

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

L'étude des phénomènes de transfert thermique plasma-gaz dans un réacteur plasma à arc stationnaire

Date de Soutenance : 20/10/2020

Présenté par :

- Filali Mohammed
- Mahammedi Abdallah

Devant les jurys compose de :

- Dr Bessenouci mohammed zakaria.
- Dr Chaabane mostafa
- Dr Badaoui abdelhamid

Encadreur de thèse:

- Dr. Gourari Djamel eddine
- Dr. Benomar Benameur

Année universitaire 2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré 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 sœurs 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.

Filali mohammed

Je dédie ce mémoire à :

à mes parents pour leur amour inestimable, leur conance,

leur soutien, Leurs sacrices et toutes les valeurs qu'ils

ont su m'inculquer.

à ma grand-mère pour sa douceur et

sa gentillesse.

à mes sœurs ainsi qu'à mes beaux-frères pour leur tendresse,

leur complicité et leur présence malgré la distance qui nous sépare.

à ma tante et mon oncle pour toute

l'action qu'ils m'ont donnée et pour

leurs précieux encouragements. à

toute ma famille ainsi qu'à mes amis.

Mahammedi Abdellah

Remerciement

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds

remerciements et nos profondes reconnaissances à :

Dr Gourari Djamel Eddine notre encadrant de mémoire de fin d'étude,

pour ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de notre recherche.

Je remercie également ;

Mr Benameur Benameur Dupuis pour son aide précieuse.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury

pour l'intérêt qu'ils ont porté 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.

Résumé

Dans ce travail, nous avons formé une recherche sur le plasma thermique, son état, ses caractéristiques et ses divisions, ainsi que ses larges utilisations dans la vie active, en particulier dans le domaine industriel et les procédés industriels.

Nous avons également étudié les phénomènes de transfert de thermique et l'effet des gaz plasma dans un réacteur à arc plasma

Dans cette thèse, la simulation hydrodynamique et thermique à l'intérieur du réacteur a été abordée à l'aide d'un code de calcul par éléments finis indispensable à notre modèle, où le caractère général a été préservé au maximum et l'approche physique, limitant ainsi au maximum tout processus expérimental.

In this work, we have formed a research on thermal plasma, its state, characteristics and divisions, as well as its wide uses in working life, especially in industrial field and industrial processes.

We also studied the phenomena of thermal transfer and the effect of plasma gases in a plasma arc reactor.

In this thesis, the hydrodynamic and thermal simulation inside the reactor was approached using a finite element calculation code essential to our model, where the general character was preserved as much as possible and the physical approach, thus limiting as much as possible any experimental process

في هذا العمل ، قمنا باجراء بحث حول البلازما الحرارية وحالتها وخصائصها وأقسامها ، وكذلك استخداماتها الواسعة في الحياة العملية ، خاصة في المجال الصناعي والعمليات الصناعية برسنا أيضًا ظاهرة النقل الحراري وتأثير غازات البلازما في مفاعل قوس البلازما في هذه الأطروحة ، تم الاقتراب من المحاكاة الهيدروديناميكية والحرارية داخل المفاعل باستخدام كود حساب عنصر محدود ضروري لنموذجنا ، حيث تم الحفاظ على الطابع العام قدر الإمكان والنهج المادي ، وبالتالي الحد قدر الإمكان من أي عملية تجريبية.

Sommaire

Introduction générale

Introduction.....	1
-------------------	---

Généralités sur les Plasmas

I. Introduction aux plasmas.....	3
---	----------

I.1. L'état de plasma.....	3
----------------------------	---

I.2. Les différents types de plasmas.....	3
---	---

I.3.L'utilisation des plasmas dans l'industrie.....	4
---	---

Phénomènes de Transfert thermique

Généralités sur les transferts de chaleur.....	9
--	---

II.1.Transfert Thermique par conduction	10
---	----

II.2.Transfert Thermique par convection.....	12
--	----

II.3.Transfert par rayonnement	14
--------------------------------------	----

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du LAPLACE

Dispositif de synthèse.....	16
-----------------------------	----

III.1.La chambre à arc	16
------------------------------	----

III.2.Alimentation électrique.....	17
------------------------------------	----

III.3.Les électrodes.....	18
---------------------------	----

III.4.Le gaz plasmagène.....	19
------------------------------	----

Modèle mathématique et équations gouvernantes

IV.1 Définition de Problème.....	23
----------------------------------	----

IV.2 Régime de l'écoulement au sein du réacteur.....	23
--	----

IV.3 Hypothèse simplificatrice.....	24
-------------------------------------	----

IV.4. Modèle Mathématique et condition aux limites.....	25
---	----

Sommaire

Résultats et discussions

V.1. Influence du gaz plasmagène.....	27
V.1.1. champs de vitesses.....	27
V.1.2. Lignes de courant.....	32
V.1.3. Champs de température.....	33
Conclusion générale.....	36

Liste des symboles

α : Le taux d'ionisation du plasma.

n_e, n_a : Sont les densités électroniques et atomiques.

r_D : La longueur de Debye.

T_e : La température des électrons [K]

T_g : La température des éléments lourdes [K]

Φ : Flux de chaleur [W]

P : Pression. [Pascal]

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor.

TIG: Tungsten Inert Gas.

MIG: Metal Inert Gas.

ETL: Les écarts à l'équilibre thermodynamique local.

R_{th} : La résistance thermique..

S : La surface d'échange thermique.

H : Le coefficient de transfert de chaleur.

C_p : Chaleur spécifique à pression constante [J/K°·Kg]

ρ : La masse volumique. [Kg/ m³].

r : Le réons.

F : Le facteur de forme.

ε : L'émissivité.

σ : La constante de Stéphane-Boltzmann.

ν : La viscosité cinématique.

g : La gravité.

D_{th} : Diffusivité thermique [m^2 / S]

p : Source interne

Liste des symboles

λ : La conductivité thermique [$w. m^{-1}. k^{-1}$]

ρ : La masse volumique du matériau [$kg. m^{-3}$]

C : Capacité thermique massique du matériau [$J. kg^{-1}.k^{-1}$]

T_c : Température de la surface d'échange [K]

T_w : Température de la fluide loi de la surface d'échange [K]

ρ : Densité [Kg/m³]

Liste des figures

Figure I.1 : Principe du soudage plasma.....	04
Figure I.2 : Le soudage à l'arc plasma.....	05
Figure I.3 : Le soudage à l'arc électrode.....	05
Figure I.4 : Découpe plasma.....	06
Figure I.5 : Projection plasma.....	07
Figure I.6 : Four à arc électrique.....	08
Figure II.1 : Modes de transfert thermique.....	09
Figure.III.1 : Schéma du réacteur à arc.	17
Figure.III.2 : Schéma de l'alimentation électrique.	17
Figure.III.3 : Schéma de l'anode.	18
Figure IV.1 : (A) : Les composants de réacteur.	20
Figure IV.1 :(b) géométrie bidimensionnel de réacteur avec les dimensions et les différents Composant.....	20
Figure IV.2 : profil des températures de plasma pour différentes intensité électrique.....	22
Figure IV.2 : Les nombres de Rayleigh pour les deux profils de température.....	23
Figure V-1 : Comparaison de champs de vitesse pour le méthane (CH_4) Pour différents instants 1s ,60s, 120s.....	26
Figure V-2 : Comparaison de champs de vitesse pour l'Hélium (He) Pour différents instants 1s ,60s, 120s.....	27
Figure V-3 : Comparaison de champs de vitesse pour l'Hydrogène (H_2) Pour différents instants 1s ,60s, 120s.....	27
Figure V-4 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans méthane.....	28
Figure V-5 : champ des modules des vitesses (a) ,(b) :champ des vecteurs vitesse dans l'hélium.....	29
Figure V-6 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs vitesse dans l'Hydrogène.....	29

Liste des figures

Figure V-7 : Comparaison des lignes de courant pour les trois gaz : méthane ; Hélium et L'Hydrogène	31
Figure V-8 : champ de température (a) et isothermes (b) dans la région plasma/électrodes dans le cas de méthane(CH ₄).....	32
Figure V-9 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hélium (He).....	33
Figure V-10 : champ de température (a) et isothermes (b) ; dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hydrogène (H ₂).....	33

Liste des tableaux

Tableaux II: des groupements sans dimensions.....	13
Tableaux IV.1 : Les Propriétés des Matériaux Solide.....	21
Tableaux IV.2 : Les dimensions de réacteur.....	21

Introduction générale

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 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 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.

Introduction générale

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 application 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 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

Généralités sur les plasmas

I. Introduction aux plasmas :

I.1. L'état de plasma :

Le plasma est défini comme étant le quatrième état de la matière, en suivant les états « solide- liquide-gaz ».il est défini aussi comme étant un gaz partiellement ou totalement ionisé. Ce terme a été introduit pour la première fois pour expliquer un état de la matière contenant des espèces chargées positivement ou négativement, mais globalement neutre.

Le plasma est généré par l'action d'une décharge qui transforme l'énergie électrique en énergie d'excitation et d'ionisation et en énergie cinétique [Rax-1]. Ceci peut être généré en fournissant de l'énergie à un gaz, en appliquant par exemple un champ électrique intense conduisant à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz.

I.2. Les différents types de plasmas :

Le terme plasma recouvre un vaste domaine que l'on peut en première approximation distinguer plusieurs types :

➤ Les plasmas « chauds » :

À des températures supérieures à 10^8 K, le gaz est totalement ionisé et se trouve en équilibre thermodynamique. En général, il peut être considéré comme un gaz parfait. On rencontre ce type de plasma dans les étoiles ou dans les réacteurs de plasma de fusion.

➤ Les plasmas « froids » hors d'équilibre :

Dans ces plasmas les électrons ont une température supérieure à celle des ions ou des neutres. Les particules lourdes neutres ou ioniques ont même température de l'ordre de 300 à 1500 K. Le gaz est faiblement ionisé avec un taux d'ionisation compris entre 10^{-6} et 10^{-2} .

➤ Les plasmas « froids » thermiques :

La pression y est basse, de 10^{-4} à quelques dizaines mPa, le taux d'ionisation faible et la température des électrons y est bien supérieure à celle des autres espèces, caractéristique première du déséquilibre thermodynamique [Lar-1].

Généralités sur les plasmas

I.3.L'utilisation des plasmas dans l'industrie :

La première utilisation industrielle des torches à plasma d'arc date de 1905 pour la production d'oxydes d'azote selon le procédé Birkeland et Eyde. Cette application qui a été arrêtée en 1920 avait une puissance totale de quelques centaines de mégawatts. Ensuite, en 1939, la société Hüls a développé des torches de 8,5 Mégawatts pour la production d'acétylène, à partir d'hydrogène et de méthane. Cette installation est toujours en fonctionnement.

Les torches à plasma d'arc couvrent maintenant une gamme de puissance variant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Elles sont utilisées dans des applications variées dont les principales sont : le découpage, le soudage, le rechargement par arc transférés, la projection par plasma, la refusions – purification de métaux, le chauffage de répartiteurs de coulée et la métallurgie extractive par des fours à électrodes en graphite. Les applications en cours de développement concernent la destruction des déchets, la fabrication de pièces de forme par plasma formage et le chauffage de l'air (cubilots, production de métaux).

I.3.1.Le soudage à l'arc :

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

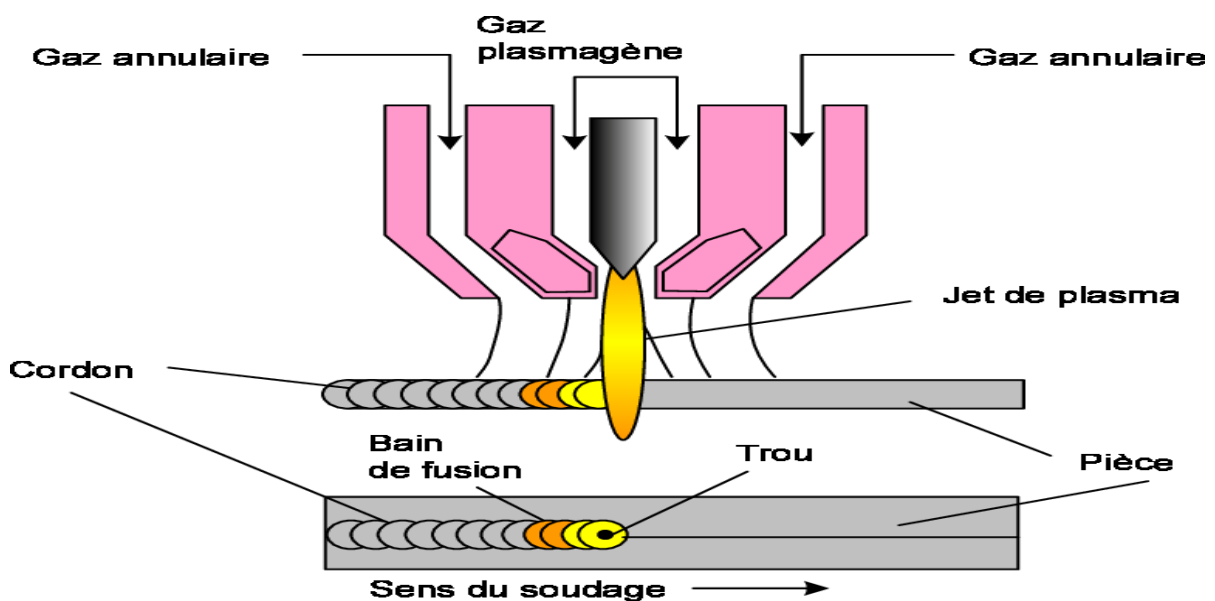


Figure I.1 : Principe du soudage plasma.

Généralités sur les plasmas

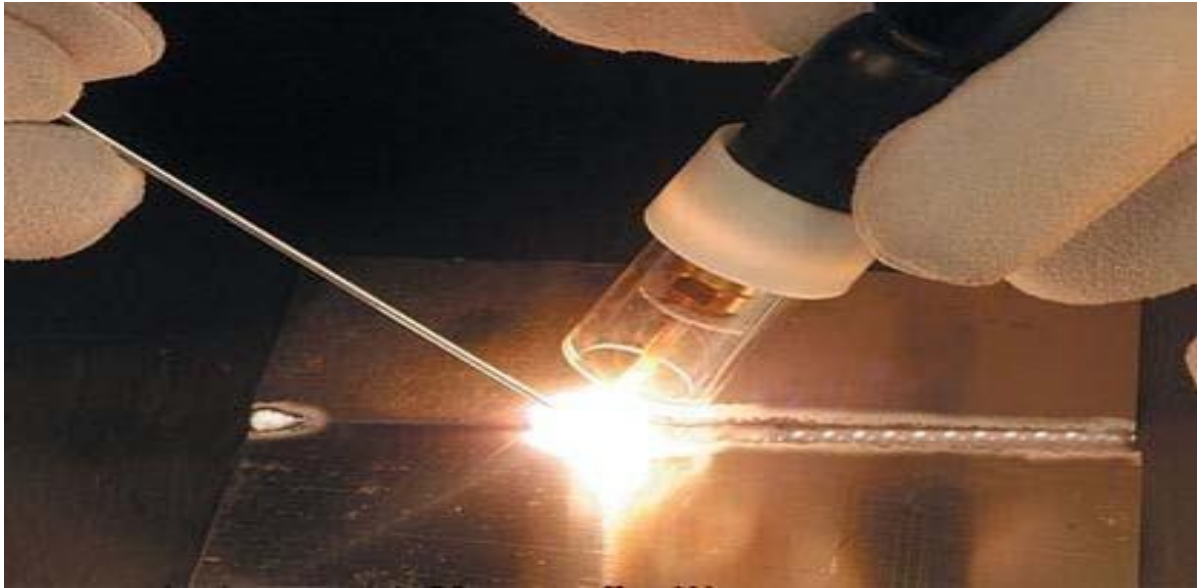


Figure I.2 : Le soudage à l'arc plasma.



Figure I.3 : Le soudage à l'arc électrode.

Généralités sur les plasmas

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

La découpe plasma est un procédé de fusion, comparé au coupage à la flamme qui est un procédé de combustion. Un jet de gaz dans le plasma permet de fondre et d'expulser la matière de l'entaille. Durant le procédé, un arc électrique brûle entre une électrode et la pièce. La pointe de l'électrode est placée dans une buse de gaz refroidie à l'eau ou à l'air à l'intérieur de la torche. Le gaz plasma est acheminé par la buse. L'arc et le gaz plasma sont contraints de passer par un très petit orifice dans la pointe de la buse. Le gaz est chauffé et ionisé. Le jet de plasma concentré qui est formé a une température pouvant atteindre 30 000 °C et une très grande vitesse. Lorsque le jet de plasma atteint la pièce, la chaleur est transférée en raison de la recombinaison (le gaz revient à son état normal). Le matériau fond et il est expulsé de la saignée par un flux de gaz.



Figure I.4: Découpe plasma.

Généralités sur les plasmas

I.3.3. La projection plasma :

La projection plasma consiste à introduire des particules solides dans un jet de gaz, dont la température atteint couramment 12000 K et la vitesse 1000-1500 m.s⁻¹, et dans lequel elles sont accélérées et fondues avant de s'écraser sur la pièce à revêtir. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des lamelles solidifiées obtenues par l'impact des particules sur le substrat préalablement « préparé ». Ce procédé est utilisé, en particulier, pour déposer des matériaux à haute température de fusion tels que des alliages réfractaires ou des céramiques.

Il fait désormais partie de la panoplie des bureaux d'études et des ingénieurs en recherche et développement pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie des surfaces. Les principales applications des dépôts réalisés par projection plasma sont : la résistance à l'usure et à la corrosion, l'isolation thermique et électrique, ... Ces dépôts sont actuellement utilisés dans la plupart des secteurs industriels [fan] et en particulier dans le biomédical, la mécanique, l'aéronautique, le nucléaire, la chimie.

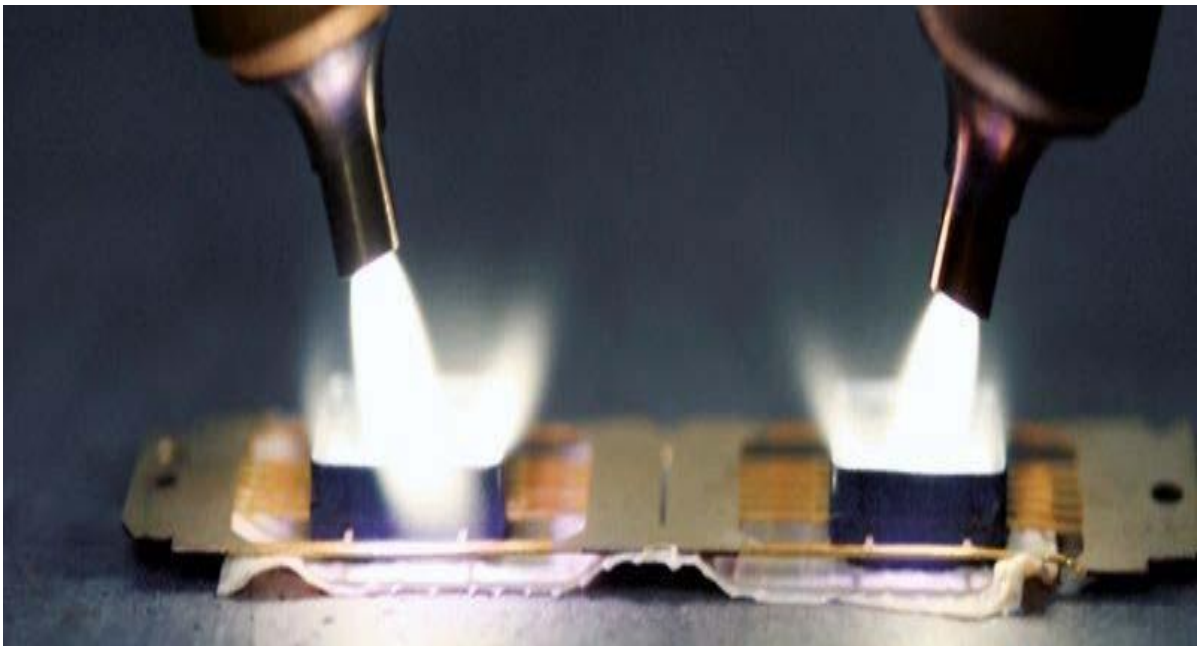


Figure I.5: Projection plasma.

Généralités sur les plasmas

I.3.4. Les disjoncteurs haute-tension :

Le DHT est un appareillage clé dans la sécurisation du réseau électrique. Son rôle est de protéger le réseau contre les différentes agressions qu'il peut subir (foudroiement, rupture de ligne, surcharge...). Dans la plus grande partie de sa vie, le DHT est en position fermée laissant passer le courant électrique (rôle de conducteur) tout en étant prêt à interrompre le courant en cas de défaut détecté. Son objectif est d'isoler et de protéger les dispositifs parfois coûteux et sensibles aux perturbations électriques importantes.

I.3.5. Les disjoncteurs basse-tension :

Le disjoncteur est un appareillage électrique destiné à assurer, en toute sécurité, la coupure du courant dans les cas :

- D'une opération volontaire sur commande.
- D'une protection automatique dans le cas d'un court-circuit ou d'une surintensité [Bau1].

I.3.6. Les fours à arc en métallurgie :

Est un type de four électrique utilisé en métallurgie et créé par Ferdinand Frédéric Moissan (Henri). Il utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisante à sa fusion.



Figure I.6: Four à arc électrique.

Phénomènes de Transfert thermique

Phénomènes de transfert thermique

Généralités sur les transferts de chaleur :

Le transfert de chaleur est un processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux aux températures différentes. Cette discipline est également appelée transfert thermique ou thermocinétique.

Le transfert thermique est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux zones, ou entre deux systèmes, dès qu'il apparaît entre eux une différence de température et ce, quelque soit le milieu qui les sépare.

L'étude des transferts thermiques repose sur les concepts de quantité de chaleur, qui est associée au mouvement de translation, de vibration et de rotation des molécules, et des différences de températures qui caractérisent l'intensité de l'énergie transférée. Ces concepts sont définis par la thermodynamique qui ne s'intéresse qu'à des états d'équilibre, négligeant les mécanismes d'échange d'énergie qui y conduisent.

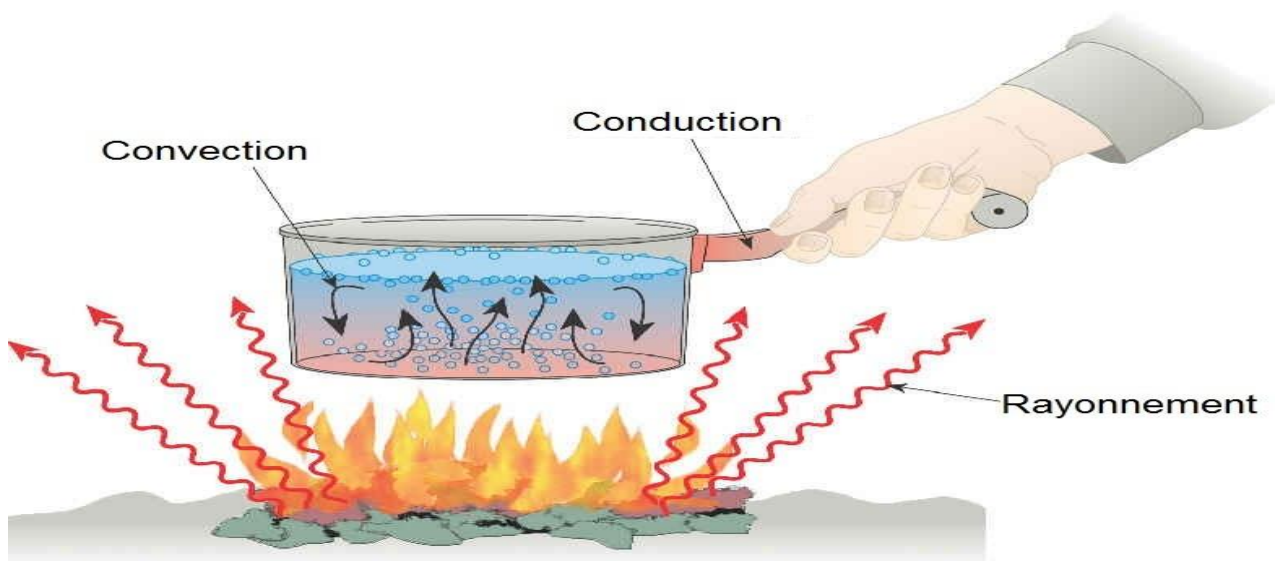


Figure II.1: Modes de transfert thermique.

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 est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur (ou l'échange d'énergie interne) provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux, ou encore entre deux milieux en contact physique.

II.1.1. Loi de Fourier :

En 1822, Jean-Baptiste Joseph Fourier, publie son *Traité analytique de la chaleur* dans lequel il énonce la loi relative à la diffusion thermique (il y introduit également les fameuses séries qui portent désormais son nom pour résoudre l'équation de la chaleur [1]:

$$\varphi = -\lambda \text{grad}T \quad (\text{II. 1})$$

La conductivité thermique λ s'exprime en J. m⁻¹. K⁻¹. s⁻¹ ou, soit des W. m⁻¹. K⁻¹

II.1.2. Equation de Chaleur :

Pour un solide de caractéristiques thermiques λ et $\gamma = \rho.c$ sont constantes et pour lequel la puissance volumique p est indépendante de la température, on obtient l'équation linéaire classique de la chaleur :

$$\Delta T - \frac{1}{D_{th}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p}{\lambda} = 0 \quad (\text{II. 2})$$

1/ Milieu avec sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T + \frac{p}{\lambda} = 0 \quad (\text{Equation de POISSON})(\text{II. 3})$$

2/ Milieu sans sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T = 0 \quad (\text{Equation de LAPLACE})(\text{II. 4})$$

3/ Milieu sans sources internes, en régime variable :

$$\Delta T = \frac{1}{D_{th}} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Equation de FOURIER})(\text{II. 5})$$

Phénomènes de transfert thermique

Dth : Diffusivité thermique [$m^2 \cdot s^{-1}$]

p : Source interne

λ : La conductivité thermique [$w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$]

ρ : La masse volumique du matériau [$kg \cdot m^{-3}$]

C : Capacité thermique massique du matériau [$J \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$]

II.1.2.1 Expressions analytiques de l'équation de la chaleur :

En introduisant les expressions du LAPLACIEN Δ en coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques, on obtient respectivement les équations suivantes :

➤ En coordonnées cartésiennes : (x, y, z, t)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{Dth} * \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p(x, y, z, t)}{\lambda} = 0 \quad (II. 6)$$

➤ En coordonnées cylindriques : (r, z, t)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{Dth} * \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p(r, z, t)}{\lambda} = 0 \quad (II. 7)$$

➤ En coordonnées sphériques : (r, θ, ϕ, t)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{Dth} * \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p(r, t)}{\lambda} = 0 \quad (II. 8)$$

II.1.2.2 Conditions aux limites spatio-temporelles:

L'équation générale de la chaleur traduit ,par une relation entre les variables x, y, z, t et la température ,le mécanisme du phénomène conductif, en tout point de coordonnées x, y, z à tout instant t .

II.1.2.3 Conditions initiales:

La distribution des températures à l'intérieur du solide et sur sa surface est supposée connue à l'instant $t=0$ c -à-d : $T(x, y, z, t=0)=T_0(x, y, z)$.

Phénomènes de transfert thermique

II.1.2.4 Conditions aux limites (Conditions aux surfaces):

Les conditions que l'on impose sur la surface frontière c -à- d à la paroi du solide pour $t > 0$, seront affectées de l'indice p. Elles sont la traduction mathématique des conditions physiques.

II.1.2.6. Température imposée : (Condition de DIRICHLET)

La température est une fonction donnée du point MP sur la paroi et/ou du temps : $T_p = f(MP, t)$.

II.1.2.7. Densité de flux imposée : (Condition de NEUMANN)

La densité de flux thermique est une fonction donnée du point MP sur la paroi et/ou du temps.

- **Remarque :** Si le corps est thermiquement isolé, la densité de flux est nulle en tout point de sa surface (adiabaticité).

II.1.2.7.4 Transfert linéaire à la surface et condition mixte : (Condition de FOURIER)

La densité de flux traversant la surface frontière est proportionnelle à la différence de température entre la paroi et le milieu environnant.

II.2. Transfert Thermique par convection:

La convection est un mode de transfert thermique qui implique un déplacement collectif de fluide. La matière fluide chaude, en se déplaçant, cède de l'énergie aux parties plus froides ; On distingue deux types de convection :

II.2.1 La convection naturelle :

Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède.

II.2.2 La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...). Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement. On distingue :

- Ecoulement en régime turbulent.
- Ecoulement en régime laminaire.

Phénomènes de transfert thermique

II.2.3. L'expression du flux de chaleur en convection est la suivante (Loi de Newton) :

Pour un écoulement à une température T_{∞} autour d'une structure à une température uniforme T_s de surface S , l'expression du flux de chaleur en convection est la suivante:

$$\Phi = h \cdot s(T_s - T_{\infty}) \quad (\text{II. 9})$$

(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 de la fluide loin de la surface d'échange [K, °C]

(S) : La surface d'échange solide/fluide.

$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$	Nombre de Reynolds
$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$	Nombre de Prandtl
$Nu = \frac{h D}{\lambda}$	Nombre de Nusselt
$Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}$	Nombre de Grashof
$Ra = \frac{c_p \beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\lambda \mu^2}$	Nombre de Rayleigh

Tableaux II: des groupements sans dimensions.

Et
$$Ra = Gr \times Pr \quad (\text{II. 10})$$

II.2.4. L'expression du résistance thermique de convection :

$$R_{th} = \frac{T_s - T_{\infty}}{\Phi} = \frac{1}{h \cdot s} \quad (\text{II. 11})$$

Phénomènes de transfert thermique

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) :

$$\varphi = F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\Delta T)^4 \quad (\text{II. 12})$$

Le flux rayonné [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] :

$$\Phi = S \cdot \varphi = S \cdot F \varepsilon \sigma (\Delta T) \quad (\text{II. 13})$$

(S) : La surface de corps.

(F) : Le facteur de forme.

(ε) : L'émissivité.

(σ) : La constante de Stephan-Boltzmann. Avec $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (II. 14)

II.3.2. Flux thermique :

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique (en J) qui traverse une surface par unité de temps Il est appelé « puissance thermique ». Il s'exprime en \mathbf{w}

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (\text{II. 15})$$

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. Elle s'exprime en $\mathbf{w} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$\varphi = \frac{d\Phi}{ds} \quad (\text{II. 1})$$

**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.

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du 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.

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du LAPLACE

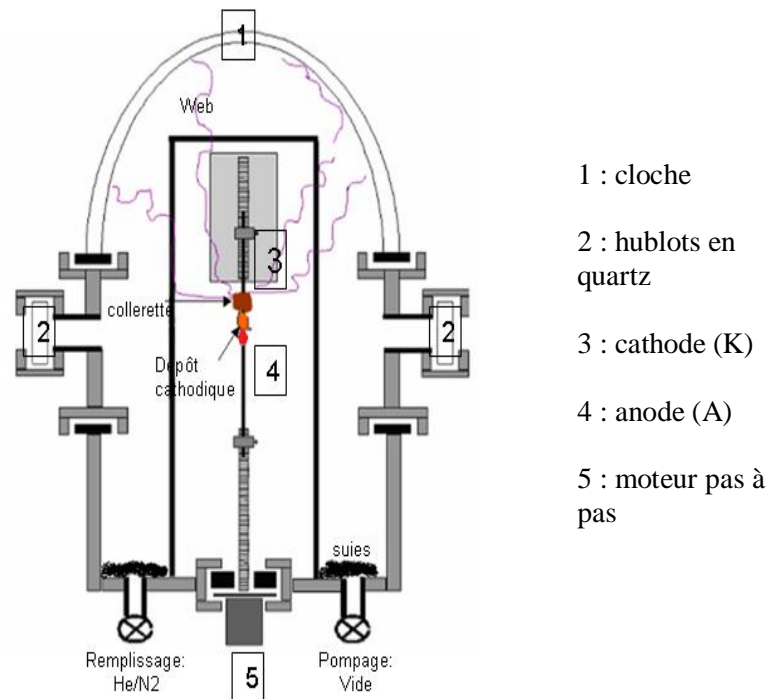


Figure III.1: Schéma du réacteur à arc.

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.

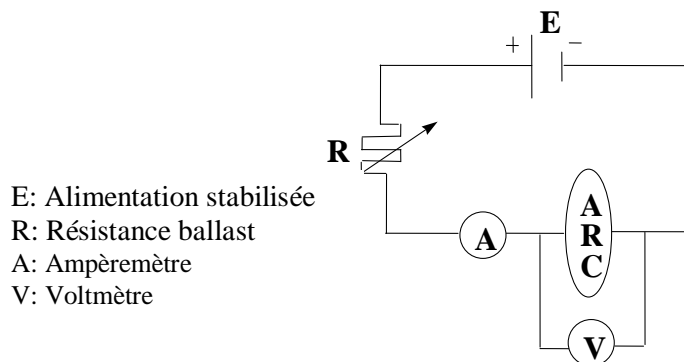


Figure.III.2: Schéma de l'alimentation électrique.

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du LAPLACE

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.

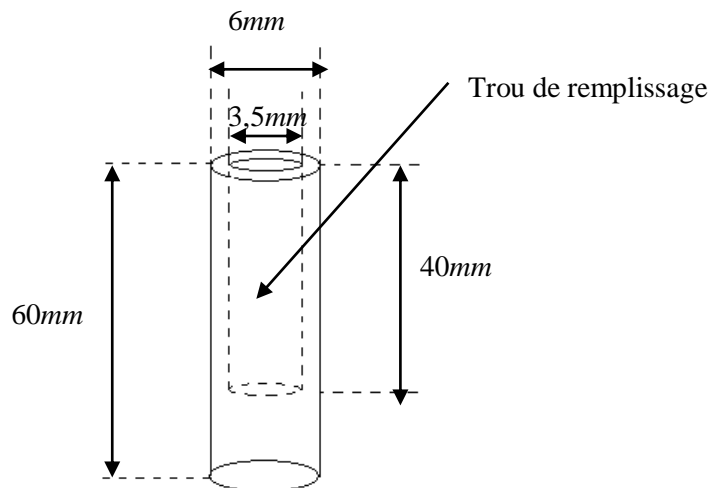


Figure.III.3. :Schéma de l'anode.

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.

Le réacteur Arc de l'équipe AEPPT du LAPLACE

III.4. Le gaz plasmagène

Le choix du gaz plasmagène est déterminant vis-à-vis de la propreté et du rendement des nanotubSWCNTs 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**

Modèle mathématique et équations de 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*.

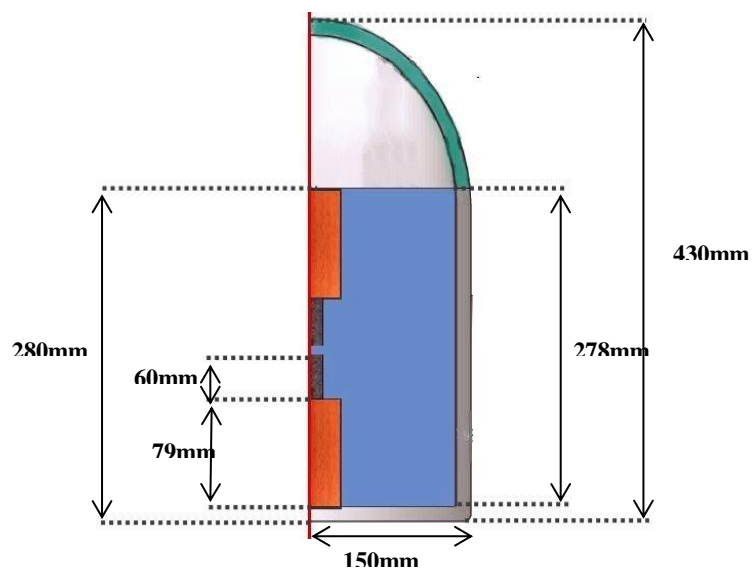
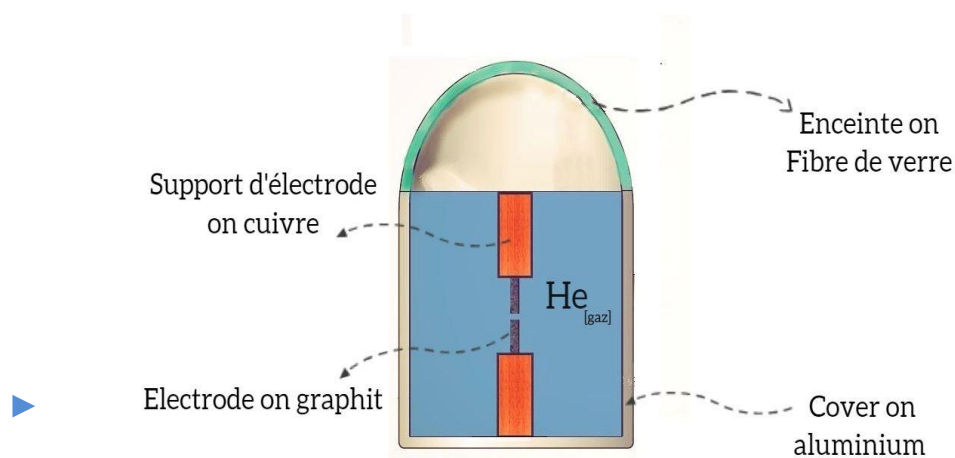


Figure IV.1 : géométrie bidimensionnel de réacteur avec les dimensions et les différents composants

Modèle mathématique et équations de gouvernantes

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.1: Les Propriétés des Matériaux Solide.

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

Tableaux IV.2 : Les dimensions de réacteur.

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.

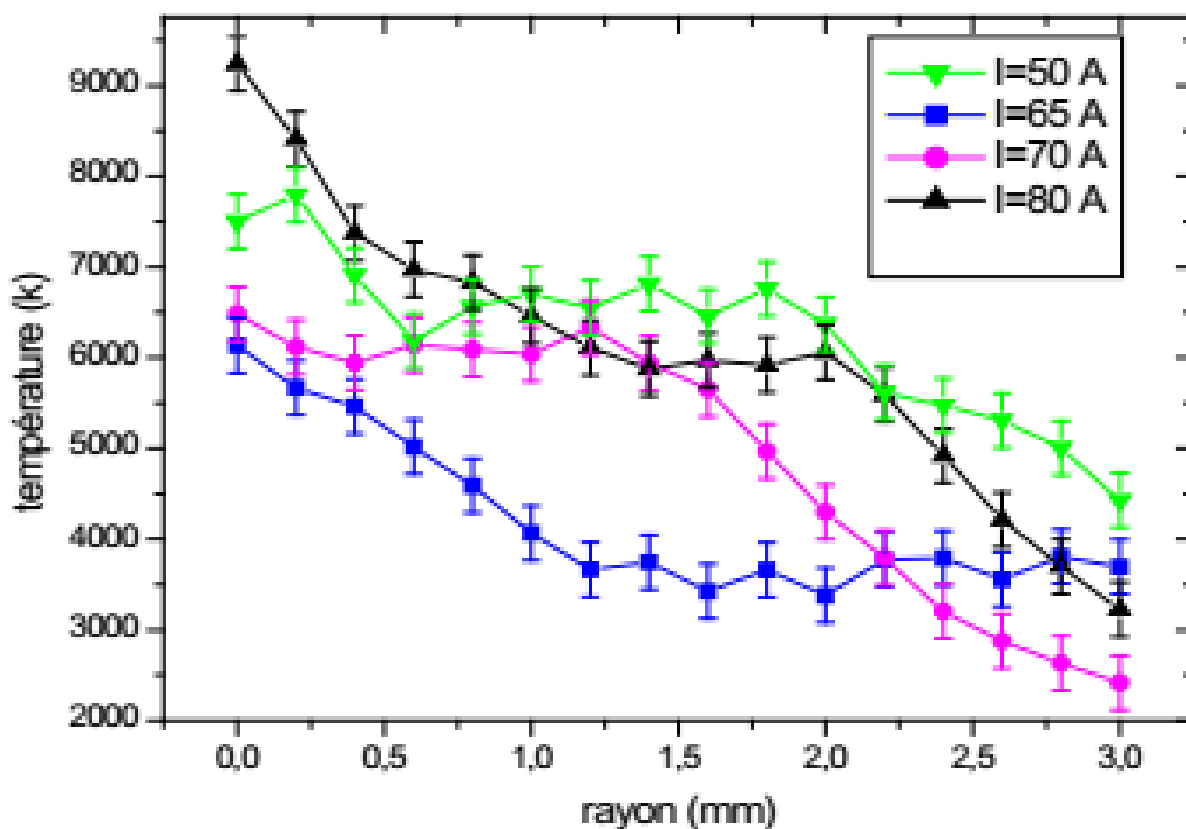


Figure IV.2 : profil des températures de plasma pour différentes intensité électrique [Go-1]

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 de 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}

Figure IV.2 : 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 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.

Modèle mathématique et équations de gouvernantes

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 :

► Gas Plasma gene: (CH₄, He, H₂)

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 :

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

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

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 :

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

Modèle mathématique et équations de gouvernantes

► Les supports: (Cuivre)

L'équation d'énergie s'écrit :

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

► Les parois: (Aluminium)

L'équation d'énergie s'écrit :

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

► La couverture: (vitre)

L'équation d'énergie s'écrit :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$U_r(r, z, 0) = 0$ $U_z(r, z, 0) = 0$ $P(r, z, 0) = P_0 = 600$ mbar $T = 9000$ K ou :

$0 \leq r \leq 3$, $z = 140$

Résultats et discussions

Résultats 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 Méthane, Hélium et Hydrogène.

V.1.1. champs de vitesses:

L'impact du changement de la nature du plasma sur le champ des vitesses est discuté à partir des Figures V-1 à V-3.

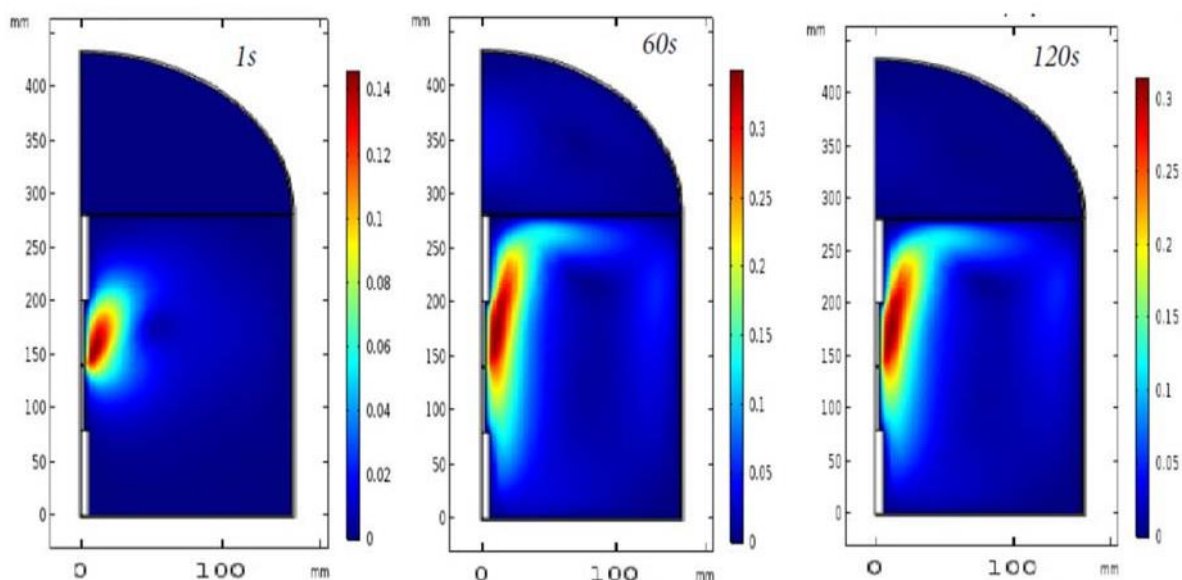


Figure V-1 : Comparaison de champs de vitesse pour le méthane (CH₄)

Pour différents instants 1s ,60s, 120s.

Résultats et discussion

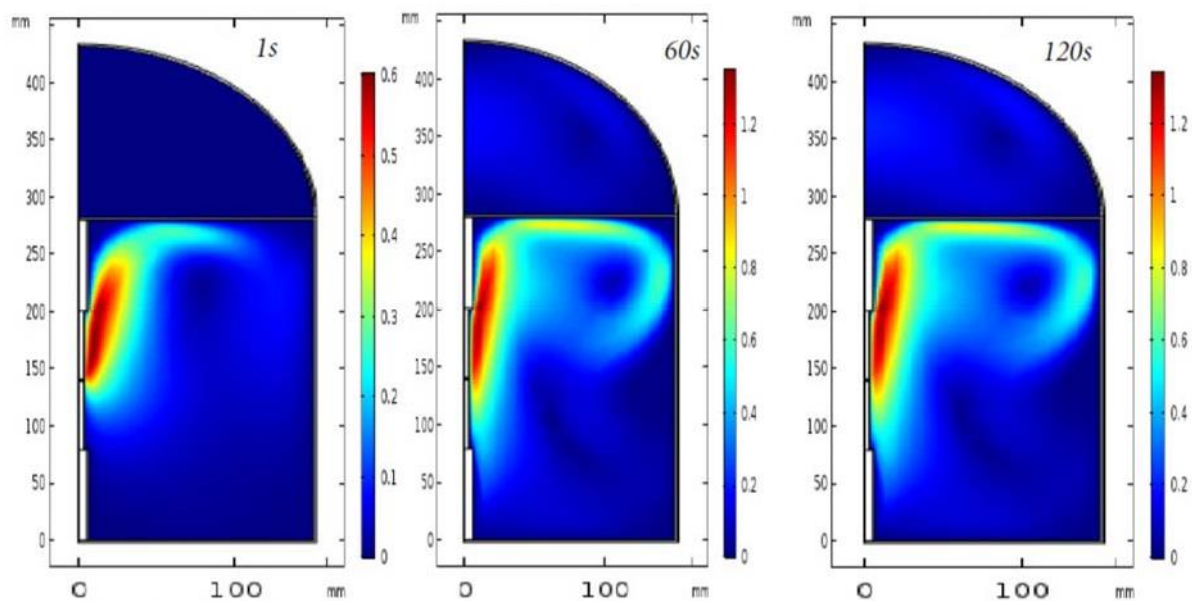


Figure V-1 : Comparaison de champs de vitesse pour l'Hélium

(He) Pour différents instants 1s ,60s, 120s.

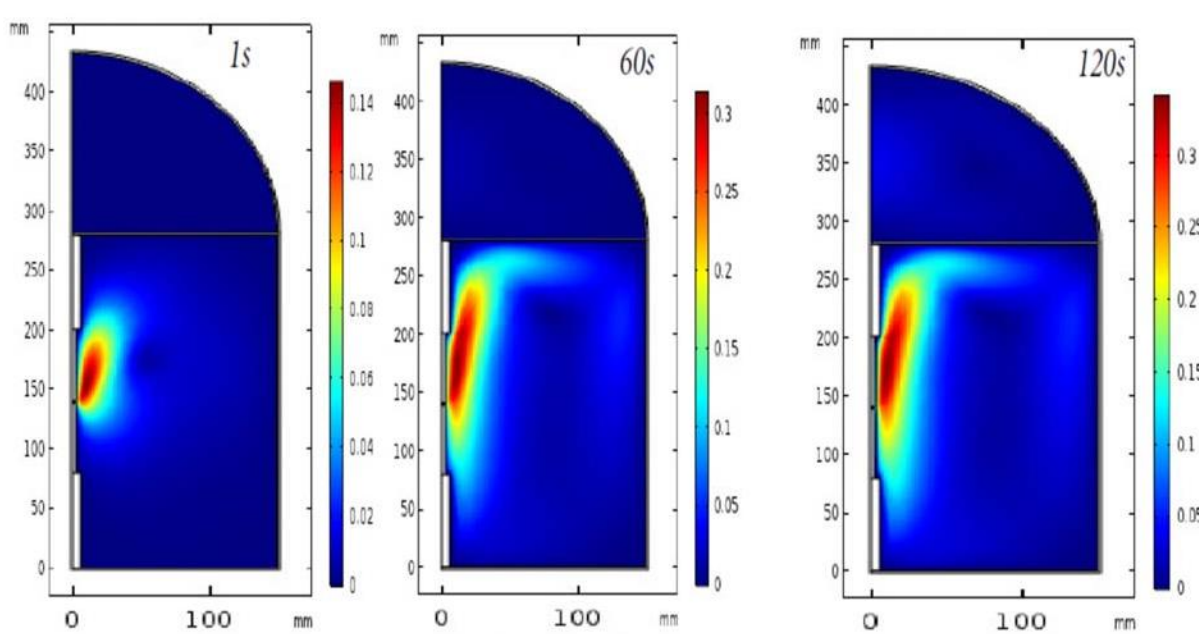


Figure V-1 : Comparaison de champs de vitesse pour l'Hydrogène (H₂) Pour différents instants 1s ,60s, 120s.

Résultats et discussion

Les figures V-1 à V-3 : illustrent les champs de vitesses aux différents instants de la simulation à l'intérieur du réacteur. Pour les trois gaz plasmagènes Méthane, Hélium, et Hydrogène, les valeurs maximales sont (0.3m.s^{-1} , 1.2m.s^{-1} et 0.3cm.s^{-1}) sont atteintes après la 60 - ème seconde de la décharge et ne présente aucun changement i.e. on assiste au même cas de figure après la 60 -ème seconde jusqu'à la 120 -ème seconde (pour cette raison nous avons décidé de suivre le reste de notre étude à la 60 -ème seconde). On peut noter que la différence entre ces valeurs maximales des modules de vitesse a pour cause la différence de la densité de masse entre l'Hélium et l'Hydrogène (un rapport de 2 entre les masses volumiques) vu que dans [badaoui-figuifui] les résultats montrent que la viscosité n'a pas trop d'influence sur les modules de vitesses.

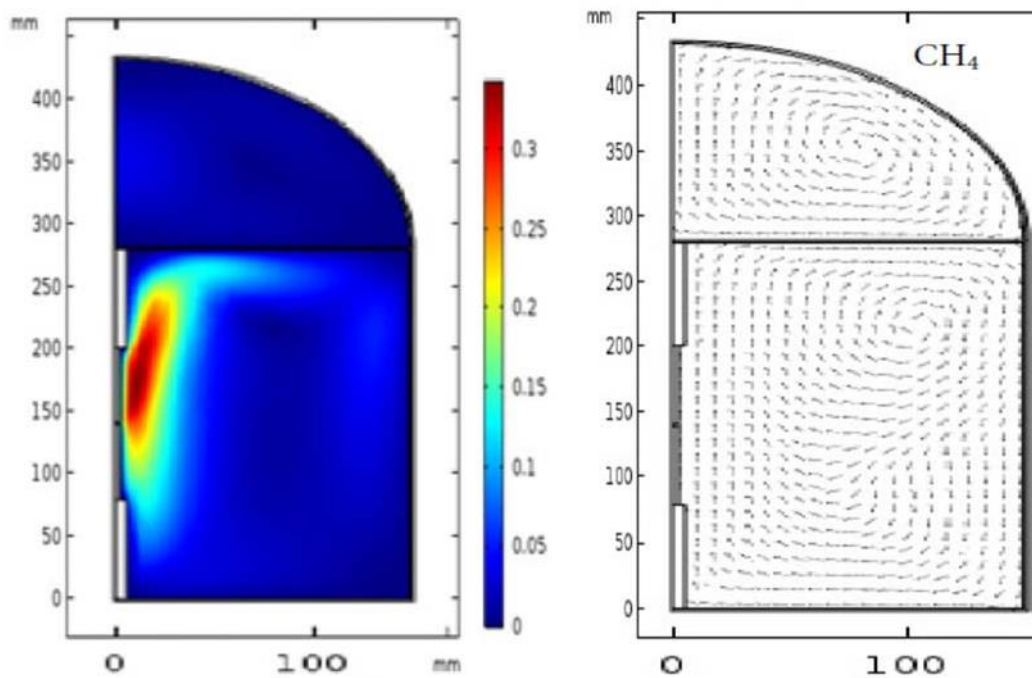


Figure V-4 : champ des modules des vitesses (a), (b) : champ des vectrices

vitesses dans le méthane.

Résultats et discussion

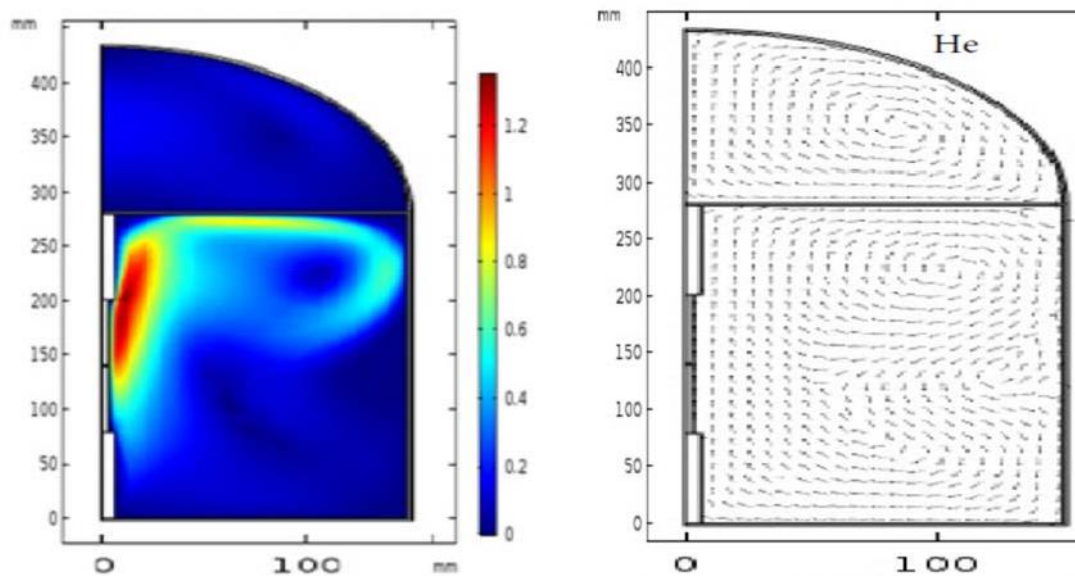


Figure V-5 : champ des modules des vitesses (a) , (b) :champ des vecteurs
vitesse dans l'Hélium.

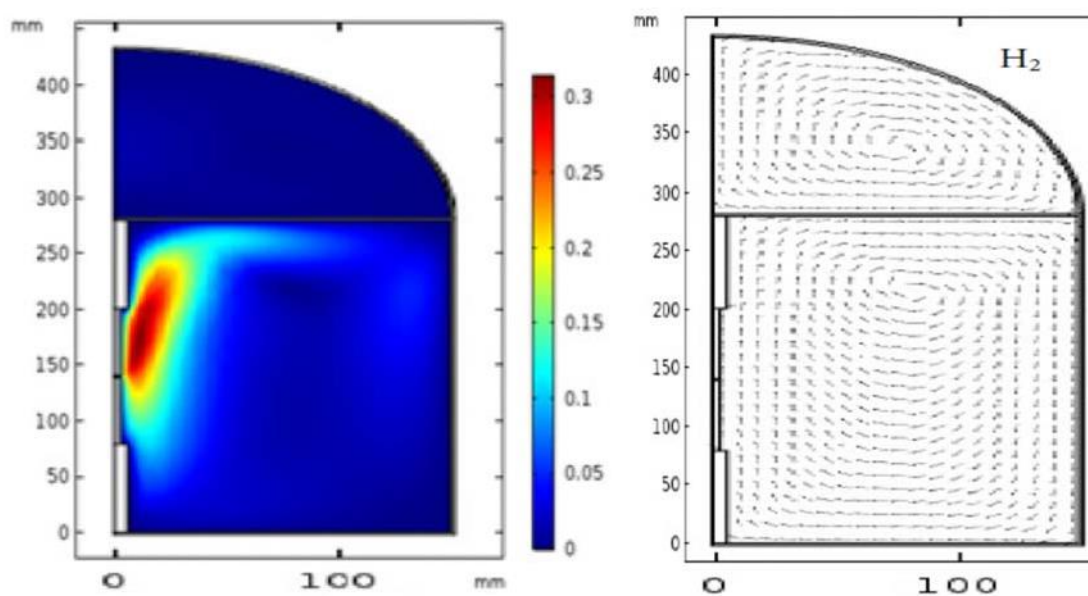


Figure V-6 : champ des modules des vitesses (a), (b) : champ des vectrices
vitesses dans l'Hydrogène

Résultats et discussion

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 différente suivant le gaz plasmagène utilisé. Pour l'Hélium l'écoulement est plus projeté selon l'axe et le rayon de la décharge (composantes en r , z prépondérantes), ceci peut favoriser la formation des vortex au centre de réacteur.

Nous avons constaté aussi une similitude entre l'allure générale des champs de vitesse entre l'Hydrogène et le Méthane. Pour mieux comprendre l'origine de ce constat nous avons comparés les champs de vecteur vitesse sur les figures au-dessus.

L'allure du champ de vecteurs vitesses pour l'Hydrogène est illustrée sur la figure V-6(b),on constate que 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'Hydrogène) et provoque une remontée du gaz ou réactifs échappées en bas du réacteur.

Tandis que pour le méthane on note la présence de "deux tourbillons" en diagonale ceci peut défavoriser la recirculation. 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.

Résultats 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

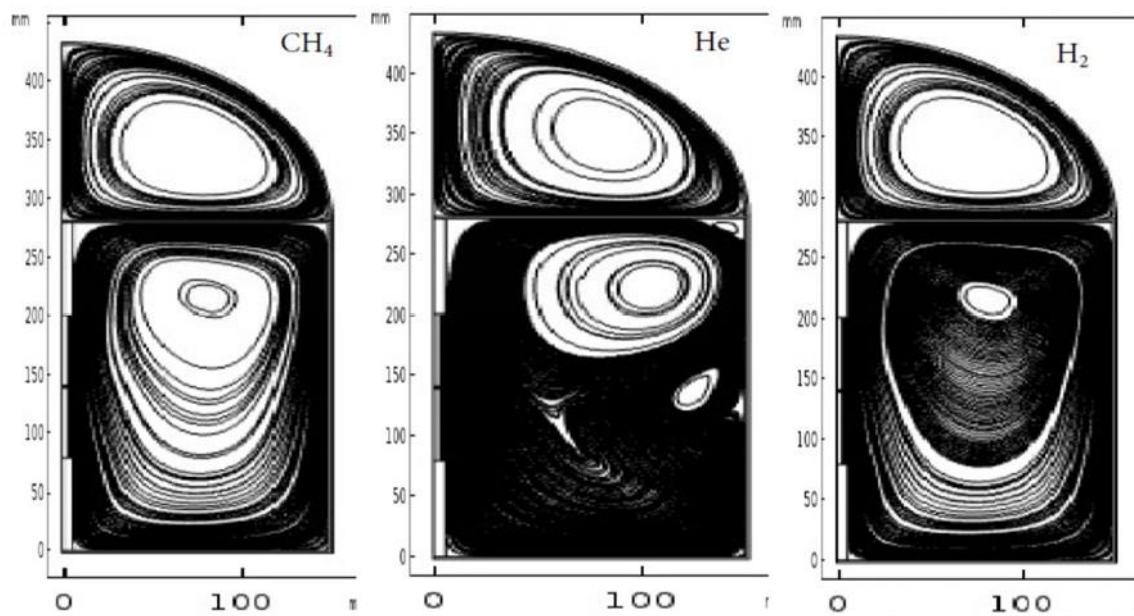


Figure V-7 : Comparaison des lignes de courant pour les trois gaz.

On remarque que l'écoulement présent beaucoup de symétrie est donc une bonne recirculation dans l'Hydrogène et le méthane. Il en suit nos commentaires et constatations de similitudes sur les champs de vitesses dans ces deux gaz. Néanmoins, on peut notifier que les lignes de courant sont un peu plus serrées dans l'Hydrogène.

L'Hélium 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.

Résultats 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).

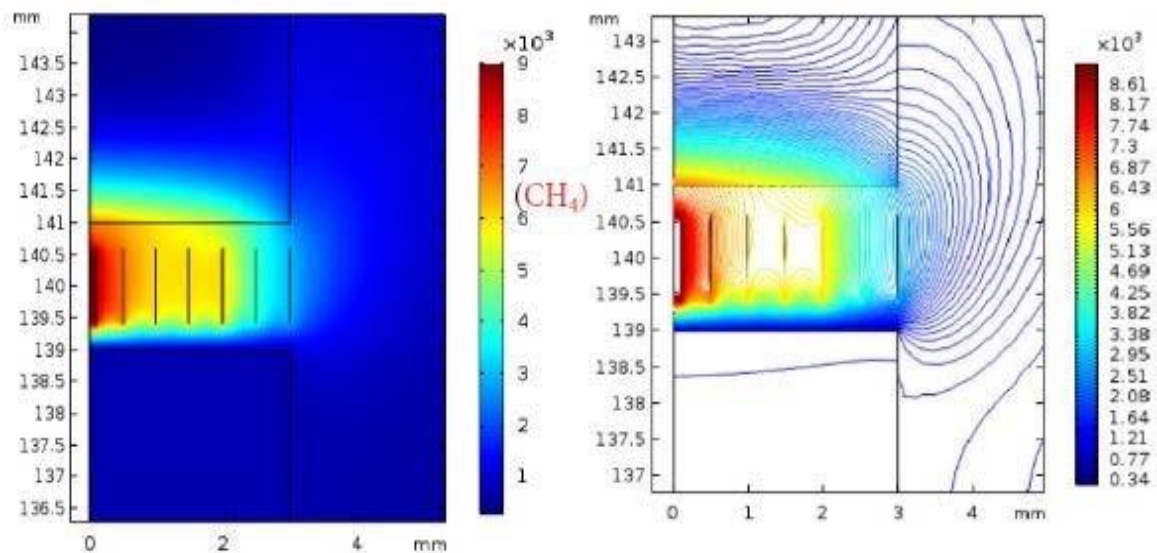


Figure V-8 : champ de température (a) et isothermes (b) dans la région plasma/électrodes dans le cas de méthane (CH₄).

Les figures (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 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. La symétrie radiale est absente dans le méthane et Hydrogène (figure-9; V-10(a)). Cette absence est peut-être l'origine des phénomènes convectifs ordonnés présentés dans ce gaz.

Résultats et discussion

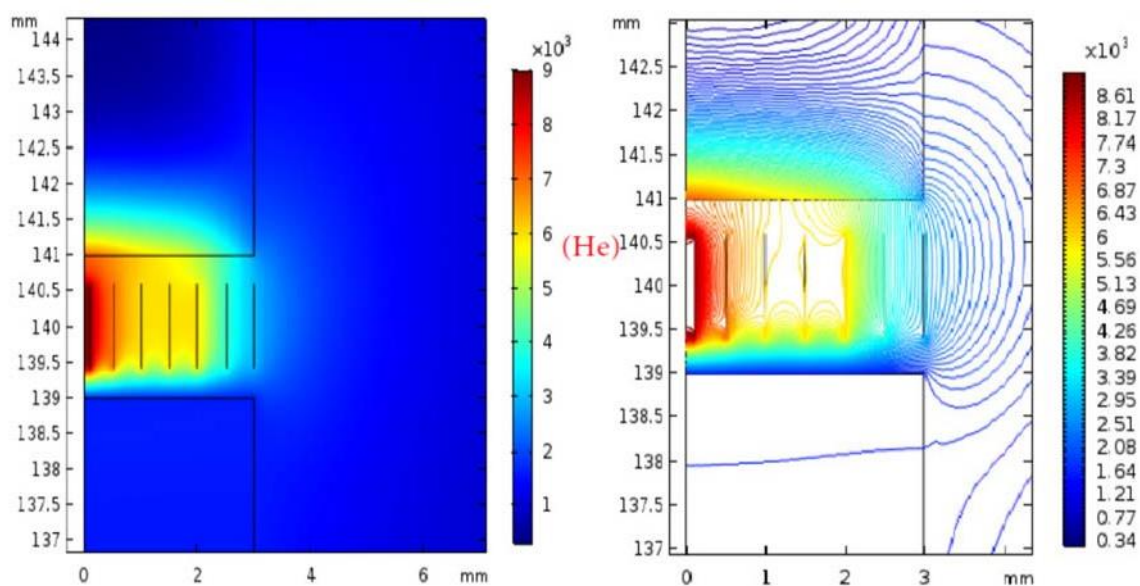


Figure V-9 : champ de température (a) et isothermes (b) dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hélium (He).

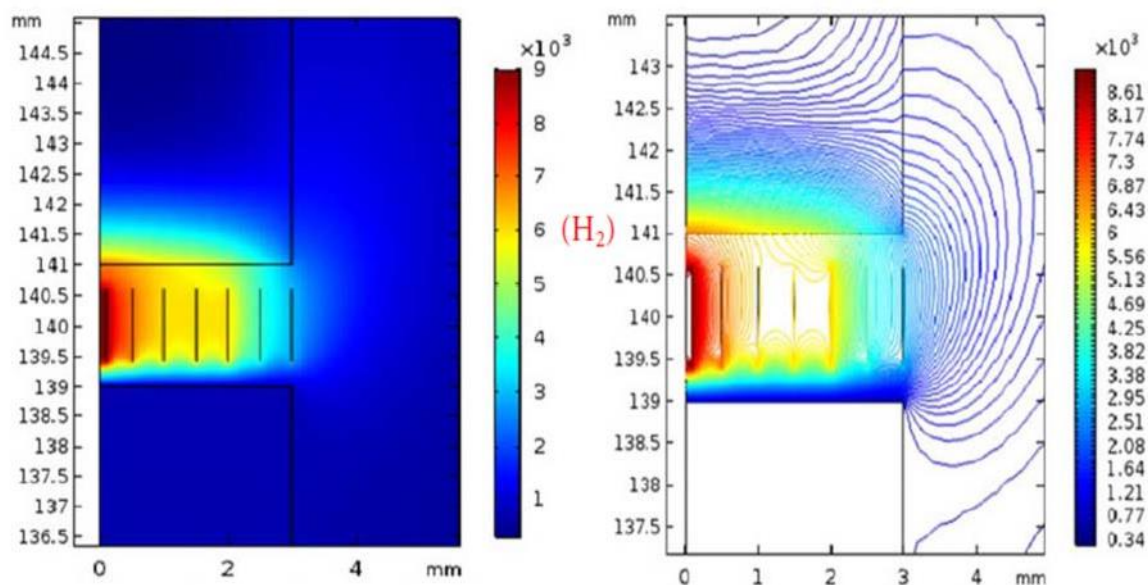


Figure V-10 : champ de température (a) et isothermes (b) ;dans la région plasma/électrodes dans le cas d'Hydrogène (H₂).

Résultats et discussion

On note aussi une différence dans la morphologie de la zone thermique où on observe, un « confinement thermique » dans l'Hydrogène et le méthane, régit par une minimisation de la zone de contact entre le plasma et les électrodes, cet effet est moins marqué pour l'Hélium ou 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 $r > 3\text{mm}$. 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.

Conclusions 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 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'Hydrogène et méthane 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'Hélium où la présence des zones de décollement peut être présent.

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 méthane, est minimal avec l'utilisation de l'hydrogène et méthane, 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 apparaît 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 proche de ce travail est la modélisation du plasma ainsi le problème peut être entouré et une bonne maîtrise du procédé peut être atteinte.

Références

- [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).
- [Mon-1] M. Monthieux, *Introduction to Meta-Nanotubes*, pp. 1-5. In *Meta-Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications* (editor: M. Monthieux), Wiley-Blackwell (UK), (2012).
- [Rax-1] J M Rax, « *Physique des plasmas : cours et applications* », Dunod, Paris (2005).
- [Lar-1] G Laroche, « *Les plasmas dans l'industrie* », Collection Electra, Dopee, Avon, ISBN 2-86995-017-9 (1991).
- [fan] fanchais P; grimand A; verdelle A; verdelle M ; la projection plasma :une revue.ann. phy.fr; 14;p261-310(1989).
- [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).
- [Koc-1] D Koch, « *Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils MT et HT* », cahier technique n°188, Schneider Electric (2003).
- [Bra] R. Bracewell L'analyse de Fourier Pour la science N°142, p. 74–80, 1989.
- [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.
- [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 07500