



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.

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique du plasma.

Par :

Mlle Bentayeb Chahinez.

Sur le thème :

Etude des propriétés thermodynamiques d'un plasma thermique formé de mélanges SF₆-Cu et N₂-Cu; Application aux Appareils de coupures.

Soutenu publiquement le 26/06/2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

M. BOUSSAID Abdelhak	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. GOURARI Djamel Eddine	Professeur	Université de Tlemcen	Examinateur
M. Liani Bachir	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant

Année Universitaire : 2022 ~ 2023

REMERCIEMENTS

J'avais envie d'adresser mes sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant pour sa volonté, sa santé et sa patience qui nous ont permis de mener à bien cette mémoire.

De plus, nous tenons à remercier notre promoteur Pr liani, pour son encadrement et sa disponibilité, nous la remercions pour ses encouragements, sa tolérance et sa compassion tout au long du semestre et des années d'études précédentes.

Je tiens également à remercier les membres du jury de m'avoir honorée en acceptant de juger mon travail.

Merci également à tous les professeurs de la Faculté de département de physique de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui ont participé à notre formation tout au long du cycle universitaire.

Je remercie Tous ceux qui ont guidé ma réflexion par leurs paroles, leurs écrits, leurs suggestions et leurs critiques et qui ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions concernant la mémoire.

Je remercie mes chers parents, Abd Krim et Saliha, qui ont toujours été là pour moi, pour m'encourager et me protéger. Je remercie mes sœurs Noriya et Wasilla, ainsi que mes frères Halim et Mohamed et Yassine et Abd Alli, pour leurs encouragements et leur amour.

Je remercie mes amis Imene et Fathi d'avoir toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionné et leurs encouragements m'ont beaucoup aidée.

A tous ces orateurs, j'exprime ma gratitude, Mon respect et ma gratitude.

DEDICACE

Je dédie cethumbletravailà :

 *Mes très chers parents qui se sont sacrifiés
tout au long.*

 *Mes frères Halim et Yassine et Mohamed et
Abdalli.*

 *Mes sœurs Noriyaet Wassila.*

 *Toute la famille Bentayeb et Bellabas.*

 *Mes amis Imene et Fathi.*

 *Mes enseignants Mr Liani Bachir et Mr Inal
Mokhtar Kamel et Mme Senoudi Assia
Rachida.*

 *Tous mes êtres chers.*

TABLE DES MÉTIERS

Remerciements.....	i
<i>Dédicace</i>	ii
Table Des Métiers	iii
Introduction Générale	1
CHAPITRE I: PLASMAS THERMIQUES	3
I-1. DEFINITION D’UN PLASMA:.....	3
I-2. CLASSIFICATION DES PLASMAS:	4
I-3. LES PLASMAS THERMIQUES:.....	6
I-4. EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE COMPLET (ETC):	6
I-4-1. LOIS VERIFIEES PAR UN PLASMA A L’ETC:	6
I-4-2. EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE LOCALE (ETL):	9
I-5. APPLICATION DU PLASMAS THERMIQUE:.....	9
I-6. ETUDE DE L’ARCELECTRIQUE:	10
I-6-1. DEFINITION D’UN ARC ELECTRIQUE (PLASMA D’ARC):.....	10
I-6-2 – AMORCAGE DE L’ARC ELECTRIQUE :.....	11
I-6-3. DOMAINES D’APPLICATION DE L’ARC ELECTRIQUE:	13
CHAPITRE II: DESCRIPTION D’UN ARC DISJONCTEUR.....	17
II-1. FONCTIONNEMENT DU DISJONCTEUR A HAUTE TENTION:.....	17
II-1-1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D’ UN DISJONCTEUR:.....	17
II-1-2 . TECHNIQUES UTILISEES POUR L’ISOLEMENT ET LA COUPURE:	18
II-2. HEXAFLUORURE DE SOUFRE (SF6):	20
II-2-1. PROPRIETES PHYSIQUE ET ELECTRIQUE DU SF6:.....	20
II-2-2. UTILISATIONS DU SF6:	22
II-2-3. LE SF6 ET L’ENVIRONNEMENT:.....	22
II-3. PROPRIETES DE L’AZOTE:	23

II-4. PROPRIETES DU MELANGE SF6-N2:.....	24
CHAPITRE III : METHODE DE TRANSFERT D'ENERGIE ENTRE LES PARTICULES CHARGE.	26
III-1-INTRODUCTION:	26
III-2. MECANISMES DE TRANSFERT D'ENERGIE AUX PARTICULES:	26
III-3. EQUATIONS DE CONSERVATION.....	27
III-3-1.EQUATION DE CONSERVATION DE MASSE (EQUATION DE CONTINUITE):	27
III-3-2. EQUATION DE CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT:	28
III-3-3. EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGIE:	28
III-4. REGIME STATIONNAIRE:	29
III-5. MODEL MATHEMATIQUE:.....	29
III-5-1. METHODE DE RUNGE-KUTTA:	29
III-5-2.PRINCIPE DE LA METHODE :.....	29
CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION	34
IV-1. INTRODUCTION:.....	34
IV-2. HYPOTHESES:	34
IV-3 PROFIL RADIAL DE TEMPERATURE:	34
IV-3-1. PROFILE DE LA TEMPERATURE DU GAZ SF6 PUR:	34
IV-3-2. PROFILE DE LA TEMPERATURE DE N2 PUR:	35
IV-3-3. INFLUENCE DE LA VAPEUR DE CUIVRE SUR LA PROFIL DE TEMPERATURE DE L'ARC:	36
IV-4. MODELISATION DE L'ARC EN REGIME TRANSITOIRE:	37
IV-4-1. EVOLUTION TEMPORELLE DE TEMPERATURE AXIALE D'UN PLASMA SF6PUR:	37
IV-4-2. EVOLUTION TEMPORELLE DE TEMPERATURE AXIALE D'UN PLASMA N2:.....	38
Conclusion Générale	Erreur ! Signet non défini.
REFERENCES.....	42

INTRODUCTION GENERALE

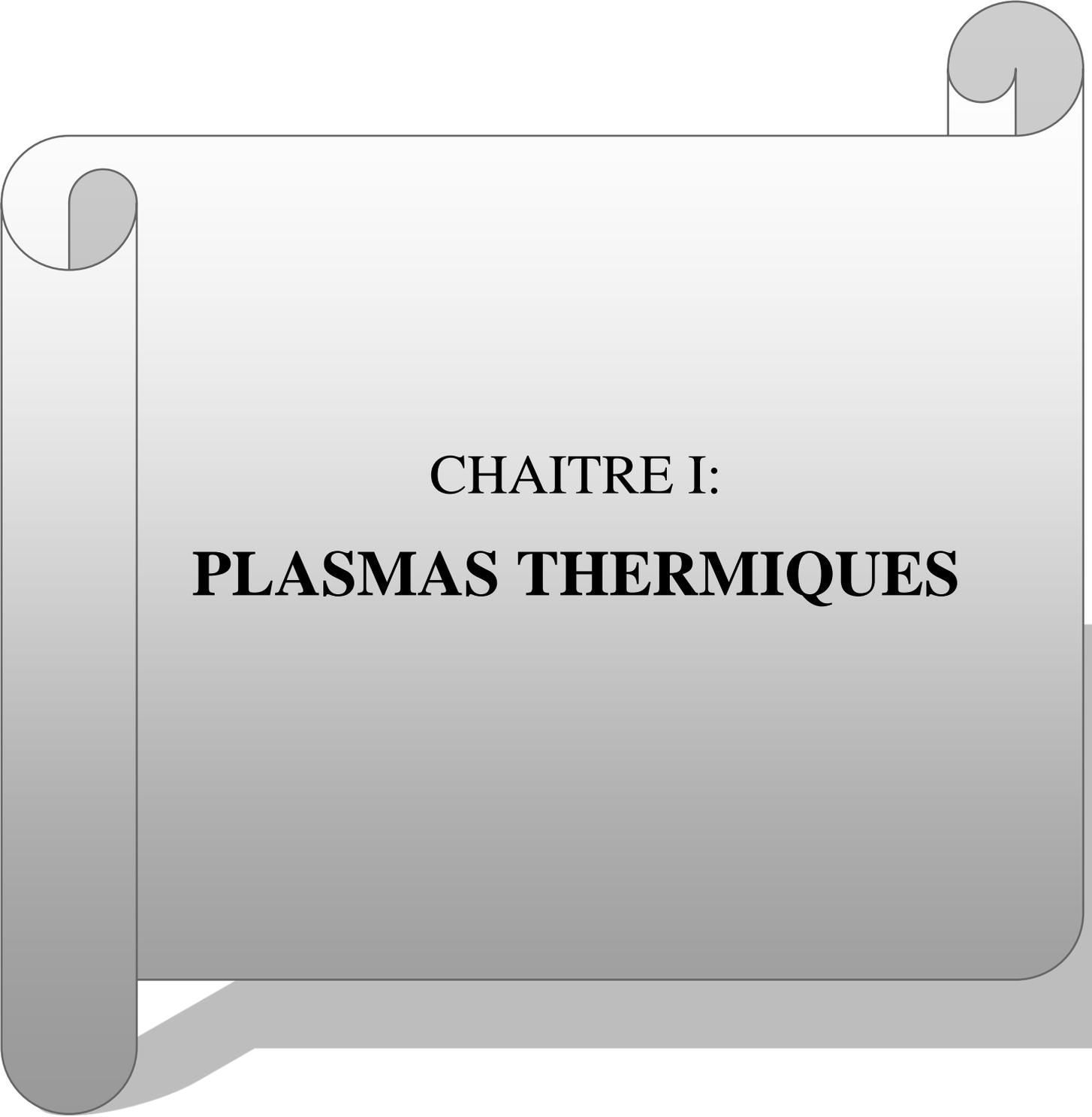
INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les plasmas thermiques sont des milieux gazeux partiellement ionisés dans lesquels toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) possèdent la même énergie cinétique moyenne. Ils peuvent atteindre ou s'approcher d'un état d'équilibre thermique. Ce qui permet de définir une température unique. A cause de leur haute énergie et leur réactivité les plasmas trouvent plusieurs applications technologiques, on peut citer par exemple: l'appareillage et les disjoncteurs, la métallurgie, le traitement des déchets, la projection thermique, la production de nanotubes de carbone.

Pour appréhender et contrôler ces processus plasmatiques, il est utile de comprendre certaines propriétés de ces plasmas, telles que les phénomènes de transport, et les propriétés radiatives et thermodynamiques. Ces propriétés sont déterminées dans le cadre de l'équilibre thermodynamique local, où toutes les particules ont la même énergie cinétique Moyenne et une seule température.

L'objet de ce travail est l'étudier la distribution de l'énergie thermique dans les plasmas d'arc et la détermination des profils de température. Le plasma est supposé cylindrique et en équilibre thermodynamique. Les équations de base sont les équations de conservation de la masse et de l'énergie. Nous avons structuré le mémoire autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les plasmas thermiques et sur leurs propriétés. Dans le deuxième chapitre, nous avons donné une description des principales propriétés physiques et chimiques de SF₆ et ses utilisations, nous avons également parlé comment fonctionne un disjoncteur à haute tension.

La description du modèle mathématique utilisé dans le calcul a fait l'objet du troisième chapitre. Ce modèle s'appuie sur les équations de conservation de la masse et de l'énergie. La résolution des équations de conservation est assurée par la méthode de Runge-Kutta, en tenant des pertes radiatives négligées dans les travaux antérieurs. Dans le dernier chapitre, nous présentons le profil radial de température (régime stationnaire) dans le cas des gaz SF₆ pur et N₂ pur, ainsi que des mélanges de ces gaz avec la vapeur de cuivre. Dans le cas d'un régime transitoire nous déterminons l'évolution de la température axiale en fonction du temps.



CHAITRE I:
PLASMAS THERMIQUES

CHAPITRE I. PLASMAS THERMIQUES

II-1. DEFINITION D'UN PLASMA.

Le plasma est considéré comme le quatrième état de la matière et représente près de 99 % de l'Univers. On peut le trouver soit à l'état naturel (couronne solaire, soleil, intérieur des étoiles, ionosphère, naines blanches...), il peut être aussi produit en laboratoire notamment par des décharges électriques[2]. Le plasma est composé des atomes, des molécules et des ions dans l'état fondamental ou dans un état excité, des électrons et des photons (figure I-1) qui proviennent de la désexcitation des états excités.

Les plasmas conservent certaines propriétés des gaz (grande compressibilité, énergie interne et pression proportionnelles à la température absolue, etc.). Les propriétés spéciales des plasmas sont dues au long rayon d'action de la force entre particules (force coulombienne): un électron ou un ion du plasma interagit à chaque instant avec beaucoup d'autres effets collectifs.

A cause de leur faible masse, les électrons sont fortement accélérés par les champs électriques et possèdent une énergie cinétique très importante. A cause des collisions élastiques les électrons cèdent une partie de leur énergie cinétique aux particules lourdes, conduisant ainsi le milieu à un état d'équilibre thermodynamique[1].

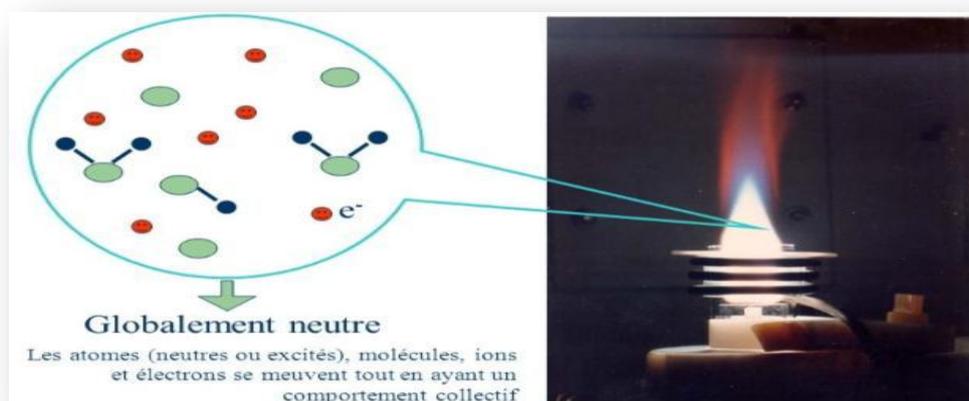


Figure I. 1. Le plasma à l'état microscopique (électrons et ions)

[\[https://slideplayer.fr/amp/2469186/\]](https://slideplayer.fr/amp/2469186/).

Au cours de ces dernières années, la pénétration des procédés plasmas dans les processus industriels a augmenté de façon extrêmement rapide; bien qu'elles ne soient pas encore identifiées en tant que secteur industriel spécifique.

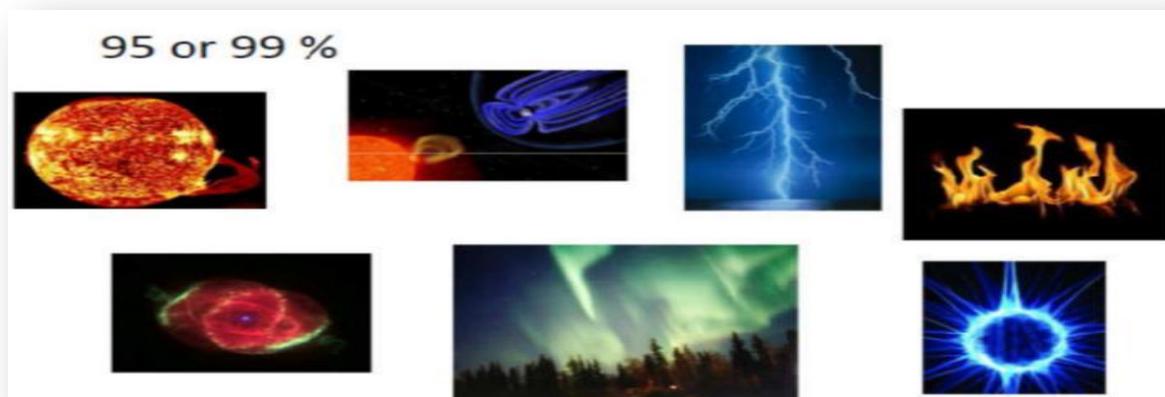


Figure I. 2: Tout était plasmas dans Univers.

I-2. CLASSIFICATION DES PLASMAS:

Les plasmas sont caractérisés principalement par plusieurs grandeurs : Degré d'ionisation, longueur de Debye, longueurs de Landau, La fréquence de plasma[3,4,5], mais les deux grandeurs principale ce sont la température et la densité électronique[6]. A partir de ces deux grandeurs, on peut classer le plasma en trois grandes familles :

Il est intéressant de classer les plasmas selon les valeurs prises par les deux paramètres (la température électronique « T_e », et la densité électronique « N_e »), comme dans le tableau suivant :

Tableau I. 1: Classification du plasmas.

Famille de plasma	Les propriétés	Les exemples
Les plasmas chauds	Plasma crée par fusion thermonucléaire. Ou par laser $T_i = T_e = 20 \times 10^6 \text{K}$. Plasmas totalement ionisés	Dans l'univers: Le Soleil Les étoiles Les tokamaks
Les plasmas thermiques	Plasma produit dans les arcs électriques et les torches à plasmas. $T_i = T_e = T_g$. Avec T_e entre (10^3 et 10^5 K).	Arc électrique : La soudure La foudre Les fours à arc

	Plasmas partiellement ionisés Plasma en équilibre thermodynamique local.	
Les plasmas froids (hors ETL)	Plasma artificiel créée à laboratoire par décharge électrique. $T_e \gg T_i$. $T_e = 3 \times 10^4 \text{ K}$ et $T_i = T_g = 300 \text{ K}$. Plasma faiblement ionisés. Plasma hors équilibre thermodynamique	Décharge luminescente (les ampoules basse consommation, les lampes à UV, les tubes fluorescents)

Avec:

- ❖ T_e : La température électronique.
- ❖ T_i : La température ionique.
- ❖ T_g : La température du gaz.

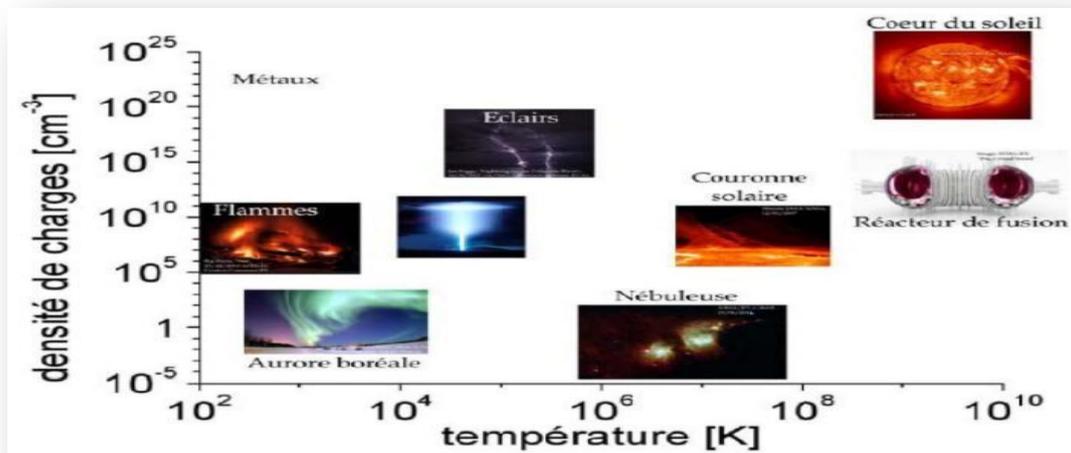


Figure I. 3: La variation de la densité et la température du différents types de plasmas (plasmas thermique, plasmas froid) [https://www.researchgate.net/figure/Classification-de-differents-plasmas-selon-leur-densite-et-leur-temperature_fig22_281532759].

I-3. LES PLASMAS THERMIQUES.

Les plasmas thermiques sont des gaz partiellement ionisé ou fortement ionisé dans les quels toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) ont des températures très voisines. Pour cette ils donc daun état proche de l'équilibre thermodynamique local (ETL) caractérisé par une température unique.

La principale caractéristique des plasmas thermiques est qu'ils sont produits sous pression Atmosphère ou son voisinage (10^4 - 10^6 Pa). L'ionisation est essentiellement un phénomène thermique dû aux collisions élastiques. Il existe deux types de plasmas thermiques [7]:

- Arc plasma (avec électrodes).
- Plasma inductif (sans électrodes).

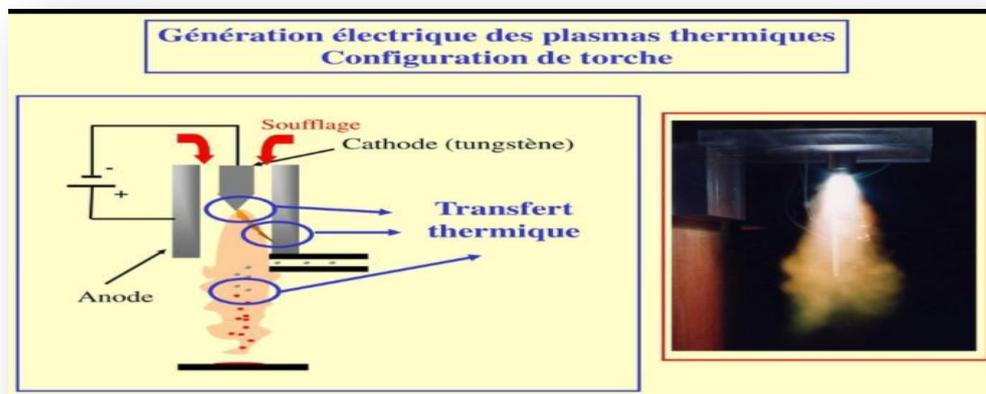


Figure I. 4. Exemple de plasma thermique (torche à plasma)

[\[https://docplayer.fr/amp/3850664-Transferts-thermiques-en-plasmas-thermiques.html\]](https://docplayer.fr/amp/3850664-Transferts-thermiques-en-plasmas-thermiques.html).

I-4. EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE COMPLET (ETC).

Le plasma peut atteindre un état d'équilibre thermodynamique complet lorsque la température, la pression et les densités des particules sont uniformes. La température est alors unique et le théorème de l'équipartition de l'énergie cinétique est vérifié autrement dit : les différentes espèces de particules du milieu ont la même énergie cinétique moyenne. Une autre condition doit être vérifiée, il s'agit de la micro-réversibilité de tous les processus collisionnels ou radiatifs qui se produisent dans le plasma: chaque processus est compensé par son processus inverse [8].

I-4-1. LOIS VERIFIEES PAR UN PLASMA A L'ETC.

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique local, il doit obéir à un nombre restreint de lois dites lois d'équilibre.

- LOI DE DISTRIBUTION DE MAXWELL.

Dans plasma à l'ETC la distribution des vitesses est isotrope; elle est décrite par la loi de Maxwell. Celle ci donne le nombre dN de particules d'une espèce donnée ayant un vecteur Vitesse compris entre v et $v + dv$ [9].

$$\frac{dN}{N} = f(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = 4 \pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(- \frac{m v^2}{2K_B T} \right) \quad (I-1)$$

Avec:

- ❖ K_B : La constant de Boltzmann.; T : La temperature de la particule.
- ❖ v : La vitesse de la particule; m : La masse de la particule.

- LOI DE BOLTZMANN.

La distribution canonique de Boltzmann permet de donner les population des différents niveaux d'énergie E_i pour chaque espèce atomique ou moléculaire [9].

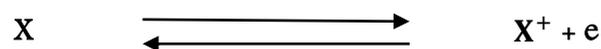
$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} \exp \left(- \frac{E_j - E_i}{K_B T} \right) \quad (I-2)$$

Avec:

- ❖ N_i, g_i, E_i : Représentent respectivement le population du niveau d'énergie E_i et le Poids statistique et l'énergie de niveau Z : C'est la fonction de partition de l'espèce.

- LOI DE SAHA.

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique tous les processus d'ionisation sont équilibrés par les processus de recombinaison:



Pour une température donnée N_{X^+}, N_X et N_e les densités des électrons, de l'ion positif, et de l'atome neutre de l'espèce x , sont constantes. Elle sont reliées par la loi de Saha [11] qui exprime l'équilibre d'ionisation:

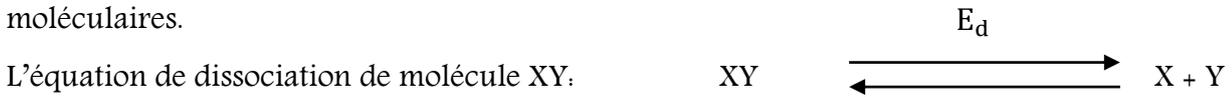
$$\frac{N_e N_{X^+}}{N_X} = 2 \frac{Z_{X^+}^{int}}{Z_X^{int}} \left(\frac{2\pi K_B T m}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(- \frac{E_i}{K_B T} \right) \quad (I-3)$$

Avec:

- ❖ $Z_{X^+}^{int}$ et Z_X^{int} : Représentent les fonctions de partition interne des espèces chargées, et des espèces neutres.
- ❖ h : La constant de Planck = $6,62618 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- ❖ Le facteur 2 représente la fonction de partition interne des électrons.
- ❖ $\left(\frac{2\pi K_B T m}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$: La fonction de partition de translation des électrons.
- ❖ E_i : L'énergie d'ionisation.

- LOI DE GULDBERG-WAAGE:

La loi de Guldberg-Waage est une loi d'équilibre relative à la dissociation des espèces moléculaires.



La loi de GULDBERG-WAAGE est une forme plus générale de loi de saha [11]:

$$\frac{N_X N_Y}{N_{XY}} = \frac{Q_X^{int} Q_Y^{int}}{Q_{XY}^{int}} \left(\frac{2\pi K_B T m_X m_Y}{(m_X + m_Y) h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_d}{K_B T}\right) \quad (I-4)$$

Avec:

- ❖ N_X , N_Y et N_{XY} : Représentent respectivement les densités des espèces X, Y et XY.
- ❖ Q_X^{int} , Q_Y^{int} et Q_{XY}^{int} : Les fonction de partition internes des espèces X, Y et XY.
- ❖ m_X et m_Y : Les masses atomiques des espèces X et Y.
- ❖ E_d : Represent l'énergie de dissociation de la moleculle XY.

- LOI DE PLANCK:

Lorsque le plasma est en équilibre thermodynamique pour une température T, chaque processus élémentaire est équilibré par son processus inverse. Cette condition exige que le rayonnement émis par le plasma et totalement absorbé. Autrement dit, le rayonnement émis subit une certaine distribution spectrale, c'est celle du corps noir donné par Planck [10].

La loi de Planck donnée la distribution de la luminance du corps noir (L) en fonction de Longueur d'onde λ et température T [10].

$$L_\lambda = \frac{2hc_\lambda^2}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{hc_\lambda}{K_B T}\right) - 1} \quad (I-5)$$

$c_\lambda = \frac{c}{n_\lambda}$: La vitesse du rayonnement électromagnétique dans le milieu où se propage le rayonnement.

Avec:

- ❖ c : La vitesse de la lumière dans le vide = 299792458 (m/s).
- ❖ h : La constante de Planck = $6,62617 \times 10^{-34}$ (Js).
- ❖ k_B : La constante de Boltzmann = $1,38066 \times 10^{-23}$ (J/K).
- ❖ T : La température de la surface du corps noir (kelvin).

I-4-2. EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE LOCALE (ETL):

Les plasmas produits au laboratoire ne sont pas à l'ETC, ils présentent des gradients de température et de concentration. Des phénomènes de transport de masse et d'énergie non réversible sont lieu au sein de ces plasmas, et le rayonnement n'y est pas totalement réabsorbé, une partie du rayonnement s'échappe du plasma. L'équilibre entre la matière et le rayonnement n'existe plus, c'est le champ électrique extérieur qui fournit l'énergie nécessaire au maintien du plasma. Mais si les processus radiatifs sont négligeables devant les phénomènes collisionnels dans le peuplement des états excités ou ionisés, on peut supposer que l'équilibre thermodynamique local (ETL) est réalisé dans ce milieu. Localement, il y a alors micro-réversibilité des processus dus aux collisions, les populations de toutes les espèces et de leurs niveaux excités restent bien décrites par les lois de Maxwell, de Boltzmann, de Saha et de Guldberg-Waage. Par contre il n'y a pas micro-réversibilité des processus radiatifs, ce qui implique que la loi de Planck n'est plus valable [8].

I-5. APPLICATION DU PLASMAS THERMIQUE.

Le plasma présente un potentiel important en nanotechnologies, il peut servir à la production des nanomatériaux tels que des nanoparticules, des nanotubes de carbone et du graphène. Dans le domaine de la métallurgie le plasma joue également un rôle important dans la synthèse des nouveaux matériaux et aussi dans les procédés thermiques de découpage, la soudure par fusion et la projection thermique.

Grace à l'énergie thermique libérée, le plasma thermique est devenu un outil incontournable dans le traitement la destruction des déchets, tels que les déchets solides municipaux, les déchets médicaux et les déchets dangereux en gaz de synthèse.

Dans le domaine des énergies renouvelables, la gazéification assistée par plasma est considérée comme une alternative viable aux sources traditionnelles de combustibles fossiles. Le processus consiste à utiliser une torche à plasma pour convertir la biomasse en gaz de synthèse, qui peut être utilisé comme source de carburant. Le processus a un potentiel

important de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de fourniture d'une source d'énergie durable.

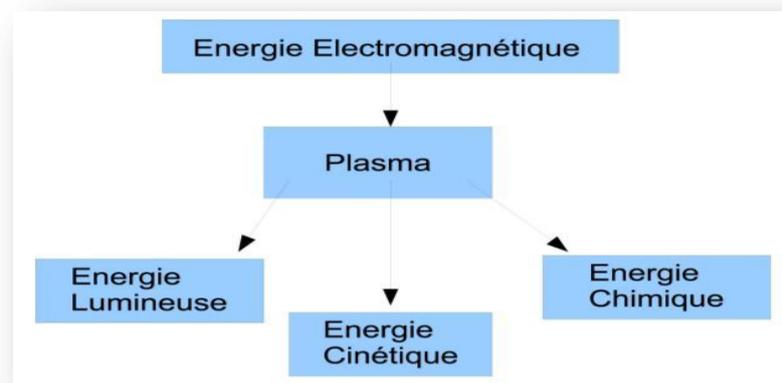


Figure I. 5: Les différents Processus de conversion d'énergie par plasma [1].

I-6. ETUDE DE L'ARC ELECTRIQUE:

I-6-1. DEFINITION D'UN ARC ELECTRIQUE (PLASMAD'ARC):

On sait que les gaz sont généralement des bons isolants néanmoins, sous certaines conditions, il est possible de les faire traverser par un courant de particules chargées, on dit alors que le gaz est le siège d'une décharge. C'est la présence des particules chargées (électrons ou ions positif) qui transforme le gaz en milieu conducteur et assure la conduction de l'électricité.

Des électrons négatifs ou des ions positifs peuvent apparaître si l'on soumet le gaz à un champ électrique intense ou si le gaz est porté à des hautes températures. Il existe plusieurs régimes de décharge électrique, certaines sont non autonomes : le passage de courant est conditionné par un agent extérieur qui assure la production des électrons primaires dans le gaz, lorsque la tension augmente ces électrons vont ioniser les atomes neutres dans le gaz suite à des collisions. Ainsi le courant électrique de la décharge augmente et la décharge électrique passe à un régime autonome : La décharge électrique qui nous intéresse est celle de l'arc électrique.

Les arcs électriques sont des phénomènes naturels qui ont pu être observés depuis la nuit des temps: la foudre, il a fallu attendre le cours de l'année 1813 pour que le premier arc électrique artificiel soit généré par le physicien anglais Humphrey Davy. Il venait d'ouvrir la

porte vers un immense champ d'applications. L'arc électrique est une décharge électrique une décharge à forte densité de courant pour laquelle les processus thermiques sont dominants. Le passage de ce courant électrique à travers le gaz qui sépare deux conducteurs générant une lumière ultraviolette très vive et une chaleur intense, les éclairs d'arc électrique sont généralement provoqués par un court-circuit. [12].

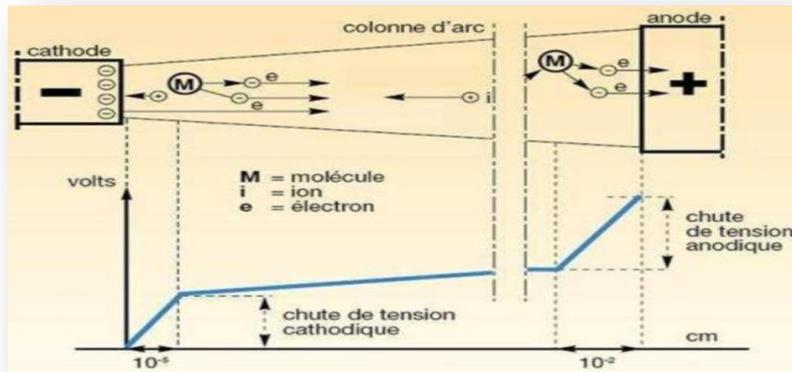


Figure I. 6: Caractéristique de tension de L'arc électrique

[https://www.researchgate.net/figure/Schema-dun-arc-electrique_fig1_30515847].

I-6-2. AMORÇAGE DE L'ARC ELECTRIQUE :

L'amorçage d'un arc électrique peut être réalisé par trois méthodes dont les principes sont très différents :

Transition continue des décharges non autonomes

Le passage continu des décharges non autonomes aux décharges auto-entretenues permet de former un arc électrique. Le système est au départ dans un état de décharge luminescente, et la cathode est recouverte par le plasma de décharge. Si on augmente l'intensité du courant, la tension d'extraction des électrons augmente aussi et la température s'élève. L'émission thermoélectronique devient majoritaire. On arrive ainsi d'une manière continue à passer d'une décharge luminescente à un arc électrique [13] (figureI-7).

Amorçage par contact

Si l'on sépare deux contacts initialement parcourus par un courant électrique. La conduction est maintenue par une décharge électrique qui s'amorce dans l'espace inter-

électrode. Dans les disjoncteurs, l'arc de puissance créé au moment de l'ouverture du circuit est très destructeur et doit être éteint rapidement [14].

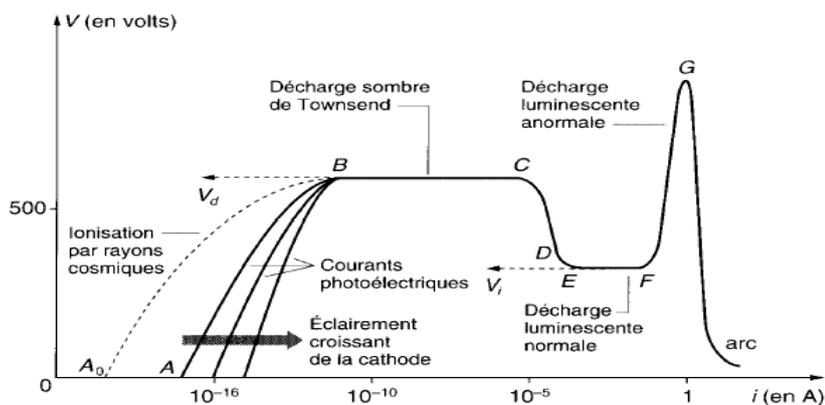


Figure I. 7: Décharge lumineuse à un arc électrique.

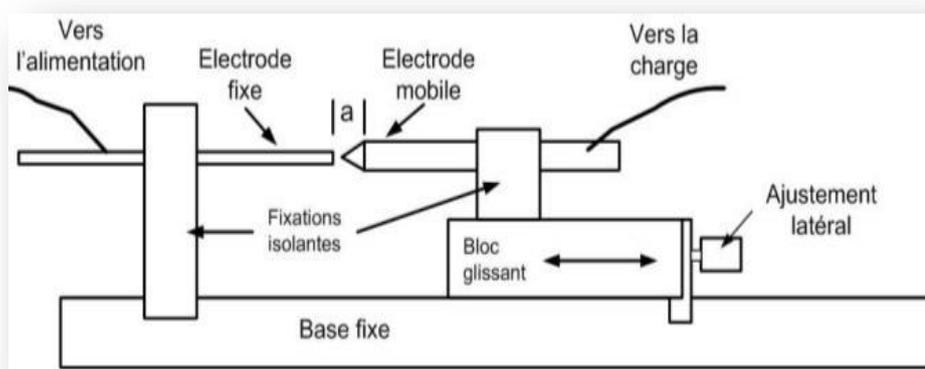


Figure I. 8: Un graphique représentant un générateur [14].

Amorçage par surtension

Lorsque la tension appliquée dépasse une valeur critique V_D dite « tension disruptive » (ou tension de claquage) une décharge s'amorce entre les électrodes.

Si la source ne limite pas le courant cette décharge dégénère en l'arc électrique.

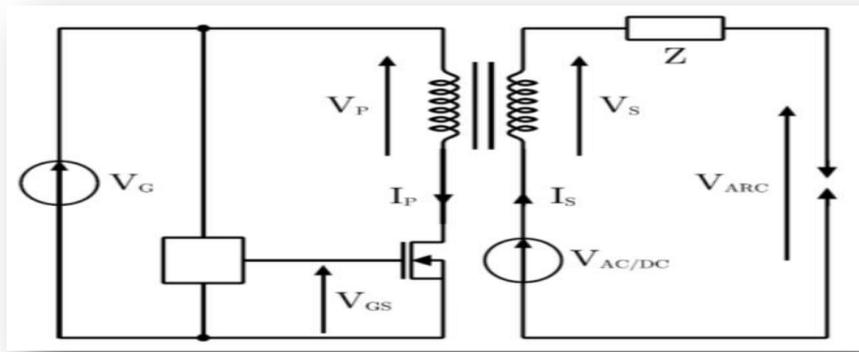


Figure I. 9. GDARC Générateur de défaut d'arc de surtension [14].

I-6-3. DOMAINES D'APPLICATION DE L'ARC ELECTRIQUE.

Les applications des arcs électriques sont nombreuses. Certaines sont connues et industrialisées depuis longtemps, d'autres ne sont encore en stade d'expérimentation scientifique. Il existe un très grand nombre d'applications et d'études des arcs électriques. A titre d'exemple nous pouvons citer [15]:

- fabrication de lampes à décharge d'arc sont destinées à des applications industrielles précises telles que le pompage lasers, la photographie moyenne et forte puissance, la médecine, les

simulations solaire, les feux anti-collision pour l'aéronautique, les lampes aux halogénures métalliques (éclairage blanc des stades), les lampes au Xénon (certains phares d'automobile, les projecteurs de cinéma) [12].



Figure I. 10: Lampe tesla à arc électrique [<https://www.cddiscount.com/maison/lampes/lampe-tesla-arc-electrique-de-foudre-tonnerre-zen/f-1170228-lig2009809327910.html>].

-Four à arc permettant d'atteindre jusqu'à 3500°C. Il isolera ainsi plusieurs métaux et mettra au point la fabrication de plusieurs composés tels que les carbures. Au début du XXIème siècle sont apparus les premiers fours à arc industriels destinés à fondre un métal primaire (généralement ferraille) pour obtenir un acier. Depuis cette époque, bien que reposant sur les mêmes principes de base, les fours à arc ont connu un développement important aussi bien du point de vue technologique que du point de vue capacité de production. En effet, la capacité des fours modernes avoisine les 200T avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t [12].

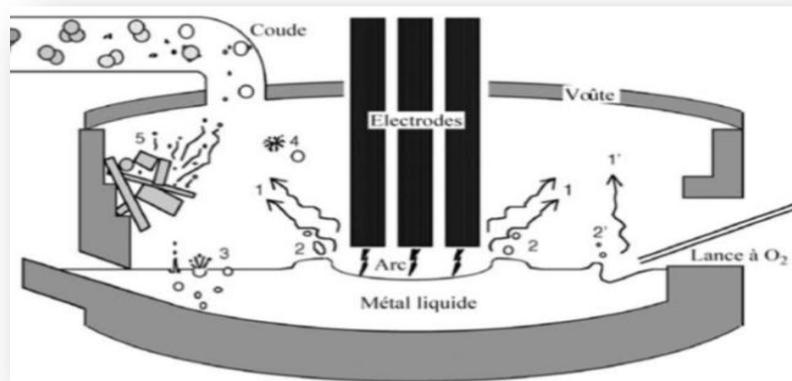


Figure I. 11: Four à arc électrique [https://www.researchgate.net/figure/Principaux-mecanismes-demission-de-poussieres-au-four-electrique-a-arc-1-et-1_fig21_280755509].

- Soudure et découpe des matériaux à arc, le soudage à l'arc électrique et aussi la projection thermique pour le revêtement de surfaces.
- - Bougies d'allumage qui créent l'étincelle dans le cylindre pour permettre l'explosion du carburant dans le moteur thermique.
- - Appareils de coupure la coupure d'un courant électrique est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆, ...) ou dans un milieu isolant.

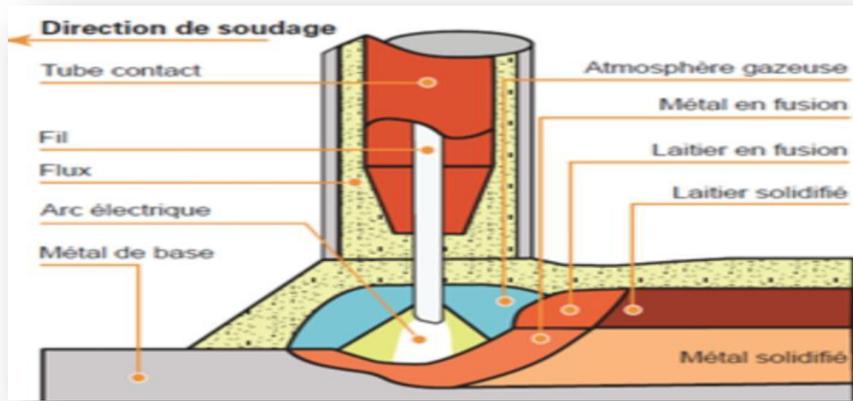


Figure I. 12: Dispositive d'un soudage à arc électrique

[<https://www.canambridges.com/fr/connaissez-vous-le-procede-de-soudage-a-larc-submerge/>].

- A cause de leurs très hautes températures, les plasmas d'arc sont utilisés dans la destruction et recyclage des déchets.

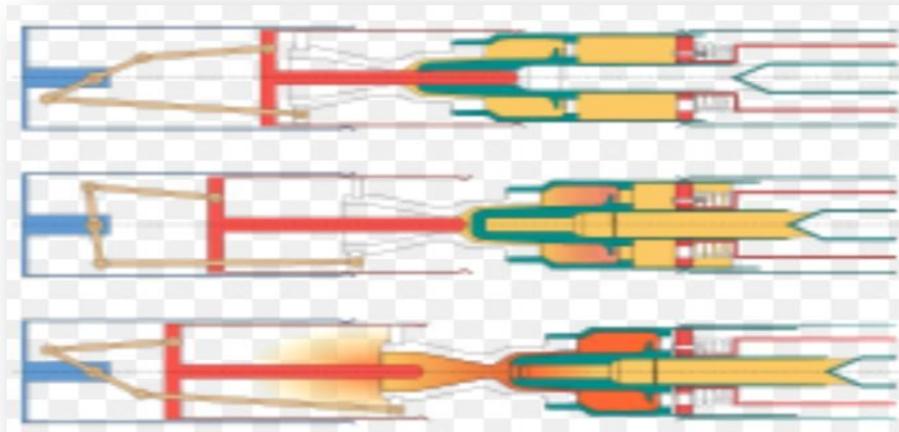
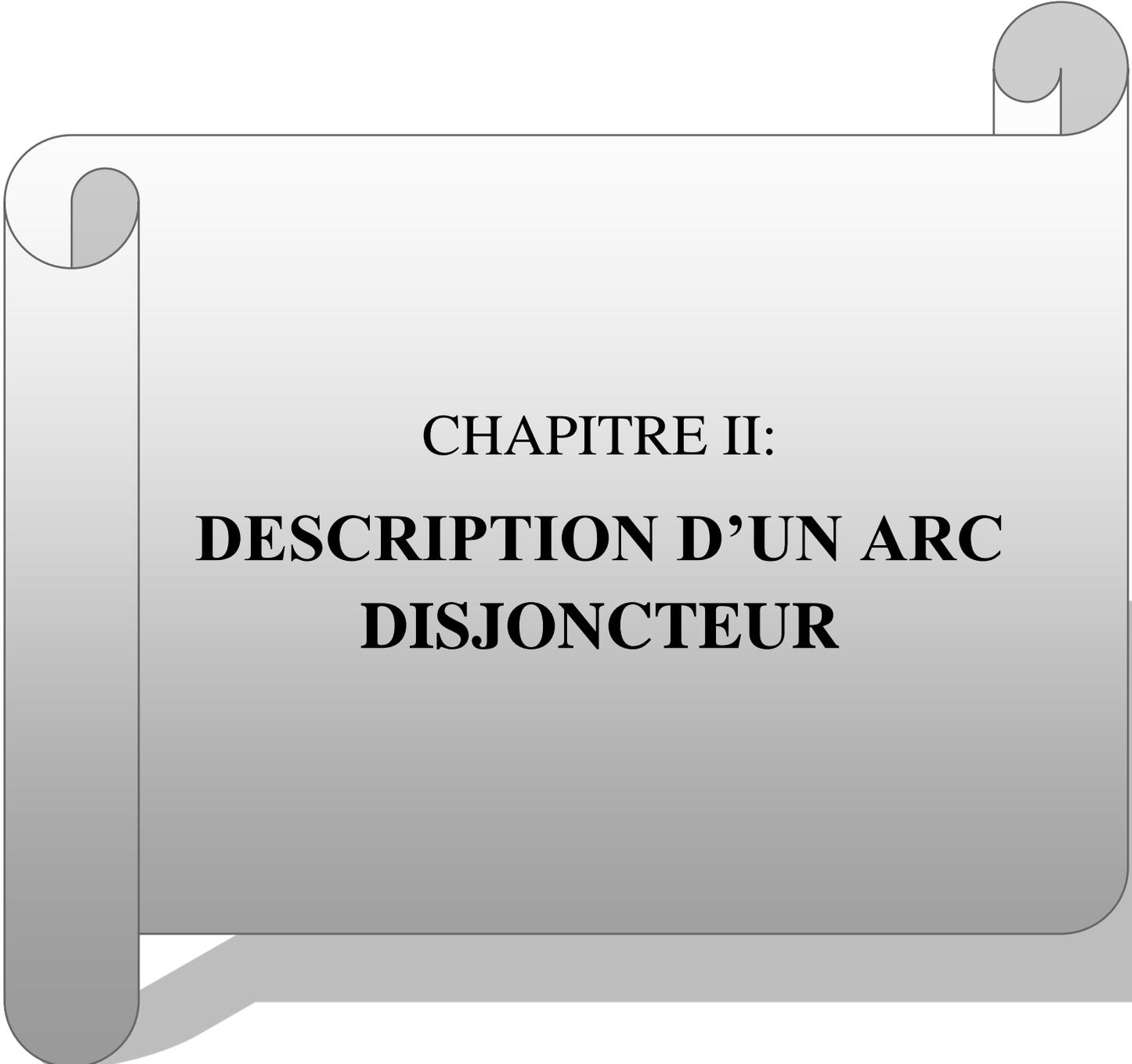


Figure I. 13: la disjonction à haute tension

[https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Disjoncteur_%C3%A0_haute_tension].



CHAPITRE II:
DESCRIPTION D'UN ARC
DISJONCTEUR

CHAPITRE II. DESCRIPTION D'UN ARC DISJONCTEUR

II-1. FONCTIONNEMENT DU DISJONCTEUR A HAUTE TENTION.

La fiabilité et la sécurité d'un réseau électrique de transport ou distribution dépend de la présence de disjoncteur à des points où le courant peut être interrompu dans l'un de ces cas suivants : court-circuit, défauts causes par la foudre, panne d'équipement ou surcharge soutenue. Un disjoncteur dans un tel réseau doit interrompre des courants de quelques KA à 80 KA et résister à des tensions de 10 à 700 KV. Une chambre de coupure est en général constituée de contacts que l'on peut manœuvrer à l'aide d'un mécanisme. Quand ces contacts sont fermés le circuit est établi par conduction métallique. Lorsqu'on actionne le mécanisme d'ouverture, un arc s'établit entre contacts [16].

II-1-1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D' UN DISJONCTEUR.

Le disjoncteur haute tension fonctionne comme suit, Pendant le fonctionnement normal, le DHT est fermé et le courant passe par des contacts permanents non représentés sur la figure

II-1. La première étape de l'ouverture d'un disjoncteur consiste à ouvrir ces contacts. Le courant passe alors par un contact mobile situé au centre de la chambre de coupure. L'actionneur déplace le contact mobile (1) pour le séparer de (3). Au fur et à mesure qu'ils se séparent, la continuité électrique initialement obtenue sur des grandes surfaces de contact est limitée à de très petites surfaces, ce qui provoque un échauffement et une fusion localisées, partie du métal menant au "pont de fusion", une évaporation du métal se produit lorsque le métal est partiellement ionisé, un arc électrique se crée dans la vapeur de métal, qui crée alors un plasma dans le gaz environnant (Vacquié, 2000). Ce plasma peut être considéré comme un gaz, composé d'atomes et de molécules, neutres et ionisés, et d'électrons libres. Ce milieu est donc électriquement conducteur et relativement chaud car il peut arriver des températures de l'ordre de 30 000 K dans ce type de dispositif. L'arc initial est entretenu par le courant qui le traverse et chauffe le milieu par effet Joule [17].

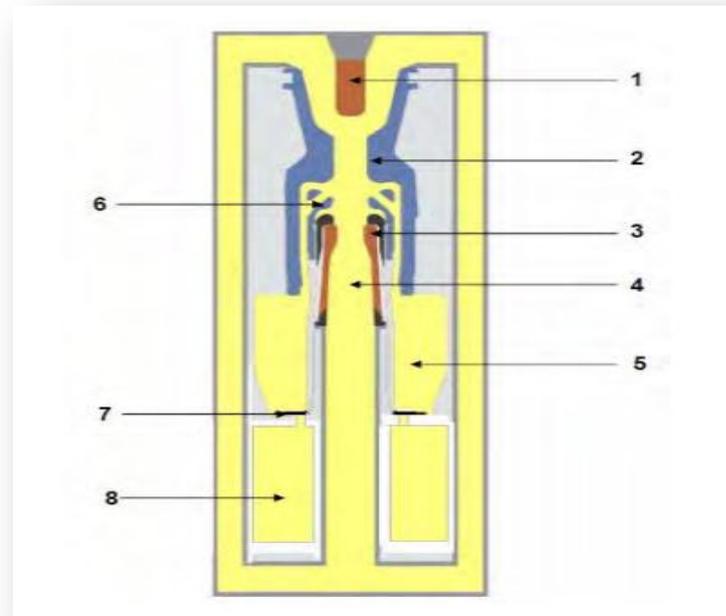


figure II. 1. Schéma de principe de la chambre de coupure d'un disjoncteur haute tension
(Randrianarivao, 2012) [17]

II-1-2 . TECHNIQUES UTILISEES POUR L'ISOLEMENT ET LA COUPURE.

Historiquement les milieux utilisés pour la coupure et l'isolement sont:

- L'air à pression atmosphérique ;
- L'huile ;
- L'air comprimé ;
- Le SF₆ ;
- Le vide (en moyenne tension).

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur en haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆, etc.) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Lors de la séparation des contacts, le courant continue de passer dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts. Un soufflage intense est exercé alors sur l'arc qui provoque le refroidissement du gaz et qui conduit à l'extinction de l'arc et le passage à un courant nul et la conduction du courant s'interrompt.

La technique de coupure dans le SF₆ a été développée en haute tension à la fin des années 1950, elle a donné lieu aux premières applications en 245 kV dans les années 1960 puis elle s'est imposée et remplace toutes les techniques classiques pour tous les nouveaux appareils de

coupures à haute tension à partir des années 1970. L'utilisation des disjoncteurs SF₆ est motivée par les avantages :

- Contrairement aux appareils à air comprimé la chambre de coupure ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure;
- L'autonomie de ces appareils.
- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 kA, avec un nombre réduit de chambres de coupure .
- Une durée d'élimination de défaut courte, de 2 à 2,5 cycles entrés haute tension ;
- Une grande endurance électrique qui permet de garantir une durée de vie d'au moins 25 ans ;
- Une réduction de l'encombrement possible avec les postes sous enveloppe métallique ;
- La possibilité d'équiper les chambres de résistances de fermeture afin de limiter les surtensions pendant les manœuvres entrés haute tension ;
- La sécurité de fonctionnement ;
- Un faible niveau de bruit.



figure II. 2:Disjoncteur à SF₆

II-2. HEXAFLUORURE DE SOUFRE (SF6).

L'hexafluorure de soufre (SF6) ou gaz SF6 est un gaz incolore, inodore et ininflammable qui possède des propriétés unique d'isolation électrique et d'extinction d'arc.

Le SF6 a été synthétisé pour la première fois par le chimiste français Henri Moissan en 1901. Il a réalisé cette synthèse en faisant réagir du fluor et du sulfure de cuivre (CuS) à haute température.

Les propriétés électriques du SF6 ont été découvertes dans les années 1930. Les chercheurs ont observé que le SF6 avait une excellente capacité d'isolation électrique, ainsi qu'une bonne stabilité thermique et chimique. Cela a conduit à l'utilisation du SF6 comme gaz isolant dans les équipements électriques à haute tension.

Le SF6 a été largement adopté dans l'industrie électrique pour l'isolation des disjoncteurs, des transformateurs et d'autres appareils à haute tension. Ses propriétés diélectriques élevées en ont fait un choix populaire pour les applications où des tensions élevées sont présentes.

II-2-1. PROPRIETES PHYSIQUES ET ELECTRIQUE DU SF6.

À haute température, la courbe de conductivité thermique du SF6 (figure II-3) passe par pic qui correspond à la température de dissociation de la molécule de SF6 (2100 à 2500 K) qui s'accompagne, lors de la reformation de la molécule à la périphérie de l'arc, d'une absorption importante de chaleur favorisant les échanges rapides de chaleur du milieu chaud vers le milieu froid.

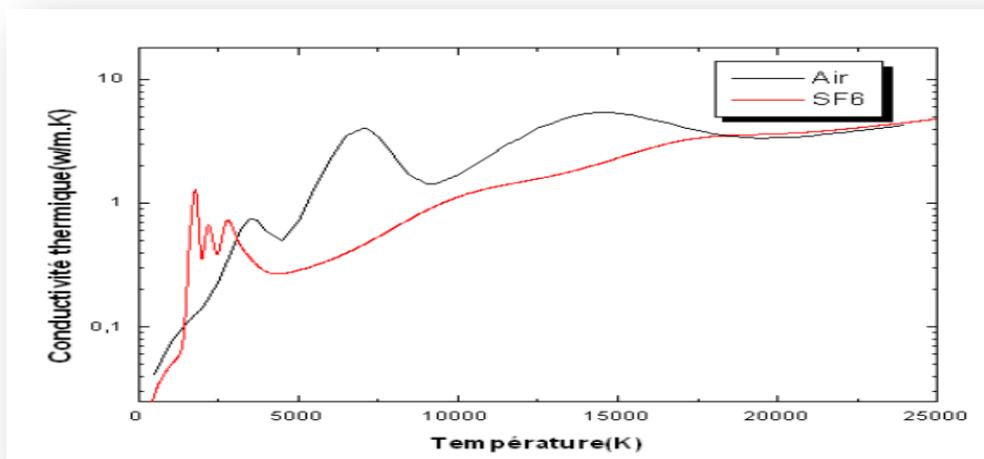


figure II. 3. La conductivité thermique de SF6 et l'air en fonction de la température à 1bar

[18].

Ce comportement est l'une des qualités remarquables de ce gaz concernant l'extinction de l'arc par refroidissement thermique.

Le SF6 possède un pouvoir de capture des électrons. Ce caractère électronégatif de la molécule permet de capturer les électrons libres pour former des particules lourdes et peu mobiles, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique.

La propriété « rigidité diélectrique » d'un gaz traduit la capacité de ce dernier de résister à une tension élevée dite tension disruptive au-dessous de laquelle le gaz reste isolant et au-dessus de laquelle il devient conducteur. La rigidité diélectrique du SF6 est 2,5 fois plus élevée que celle de l'air dans les mêmes conditions.

A cause de sa basse température de dissociation et de son énergie de dissociation élevée, le SF6 est considéré comme un excellent gaz d'extinction d'arc. Lorsqu'un arc électrique se refroidit dans le SF6, il conserve sa conductivité électrique jusqu'à une température relativement basse, ce qui minimise la coupure du courant avant le zéro du courant et évite ainsi les surtensions élevées.

La chaleur spécifique du SF6 rapportée à l'unité de volume est 3,7 fois plus élevée que celle de l'air. Ceci permet d'éviter des échauffements au sein de l'appareillage électrique.

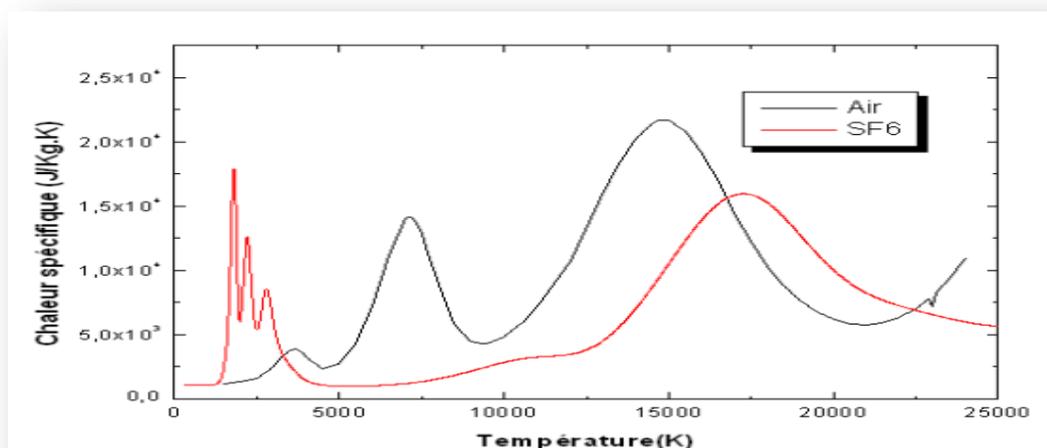


figure II. 4: Chaleur spécifique pour le SF6 et l'air à pression de 1bar [18].

II-2-2. UTILISATIONS DU SF6.

Depuis plus de 50 ans, l'utilisation du SF6 est rentrée, dans diverses applications industrielles et notamment dans les disjoncteurs et les appareils de coupure dans des lignes de transport et de distribution d'énergie. Il est également utilisé dans les accélérateurs de particules, les radars et l'industrie électronique. Dans le domaine médical, le gaz SF6 est utilisé dans les appareils de diagnostic par resonance magnétique et en chirurgie oculaire.

- Applications médicales : isolation électrique pour les appareils médicaux (appareillage de radiodiagnostic par exemple) ou l'instrumentation chirurgicale,
- Isolation électrique des équipements scientifiques (microscope électronique, accélérateur de particules),
- Isolation phonique des fenêtres à double vitrage,
- Gaz traceur pour les études d'écoulement de l'air dans les systèmes de ventilation (par exemple dans les mines) ou la haute atmosphère, et aussi pour la détection des fuites dans les systems pressurisés,

II-2-3. LE SF6 ET L'ENVIRONNEMENT.

La production de SF6 a fortement augmenté au cours de la dernière décennie, les émissions annuelles de SF6 dans l'atmosphère ont considérablement augmenté depuis le années 1960 à mesure que son utilisation à élevé (fig II-3).

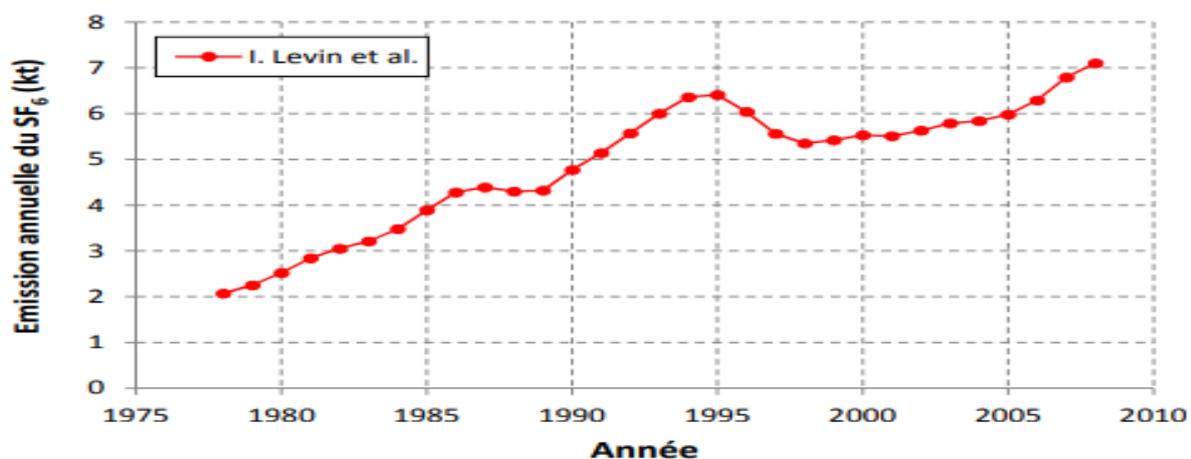


figure II. 5: Emission annuelle du SF6 [24].

Il est important de noter que le SF₆ est un puissant gaz à effet de serre avec un potentiel de réchauffement global (PRG) élevé. Sa production et son utilisation sont réglementées dans de nombreux pays en raison de son impact sur le changement climatique. Des efforts sont déployés pour réduire l'utilisation du SF₆ et développer des alternatives plus respectueuses de l'environnement dans l'industrie électrique.

Le SF₆ n'est pas toxique et ne présente aucun risque direct pour les personnes ou les animaux. En fait, ce gaz est utilisé dans les diagnostics médicaux. Cependant, en raison de son poids moléculaire plus élevé, le SF₆ échappé peut s'installer dans les zones basses d'une pièce et y déplacer vers le haut l'oxygène. Cela peut provoquer des problèmes respiratoires (asphyxie) chez le personnel travaillant dans les tranchées et les fosses, surtout lorsqu'il est respire en grande quantité.

Afin d'éviter les effets néfastes du SF₆, il faut surveiller les équipements électriques et les appareils qui utilisent ce gaz des fuites. Une fuite au niveau d'un équipement isolé au gaz risque de remettre en cause le bon fonctionnement des arcs disjoncteur. Ces fuites sont également source de pollution.

II-3. PROPRIETES DE L'AZOTE.

On a vu précédemment que SF₆ est un gaz électronégatif mais en ce qui concerne l'azote, ce n'est pas pourtant la molécule présente un état de résonance autour de 2,3 eV, ce qui peut expliquer l'augmentation du nombre de collisions électroniques dans cette bande d'énergie. La perte d'énergie des électrons par collision dans l'azote augmente pour des énergies proches de la résonance (de 1,5 à 5eV), ce qui confère à la molécule d'azote d'excellentes propriétés de « thermaliser » et explique son utilisation dans des mélanges de gaz diélectriques.

Sous des conditions de champ uniforme, à des pressions faibles (<300 kPa), l'azote a une rigidité diélectrique égale à 0,33 fois celle du SF₆ à la même pression. La tension disruptive de l'azote et du SF₆ augmentent avec la pression produisant un phénomène de saturation à la pression de 1 MPa. Les propriétés thermiques de l'azote sont très inférieures à celle du SF₆ qui présente un pic de conductivité thermique autour de 7000 K.

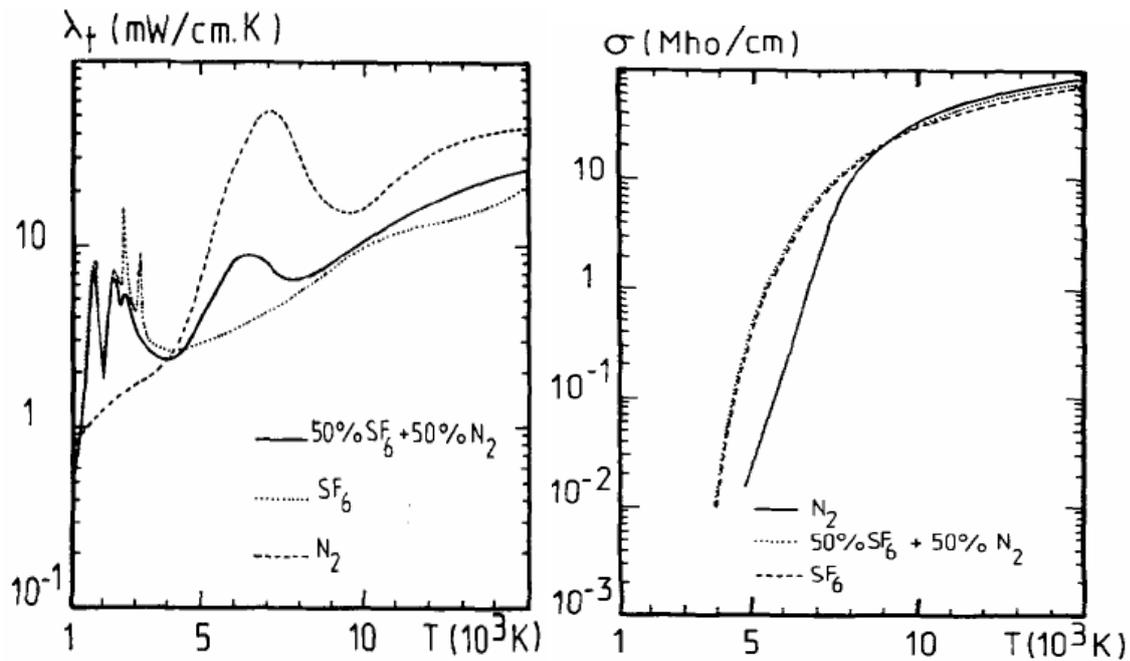


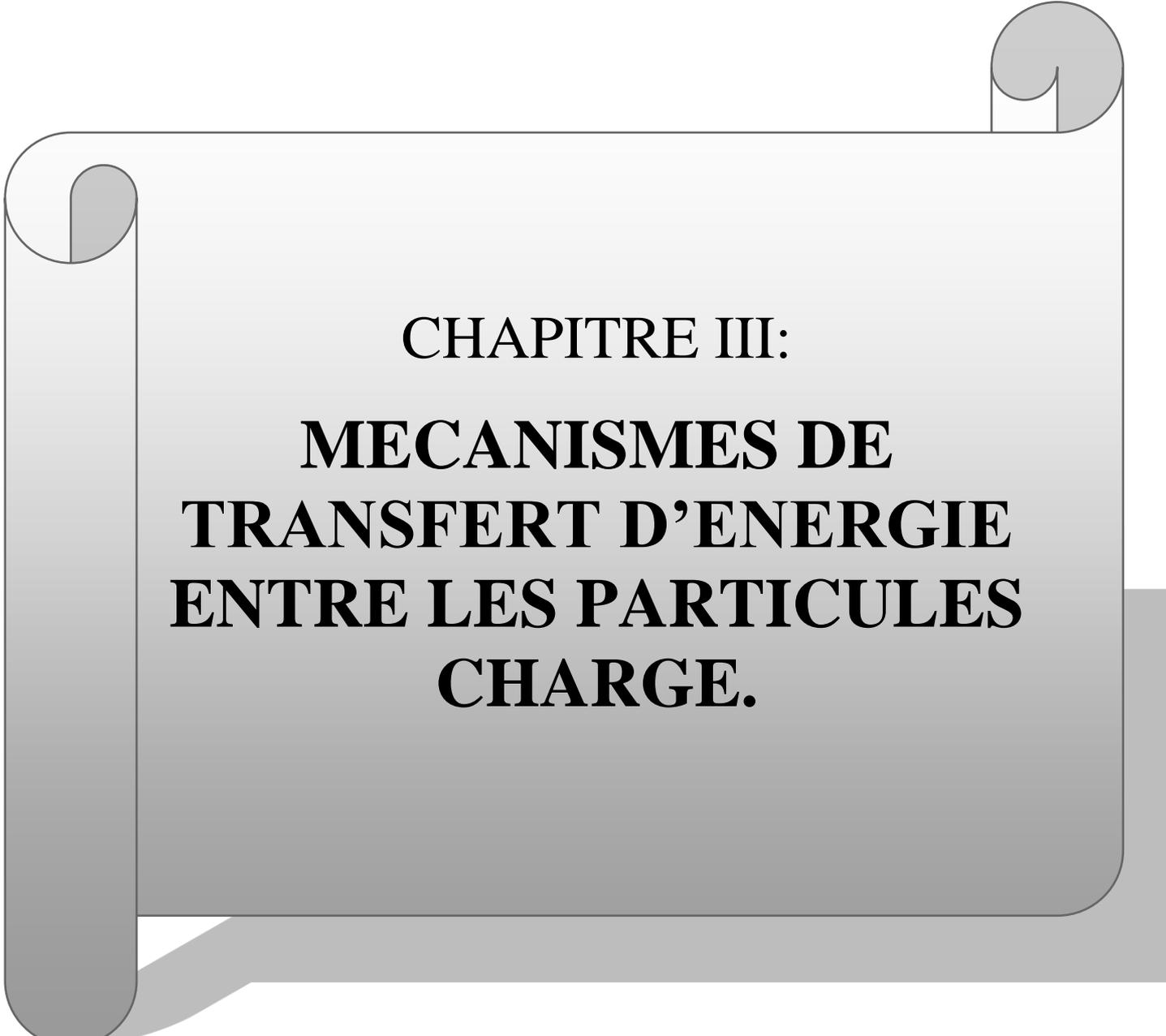
figure II. 6: Les propriétés de SF6-N2.

II-4. PROPRIETES DES MELANGES SF6-N2:

Dans l'industrie, la tendance actuelle est d'utiliser le SF6 dans les appareils de coupures mais l'inquiétude du réchauffement climatique ne cesse d'augmenter croissante. Plusieurs solutions sont proposées pour réduire les effets de ce gaz :

- Réduction des fuites de SF6 lors de la fabrication d'équipements électriques.
- Récupération et recyclage des gaz.
- Utilisation de petites quantités de SF6 en le mélangeant avec un autre ingrédient.

L'idéal serait de le mélanger avec un gaz équivalent au niveau diélectrique, mais sans conséquence sur l'environnement. Depuis de nombreuses années, un diélectrique gazeux meilleur ou équivalent, le meilleur compromis jusqu'à présent est le mélange de SF6 avec un gaz tel que l'azote, car les mélanges SF6 - N2 ont une bonne rigidité diélectrique même avec de très petites quantités d'hexafluorure de soufre [19].



CHAPITRE III:
MECANISMES DE
TRANSFERT D'ENERGIE
ENTRE LES PARTICULES
CHARGE.

CHAPITRE III. MECANISMES DE TRANSFERT D'ENERGIE ENTRE LES PARTICULES CHARGE.

III-1. INTRODUCTION.

Dans ce chapitre, il est intéressant de comprendre certaines propriétés telles que les phénomènes de transport d'énergie et la distribution de l'énergie thermique dans ces plasmas. Cette distribution d'énergie thermique permet également d'étudier le transfert de chaleur entre le plasma d'arc et le matériau. Le plasma est un milieu réactionnel, afin d'étudier plus avant la cinétique chimique, il est nécessaire de connaître le champ de température du plasma d'arc.

Pour calculer le profil de température, la méthode de Runge-Kutta (RK) est utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles (équation de conservation de masse et équation de conservation d'énergie) représentatives des phénomènes transitoires, ce qui permet de vérifier des résultats théoriques dus au calcul du conductivité électrique et aussi thermique.

III-2. MECANISMES DE TRANSFERT D'ENERGIE AUX PARTICULES.

L'énergie totale fournie aux électrons est égale à σE^2 , une partie de cette énergie est transférée aux ions et neutrons par collisions élastiques W_{col} , et le reste par conduction thermique et diffusion bipolaire vers la paroi et par collisions inélastiques et formes de rayonnement. L'énergie transférée à une particule lourde lors d'une collision est donnée par la relation suivante [20]:

$$w_{col} = 3 \frac{m_e}{M} k (T_e - T_g) N_e \nu \quad (\text{III-1})$$

ν : est la fréquence de collision, m_e et T_e sont respectivement la masse et la température des électrons, et leur densité N_e . M et T_g sont la masse et la température des particules lourdes.

L'énergie perdue par conduction thermique des électrons est [20]:

$$w_{Th} = -\vec{\nabla}(\lambda_e \cdot \vec{\nabla}) T \quad (\text{III-2})$$

En géométrie cylindrique à gradient longitudinal ($\frac{dT}{dz} = 0$), on a [20] :

$$w_{Th} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{III-3})$$

λ_e est représenté le coefficient de conductivité thermique des électrons.

L'énergie associée à la perte de diffusion dipolaire est: [20]:

$$W_{amb} = \left(E_i + \frac{5}{2} k T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) \quad (III-4)$$

D_a est représenté le coefficient de diffusion dipolaire.

L'énergie perdue par rayonnement peut être spécifiée avec U_{rad} .

Le bilan énergétique total des électrons s'écrit sous la forme suivante [20]:

$$\sigma E^2 = 3 \frac{m_e}{M} k (T_e - T_g) n_e f - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_e \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \left(E_i + \frac{5}{2} k T_e \right) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_a \cdot \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) + U_{rad} \quad (III-5)$$

III-3. EQUATIONS DE CONSERVATION

III-3-1. EQUATION DE CONSERVATION DE MASSE (EQUATION DE CONTINUITÉ).

Le plasma est considéré comme un fluide conducteur, alors les équations de transport macroscopiques peuvent être écrites à partir d'équations microscopiques. Par conséquent, on peut déterminer l'équation de conservation de la masse à partir de l'équation de continuité des espèces (équation(III-6)) en sommant chaque type de particule (électrons, ions, neutres)[21].

L'équation de continuité liées à l'équilibre des particules:

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_i) + \mathbf{div}(n_i \vec{v}_i) = S_i \quad (III-6)$$

L'équation fondamentale de conservation de la masse est dérivée directement de l'équation de continuité de la densité multipliée par la masse de substance correspondante [21].

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_i n_i) + \mathbf{div} (m_i n_i \vec{v}_i) = m_i S_i \quad (III-7)$$

Avec la densité de masse global.

$$\rho = \sum_i n_i m_i \quad (III-8)$$

La vitesse directionnelle moyenne pour toutes les espèces:

$$\vec{v} = \frac{\sum_i n_i m_i \vec{v}_i}{\sum_i n_i m_i} \quad (III-9)$$

En sommant les équations fondamentales de conservation de la masse pour toutes les espèces, et sachant que le terme source est égal à zéro, on trouve l'équation de continuité macroscopique associée aux r et v [21].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{div} (\rho \vec{v}) = 0 \quad (III-10)$$

III-3-2. EQUATION DE CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT.

L'équation différentielle régissant la conservation de la quantité de mouvement s'écrit pour un fluide newtonien de la façon suivante:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\vec{v}) + \rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{v} = -\overrightarrow{\text{grad}} \rho + \text{div} \bar{\tau} + \vec{j} \wedge \vec{B} + \rho \cdot \vec{g} + e(n_i - n_e) \vec{E} \quad (\text{III-11})$$

Où: la densité de courant est couplée au champ magnétique pour générer la force de Lorentz ou la force magnétique ou pression $F = j \wedge B$ [18].

Du fait de la neutralité total du plasma, la force gravitationnelle $\rho \vec{g}$ et la force électrique $e(n_i - n_e) \vec{E}$ sont généralement considérées comme négligeables. Le tenseur des contraintes visqueuse $\bar{\tau}$ d'un fluide newtonien donné sous la façon suivante [21]:

$$\bar{\tau} = \left(-\frac{2}{3} \mu \text{div} \vec{u} \right) \bar{I} + \mu (\overrightarrow{\text{grad}} \vec{u} + \overrightarrow{\text{grad}}_t \vec{u}) \quad (\text{III-12})$$

Où \bar{I} est la matrice identité, et $\overrightarrow{\text{grad}}_t$ représente l'opérateur de transposition de l'opérateur gradient.

III-3-3. EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGIE.

La présence d'un arc électrique signifie que des électrons circulent dans le milieu. Ces électrons s'échauffent par effet Joule et sont perdus par rayonnement lors qu'ils atteignent une certaine température (dizaines de milliers de Kelvin). L'équation de conservation de l'énergie s'écrit alors [18]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (h) + \rho (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) h - \frac{\partial p}{\partial t} - \text{div} \vec{Q} + \vec{u} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} p + \bar{\tau} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \vec{u} + \vec{j} \cdot \vec{E} - u_R \quad (\text{III-13})$$

Dans cette équation le terme de dissipation visqueuse $\bar{\tau} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \vec{u}$ et le terme de pression instable $\frac{\partial p}{\partial t}$ sont négligés. Le flux de conduction thermique \vec{Q} est déterminé par la loi de Fourier [21]:

$$\vec{Q} = -k \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{III-14})$$

Dans une pression constante, L'enthalpie h et la température T sont liées par la relation [21]:

$$C_p = \frac{\partial h}{\partial T} \quad (\text{III-15})$$

Si on suppose la pression uniforme et indépendante du temps, l'équation de conservation d'énergie s'écrit sous la forme:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P v \frac{\partial T}{\partial r} - \sigma E^2 - U rad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (\text{III-16})$$

III-4. REGIME STATIONNAIRE.

Durant cette phase la température ne dépend que de la distance radiale, le premier terme de l'équation (III-16) s'annule, cette équation prend alors la forme suivante:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P v \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma E^2 - U rad + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (\text{III-16})$$

$$\sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (\text{III-17})$$

La résolution de cette équation est assurée par la méthode de Runge Kutta.

III-5. MODEL MATHÉMATIQUE.

La résolution des équations obtenues est assurée une procédure de RUNGE-KUTTA qui permet de résoudre les équations aux dérivées partielles

III-5-1. METHODE DE RUNGE-KUTTA.

La méthode de Runge-Kutta est une méthode d'analyse numérique d'approximations de solutions d'équations différentielles, elle est nommée en l'honneur des mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhelm Kutta qui ont développé la méthode à l'année de 1901.

Ces méthodes sont basées sur le principe itératif, c'est-à-dire qu'une première approximation de la solution est utilisée pour calculer une deuxième estimation plus précise [22]

III-5-2. PRINCIPE DE LA METHODE :

La méthode Runge-Kutta tire parti de la méthode de Taylor tout en conservant la méthode d'Euler est simple à mettre en œuvre. Par pratique, le Runge-Kutta remplace l'évaluation Analyse des commandes $y^{(m)}$, Avec $m > 1$ est obtenu en dérivant numériquement la fonction $f(t_n, y(t_n))$ à différents endroits pour obtenir presque le même résultat aux la méthode de Taylor [23].

Nous considérons le problème de Cauchy [24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{dt} = y' = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{array} \right. \quad (\text{III-18})$$

$$(\text{III-19})$$

On cherche à discrétiser ce problème par rapport à la subdivision $t_0 < t_1 < \dots < t_n = t_0 + T$. L'idée est de calculer le point (t_n, y_n) par induction en utilisant le point intermédiaire $(t_{n,i}, y_{n,i})$ et [24] :

$$\mathbf{t}_{n,i} = \mathbf{t}_n + \mathbf{c}_i \cdot \mathbf{h}_n \quad (\text{III-20})$$

Où $\mathbf{h}_n = t_{n+1} - t_n$ représente le pas de temps et c_i est dans l'intervalle $[0 ; 1]$ Pour chaque point intermédiaire, enregistrer la pente correspondante.

A chaque de ces points, on associe la pente correspondante [24].

$$\mathbf{p}_{n,i} = \mathbf{f}(\mathbf{t}_{n,i}, \mathbf{y}_{n,i}) \quad (\text{III-21})$$

En suite, pour une solution exacte y du problème, on a l'équation suivante :

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}_{n,i}) = \mathbf{y}(\mathbf{t}_n) + \int_{\mathbf{t}_n}^{\mathbf{t}_{n,i}} \mathbf{f}(\mathbf{t}, \mathbf{y}(\mathbf{t})) \mathbf{d}\mathbf{t} = \mathbf{y}(\mathbf{t}_n) \int_0^{c_i} \mathbf{f}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n, \mathbf{y}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n)) \mathbf{d}\mathbf{u} ; \forall i = 1, \dots, q. \quad (\text{III-22})$$

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}_{n,i}) = \mathbf{y}(\mathbf{t}_n) + \int_{\mathbf{t}_n}^{\mathbf{t}_{n+1}} \mathbf{f}(\mathbf{t}, \mathbf{y}(\mathbf{t})) \mathbf{d}\mathbf{t} = \mathbf{y}(\mathbf{t}_n) \int_0^1 \mathbf{f}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n, \mathbf{y}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n)) \mathbf{d}\mathbf{u} \quad (\text{III-23})$$

Ces intégrales seront calculées par la méthode de la quadrature, qui peut être choisie différemment pour deux valeurs différentes de i [22].

$$\int_0^{c_i} \mathbf{g}(\mathbf{u}) \mathbf{d}\mathbf{u} \approx \sum_{k=1}^{i-1} \mathbf{a}_{ik} \mathbf{g}(\mathbf{c}_k) \quad (\text{III-24})$$

$$\int_0^1 \mathbf{g}(\mathbf{u}) \mathbf{d}\mathbf{u} \approx \sum_{k=1}^q \mathbf{b}_{ik} \mathbf{g}(\mathbf{c}_k) \quad (\text{III-25})$$

Ceci calcule $\mathbf{g}(\mathbf{u}) = \mathbf{f}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n, \mathbf{y}(\mathbf{t}_n + \mathbf{u}\mathbf{h}_n))$.

Ainsi, la méthode de Runge-Kutta d'ordre q est donnée par [22].

$$\forall i = 1, \dots, q \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{T}_{n,i} = \mathbf{t}_n + \mathbf{c}_i \mathbf{h}_n \quad (\text{III-26}) \\ \mathbf{y}_{n,i} = \mathbf{y}_n + \mathbf{h}_n \sum_{k=1}^{i-1} \mathbf{a}_{ik} \mathbf{p}_{n,k} \quad (\text{III-27}) \\ \mathbf{p}_{n,i} = \mathbf{f}(\mathbf{t}_{n,i}, \mathbf{y}_{n,i}) \quad (\text{III-28}) \\ \mathbf{y}_{n+1} = \mathbf{y}_n + \mathbf{h}_n \sum_{k=1}^q \mathbf{b}_k \mathbf{p}_{n,k} \quad (\text{III-29}) \end{array} \right.$$

III-5-2-1. METHODE DE RUNGE-KUTTA D'ORDRE 2.

Insérez un nœud au milieu de l'intervalle $[t_n, t_{n+1}]$. La méthode est du 2ème ordre et l'erreur d'approximation est du 3ème ordre.

Rappelons la formule d'Euler [23]:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}_{n+1}) = \mathbf{y}(\mathbf{t}_n) + \mathbf{h}\mathbf{f}(\mathbf{t}_n, \mathbf{y}(\mathbf{t}_n)) \quad (\text{III-30})$$

Ainsi, la méthode d'Euler peut calculer $y(t_n + h)$ en fonction de $y(t_n)$ et la dérivée en $y(t_n)$. La méthode est asymétrique autour de l'intervalle car elle ne fait pas intervenir d'information sur la dérivée en fin d'intervalle, C'est-à-dire que $hf(t_n, y(t_n))$ n'intervient pas. La méthode Runge-Kutta est plus symétrique car elle revient à calculer numériquement la dérivée sur le centre de l'intervalle [23].

De cette manière, nous avons l'algorithme de la méthode du second ordre de Runge-Kutta:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{k}_1 = \mathbf{hf}(t_n, y(t_n)) \\ \mathbf{k}_2 = \mathbf{hf}\left(t_n + \frac{1}{2}h, y(t_n) + \frac{1}{2}\mathbf{k}_1\right) \\ y(t_{n+1}) = y(t_n) + \mathbf{k}_2 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III-31)} \\ \text{(III-32)} \\ \text{(III-33)} \end{array}$$

Où h est le pas d'itération.

III-5-2-2. LA METHODE DE RUNGE-KUTTA D'ORDRE 3.

La formule de Runge-Kutta du 3ème ordre est [23].

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{k}_1 = \mathbf{hf}(t_n, y(t_n)) \\ \mathbf{k}_2 = \mathbf{hf}\left(t_n + \frac{1}{2}h, y(t_n) + \frac{1}{2}\mathbf{k}_1\right) \\ \mathbf{k}_3 = \mathbf{hf}\left(t_n + h, y(t_n) + (2\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)\right) \\ y(t_{n+1}) = y(t_n) + (\mathbf{k}_1 + 4\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) \frac{1}{6} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III-34)} \\ \text{(III-35)} \\ \text{(III-36)} \\ \text{(III-37)} \end{array}$$

III-5-2-3. LA METHODE DE RUNGE-KUTTA D'ORDRE 4.

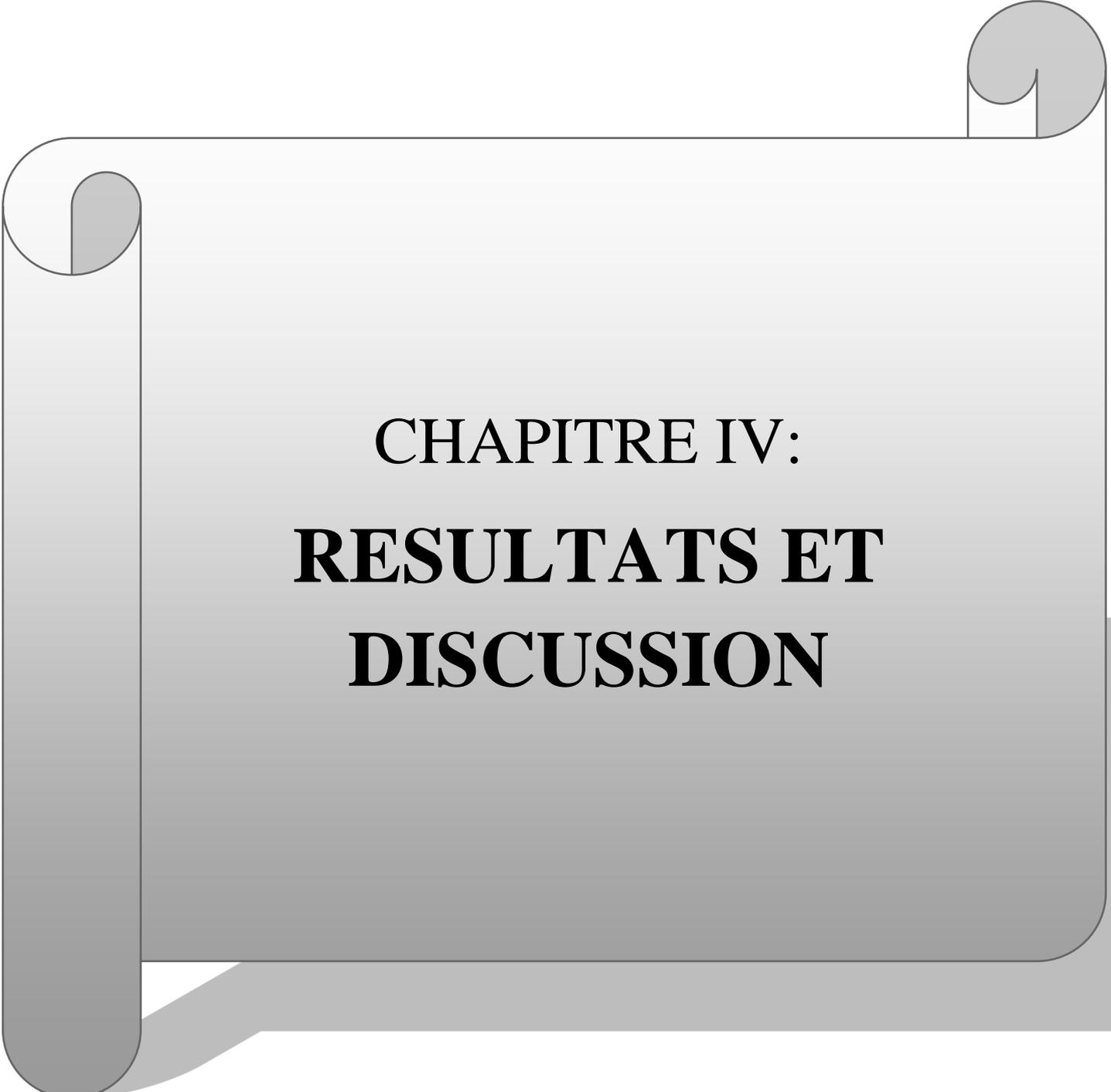
La formulation de Runge-Kutta du 4ème ordre est de loin la plus couramment utilisée. Elle a une forme complètement symétrique [23].

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{k}_1 = \mathbf{hf}(t_n, y(t_n)) \\ \mathbf{k}_2 = \mathbf{hf}\left(t_n + \frac{1}{2}h, y(t_n) + \frac{1}{2}\mathbf{k}_1\right) \\ \mathbf{k}_3 = \mathbf{hf}\left(t_n + \frac{1}{2}h, y(t_n) + \frac{1}{2}\mathbf{k}_2\right) \\ \mathbf{k}_4 = \mathbf{hf}(t_n + h, y(t_n) + \mathbf{k}_3) \\ y(t_{n+1}) = y(t_n) + (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \frac{1}{6} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III-38)} \\ \text{(III-39)} \\ \text{(III-40)} \\ \text{(III-41)} \\ \text{(III-42)} \end{array}$$

L'idée est que la valeur suivante (y_{n+1}) est approximée par la pente estimée par la somme du produit de la valeur actuelle (y_n) et de la taille de l'intervalle (h). La pente est obtenue en pondérant la moyenne des pentes [22] :

- k_1 est la pente au début de l'intervalle .
- k_2 est la pente au milieu de l'intervalle, utilisez la pente k_1 pour calculer la valeur y de point $t_n + h/2$ par la méthode d'Euler .
- k_3 est à nouveau la pente au milieu de l'intervalle, mais cette fois elle est obtenue en calculant y avec la pente k_2 .
- k_4 est la pente à la fin de l'intervalle et la valeur de y est calculée à l'aide de k_3 [22].

Alors ; On remarque que le Runge-Kutta d'ordre 4 évalue la fonction f deux fois plus que le Runge-Kutta d'ordre 2. Par conséquent, RK4 ne surpasse vraiment RK2 que si RK4 donne une taille de pas deux fois meilleure que RK2. Cela arrive souvent, mais pas toujours [23].



CHAPITRE IV:
RESULTATS ET
DISCUSSION

CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV-1. INTRODUCTION.

Au cours de ce chapitre nous allons présenter les résultats de la modélisation d'un arc en extinction. Ces résultats concernent les variations de la température en régime stationnaire et transitoire d'un mélange de plasma SF₆ – Cu et Azote – Cu nous déterminons également le pouvoir de coupure d'un disjoncteur à SF₆ en évaluant la vitesse de refroidissement du plasma.

IV-2. HYPOTHESES.

Afin de simplifier les calculs, nous supposons certaines hypothèses physiques:

- 1- Le plasma possède une symétrie cylindrique.
- 2- Plasma est en équilibre thermodynamique local (ETL).
- 3- La pression à l'intérieur du plasma est constante dans le temps et dans l'espace.
- 4- La vitesse du flux est radiale et varie uniquement en fonction du rayon.

IV-3 PROFIL RADIAL DE TEMPERATURE.

L'évolution de la température en fonction de la distance radiale dans un arc électrique en régime stationnaire est donnée dans deux types de plasmas.

IV-3-1. PROFILE DE LA TEMPERATURE DU GAZ SF₆ PUR.

Sur la figure (IV-1), nous avons tracé l'évolution de la température pour un gaz pur SF₆ en fonction de la distance radiale. Le rayon de la décharge étant fixé à 2.5 mm, l'intensité de courant $I = 100$ A et le champ électrique $E = 1500$ v/m.

La température est beaucoup plus élevée au voisinage de l'axe de la décharge ($R=0$) ensuite elle commence à diminuer. Lorsque $0 < r < 1.5$ mm, la température varie lentement de 12500 K à 11000 K. Par contre lorsque $r > 1.5$ mm, la température chute rapidement.

Le profil de température dépend de la conduction thermique, le gradient de température est faible dans la région où la conductivité thermique est élevée et le terme $\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$ est presque constant.

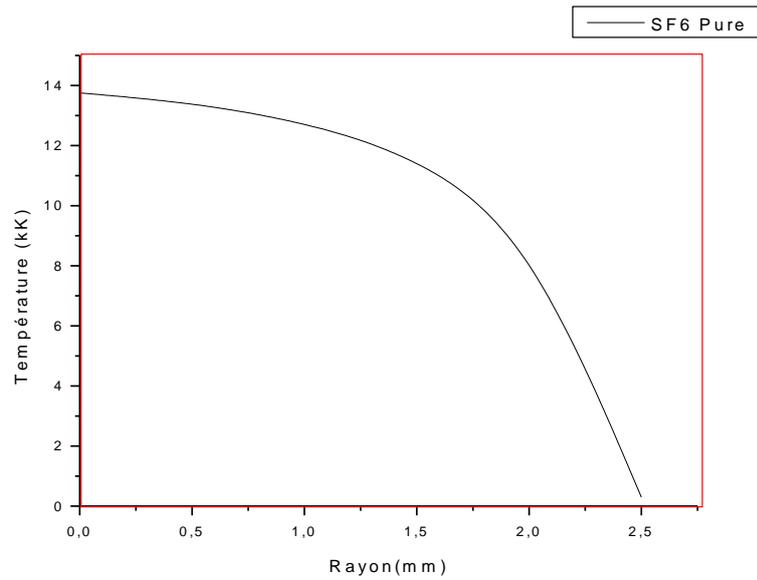


Figure IV. 1: Profil de température d'un arc à l'état stationnaire dans le SF₆ pur.

IV-3-2. PROFILE DE LA TEMPERATURE DE N₂ PUR.

La figure (IV-2) représente les variations de la température d'un plasma de N₂ pur, pour un rayon de la décharge de 2.5 mm, l'intensité de courant I= 100A et pour une valeur de champ électrique E= 2000 V/m.

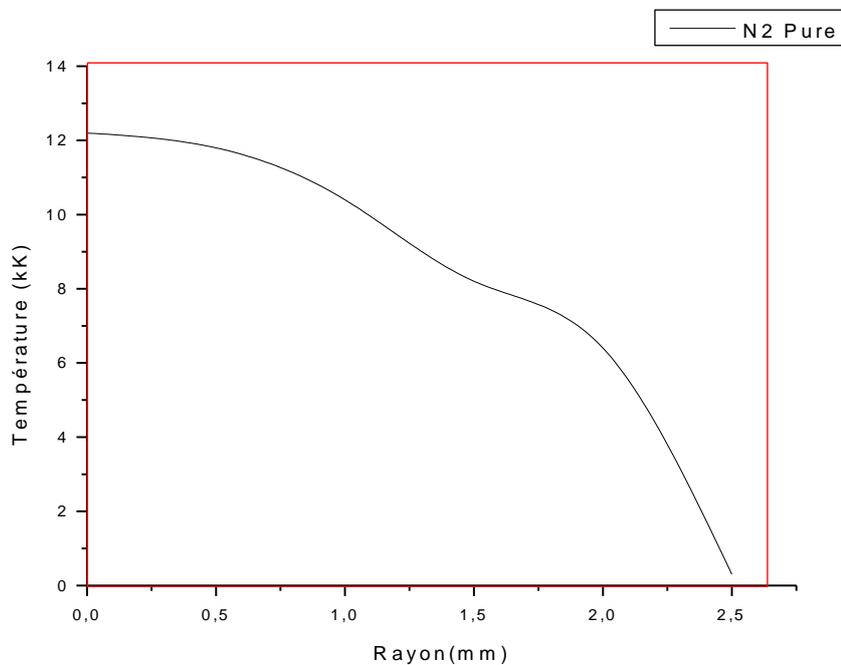


Figure IV. 2: Profil de température d'un plasma d'arc à l'état stationnaire dans N₂ pur.

On remarque que la température est élevée près de l'axe ($R=0$) puis commence à diminuer graduellement jusqu'au rayon $r = 2$ mm où la courbe passe par un point d'inflexion puis continue sa diminution.

Le profil de température de l'azote pur est marqué par un faible gradient autour de la température de 7000 K, ce comportement est justifié par la variation de la conduction thermique qui présente un pic qui provient de la dissociation de la molécule d'azote.

IV-3-3. INFLUENCE DE LA VAPEUR DE CUIVRE SUR LA PROFIL DE TEMPERATURE DE L'ARC.

Dans nombreuse applications des arcs, le plasma créé estensemencé en vapeurs métallique, ces vapeurs provient de l'érosion des matériaux des électrodes ou injectées volontairement dans le plasma d'arc. Leur présence risque d'influencer les propriétés thermodynamiques et modifier les coefficients de transport du plasma. Ces effets se répercutent sur les profils de température .

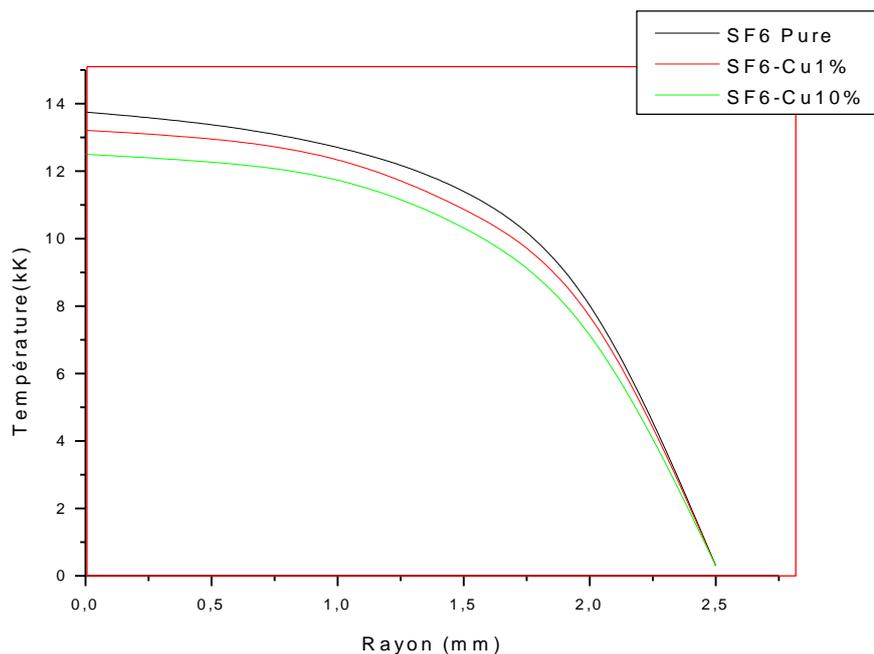


Figure IV. 3. Profil de température d'un plasma d'arc en régime stationnaire, formé et des mélanges SF₆-Cu.

L'influence de la vapeur de cuivre sur le profil de température de l'arc est illustrée sur les figures (IV-3) et (IV-4). De façon générale, le calcul montre que la présence de la vapeur métallique contribue au refroidissement la région axiale et à l'abaissement de la température du cœur chaud du plasma. Malgré l'augmentation de la conductivité électrique des mélanges sous l'effet de la vapeur du cuivre, pertes radiatives qui deviennent importantes dès que la proportion du cuivre augmente conduisent au refroidissement plasma, on remarque que l'effet de la vapeur de cuivre est beaucoup ressenti dans le cas du plasma de N₂.

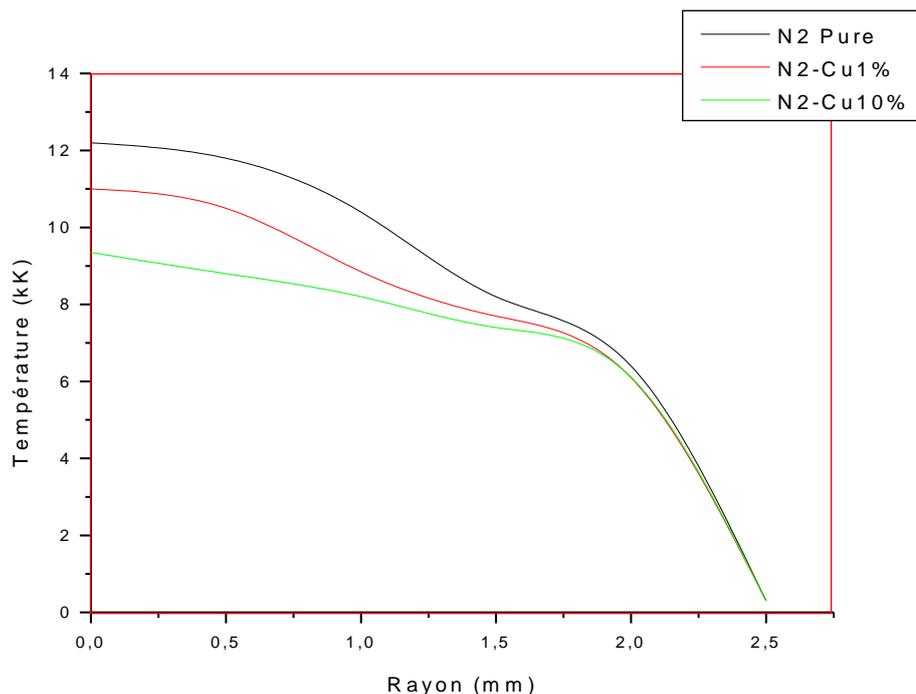


Figure IV. 4: Profil de température d'un arc à l'état stationnaire calculé pour les mélanges N₂-Cu.

IV-4. MODELISATION DE L'ARC EN REGIME TRANSITOIRE:

IV-4-1. EVOLUTION TEMPORELLE DE TEMPERATURE AXIALE D'UN PLASMA SF6 PUR.

La figure (IV-5) représente l'évolution de la température axiale en fonction du temps obtenu pour les arcs brûlant dans le gaz SF₆ pur. Le profil de la température T(r) calculé dans l'état stationnaire sera utilisé comme condition initiale pour notre calcul.

Durant la période étalée du début de l'extinction jusqu'à 50 micro seconde la température diminue rapidement. Durant la deuxième phase de 50 microsecondes jusqu'à 130

microsecondes la vitesse de diminution de la température est légèrement inférieure à la phase précédente.

IV-4-2. EVOLUTION TEMPORELLE DE TEMPERATURE AXIALE D'UN PLASMA N₂:

La figure (IV-6) montre la décroissance rapide de la température pendant les premiers instants de la décharge. On observe que la température passe par deux phases:

- $t < 40$ microsecondes : La diminution de la température est très rapide de telles façons que la température chute de 2000 °K à 900 °K.
- $t > 40$ microsecondes : La vitesse de décroissance de la température diminue.

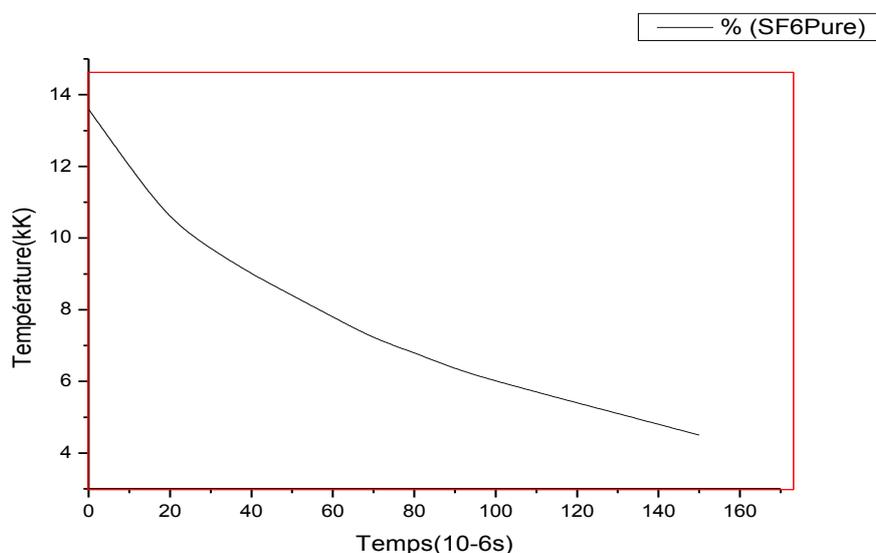


Figure IV. 5: Profil de température d'un arc à l'état transitoire SF₆ pure.

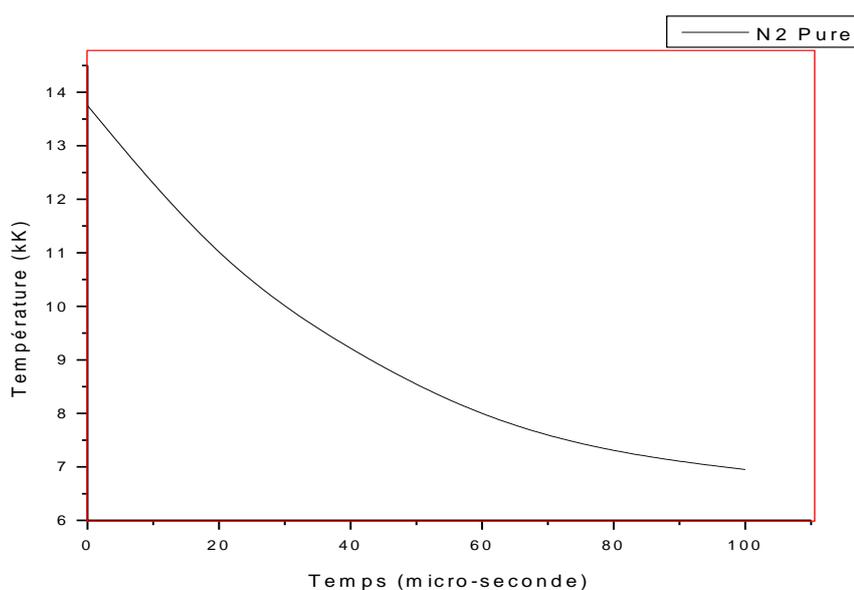


Figure IV. 6: Profil de température d'un arc à l'état transitoire N₂ pure.

CONCLUJSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but recherché de ce travail de ce travail était de déterminer certaines grandeurs fondamentales caractérisant le plasma d'arcformés de mélange SF₆-Cu et N₂Cu. Nous nous sommes intéressés particulièrement au profil de température en fonction de la distance radiale, dans le cas d'un régime stationnaire, et avec une géométrie cylindrique. Nous avons déterminé les variations de la température axiale en fonction de la température dans le cas d'un régime transitoire.

Les résultats obtenus ont montré que :

- la présence de la vapeur métallique contribue au refroidissement la région axiale et à l'abaissement de la température du cœur chaud du plasma.
- l'effet de la vapeur de cuivre est beaucoup ressenti dans le cas du plasma de N₂.
- L'effet de vapeur de cuivre n'est pas important dans les mélange SF₆-Cu a cause de sa faible rigidité électrique.
- L'azote est un autre composant important du mélange SF₆ -N₂. Il poccede des propriétés physique comparable à celles du SF₆,Il peut être ajouté au mélange pour améliorer ses propriétés diélectriques, ainsi que pour réduire le coût global et l'impact environnemental du système d'isolation.

REFERENCES

REFERENCES

- [1] Raimbault, J. L. (2012). Introduction To Plasma Physics; Introduction A La Physique Des Plasmas. Université Paris-Sud 11.
- [2] Boulos, M. I., Fauchais, P., & Pfender, E. (1994). *Thermal Plasmas* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- [3] Mellhaoui, X. (2006). *Mécanismes Physico-Chimiques Dans Le Procédé De Gravure Plasma Du Silicium* (Doctoral Dissertation, Université D'Orléans).
- [4] Held, B. (1994). *Physique Des Plasmas Froids* (No. 180). Elsevier Masson.
- [5] Fauchais, P. (2000). Gaz Ionisés Et Plasmas. *Techniques De L'ingénieur. Sciences Fondamentales*, (Af3560), Af3560-1.
- [6] Fauchais, P. (2004). Understanding Plasma Spraying. *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 37(9), R86.
- [7] Ikhlef, N. (2010). *Modélisation Numérique D'une Installation Convertisseur-Plasma D'induction En Vue D'une Commande Optimale* (Doctoral Dissertation, Université De Batna 2).
- [8] De Dortan, F. D. G. (2003). *Etude De L'influence De L'environnement Plasma Sur Les Sections Efficaces D'excitation Collisionnelles Électron-Ion Dans Un Plasma Chaud Et Dense* (Doctoral Dissertation, Université Paris Sud-Paris Xi).
- [9] [Http://Www.Lra.Ens.Fr/~Levrier/Files/Chapter_3_Rt-2016-2017.Pdf](http://Www.Lra.Ens.Fr/~Levrier/Files/Chapter_3_Rt-2016-2017.Pdf)
- [10] Touali, Y. A. (2010). Etude Du Rayonnement Thermique Dans Sa Phase D' Absorption Et D' Emission A Travers Une Chaudiere A Gaz: Analyses Mathematiques Et Chimiques Des Resultats Issues Des Mesures Realisees En Laboratoire.
- [11] Godin, D. (1998). *Calcul De Compositions Chimiques De Plasmas À L'équilibre Thermodynamique: Application À La Modélisation De L'ablation Dans Les Disjoncteurs*. Ecole Polytechnique De Montreal.
- [12] Daveau, G., Martire, T., Huselstein, J. J., & Enrici, P. (2008). Applications Des Arcs Électriques. *J3ea*, 7, 1010.
- [13] Sefsifi, L. *Calcul De La Composition Chimique D'un Plasma Thermique Formé De Mélange Ch4-H2 Et Ch4-N2* (Doctoral Dissertation).
- [14] Calvo, J. G. L. (2014). *Étude, Modélisation Et Conception D'un Système De Détection De Défauts D'arcs Électriques Pour L'habitat* (Doctoral Dissertation, Université De Lorraine).
- [15] [Http://Dspace.Univ-Tlemcen.Dz/Bitstream/112/5161/4/Chapitre_1_Les_Plasmas_Definitions_Generales.Pdf](http://Dspace.Univ-Tlemcen.Dz/Bitstream/112/5161/4/Chapitre_1_Les_Plasmas_Definitions_Generales.Pdf)

[16][Http://Www.Association-Arc-Electrique.Org/Mediatheque/Les Appareillages De Coupure.Pdf](http://www.association-arc-electrique.org/mediatheque/les_appareillages_de_coupure.pdf)

[17] Jan, C. (2013). *Etude Du Transfert Radiatif Dans Des Plasmas Thermiques De Mélanges Sf6-C2f4: Application À La Simulation De Disjoncteurs Haute Tension* (Doctoral Dissertation, Université De Toulouse, Université Toulouse Iii-Paul Sabatier).

[18] Randrianarivao, D. (2012). *Modélisation Des Écoulements Dans Un Disjoncteur Haute Tension* (Doctoral Dissertation, Université De Toulouse, Université Toulouse Iii-Paul Sabatier).

[19] Guerroui, A. (2016). *Prédiction Des Paramètres Des Décharges Couronnes Dans Le Mélange Sf6-N2* (Doctoral Dissertation).

[20] Vacquie, S. (1984). *L'arcélectrique Et Ses Applications. Tome, 1*, 124-128.

[21] Belhaouari, J. B. (1997). *Modélisation De L'extinction D'un Arc De Sf6 Hors D'équilibrethermodynamique Local* (Doctoral Dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse Iii).

[22][Https://Fr.Wikipedia.Org/Wiki/M%C3%A9thodes De Runge-Kutta](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thodes_De_Runge-Kutta)

[23] Stout, B. (2007). *Méthodesnumériques De Résolutiond'équationsdifférentielles. Marseille, France: Universite De Provence.*

[24] Demailly, J. P. (2006). *Analyse Numérique Et Équations Différentielles* (Pp. 237-243). Les Ulis: Edp Sciences.

Résumé :

En raison de ces hautes performances diélectriques et à son inertie chimique , l'hexafluorure de soufre ou gaz SF6 est notamment utilisé comme isolant dans les équipements de transmission et la distribution de l'électricité comme les disjoncteurs , pour diminuer les rejets de SF6 dans l'atmosphère en le mélangeant à un gaz ayant un potentiel de réchauffement totale plus faible et un pouvoir de coupure comparable. Le mélange gazeux le plus adapté est le SF6-N2. Nous avons ensuite déterminé la distribution de température en régime stationnaire d'un plasma d'arc SF6 supposé être en équilibre thermodynamique local. Et à l'évolution de la température à l'état transitoire Nous soulignerons également l'influence de la vapeur de cuivre sur le comportement en température des plasmas SF6.

Mots clés : disjoncteur, l'hexafluorure de soufre, régime stationnaire, l'état transitoire.

Summary :

Due to its high dielectric performance and chemical inertness, sulfur hexafluoride or SF6 gas is used in particular as an insulator in electrical transmission and distribution equipment such as circuit breakers, to reduce SF6 emissions into the atmosphere by mixing it with a gas having a lower total warming potential and comparable breaking capacity. The most suitable gas mixture is SF6-N2. We then determined the steady-state temperature distribution of an SF6 arc plasma assumed to be in local thermodynamic equilibrium. We will also highlight the influence of copper vapor on the temperature behavior of SF6 plasmas.

Keywords : circuit breaker, sulfur hexafluoride, steady state ,transient state.

: الملخص

بسبب هذا الأداء العالي للعازل و خموله الكيميائي ، يتم استخدام سادس فلوريد الكبريت أو غاز SF6 على وجه الخصوص كعازل في معدات نقل وتوزيع الكهرباء مثل قواطع الدائرة ، لتقليل انبعاثات سادس فلوريد الكبريت في الغلاف الجوي عن طريق مزجها بالغاز ذات قدرة احتراق كلية أقل وقدرة تكسير مماثلة. أنسب خليط غاز هو SF6-N2. ثم حددنا توزيع درجة حرارة الحالة المستقرة لبلازما القوس SF6 المفترض أن تكون في توازن ديناميكي حراري محلي. وتطور درجة الحرارة في الحالة العابرة، درسنا أيضاً تأثير بخار النحاس على السلوك الحراري لبلازما SF6.

الكلمات المفتاحية: قاطع الدائرة - سداسي فلوريد الكبريت - حالة ثابتة - حالة عابرة.