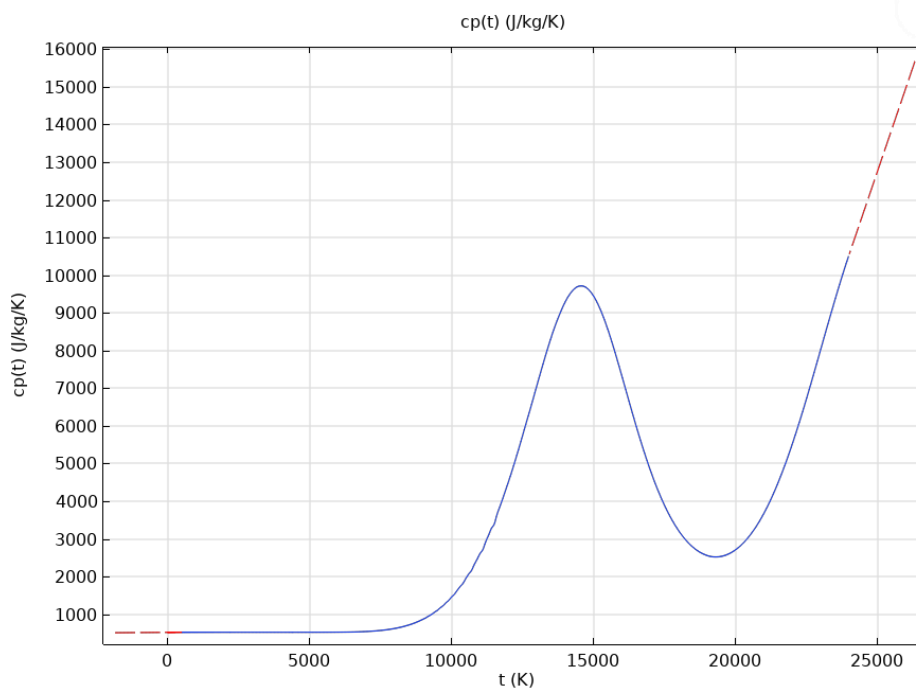
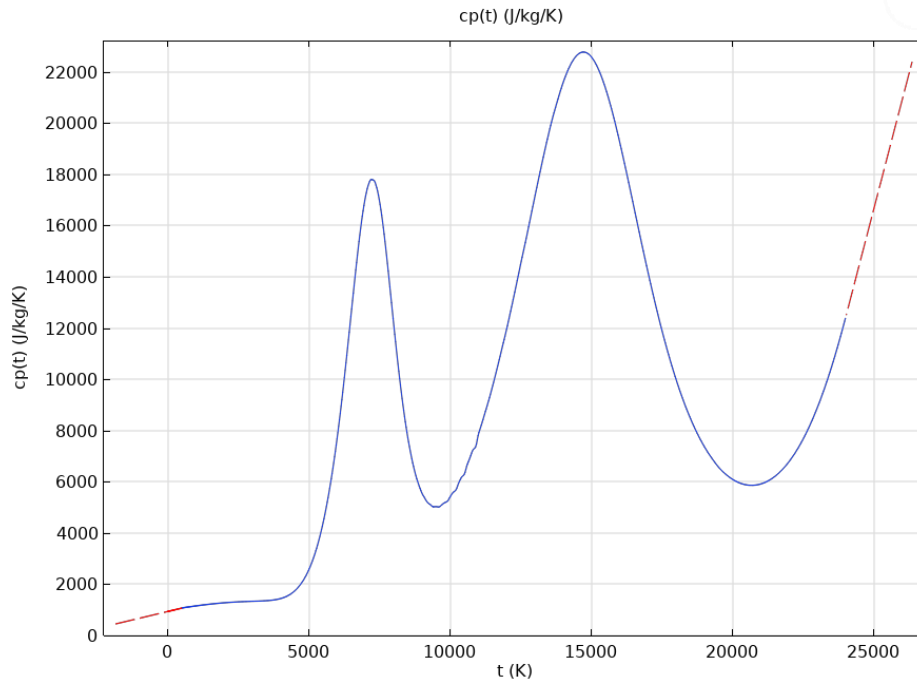


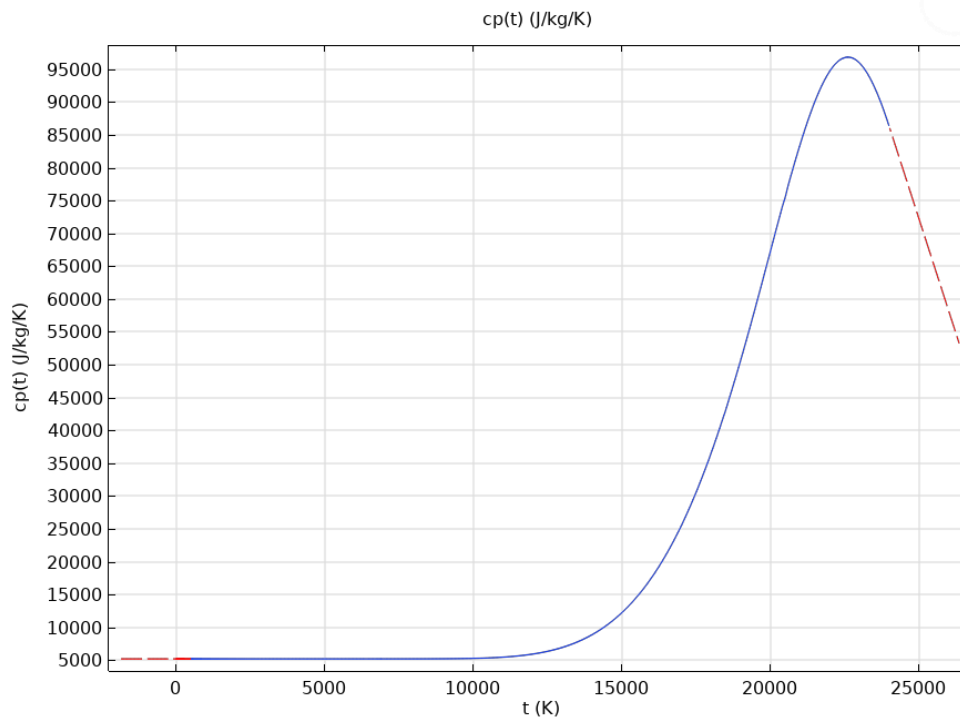
Figure 10 : La capacité thermique de l'argon

**4.2.2. Azote :**



*Figure 11 : La capacité thermique de l'azote*

**4.2.3. Hélium :**



*Figure 12 : la capacité thermique de l'Hélium*

**4.3. La viscosité dynamique des gaz :**

**4.3.1. Argon :**

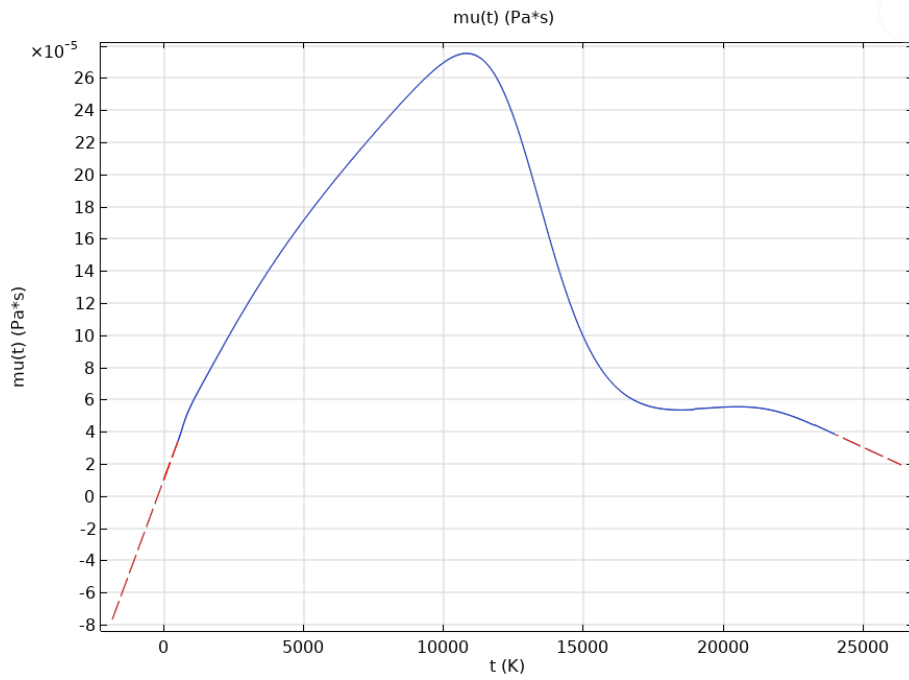


Figure 13 : la viscosité dynamique de l'argon

**4.3.2. Azote :**

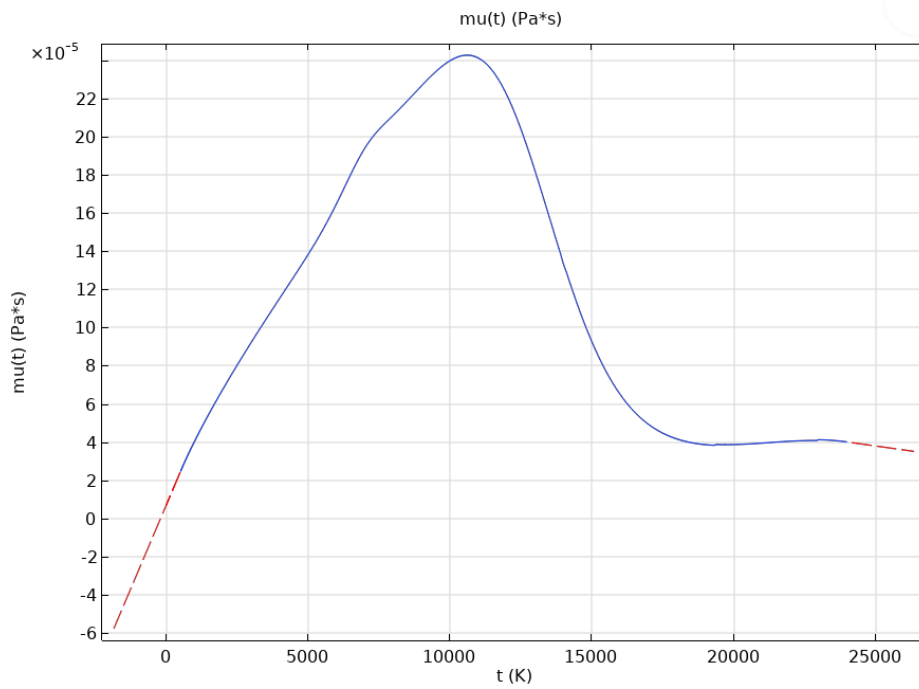


Figure 14 : la viscosité dynamique de l'azote

**4.3.3. Hélium :**

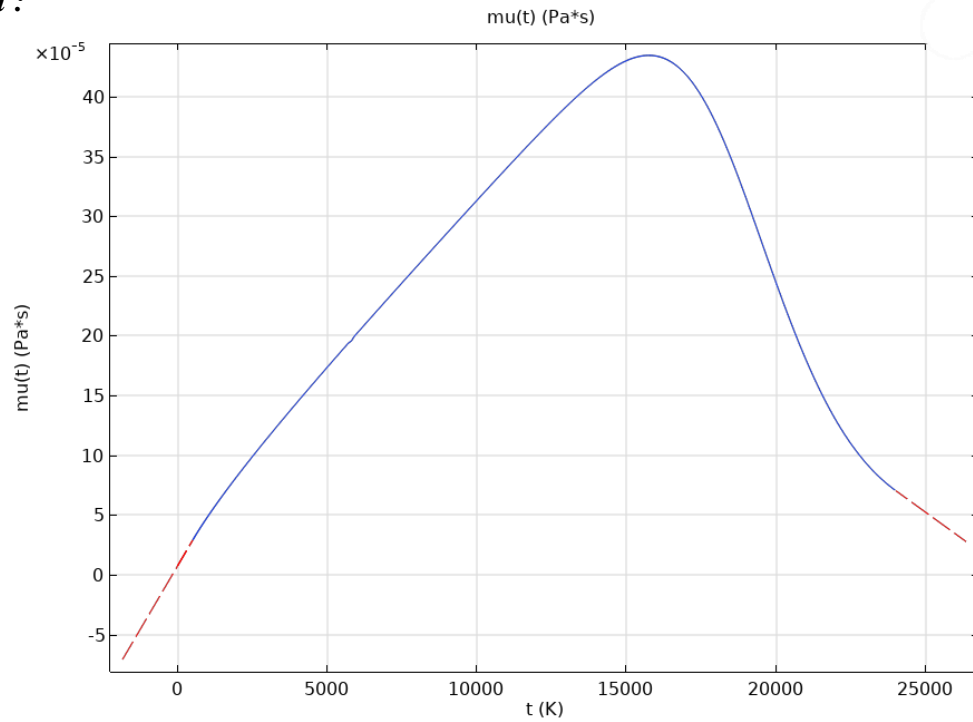


Figure 15 : La viscosité dynamique de l'hélium

**4.4. Les dimensions de réacteur :**

La figure 16 représente les dimensions de réacteur à arc.

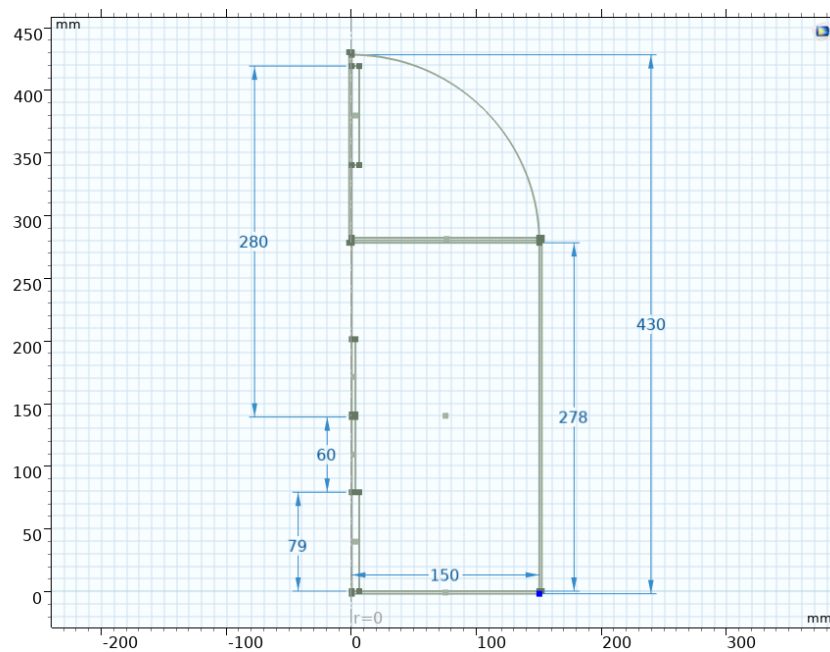


Figure 16 : les dimensions de réacteur à arc électrique

## 5. Régime de l'écoulement au sein du réacteur

Les phénomènes mis en jeu au niveau du 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 14) sont considérés où les températures maximales sont respectivement 6000 et 9000 K.

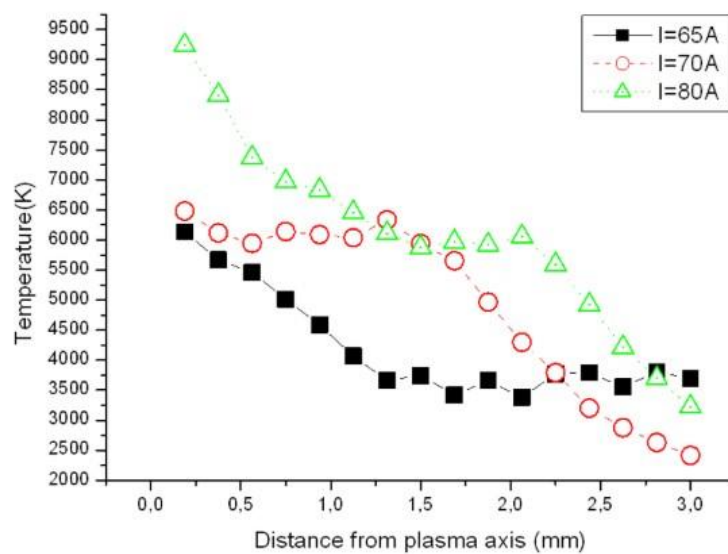


Figure 17 : profils des températures de plasma pour différentes intensités électriques [13].

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 :

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (1)$$

Avec

Ra : Le nombre de Rayleigh

Gr : nombre de Grashof

Pr : nombre de Prandtl

$g$  : accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

$L$  : longueur caractéristique (m)

$T_s$  : température de la paroi (K)

$T_\infty$  - température du fluide loin de la paroi (K)

$\nu$  : viscosité cinématique (m<sup>2</sup>/s)

$\alpha$  : Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)

$\beta$  : coefficient de dilatation thermique volumétrique (K<sup>-1</sup>)

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 ( $T_\infty$ )	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	$2.152 \times 10^{-4}$	0.0234	0.0358	$3.7892 \times 10^{-4}$
He	6000	293.15	3146.575	$3.178 \times 10^{-4}$	0.0117	0.0179	$1.4744 \times 10^{-4}$

Tableau 5 : Le calcul des propriétés et le nombre de Rayleigh

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

## 6. 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 régime est instationnaire pendant une séquence de 2 minutes.
- Le problème est axisymétrique.
- Le fluide est incompressible.
- La viscosité de gaz plasmagène est considérée variable en fonction de température.
- Le régime d'écoulement est laminaire
- L'échange radiatif au sein de réacteur est négligeable.

- Les électrodes subissent un changement de phase.
- Les propriétés thermo-physiques varient en fonction de température.

## 7. 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 :

### 7.1. Gaz Plasmagène : (He, Ar, N<sub>2</sub>)

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

- **Equation de continuité**

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + \frac{\partial(U_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

- **Equations de Navier-Stocks :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + U_z \frac{\partial(rU_r)}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -g + \beta g(T - T_\infty) - \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial(rU_r)}{\partial r} + U_z \frac{\partial(rU_r)}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial U_z}{\partial t} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -g + \beta g(T - T_\infty) - \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (5)$$

- **Equation d'énergie :**

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

### 7.2. Electrodes : (Graphite)

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

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

### 7.3. Les supports : (Cuivre)

L'équation d'énergie s'écrit :

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

### 7.4. Les parois : (Aluminium)

L'équation d'énergie s'écrit :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{Al} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{Al} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

### 7.5. La couverture : (vitre)

L'équation d'énergie s'écrit :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{vitre} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{vitre} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (10)$$

Les conditions aux limites et les conditions initiales sont mentionnées dans la figure comme suivant :

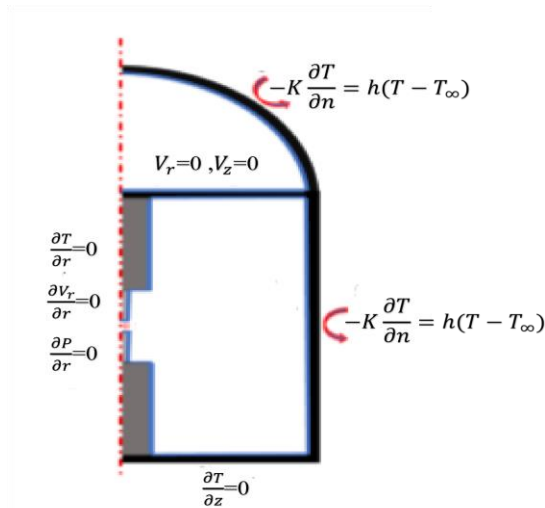


Figure 18 : les conditions aux limites pour un réacteur à arc [17]

Les conditions aux limites et les conditions initiales sont comme suivant :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# **Chapitre 3**

## **Résultats et discussions**

## 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.

### 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).

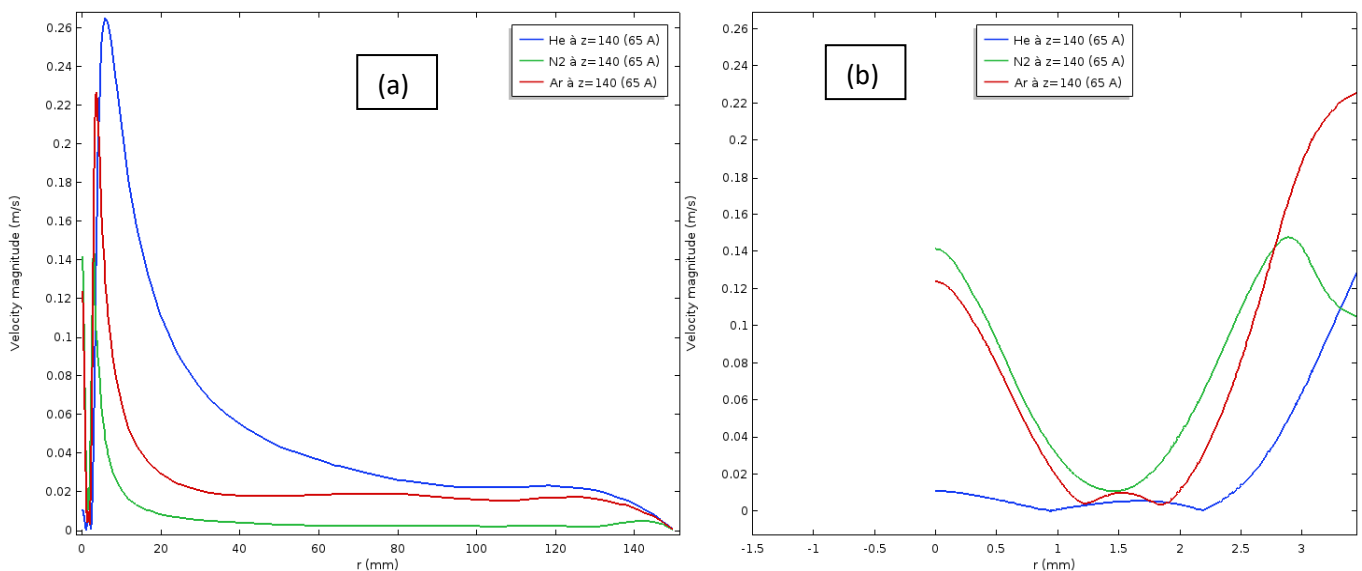


Figure 19: Comparaison des profils de vitesse pour les 3 gaz : Hélium (He), Azote (N2) et Argon (Ar), au milieu de plasma ( $z=140$ ) mm

#### 1.1.1. Vitesses sur l'axe $z$ :

La figure 19 : (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  $1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $14 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $12 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 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

La figure 19 : (a) ce changement est manifesté par des vitesses nettement supérieures comparées à celles d'Azote, qui avait la vitesse maximale à l'intérieure du plasma comparé à la vitesse des deux autres gaz. En effet, La norme de la vitesse résultante 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 reportée sur la figure 20 et figure 21.

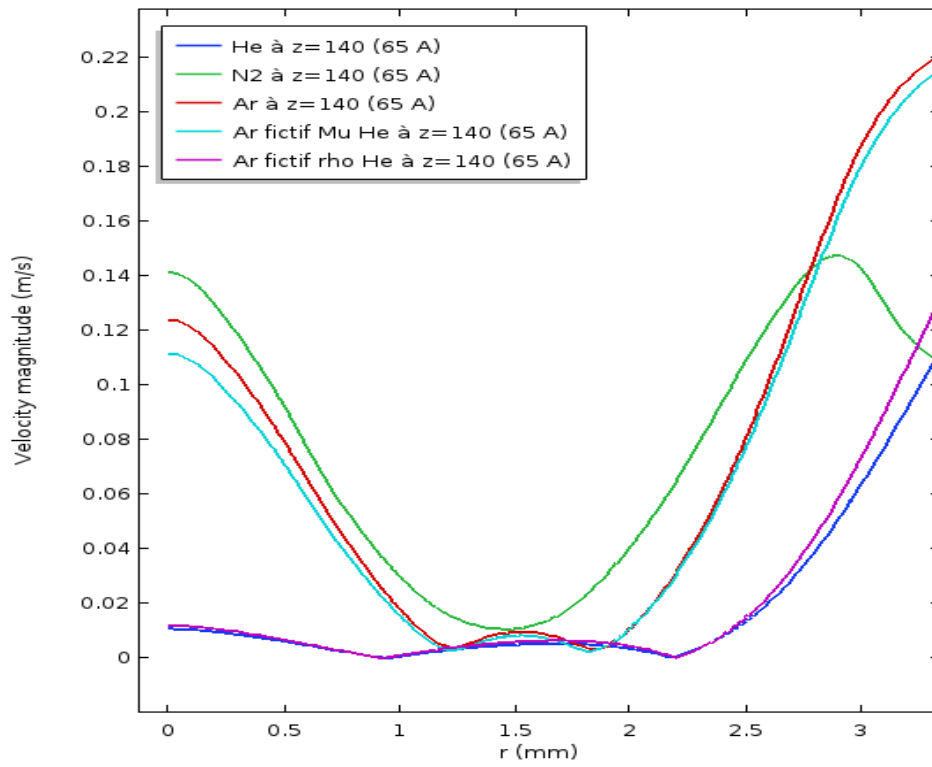


Figure 20 : Comparaison des profils de vitesse Avec les deux gaz fictif et Argon

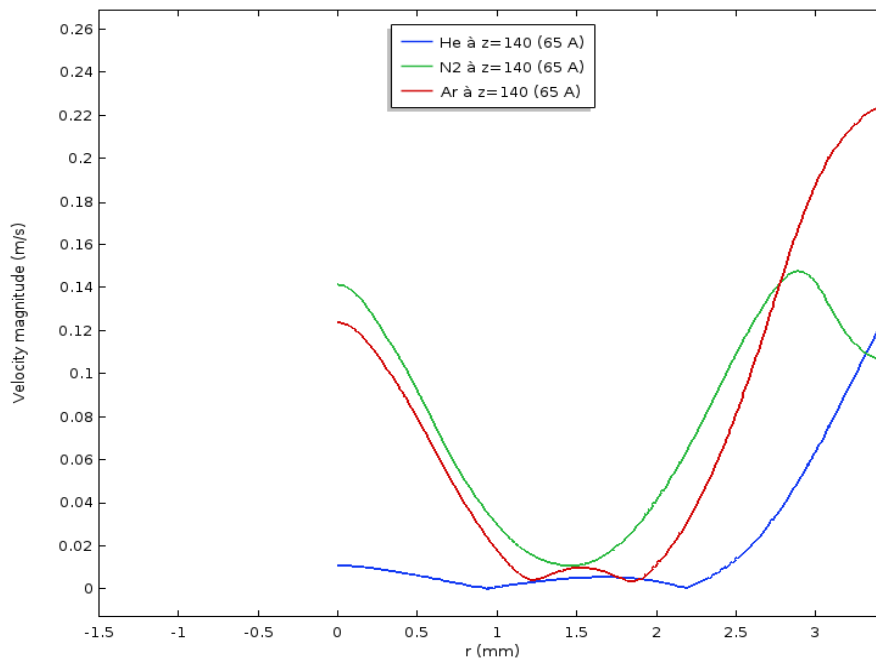


Figure 21 : Comparaison des profils de vitesse Avec les trois gaz réels

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 20) et l'argon fictif avec une viscosité d'hélium (courbe Cyan dans figure 20 ) 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).

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 22, 23et 24).

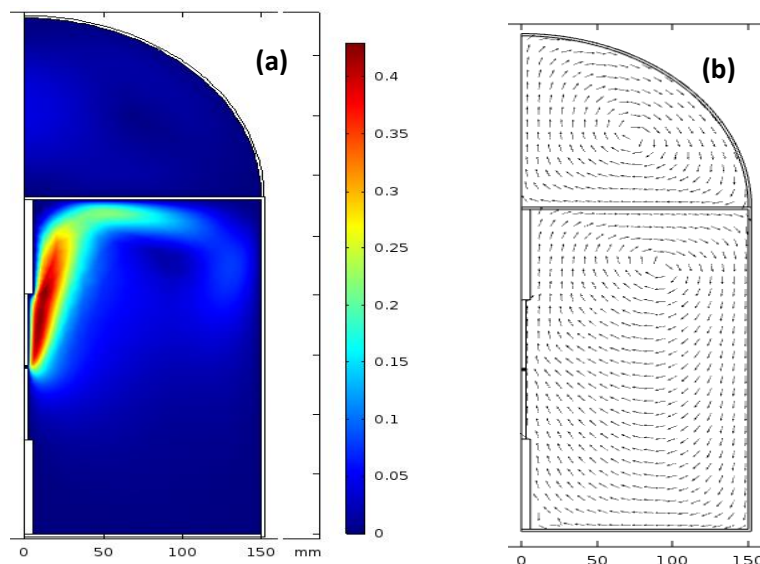


Figure 22: champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Hélium à 65 A

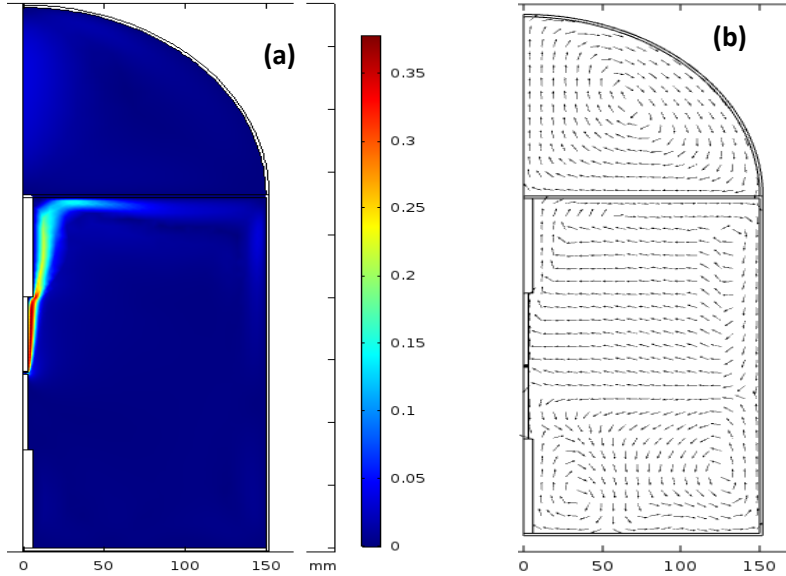


Figure 23: champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

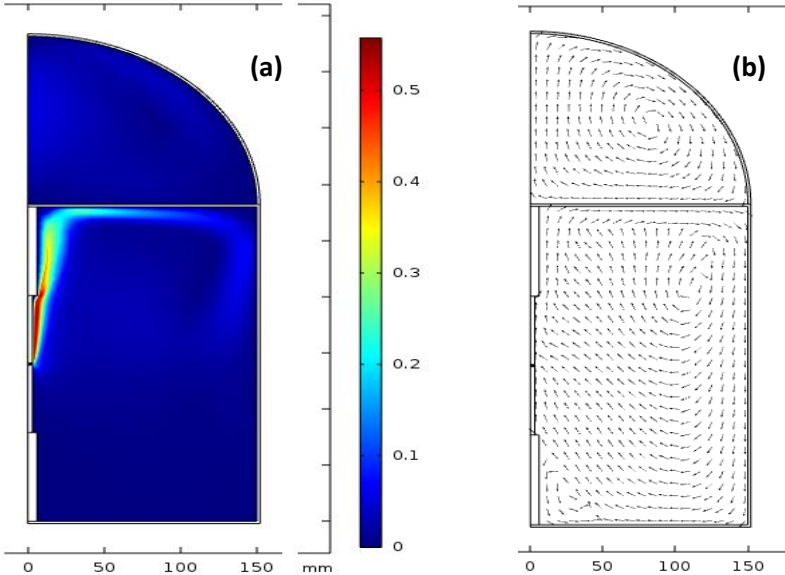


Figure 24: champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Azote à 65 A

Dans (b) sur la figure 22,23 et 24 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 projeté 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 23 (b), on constate que l'écoulement est projetée vers la parois à droite c'est-à-dire 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 restée mal réalimenté par la cinétique et la dynamique créée 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.

### 1.2.Lignes de courant :

La figure 25 montre les lignes de courant dans la chambre à arc pour les trois gaz utilisés .

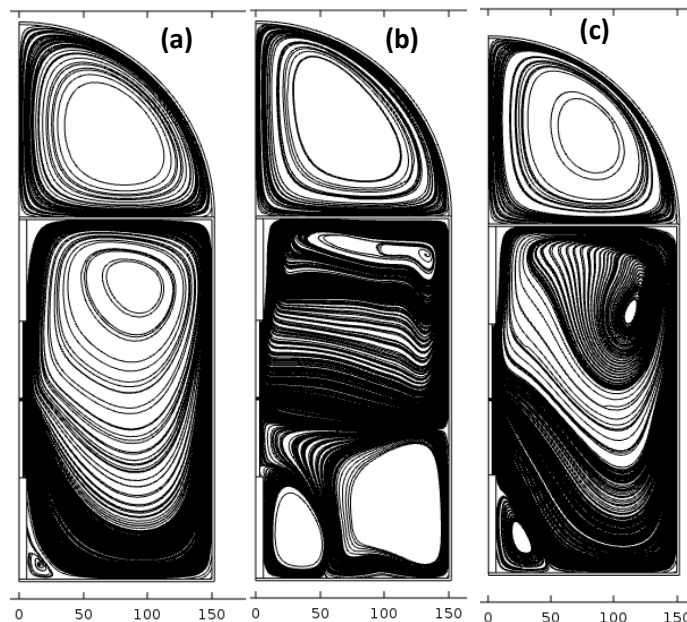


Figure 25: Comparaison des lignes de courant pour les trois gaz : (a) Hélium (b) Azote et (c) : Argon à 65 A

On remarque que l'écoulement présente beaucoup de symétrie est donc une bonne recirculation 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 zone 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.

### 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.

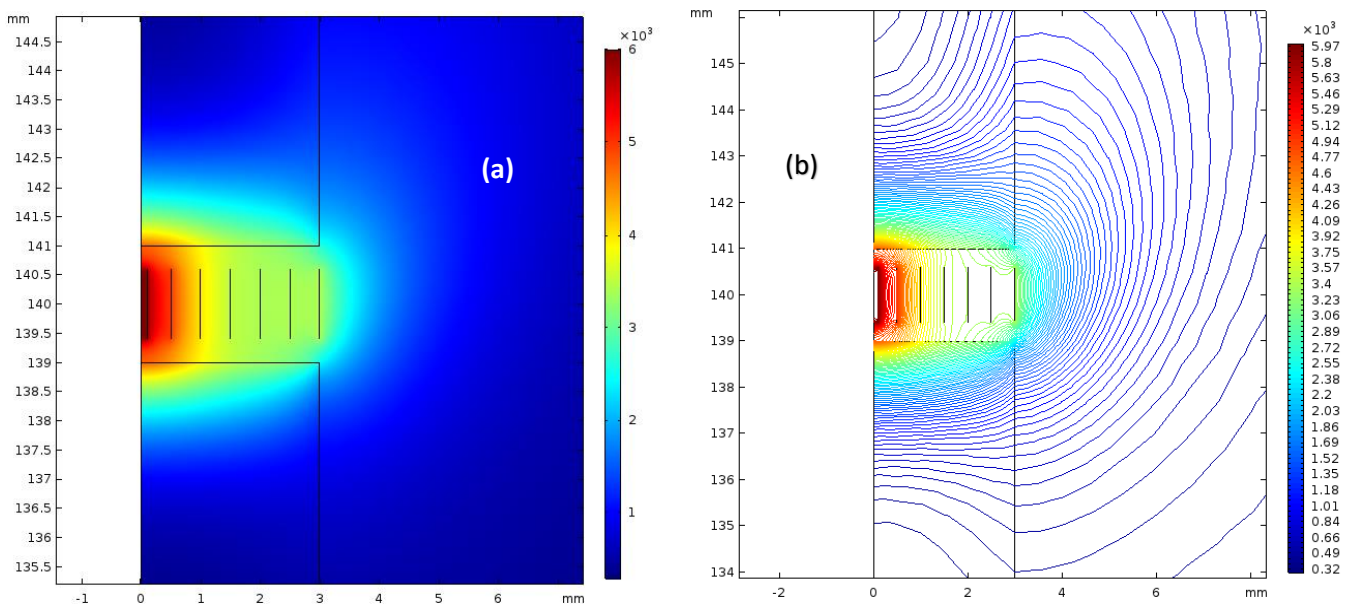


Figure 26: champ de température (a) et isothermes (b) ; à 65 A dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hélium (He)

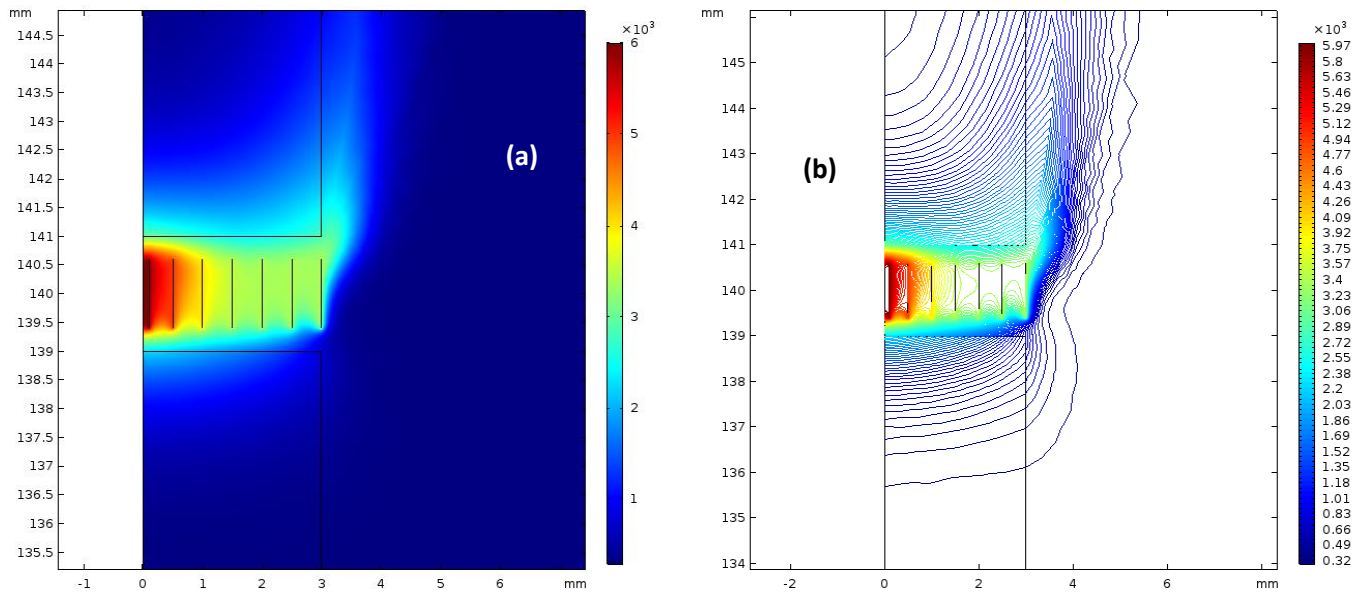


Figure 27: champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Azote (N<sub>2</sub>)

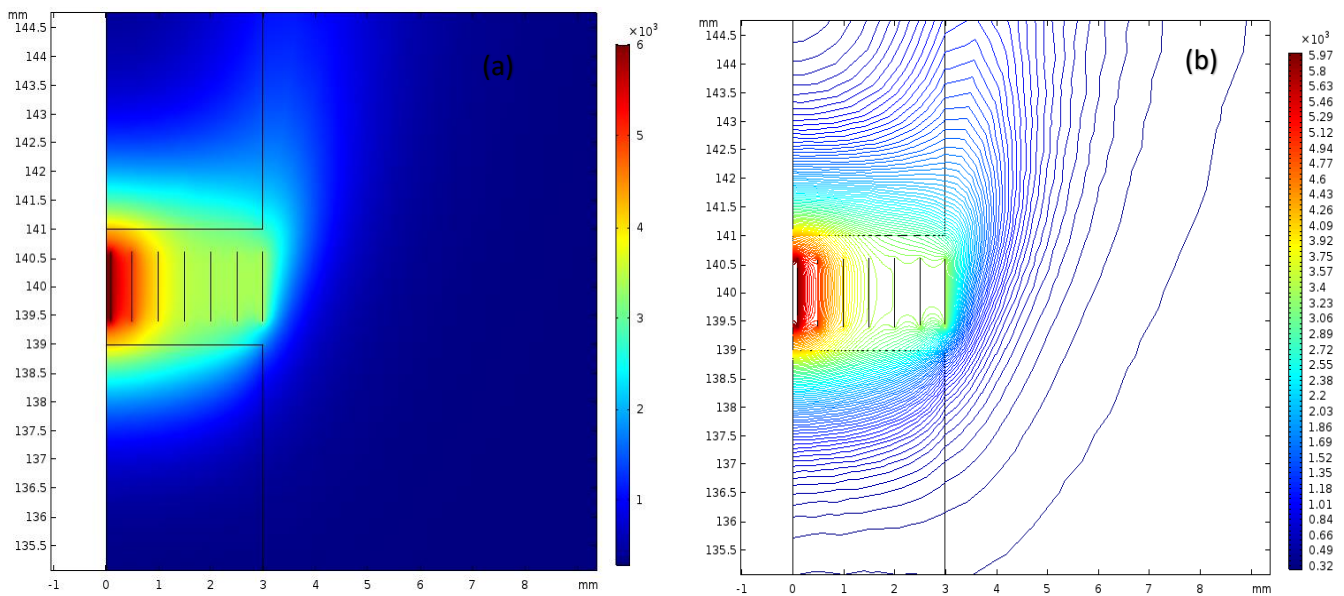


Figure 28: champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Argon (Ar)

Les figure (a) dans 26,27 et 28 : 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. ( $\text{\AA } r < 3 \text{ mm}$ ) ceci est pareil pour tous les gaz plasmagènes utilisés. Dans le cas d'Hélium on note une symétrie axiale et surtout radiale. Cette configuration peut traduire une meilleure

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 26 (a)). Cette absence est moins accentuée dans l'Argon (figure 27 (a)).

On note aussi une différence dans la morphologie de la zone thermique où on observe un « confinement thermique » dans l'Azote régi 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 26 (a) avec une couleur cyan-verte dans la zone comprise 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 29 où on reconnaît clairement l'image de ce transfert dont la fraction fondue la plus grande -figure 29 (a) - est dans l'Hélium et la plus faible est dans l'Azote -figure 29 (b) - ces commentaires viennent rejoindre nos constats sur la morphologie dans les champs de température notamment la minimisation (maximisation) de la zone de contact dans l'Azote (Hélium).

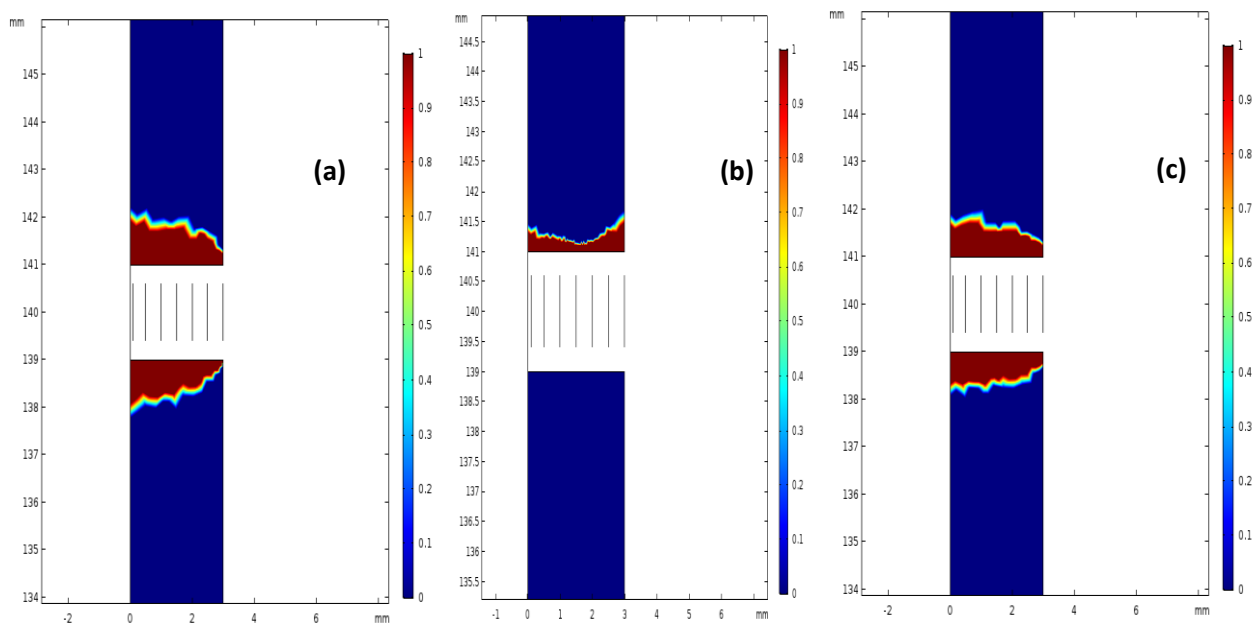


Figure 29: distribution de fraction liquide au niveau des électrodes en présence des gaz (a): He, (b): N<sub>2</sub> et (c): Ar.

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 champs 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 4.

On a montré sur les figures (b) dans 27,28 et 29 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 isothermes trop serrés et de formes longitudinales dans l'Azote.

## **2. Influence de la température du plasma :**

Afin de mieux comprendre le phénomène de transfère 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 figure 30.

### **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.

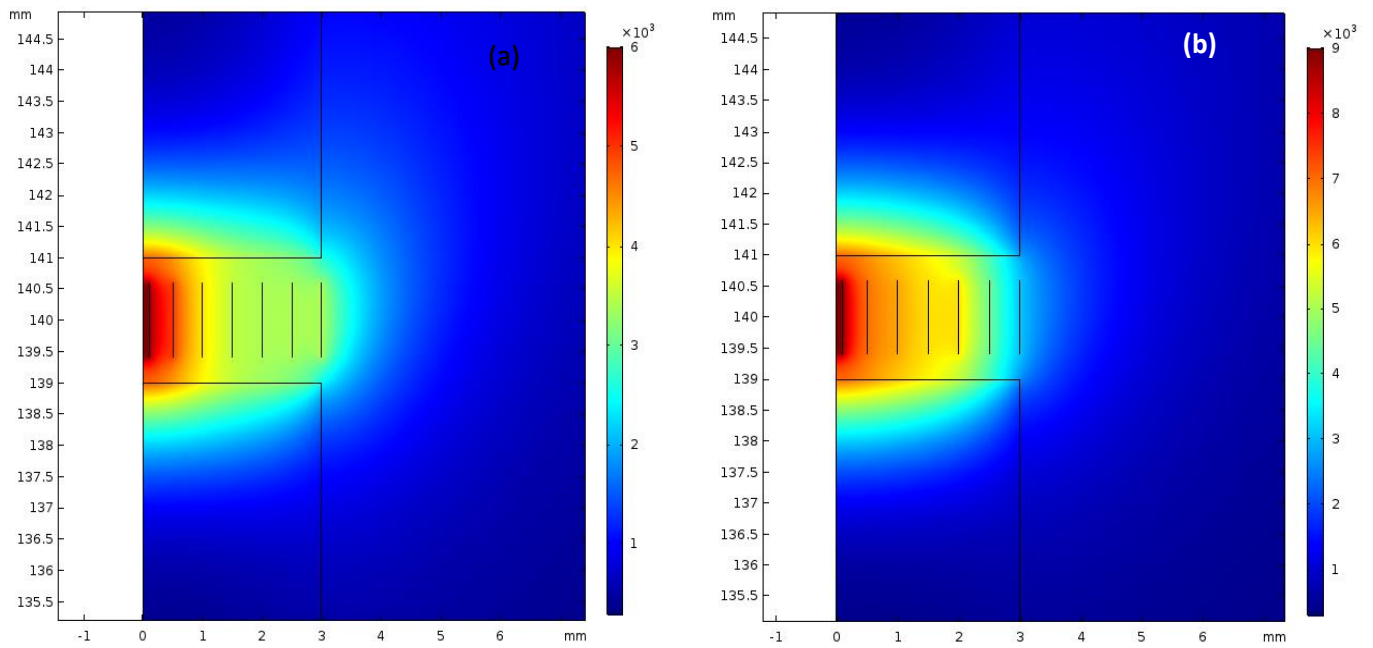


Figure 30: champ de température dans l'Hélium  
Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A

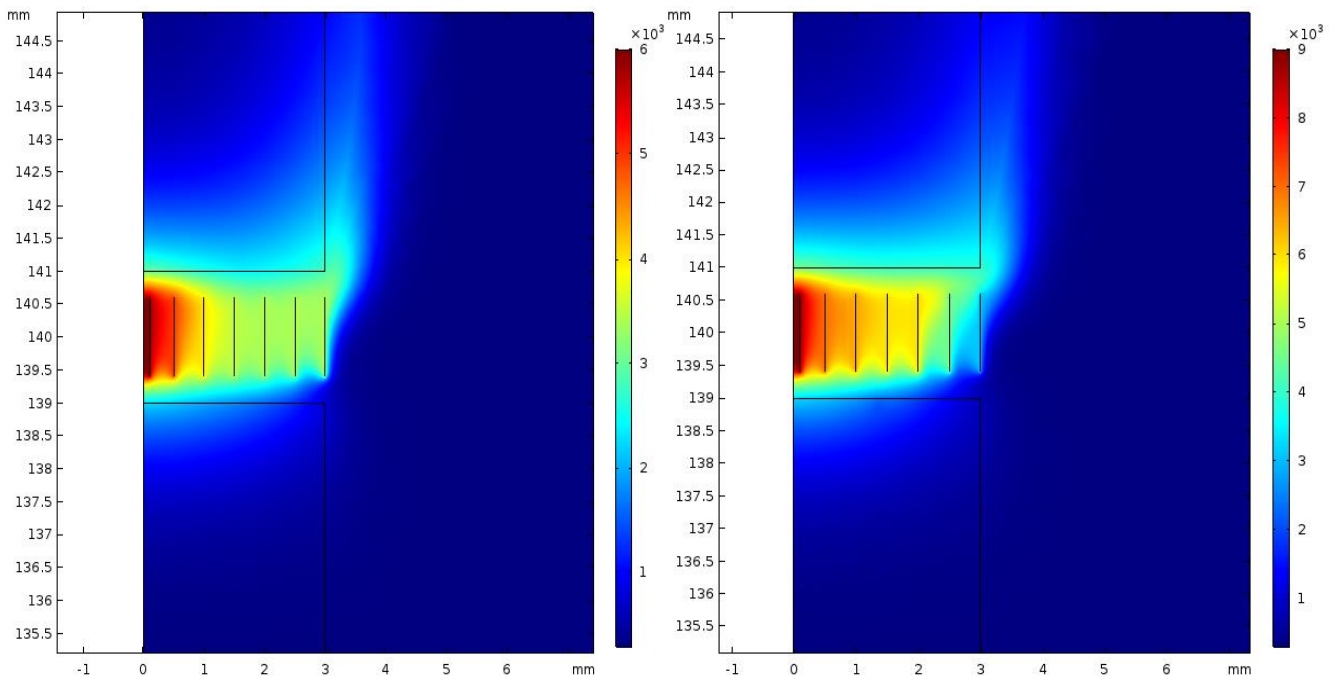


Figure 31: champ de température dans l'Azote Avec (a) : profil de température 65 A et (b) :  
profil de température 80 A

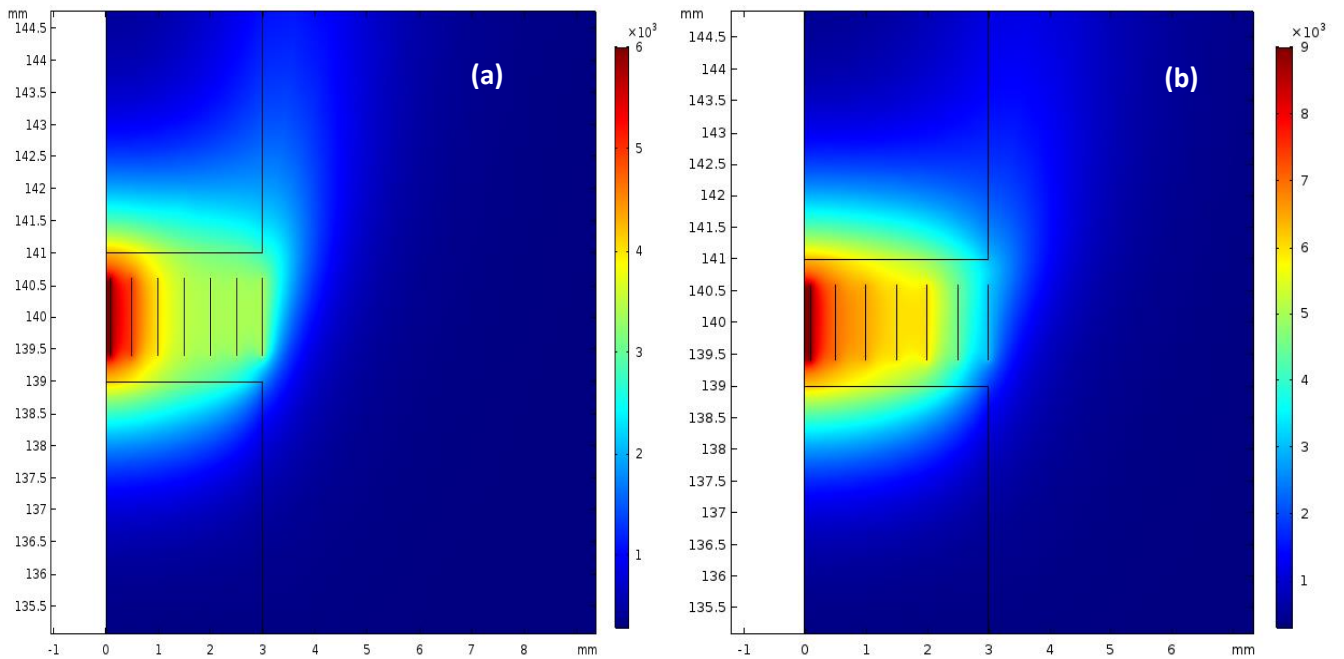


Figure 32: champ de température dans l'Argon Avec (a) : profil de température 65 A et (b) : profil de température 80 A.

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 33 ci-après.

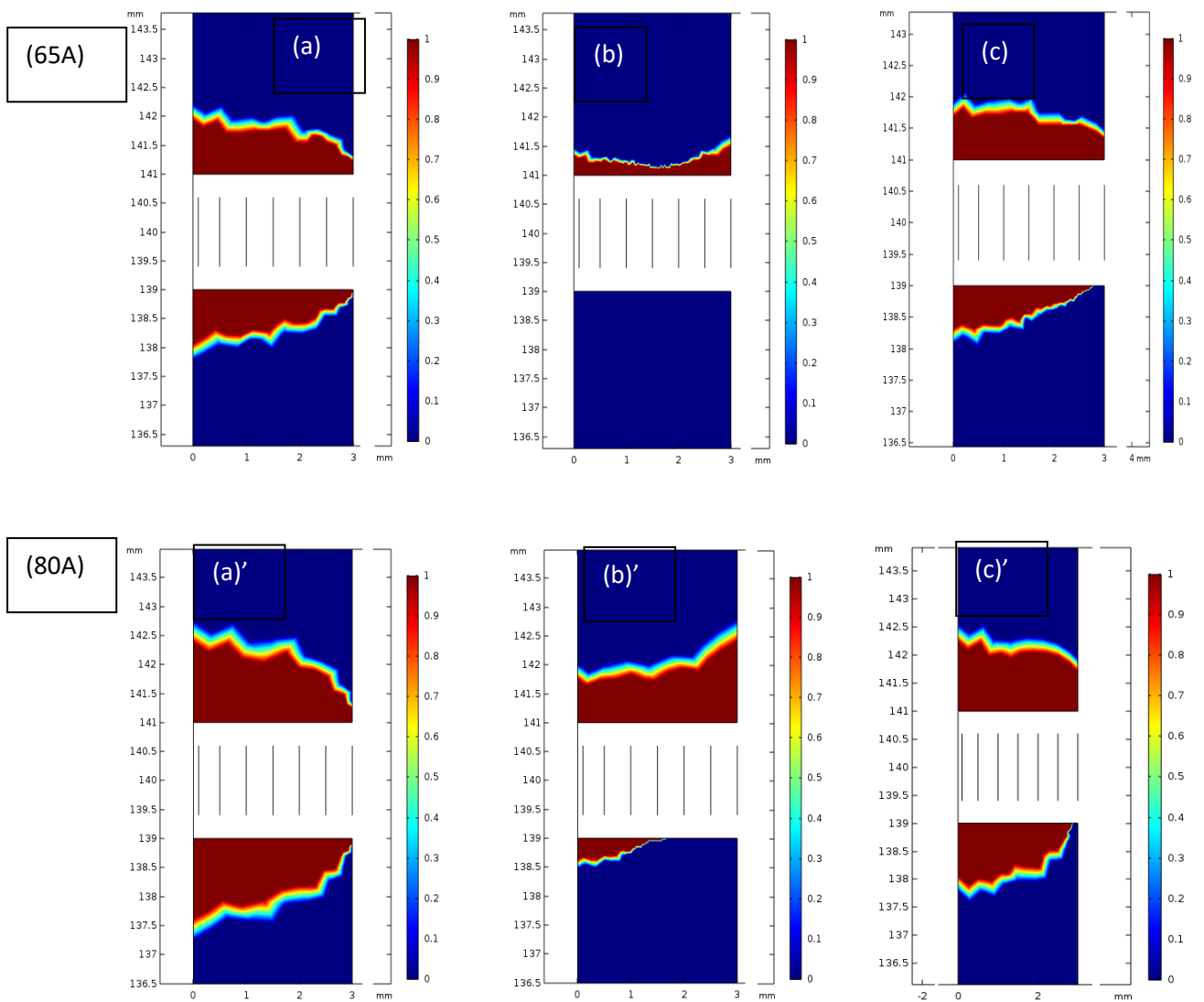


Figure 33: Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes (a) et (a') : He ; (b) et (b') : N2 et (c) et (c') : Ar.

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 32 (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.

### 3. Influence de la conductivité thermique de l'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.

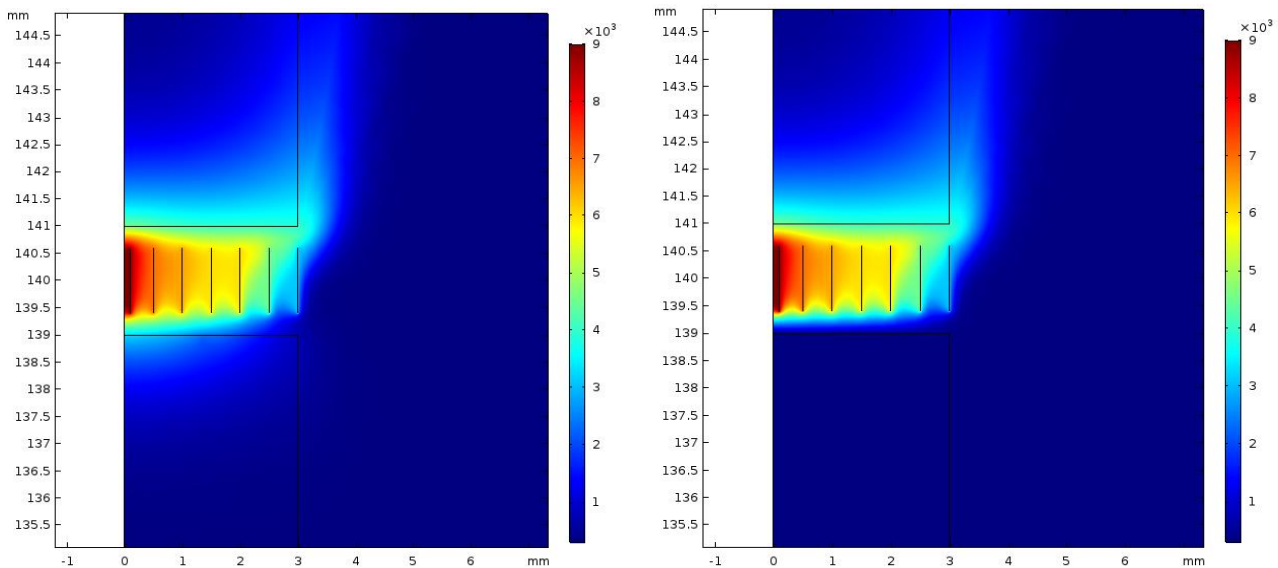


Figure 34: Comparaison du champs de température dans l'azote à 80 A  
(a) :électrode du bas en graphite et (b) en cuivre .

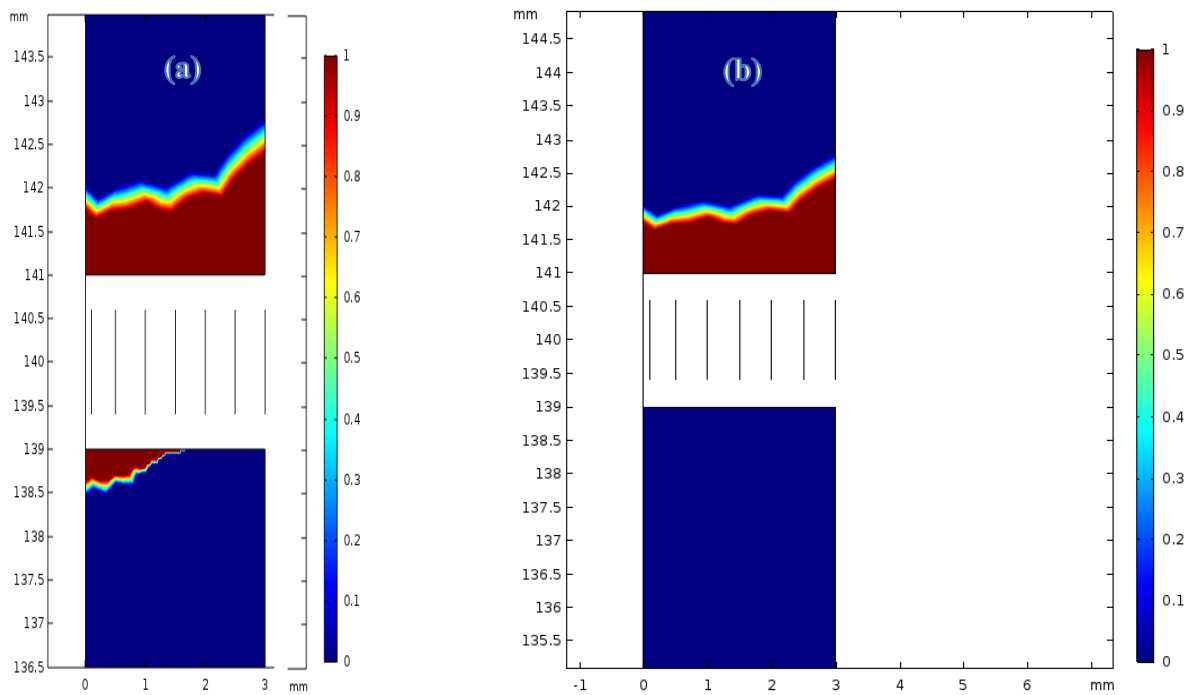


Figure 35: Comparaison de la distribution de fraction liquide au niveau des électrodes dans l'azote à 80 A (a) : anode en graphite et (b) en cuivre.

On a remarqué que même avec une 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 observé, 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 a une capacité de stockage volumique à des températures  $> 6000$  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'hélium, 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, tels les réacteurs à arc électrique, nécessite une bonne maîtrise de tout aspect physique mis en jeu 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 paramètres 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 mis en jeu 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 perspectives proches de ce travail est la modélisation du plasma ainsi le problème peut être entourée et une bonne maîtrise du procédé peut être atteinte.

## Références

- [1] Vonjy RAMAROZATOVO, In-situ elaboration and characterization of heterogeneous nanotubes by electric arc plasma [Ph.D]. University Paul Sabatier, Toulouse III(Elaboration in-situ et caractérisation de nanotubes hétérogènes par plasma d'arc électrique), 2011. <http://thesesups.ups-tlse.fr/1948/>.
- [2] M.I. Boulos, P.L. Fauchais, E. Pfender, The Plasma State, in: *Handb. Therm. Plasmas*, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 1–53. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3\\_1-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3_1-2).
- [3] S. Samal, I. Blanco, An Overview of Thermal Plasma Arc Systems for Treatment of Various Wastes in Recovery of Metals., *Mater.* (Basel, Switzerland). 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15020683>.
- [4] KECHAR EL-KHENSSA, Présenté par, BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY, 2010.
- [5] G. Daveau, T. Martire, J.J. Huselstein, P. Enrici, Une application ludique des arcs électriques : le transformateur de Tesla, *J3eA*. 8 (2009) 1027. <https://doi.org/10.1051/j3ea/2009001>.
- [6] K. (Ken) Ostrikov, U. Cvelbar, A.B. Murphy, Plasma nanoscience: setting directions, tackling grand challenges, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 44 (2011) 174001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/17/174001>.
- [7] I.-K. Oh, J.-H. Jung, J.-H. Jeon, S. Vadahanambi, Electro-chemo-mechanical characteristics of fullerene-reinforced ionic polymer–metal composite transducers, *Smart Mater. Struct.* 19 (2010) 75009. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/7/075009>.
- [8] D.E. Gourari, Synthèse par arc électrique de nanotubes de carbone hybrides incorporant de l'azote et/ou du bore, Université Paul Sabatier (Toulouse 3), 2015. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01813681>.
- [9] A. Mansour, M. Razafinimanana, M. Monthieux, Influence of the anode filling carbon granulometry on plasma features in the electric arc process applied to carbon nanotubes synthesis, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 42 (2009). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/195203>.
- [10] A. Mansour, M. Razafinimanana, M. Monthieux, M. Pacheco, A. Gleizes, A significant improvement of both yield and purity during SWCNT synthesis via the electric arc process, *Carbon N. Y.* 45 (2007) 1651–1661. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.03.044>.
- [11] T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. <https://books.google.dz/books?id=5cgbAAAAQBAJ>.
- [12] W. Wang, M. Rong, A.B. Murphy, Y. Wu, J.W. Spencer, J.D. Yan, M.T.C. Fang, Thermophysical properties of carbon-argon and carbon-helium plasmas, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 44 (2011). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/35/355207>.
- [13] D.E. Gourari, M. Razafinimanana, M. Monthieux, R. Arenal, F. Valensi, S. Joulie, V. Serin, Synthesis of (B-C-N) Nanomaterials by Arc Discharge Using Heterogeneous Anodes, *Plasma Sci. Technol.* 18 (2016) 465–468. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/5/03>.