

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de physique
Filière : science de la matière

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en physique
Option : Modélisation et caractérisation des matériaux

THEME :

Etude des propriétés des gaz rares utilisés dans la technologie des plasmas.

Etudiant(e) : « **Mezoudji Meryem** »

Encadrant(e) : « Benstaali wafà »

Année Universitaire 2018-2019

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de physique
Filière : science de la matière

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en physique
Option : Modélisation et caractérisation des matériaux

THEME :

Etude des propriétés des gaz rares utilisés dans la technologie des plasmas.

Etudiant(e) : « **Mezoudji Meryem** »

Encadrant(e) : «Benstaali wafà»

Année Universitaire 2018-2019

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui ma donner la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Je souhaite d'adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements, reconnaissances et gratitude à tous mes enseignants, et en particulier madame Benstaali wafaa de m'avoir encadré et pour ses précieux conseils, et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire

Je remercie les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous mes proches et amis.

Dédicace

Je rends mes profondes gratitudees à ALLAH qui m'a aidé à réaliser ce modeste

Travail.

À MES CHERS PARENTS Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

Une spéciale dédicace à ma sœur Rafika

A mon chers frère Adel

A mon neveu youcef et mes nièces SALMA ET MAISSA

A tous les membres de ma famille. et surtout mes cousine Sara et Farah

A tous mes amis

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A ma promotion de Master physique des matériaux 2019

Liste des figures

Figure	Titre de la figure	Page
Figure. I.1	Classification des éléments et leurs familles dans le Tableau périodique	6
Figure. I.2	Ballon dirigeable publicitaire personnalisé gonflable à l'hélium	11
Figure. I.3	IRM gorgés d'hélium	11
Figure. I.4.	Le tube de néon	13
Figure. I.5	Utilisation du néon dans les enseignes lumineuses	14
Figure. I.6	Lampe à décharge contenant du krypton	19
Figure. I.7.	Phare à décharge au xénon	23
Figure. II.1	L'état plasma	30
Figure II.2	Processus d'ionisation	35
Figure .II.3.	Le spectre électromagnétique	40
Figure. II.4.	Sections efficaces de collisions électron-atome d'hélium	46
Figure. II.5	Sections efficaces de collisions électron-atome du néon	46
Figure. II.6	Sections efficaces de collisions électron-atome d'Argon.	47
Figure.II.7	Sections efficaces de collisions électron-atome du xénon.	47
FigureI.I.8	Sections efficaces de collisions électron-atome du krypton.	48
Figure.III.1	La variation de la mobilité électronique en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.	52
Figure.III.2	La variation du premier coefficient de Townsend en fonction du champ réduit	53
Figure.III.3	La variation de l'énergie moyenne en fonction du champ réduit	53

Figure.III.4	La variation du coefficient de diffusion en fonction du champ réduit	54
Figure.III.5	La variation de la fréquence de collision totale en fonction du champ réduit	55
Figure.III.6	La variation de la fréquence de collision d'ionisation en fonction du champ réduit	56
Figure.III.7	La variation du rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence de collision d'ionisation	57
Figure.III.8	La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon	59
Figure.III.9.	La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon	60
Figure.III.10	Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon	60
Figure.III.11.	La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton	61
Figure.III.12.	La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton	62
Figure.III.13	Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence de collision d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton	62
Figure.III.14	La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon	63

Figure.III.15	La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon	64
Figure.III.16	le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour la différente concentration du mélange hélium-néon	64
Figure.III.17	la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange néon-xénon	66
Figure.III.18	La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange néon- xénon	66
Figure.III.19	Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange xénon-néon	67
Figure.III.20	variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor	68
Figure.III.21	La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor.	69
Figure.III.22	Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor.	69
Figure.III.23	La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-chlore	70
Figure.III.24	la variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-chlore	71

Figure.III.25	le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-chlore	71
----------------------	--	----

Liste des tableaux

Tableaux	Titre des tableaux	page
Tableau(II.1)	Energie du seuil d'ionisation des gaz rares	36
Tableau(II.2)	Energie du seuil d'excitation des gaz rares	38
Tableau(II.3)	Longueurs d'onde maximales émises par les gaz rares purs et en mélange avec les halogènes	41

Liste des abréviations

<i>Abréviation</i>	<i>Expression Complète</i>
\vec{E}	<i>Champ électrique</i>
$\vec{\nabla}_v$	<i>l'opérateur gradient de la vitesse</i>
E/N	<i>Le champ réduit</i>
N	<i>La densité électronique</i>
V	<i>vitesse de dérive.</i>
μ	<i>La mobilité</i>
$J_{diffusion}$	<i>du flux de diffusion</i>
D	<i>Coefficient de diffusion</i>
∇n	<i>Gradient de la densité</i>
ν_{tot}	<i>Fréquence de collision totale</i>
ν_{ion}	<i>Fréquence d'ionisation</i>
α	<i>Coefficient d'ionisation</i>
He	<i>Hélium</i>
Ne	<i>Néon</i>
Ar	<i>Argon</i>
Kr	<i>krypton</i>
Xe	<i>Xénon</i>
Rn	<i>Radon</i>
Cl_2	<i>Gaz du chlore</i>

Résumé

Résumé :

Nous présentons dans ce manuscrit une étude des paramètres de gaz rares dans une décharge à plasma, ces gaz ayant une importance dans la technologie et la vie quotidienne. Nous avons décrit leurs caractéristiques des gaz rares dans le cas général et dans les décharges à plasma et de faire un bilan sur les paramètres de transport et de collision pour des gaz pur ainsi que pour des mélanges et l'effet d'utilisation des mélange sur ces paramètres. La simulation est un outil efficace à cause de son faible coût ; plusieurs modèles ont été développés à l'échelle macroscopique (fluide) ou microscopique (particulaire). Ces modèles ont besoin des paramètres d'entrés. Dans notre travail, nous avons calculé, grâce au code bolsig +, les paramètres de transport et les fréquences de collision des gaz rares dans deux cas ; purs et mélanges.

Nous avons trouvé que les gaz (xénon, krypton, l'argon) produisent plus d'états excités ce qui implique plus de production UV et que l'hélium et le néon avaient des propriétés de gaz parent au gaz émetteur d'UV. En se basant sur ses résultats, nous avons étudié quatre types de mélanges ; un mélange de deux gaz bon émetteurs d'UV; krypton-xénon et krypton-argon, deux gaz qui ont l'ionisation facile ; hélium- néon, un mélange de deux gaz dont l'un favorise l'excitation et le 2^{ème} a une ionisation facile ; xénon-néon et enfin un gaz bon émetteur UV avec des gaz qui appartient à la famille des halogènes ; krypton-fluor ,krypton-chlore Nous avons regardé l'effet de ces mélanges avec leurs différentes concentrations sur le comportement des paramètres de transport et les fréquences de collisions ainsi que sur leurs valeurs. Nous avons constaté que pour le premier type de mélange, l'ajout du xénon au krypton a une influence plus importante sur les fréquences de collision et les paramètres de transport sauf le coefficient d'ionisation. Pour un mélange de deux gaz parents, 2^{ème} type, la mobilité a un comportement mixte des deux gaz. Ceci est plus remarquable si on ajoute l'hélium. Les concentrations en hélium affectent la fréquence de collision totale à fort champ ; le mélange He80%-Ne a plus d'excitation. Dans le troisième type de mélange, Xe-Ne, Les paramètres de transport ont également un comportement mixte des deux gaz. L'effet de la concentration en xénon est clair sur fréquences des collisions ; Un mélange de Xe15%-Ne a une excitation dominante. Lors de l'ajout d'un halogène à un gaz rare, Les fréquences de collision ont le même comportement pour les deux mélanges et l'effet de la concentration est clair pour le coefficient de diffusion. A fort champ c'est l'ionisation qui est dominante pour un mélange de 10% de fluor dans le krypton et pour un mélange de 15% de chlore à faible champ c'est l'excitation qui est dominante.

Table de matière

<i>Introduction générale</i>	2
------------------------------------	---

Chapitre I. Gaz rares : caractéristique et application

I.1. Introduction.....	6
I.2. Les propriétés communes des gaz rares.....	7
I.3. Les différents gaz rares	8
I.3.1. L'hélium.....	8
I.3.2. Le néon.....	12
I.3.3. L'argon.....	15
I.3.4. Le krypton.....	17
I.3.5. Le xénon.....	20
I.3.3. Le radon.....	23
I.4. Conclusion.....	27

Chapitre II. *Le milieu plasma : Aspect physique et approche numérique*

II.1. Introduction	29
II.2. Le plasma.....	29
II.3. Particules excitantes.....	30
II.3.1. L'électron.....	30
II.3.2. L'atome.....	31
II.3.3. L'électron dans l'atome.....	31
II.3.4. L'atome neutre à l'état fondamentale.....	31
II.3.5. L'atome neutre à l'état excité.....	31
II.3.6. L'ion.....	31
II.4. Génération d'un plasma.....	32
II.5. Décharge électrique.....	33
II.6. Interaction entre les particules dans une décharge.....	33
II.6.1. Les collisions élastiques.....	34
II.6.2. L'ionisation.....	34

II.6.3. La dé-ionisation.....	36
II.6.4.L'excitation.....	37
II.6.5.La désexcitation.....	38
II.7.La diffusion.....	39
II.8.L'émission de la lumière spontanée.....	39
II.8.1.Le rayonnement électromagnétique.....	39
II.8.2.Le spectre de la lumière.....	39
II.8.3.Le rayonnement UV.....	40
II.9.Modèle pour l'étude des plasmas.....	41
II.9.1.Modèle fluide.....	42
II.9.2.Modèle particulaire.....	42
II.9.3.Modèle hybride.....	43
II.10. Le code Bolsig+.....	44
II.10.1. Principe.....	44
II.10.1. Les paramètres d'entrée.....	44
II.10.2.Les paramètres de sortie.....	48
II.11. Conclusion.....	50

Chapitre III : Résultats des calculs

III.1.Introduction.....	52
III.2.Les résultats pour les gaz rare purs.....	52
III.2.1. Les paramètres de transport.....	52
III.2.2.Les fréquence de collision.....	55
III.3. Conclusion sur les résultats pour les gaz purs.....	58
III.4. Résultat pour les mélange des gaz.....	58
III.4.1. Le mélange Kr-Xe.....	59
III.4.2. Le mélange Kr-Ar.....	61
III.4.3. Le mélange He-Ne.....	63
III.4.4.Le mélange Ne-Xe.....	65
III.4.5. Le mélange Kr-F.....	67
III.4.6.Le mélange Kr-Cl ₂	70
III.5. Conclusion pour les mélanges gaz.....	72
III.6.Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	75
Bibliographie.....	78

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Depuis ces dernières années les gaz nobles suscitent de plus en plus l'intérêt de la communauté scientifique, vu leur grand champ d'application. Ces gaz nobles qui appartiennent à la dix huitième colonne du tableau de Mendeleïev sont appelés également gaz rares à cause de leur faible présence sur terre ; ils forment 1% de l'air seulement.

La nature chimiquement inerte des gaz nobles les rend utiles pour toutes les applications où les réactions chimiques sont indésirables. L'argon est ainsi utilisé dans les ampoules à incandescence pour éviter l'oxydation du filament de tungstène. Dans un autre registre, l'hélium est utilisé en plongée sous-marine comme gaz respiratoire sous forme d'héliox ou de trimix pour limiter à la fois les turbulences du gaz circulant dans l'équipement respiratoire, la toxicité de l'azote et la toxicité de l'oxygène. Les gaz nobles sont par ailleurs utilisés dans des domaines aussi divers que l'éclairage, le soudage, ou encore l'aéronautique et scientifiques, et même dans la vie quotidienne. Malgré le prix élevé de certains d'entre eux, la demande pour ces gaz rares augmente rapidement car de nombreuses industries, allant de l'électronique à la fibre de verre en passant par l'éclairage, de l'automobile et de l'aérospatiale, exploitent de plus en plus leurs avantages. Les gaz rares brillent dans des couleurs distinctives lorsqu'ils sont utilisés dans des lampes à décharge, telles que des néons. Le krypton est utilisé comme gaz de remplissage dans les lampes à incandescence. Le xénon est couramment utilisé dans les lampes à arc au xénon, qui sont présentes dans les projecteurs de films et les phares d'automobile en raison de leur spectre presque continu qui ressemble à la lumière du jour.

Dans leurs états normaux les gaz rares sont des isolants électriques mais si on applique un champ électrique assez intense ils deviennent conducteurs, Ce qui génère un plasma. Les phénomènes complexes qui se produisent portent le nom des décharges électriques dans les gaz. Le principe des décharges à base de gaz rares est le même ; Sous alimentation électrique, une décharge se produit entre deux électrodes de part et d'autre. Les particules qui existent dans le gaz vont entrer en collisions entre elles en émettant des rayonnements dans la gamme de l'ultraviolet (UV). Les radiations UV sont, d'une façon générale, très fortement absorbées par la matière, et la technologie dans ce domaine est dominée par le problème de transmission ; chaque application utilise le gaz qui pourra être absorbé ; que ce soit les luminophores dans

Introduction générale

les écrans plasma ou la peau de l'être humain irradié. Le choix des gaz rares est donc crucial dans les sources de lumière U.V basées sur les décharges plasma.

L'étude des décharges électriques est une discipline ancienne, dont l'un des pionniers est le célèbre physicien anglais M. Faraday, dans la première moitié du 19^{ème} siècle. Le terme "plasma" a été introduit par I. Langmuir en 1928, lors d'études sur les tubes à décharges contenant un gaz ionisé. Ce quatrième état de la matière est passé du domaine de curiosité de la nature, sorte de jouet des physiciens, à celui d'outil industriel indispensable depuis la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. C'est la raison pour laquelle l'attention des chercheurs s'est tournée vers ce domaine. Ce travail rentre dans le cadre général de la simulation numérique des gaz

Par ailleurs, l'étude des plasmas nécessite des efforts importants dans le domaine de la simulation numérique et bénéficie de la puissance des calculateurs actuels. L'objectif principal de ces études numériques est de proposer des méthodes numériques robustes, précises et les moins coûteux possibles pour simuler les différents phénomènes mis en jeu. Grâce à leur caractère de reproductibilité, les simulations peuvent permettre par exemple, de vérifier une théorie à un coût moins important que l'expérience, mais aussi de compléter, voire de guider, des études expérimentales. Néanmoins, chacun de ces différents modèles nécessite, la simulation des décharges électriques est en général conditionnée par la connaissance d'un grand nombre de données de base, sections efficaces de collision électronique et coefficients de transport ainsi que les propriétés microscopiques des gaz qui sont actuellement des sujets d'intérêt très important chez les chercheurs dans le domaine de la haute tension.

Partant de ces remarques, nous nous sommes intéressés à l'étude des paramètres de transport et les coefficients de collisions pour différents gaz rares à l'état pur et dans certains mélanges de gaz. Dans ce contexte, le manuscrit de ce mémoire est structuré en trois chapitres partiellement indépendants :

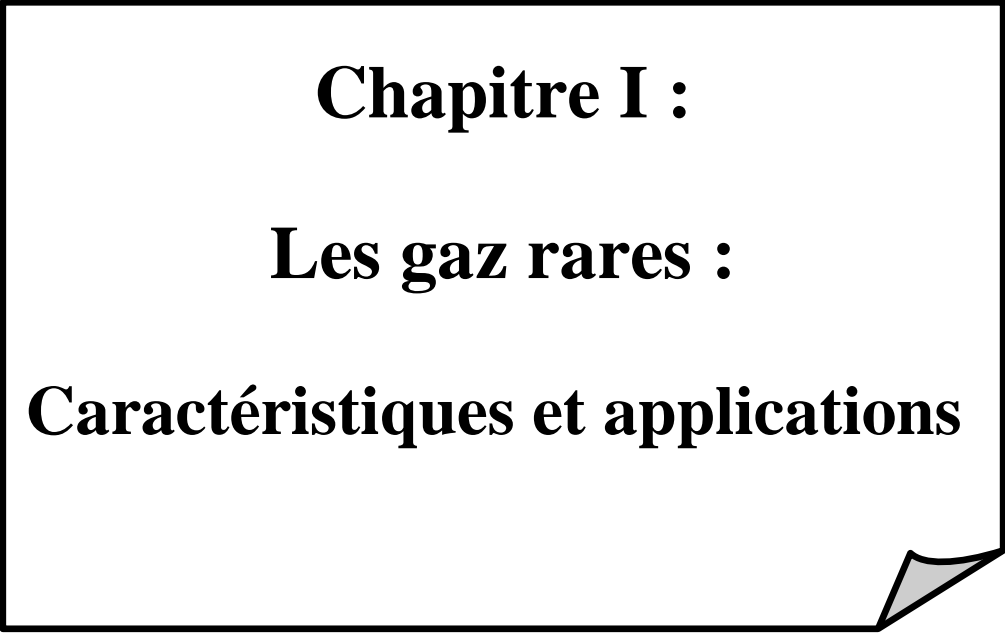
- Un premier Chapitre qui a pour objectif de présenter les différents gaz rares où sera donné l'historique de chacun d'eux ainsi que ses caractéristiques physiques et chimiques. Nous passerons en vue les applications des gaz rares dans les différents domaines. Certaines de ces applications, sont basées sur les décharges électriques où les gaz rares deviennent plasma.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre est donc consacré, en première partie, à comprendre quelques mécanismes mis en jeu lors d'une décharge électrique qui est basée sur la connaissance des processus physiques importants pour la modélisation, il s'agit des mécanismes élémentaires microscopiques qui dominent un milieu gazeux et ils sont liés aux sections efficaces de collision. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons décrire les différents modèles utilisés pour comprendre et de décrire les phénomènes présents dans les décharges plasma ainsi que le code bolsig qui nous permettra de calculer les données du modèle fluide. Nous terminerons par donner les sections efficaces des gaz rares qui sont à la fois utilisées comme données d'entrée pour le modèle PIC ainsi que pour Bolsig+ et la définition des paramètres d'entrés obtenus par les calculs de Bolsig +
- Dans le chapitre 3, nous allons présenter les résultats de calcul faits à l'aide bolsig+. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première sera consacrée aux paramètres de transport et les fréquences de collision pour les gaz purs. Dans la deuxième partie, nous présenterons les résultats pour certains mélanges gaz ; le choix des mélanges sera le fruit des résultats de la première partie et de la recherche bibliographique.
- Nous terminerons notre manuscrit par une conclusion où nous passerons en vue les résultats obtenus par notre code concernant les propriétés des gaz rares purs et mélanges selon leurs applications

En vous souhaitons une bonne lecture

Chapitre I :
Les gaz rares :
Caractéristiques et applications



I.1.Introduction :

Un *gaz rare* est un élément chimique qui est inerte chimiquement, c'est-à-dire qu'il ne réagit jamais avec un autre composé. Ce type de gaz est regroupé dans la dix-huitième colonne du tableau périodique des éléments . Les principaux gaz rares sont, dans l'ordre de leur masse :

- l'hélium (**He**)
- le néon (**Ne**)
- l'argon (**Ar**)
- le krypton (**Kr**)
- le xénon (**Xe**)
- le radon (**Rn**)



The periodic table of elements
with conventional atomic weights scaled to $A_r(^{12}\text{C}) = 12$ and physical state (at STP 25 °C and 1 atm)*

																		class																													
																		metal		metalloid		non-metal		likely metal		lanthanoids		sub-group																			
																		80		33		54		105		118		57-71																			
																		Hg		As		Xe		Db		Og		Ln																			
																		name		MERCURY		ARSENIC		XENON		DUBNIUM		OGANESSON																			
																		standard atomic weight		200.59		74.9216		131.29		(288)		(294)																			
																		physical state		liquid		solid		gas		probably solid		unknown																			
1	2																	13	14	15	16	17	18																								
1 H HYDROGEN 1.008																		2 He HELIUM 4.0026																													
3 Li LITHIUM 6.94	4 Be BERYLLIUM 9.0122																	5 B BORON 10.81	6 C CARBON 12.011	7 N NITROGEN 14.007	8 O OXYGEN 15.999	9 F FLUORINE 18.9984	10 Ne NEON 20.1797																								
11 Na SODIUM 22.9898	12 Mg MAGNESIUM 24.305																	13 Al ALUMINUM 26.9815	14 Si SILICON 28.085	15 P PHOSPHORUS 30.9738	16 S SULFUR 32.06	17 Cl CHLORINE 35.45	18 Ar ARGON 39.948																								
19 K POTASSIUM 39.0983	20 Ca CALCIUM 40.078	21 Sc SCANDIUM 44.9559	22 Ti TITANIUM 47.867	23 V VANADIUM 50.9415	24 Cr CHROMIUM 51.9961	25 Mn MANGANESE 54.9380	26 Fe IRON 55.845	27 Co COBALT 58.9332	28 Ni NICKEL 58.6934	29 Cu COPPER 63.546	30 Zn ZINC 65.38	31 Ga GALLIUM 69.723	32 Ge GERMANIUM 72.630	33 As ARSENIC 74.9216	34 Se SELENIUM 78.971	35 Br BROMINE 79.904	36 Kr KRYPTON 83.798																														
37 Rb RUBIDIUM 85.4678	38 Sr STRONTIUM 87.62	39 Y YTRBIUM 88.9058	40 Zr ZIRCONIUM 91.224	41 Nb NIOBIUM 92.9064	42 Mo MOLYBDÈNE 95.95	43 Tc TECHNETIUM (98)	44 Ru RUTHÈNIUM 101.07	45 Rh RHODIUM 102.9055	46 Pd PALLADIUM 106.42	47 Ag ARGENT 107.8682	48 Cd CADMIUM 112.414	49 In INDIUM 114.818	50 Sn ÉTAIN 118.710	51 Sb ANTIMOINE 121.760	52 Te TÉLURIUM 127.60	53 I IODINE 126.9045	54 Xe XÉNON 131.29																														
55 Cs CÉSURIUM 132.9054	56 Ba BARIUM 137.327	57-71 Ln LANTHANOÏDES	72 Hf HAFNIUM 178.49	73 Ta TANTALUM 180.9479	74 W WOLFRÈME 183.84	75 Re RHÉNIUM 186.207	76 Os OSMIUM 190.23	77 Ir IRIDIUM 192.222	78 Pt PLATINE 195.084	79 Au OR 196.9665	80 Hg MERCURE 200.59	81 Tl THALLIUM 204.38	82 Pb PLOMBE 207.2	83 Bi BISMUTH 208.9804	84 Po POLONIUM (209)	85 At ASTATINE (210)	86 Rn RADON (222)																														
87 Fr FRANCIUM (223)	88 Ra RADIUM (226)	89-103 An ACTINOÏDES	104 Rf RÉFÉRIUM (261)	105 Db DUBNIUM (268)	106 Sg SEABORGIUM (269)	107 Bh BOHRJIUM (270)	108 Hs HASSIUM (278)	109 Mt MEITNERIUM (276)	110 Ds DARMSTADTIUM (281)	111 Rg ROENTGIUM (282)	112 Cn COPERNICIUM (285)	113 Nh NIHONJIUM (286)	114 Fl FLEROVIUM (289)	115 Mc MOSCOWIUM (290)	116 Lv LIVERMORIUM (293)	117 Ts TENNESSIUM (294)	118 Og OGANESSON (294)																														
57 Ln LANTHANOÏDES	58 La LANTHANE 138.9055	59 Ce CÉRIUM 140.116	60 Pr PRASEODYMIUM 140.9077	61 Nd NÉODYMIUM 144.242	62 Pm PROMÉTHIUM (145)	63 Sm SAMARITIUM 150.36	64 Eu EUROPIUM 151.964	65 Gd GADOLINIUM 157.25	66 Tb TERBIUM 158.9254	67 Dy DYSPROSIUM 162.500	68 Ho HOLMIUM 164.9303	69 Er ERBIUM 167.259	70 Tm THULIUM 168.9342	71 Lu LUTÉTIUM 174.9648																																	
89 An ACTINOÏDES	90 Ac ACTINIUM (227)	91 Th THORIUM 232.0377	92 Pa PROTACTINIUM 231.0368	93 U URANIUM 238.0289	94 Np NEPTUNIUM (237)	95 Pu PLUTONIUM (244)	96 Am AMÉRICIUM (243)	97 Cm CURIUM (247)	98 Bk BERKÉLIUM (247)	99 Cf CALIFORNIUM (251)	100 Es EINSTEINIUM (252)	101 Fm FERMIUM (257)	102 Md MÉMOÏREVIUM (288)	103 No NOBELIUM (289)	104 Lr LAWRENCIUM (260)																																

* The symbols listed are those recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The atomic masses for hydrogen, lithium, boron, carbon, nitrogen, oxygen, silicon, chlorine, and thallium are the suggested conventional atomic weights regardless of the respective element's terrestrial origin, with the remaining limited to four decimals (whenever needed). Elements with their atomic weight in parenthesis have no stable isotopes, and the value refers to the most long-lived, non-metastable one. Bismuth, thorium, protactinium, and uranium have no stable isotopes either, but these have a characteristic terrestrial isotopic composition allowing a standard atomic mass to be tabulated. For a more detailed description of the determination of atomic masses, see J. Meija et al., *Pure Appl. Chem.* 2016, 88, 285-291. Please cite this article as D. Lundberg, *The periodic table of elements* (DOI - 10.13140/RG.2.1.4509.7129). Last updated: May 7, 2018.

Figure. I.1 : Classification des éléments et leurs familles dans le Tableau périodique [1]

Les gaz rares ont certaines propriétés communes entre eux, qu'elles soient chimique, physique ou autres.

I.2. Les propriétés communes des gaz rares :

- ❖ **La stabilité chimique** : Les gaz nobles, à cause de leur configuration électronique, sont des éléments très stables chimiquement. Comme leur dernière couche électronique est saturée, ils n'ont pas tendance à perdre ou à gagner des électrons pour former un lien chimique avec d'autres atomes. C'est pour cette raison qu'on les trouve sous forme d'éléments simples dans la nature.
- ❖ **L'abondance dans la nature** : Ils sont de faibles proportions dans l'atmosphère de la Terre. Le plus abondant des gaz nobles constitue environ 1 % de l'air, les autres gaz nobles ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations dans l'air, d'où leur surnom de «gaz rares». Dans certaines applications, comme les tubes fluorescents, les ampoules incandescentes ou la soudure à l'arc les gaz nobles peuvent constituer un milieu inerte en remplacement de l'air.
- ❖ **La température de transition d'état** : À pression atmosphérique, la différence entre la température d'ébullition et la température de fusion d'un gaz noble n'excède jamais 10 °C, de sorte qu'ils n'existent à l'état liquide que dans un intervalle de températures très étroit.
- ❖ **Le rayon atomique** : Le rayon atomique des gaz nobles augmente en descendant le long de la 18^{ème} colonne en raison du nombre croissant de sous-couches électroniques. La taille de ces atomes détermine plusieurs de leurs propriétés.
- ❖ **Le potentiel d'ionisation** : Le potentiel d'ionisation des gaz nobles est le plus élevé des éléments de chaque période, ce qui reflète la stabilité de leur configuration électronique, caractérisée par la saturation de leur couche de valence. La valeur élevée de leur **potentiel d'ionisation** est également liée à leur faible réactivité chimique.
- ❖ **L'affinité électronique** : L'affinité électronique est affectée par la règle de l'octet, dont les atomes de gaz ne sont pas capables de prendre un électron supplémentaire d'où leurs affinités électroniques sont presque nulles.
- ❖ **Les forces d'attractions entre les atomes de gaz nobles** : Tous les atomes et molécules neutres, suffisamment éloignés les uns des autres, s'attirent avec une force dont l'énergie potentielle varie comme l'inverse de la sixième puissance de la distance mutuelle. Ce sont les *forces d'attraction de Van der Waals*, responsables de la cohésion des gaz rares solidifiés. Ces forces résultent de l'action que le système de

charges d'un atome ou molécule neutre produit sur celui d'un autre atome ou molécule. Les propriétés macroscopiques des gaz nobles sont dominées par leurs faibles forces de van des Waals entre les atomes. Cette force attractive augmente avec la taille des atomes car leur polarisabilité augmente et leur potentiel d'ionisation diminue

❖ **La solubilité dans l'eau** : Ces gaz sont solubles dans l'eau

Malgré cela, chacun des gaz rares est différent des autres par ses propriétés, applications et sa propre histoire. Ce qui ouvre un grand champ à application de ces gaz.

I.3. Les différents gaz rares

I.3.1. L'Hélium :

L'hélium est un gaz rare (ou gaz noble) donc très peu réactif, au même titre que le néon, et est pratiquement inerte. Son numéro atomique est 2. Ainsi, il débute la série des gaz nobles dans le tableau périodique des éléments. Il est, après l'hydrogène, l'élément le plus abondant connu dans l'univers. L'hélium est aussi près de 7 fois plus léger que l'air.

Origine du nom et découverte :

En 1868, Norman Lockyer et Edward Frankland nomment cet élément d'après le mot grec ἥλιος (*hélîos*) signifiant soleil. L'existence de l'hélium a été mise en évidence pour la première fois par Jules Janssen, un astronome français, dans la couronne solaire lors de l'éclipse du 18 août 1868, et simultanément par l'astronome anglais Sir Joseph Norman Lockyer et l'astronome Edward Frankland, après avoir observé une ligne jaune dans le spectre du soleil pendant cette éclipse. En 1882 Luigi Palmieri montre la présence d'hélium sur la Terre. Le 26 mars 1895, le chimiste britannique Sir William Ramsay isole l'hélium sur Terre en travaillant sur une variété de pechblende, également appelée uraninite. En 1907, Ernest Rutherford et Thomas Royds démontrent que les particules « alpha (α) » sont des noyaux d'hélium.

Abondance dans la nature :

Deuxième élément en abondance dans l'univers : 23% (après l'hydrogène 76%). Rare sur la terre, l'hélium est au contraire très abondant dans l'univers, car beaucoup d'étoiles en ont d'énormes quantités. On le retrouve dans la fusion thermonucléaire. Sur terre,

il s'en forme continuellement dans l'atmosphère et lors de certaines réactions nucléaires (α), mais sa faible densité fait qu'il ne s'accumule pas au-delà de 0,0005 % dans l'air,

Structure électronique, configuration de l'état fondamental :

La configuration électronique de l'état fondamental est $(1s)^2$.

Propriétés atomiques et isotopes :

L'hélium a un diamètre atomique assez petit, il possède par ailleurs 8 isotopes connus, mais seuls deux d'entre eux sont stables : ^3He 0.000137 % et ^4He 99.999863 %

En radioactivité, les particules « alpha » sont des noyaux d'hélium 4.

Propriétés physiques et chimiques. :

- L'hélium est incolore, inodore, ininflammable, pratiquement inerte, et ce à des températures très élevées car il ne forme pas de liaisons chimiques.
- A l'état ordinaire, l'hélium est un Gaz
- Sa masse atomique égale à : 4,002602 u
- Sa température de fusion est égale à: $-272,2\text{ }^\circ\text{C}$; 0,95 K
- L'hélium peut être liquéfié, Il est le liquide le plus froid connu sur Terre. Il a la température d'ébullition la plus basse de tout les gaz avec -268.9°C ou 4,216 K
- Sa masse volumique égale à : $0,1786\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
- Le degré d'oxydation de L'hélium est : 0 (zéro).
- L'hélium est extrêmement léger et par conséquent très volatile
- L'hélium est à peine soluble dans les métaux et les alliages métalliques(8.9 ml dans 1litre d'eau à 20°C sous 1bar),
- L'hélium a une température de condensation la plus basse parmi toutes les substances connues. Il a, en théorie, la propriété de rester liquide jusqu'au zéro absolu (Contrairement aux autres éléments, l'hélium reste liquide jusqu'au zéro absolu, à des pressions inférieures à 25 atm.), et par conséquent, seule une variation de la pression permet d'obtenir de l'hélium solide (L'hélium ne se solidifie que sous l'effet de fortes pressions).

- Sur Terre, l'hélium est créé par la désintégration radioactive d'éléments plus lourds (les particules alpha sont des noyaux d'hélium produits par la désintégration de l'uranium). Après sa création, une partie est emprisonnée avec le gaz naturel dans des concentrations allant jusqu'à 7 % par volume.

Les applications de l'hélium

L'hélium a été le premier gaz utilisé pour remplir les ballons et les dirigeables et il est toujours employé pour les ballons météo notamment (voir figure. I.1). Il sert aussi à gonfler les ballons de baudruche. Son application principale reste le travail en atmosphère inerte. Un grand champ d'application lui est réservé dans le domaine industriel et scientifique comme celui du refroidissement à des températures très basses notamment pour la supraconductivité, car il subsiste à l'état gazeux ou liquide. Comme il diffuse à travers les solides trois fois plus vite que l'air, l'hélium est utilisé pour détecter les fuites dans les équipements à ultravide ou les réservoirs à haute pression. Il est utilisé comme gaz pressurisant (Augmente artificiellement la pression) pour les carburants des fusées, dans le refroidissement de certains réacteurs nucléaires ou encore en chromatographie. Les lasers He-Ne ont diverses applications, en particulier les lecteurs de code-barres. L'hélium a également une grande application dans le domaine alimentaire et médicale ; Il est utilisé avec des produits alimentaires (additif alimentaire autorisé par l'Union européenne sous la référence E939) pour permettre une vérification de l'étanchéité de l'emballage. Il est utilisé comme fluide cryogénique (l'étude et la production des basses températures) pour les aimants de l'IRM [2, 3] (voir figure. I.2)

Sur Terre, l'hélium est formé par la radioactivité d'éléments plus lourds. Une fois en surface, l'hélium migre dans l'atmosphère avant de s'en échapper à peu près au même rythme qu'il apparaît en surface.



Figure.I.2 : Ballon dirigeable publicitaire personnalisé gonflable à l'hélium [2-4]



Figure .I.3: IRM gorge d'hélium [5]

Effet de l'hélium sur la santé :

L'hélium est en générale non-toxique, mais la substance peut avoir des *effets sur l'homme par exposition* dans le corps soit par inhalation (Hélium à l'état gazeux) ou par la peau (Hélium à l'état liquide).

La voix d'une personne qui a inhalé de l'hélium change temporairement et devient plus aigue. Ce n'est pas dangereux pour l'organisme en lui-même, mais il est important de comprendre que l'hélium prend la place de l'oxygène dans les poumons. Inhaler de l'hélium a des effets sur la santé parce qu'en remplaçant l'oxygène dans les poumons, On risque pratiquement de s'étouffer. En premier lieu, nous pouvons voir l'effet de la voix aiguë, si nous continuons à absorber l'hélium, nous remarquerons un certain mal de tête, des étourdissements.

En cas de continuation à inhaler l'hélium en grandes quantités ou pendant une période de temps significative, il finira par obtenir l'oxygène de nos poumons qui à la fin causera l'étouffement. Une courte période sans oxygène peut causer des lésions cérébrales

irréversibles, une période prolongée conduira à la mort. Par contact de la peau avec le liquide de l'hélium, il y'a un risque de gelure.

1.3.2 Le néon :

Le néon est un gaz noble léger. Il a pour symbole **Ne** et son numéro atomique est **10**. Nous le retrouvons classés dans le tableau périodique des éléments dans le groupe **18**. Second gaz rare dans le tableau périodique, le néon a donné son nom aux tubes néon et, par abus de langage, à une variété de tubes fluorescents. Cet élément est obtenu par distillation fractionnée de l'air liquide.

Origine du nom et découverte :

Le mot « Néon » vient du mot grec « Neos » qui signifie « nouveau ». Ce nom aurait été suggéré à son découvreur, **William Ramsay**, par son fils de treize ans qui lui aurait demandé le nom de ce « nouveau » gaz. Après la découverte de l'Argon, William Ramsay et son assistant **Morris Travers** soupçonnaient l'existence d'éléments de la même famille qui sont également inertes chimiquement et donc très difficiles à détecter. Il s'est alors servi du procédé Linde-Hampson de liquéfaction des gaz, récemment mis au point en 1895, pour liquéfier de l'air et lui fait subir une distillation qui lui permit de découvrir le Néon en 1898.

Abondance dans la nature :

Le néon est le quatrième élément par ordre d'importance dans l'univers. Sur terre, il est présent dans l'atmosphère à une concentration de 0,0018 % (18 ppm), 0.00007 ppm dans la croûte terrestre et 0.04 ppm dans les océans.

Structure électronique, configuration de l'état fondamental :

La configuration électronique de l'état fondamental est $(1s)^2(2s)^2(2p)^6$.

Propriétés atomiques et isotopes :

Il existe trois isotopes du néon : ^{20}Ne (90,48 %), ^{21}Ne (0,27 %), ^{22}Ne (9,25 %)

Propriétés physiques et chimiques :

- Cet élément stable est incolore, inodore, inerte et ininflammable
- Sa masse atomique égale à : 20,1797(6) u
- Sa température d'ébullition est égale à : -246,053 °C
- Sa température de fusion est égal à : -248.59 °C

- Sa masse volumique est égale à : 0.9002 g.L^{-1}
- Son degré d'oxydation est : 0 (Zéro).
- Le néon est le second gaz rare, il possède 40 fois la capacité de réfrigération de l'hélium liquide et trois fois celle de l'hydrogène liquide (à volume égal). Dans la plupart des applications, c'est un réfrigérant moins cher que l'hélium.
- À des tensions et des courants normaux, le néon a la décharge la plus intense de tous les gaz rares et prend une teinte rouge orangé.
- Il n'est par ailleurs présent qu'en très faible quantité dans l'air puisque sa faible densité (inférieure à celle du dioxygène et du diazote) le pousse à s'élever et à se perdre dans l'espace.

Les applications du néon :

Le néon a une grande importance industrielle à cause de sa grande diversité d'utilisation. Parmi les applications du Néon, la plus connue d'entre-elles est bien évidemment le système d'éclairage qui lui doit son nom : **le tube Néon**. (Voir figure. I.4)



Figure .I.4: Le tube de néon [6]

Le néon, de couleur orange rougeâtre, est beaucoup utilisé dans les enseignes publicitaires. Historiquement, la société Air Liquide a commencé à produire le Néon en grande quantité et c'est l'Ingénieur français Georges Claude qui a eu l'idée de remplir des tubes de gaz Néon, qui, sous l'effet d'une décharge électrique, continue émet une lumière rougeâtre. Il a mis en évidence cette propriété en décembre de l'année 1910 à l'occasion du Salon de l'Automobile où il a montré la capacité d'éclairage de ce gaz en installant des tubes de néon sur les colonnes du Grand Palais à Paris. Petit à petit, les tubes Néon ont commencé à être installés par des commerçants pour leurs enseignes publicitaires.

Voici quelques images des enseignes publicitaires (figure. I.5)



Figure. I. 5 : Utilisation du néon dans les enseignes lumineuses [7]

Remarque : par **abus de langage**, on a tendance à appeler « Néon » tous les tubes ou autres lampes qui se déclinent dans d'autres couleurs que le rouge. Or, quand la lampe est dans une autre couleur que le rouge, c'est tout simplement que le gaz utilisé n'est pas le Néon mais un autre gaz. Pour les usages domestiques, on a tendance à parler de « Néon », mais il s'agit en réalité plutôt de tubes fluorescents ou encore **tubes luminescents**.

Le néon est également beaucoup utilisé dans d'autres types de lampes telles que les lampes de signalisation. Ces dernières présentent l'avantage d'avoir une consommation très faible et une durée de vie très longue, soit la combinaison idéale pour de telles lampes.[8]

Il est aussi utilisé dans :

- ✓ les écrans de télévision dits "plasma" en mélange avec le xénon
- ✓ les lasers He-Ne
- ✓ les parafoudres
- ✓ télévision à tubes cathodiques
- ✓ réfrigérant cryogénique

Effets du néon sur la santé :

Le néon n'est pas un gaz toxique mais il s'agit d'un agent asphyxiant. Présent en trop grande concentration et en présence d'un taux trop réduit d'oxygène, il provoque une asphyxie dont les premiers symptômes produits sont de rapides respirations et un manque d'air. La vigilance mentale est diminuée et la coordination musculaire est altérée. Le jugement postérieur devient défectueux et toutes les sensations sont diminuées. L'instabilité émotionnelle

résulte souvent et la fatigue se produit rapidement. Pendant que l'asphyxie progresse, il peut y avoir nausée et vomissement et perte de conscience, et finalement convulsions, coma profond et la mort.

1.3.3. L'argon :

L'argon est le premier gaz rare découvert. Nous le retrouvons classés dans le tableau périodique des éléments dans le groupe 18. Il a pour symbole Ar et son numéro atomique est 18. Il a 3 couches électroniques et 8 électrons de valence. Il a 18 électrons au total.

Origine du nom et découverte :

L'argon doit son nom au grec *αργόν* (argos), qui signifie paresseux, inerte. La découverte de l'argon est due à deux savants britanniques, Sir William Ramsay et Lord Rayleigh, en 1894. C'est en cherchant la cause d'une différence de masse molaire entre l'azote atmosphérique obtenu par élimination de l'oxygène de l'air et l'azote obtenu par décomposition de composés azotés qu'ils ont découvert l'argon. Cette réalisation valut à Lord Rayleigh le prix Nobel de physique en 1904. Ramsay avec son équipe ont donc fait la théorie qu'il manque une colonne d'éléments chimique dans le tableau périodique de Mendeleïev.

Abondance dans la nature :

L'argon arrive au troisième rang des gaz les plus abondants dans l'atmosphère terrestre, après l'azote (78,09 %) et l'oxygène (20,95 %). Sa concentration (0,93 %) le rend plus de 27 fois plus abondant que le dioxyde de carbone (0,035 %), ce qui a permis sa première identification par Rayleigh.

Structure électronique, configuration de l'état fondamental :

La configuration électronique de l'état fondamental est $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6$

Propriétés atomiques et isotopes :

Il existe cinq isotopes de l'hélium :

^{36}Ar (0,336 %), ^{37}Ar (traces), ^{38}Ar (0,063 %), ^{39}Ar (traces), ^{40}Ar (99,6 %) dont 3 sont stables et ne sont pas radioactifs ; ^{36}Ar , ^{38}Ar , ^{40}Ar .

Propriétés physicochimiques :

- L'argon est un gaz inerte sans couleur, sans saveur ni odeur.
- Sa masse atomique est égale à : 39,948(1) u
- Son volume molaire est égale à : 1,784 g·L⁻¹
- Sa température de fusion est de -189.2 °C (84K) sous 1 atm.
- Sa température d'ébullition est égale à -185.89 °C d'où une présence majoritaire de cet élément sous forme de gaz
- Son degré d'oxydation est : 0
- Le liquide présente les mêmes particularités. Sa solubilité dans l'eau est environ 2,5 fois celle de l'azote.
- Très peu de composés chimiques incluant de l'argon sont connus. Le fluor hydrure d'argon HArF et le dication ArCF₂²⁺ ont été obtenus.
- Dans les décharges électriques, la couleur de la lumière émise sera bleue si le tube ne contient que de l'argon. On peut obtenir d'autres couleurs si l'on mélange l'argon avec un autre gaz noble comme le rouge.

Les applications d'argon

L'argon est employé comme atmosphère protectrice dans un grand nombre de procédés industriels, il peut remplacer l'azote dans une atmosphère contrôlée. L'argon sert à empêcher le contact, donc l'interaction, entre le métal liquide et l'atmosphère environnante. Il est employé dans l'éclairage, puisqu'il ne réagit pas avec le filament de l'ampoule, même à des températures élevées, et dans d'autres cas où l'azote diatomique est un gaz semi-inerte ou inerte peu approprié. L'argon peut aussi être utilisé en tant que bouclier de gaz inerte dans la soudure à l'arc électrique, en tant que couverture non-réactive dans la fabrication du titane et d'autres éléments réactifs et en tant qu'atmosphère protectrice pour le silicium croissant et les cristaux de germanium. L'Argon-39 a été employé pour un certain nombre d'applications, principalement le dénoyautage de glace [9]. Il a été également employé pour dater les eaux souterraines. L'argon est également employé dans la technique SCAPHANDRE plongeant pour les combinaisons étanches, dû à sa non-réactivité [10]. L'argon est utilisé comme gaz inerte dans la lame d'air des vitrages isolants à faible émission

Effet de l'argon sur la santé :

L'argon n'est pas un gaz toxique en soi. Toutefois, en quantités importantes, sa présence peut agir comme un agent asphyxiant. En effet, la substance peut être absorbée dans le corps par inhalation car ce liquide s'évapore très rapidement entraînant la sursaturation d'air. L'inhalation de concentrations excessives peut avoir comme conséquence des vertiges, nausées, vomissements, perte de conscience, et la mort. La mort peut résulter des erreurs dans le jugement, confusion, ou la perte de conscience des individus. Une concentration de 75% est mortelle en quelques minutes.

I.3.4 Le krypton :

Est un élément chimique qui appartient aux gaz rares appartenant à la colonne 18 du tableau périodique. Il a pour symbole Kr et porte le numéro **36** (numéro atomique) dans la classification périodique des éléments. C'est un gaz rare présent dans l'air, mais en très petite proportion. Il y a moins d'un milligramme de krypton par kilogramme d'air.

Origine du nom :

Le nom vient du grec " κρυπτός" (*kryptos*), qui signifie caché, car on a eu bien de la peine à le trouver dans l'air. Le krypton a été découvert en 1898 par Sir William Ramsay et Morris William Travers, sa découverte est consécutive à celle de l'argon. L'histoire de la découverte (avec Ne et Xe) est l'objet de la conférence Nobel de Ramsay (1904). Un régal de l'esprit.

Abondance dans la nature :

L'argon est présent dans l'atmosphère à une concentration de 0,0001 % (1.14 ppm), 0.00001 ppm dans la croûte terrestre et 0.0003 ppm dans les océans.

Structure électronique, configuration de l'état fondamental :

La configuration électronique de l'état fondamentale $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^2(4p)^6$

Propriétés atomiques et isotopes :

Il existe plusieurs isotopes naturels du krypton dont 5 stables: ^{80}Kr (2,25 %) , ^{82}Kr (11,6 %) , ^{83}Kr (11,5 %) , ^{84}Kr (**57 %**) , ^{86}Kr (17,3 %) et un quasi-stable : ^{78}Kr (0,35 %).

^{81}Kr est utilisé pour dater les eaux souterraines (50,000–800,000 ans).

Les composés :

Le krypton est le plus léger des gaz nobles pour lequel on a pu isoler au moins un composé covalent, en l'occurrence le difluorure de krypton KrF_2 , synthétisé pour la première fois en 1963 dans la foulée des travaux sur le xénon. D'autres composés, dans lesquels un atome de krypton est lié à un atome d'azote pour les uns et à un atome d'oxygène pour les autres, ont également été publiés, mais ils ne sont stables qu'en dessous de $-60\text{ }^\circ\text{C}$ pour les premiers et $-90\text{ }^\circ\text{C}$ pour les seconds

Propriétés physique et chimiques.

- Le krypton est incolore, inodore, ininflammable, pratiquement inerte chimiquement.
- Sa masse atomique : 83,798 u
- Sa température de fusion : $-157,36^\circ\text{C}$
- Sa température d'ébullition : $-153,34^\circ\text{C}$
- Sa Masse volumique : $3,733\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (273 K)
- En décharge électrique, il produit une couleur jaune-verte
- Le krypton est présent dans l'air à environ 1 ppm. L'atmosphère de Mars contient environ 0,3 ppm de krypton. Il est caractérisé par ses lignes spectrales vertes et orange brillantes
- .Le krypton est le plus léger des gaz nobles
- Le krypton est un gaz considéré assez cher

Les applications du krypton :

Le krypton, bien qu'assez cher, est utilisé dans divers domaines, mais ses applications sont limitées par son prix élevé, qui s'élève à environ 10 \$ le litre. Dans le commerce, il est employé comme gaz de remplissage pour les lampes fluorescentes à économie d'énergie qui ont à longue durée de vie car les lampes qui contiennent du krypton (voir figure.I.6) fonctionnent plus longtemps et garantissent une excellente luminosité. Le

krypton est utilisé également dans certaines lampes flash utilisées pour la photographie à grande vitesse. Il est utilisé dans certains lasers à excimère, tel que le laser KrF donnant une radiation ultraviolette (248 nm) [11]. Contrairement aux gaz plus légers de son groupe, il est suffisamment réactif pour former certains composés chimiques. Par exemple, le krypton réagira avec le fluor pour former du fluorure de krypton. Le fluorure de krypton est utilisé dans certains lasers.

Le krypton radioactif a été utilisé pendant la guerre froide pour estimer la production nucléaire soviétique. Le gaz étant un produit de tous les réacteurs nucléaires, la part de la Russie a été obtenue en soustrayant la quantité provenant des réacteurs occidentaux du total dans l'air. En architecture, ce gaz rare peut aider à augmenter l'isolation thermique d'une habitation. Il est employé pour l'isolation dans les doubles vitrages. C'est le meilleur isolateur, mais son coût implique l'utilisation de l'argon qui est plus abondant et moins cher. En effet le mélange de gaz utilisé a une concentration de 90% d'argon et 10% de krypton, ce qui lui permet de produire à coûts moindres et de rester dans la concurrence au niveau des prix. En médecine, une scintigraphie pulmonaire emploie du krypton 81 métastable. Inodore et inerte, le krypton est également utilisé comme anesthésique



Figure .I.6 : Lampe à décharge contenant du krypton [12].

Le krypton pour définir le mètre :

Une décharge électrique établie dans un tube rempli de krypton produit une lumière dont l'une des composantes orangées possède une longueur d'onde définie avec une précision à nulle autre pareille. On a utilisé cette longueur d'onde pour définir le mètre, entre 1960 et 1983. Avant 1960, le mètre était défini comme la distance séparant deux rainures faites aux extrémités d'une règle de platine-iridium déposée au Pavillon des Poids et Mesures de Sèvres

près de Paris. Mais il n'est pas possible de mesurer cette distance avec une précision supérieure à 10 microns. L'emploi de la radiation du krypton, et plus précisément de son isotope 86, permettait de définir le mètre avec une précision 1000 fois plus élevée. L'Union Internationale de Physique a donc choisi d'abandonner la référence au mètre étalon en 1960. Le mètre devenait la longueur équivalente à 1'650'763.73 fois la longueur d'onde de la raie orange du krypton-86. On a finalement abandonné cette nouvelle définition en 1983, pour se détacher de la référence à une matière quelconque. Le mètre est alors devenu le trajet parcouru par la lumière en 1/299'792'458 seconde.

Effet du krypton sur la santé :

Le krypton est considéré comme un gaz asphyxiant non toxique. L'inhalation d'un gaz contenant 50 % de krypton (en volume) et 50 % d'air pourrait causer une narcose (sommeil artificiel induit par un médicament). Néanmoins, ce mélange ne contenant que 10 % d'oxygène, la préoccupation principale serait plutôt le risque d'hypoxie (est une inadéquation entre les besoins tissulaires en oxygène et les apports. Elle peut être la conséquence de l'hypoxémie (diminution du taux d'oxygène dans le sang).

1.3.5. Le xénon :

Le xénon est un élément chimique qui appartient aux gaz rares appartenant à la colonne 18 du tableau périodique. Il a pour symbole Xe et porte le numéro **54** dans la classification périodique des éléments. Le xénon est le plus rare et le plus cher des gaz nobles

Origine du nom et découverte:

Le nom xénon vient du mot grec ξένος (*xenos*) qui signifie étranger. Il a été découvert le 12 juillet 1898 par William Ramsay et par Morris William Travers par analyse spectrale du gaz résiduel obtenu après avoir éliminé le dioxygène et le diazote de l'air.

Abondance dans la nature :

Le xénon est présent dans l'atmosphère à une concentration de $8,0 \cdot 10^{-6}$ % (0.086 ppm), 0.000002 ppm dans la croûte terrestre et 0.00004 ppm dans les océans.

Structure électronique, configuration de l'état fondamental :

La configuration électronique de l'état fondamental est :
 $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^2(4p)^6(4d)^{10}(4f)^{14}(5s)^2(5p)^6$.

Propriétés atomiques et isotopes :

Il existe neuf isotopes naturels de xénon :

^{124}Xe (0.10 %), ^{126}Xe (0.09 %), ^{128}Xe (1.91%), ^{129}Xe (26.4 %), ^{130}Xe (4.1 %), ^{131}Xe (21.2 %),
 ^{132}Xe (26.9 %), ^{134}Xe (10.4 %), ^{136}Xe (8.9 %).

Dont 7 isotopes stables (ou quasi stables) ^{132}Xe , ^{129}Xe , ^{131}Xe , ^{134}Xe , ^{130}Xe , ^{128}Xe .

Propriétés physique et chimiques :

- Le xénon est un gaz incolore et inodore.
- Sa masse volumique $5,887 \text{ g.L}^{-1}$ (gaz)
- Sa masse atomique 131,293 u
- Sa température de fusion : $-111.75 \text{ }^\circ\text{C}$
- Sa température d'ébullition : $-108.0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Dans une lampe à décharge, il émet une lumière bleue ou violette
- Cet élément présente un état métallique sous une pression au-delà de plusieurs giga pascals.
- Le xénon ne réagit qu'avec les oxydants très puissants (Cf. généralités du groupe).
- Gaz inerte, il est oxydé par des oxydants très puissants, de nombreux composés du xénon ont ainsi pu être synthétisés.

Les composés du xénon :

Le xénon forme quelques dizaines de composés avec d'autres atomes, probablement en raison de la forte polarisabilité de son cortège électronique, supérieure à celle du krypton (qui forme aussi quelques composés). On note ainsi la possibilité de fabriquer des fluorures, des oxydes ou encore des oxyfluorures de xénon, ainsi que d'autres composés non fluorés : difluorure de xénon XeF_2 , tétrafluorure de xénon XeF_4 , hexafluorure de xénon XeF_6 , perxénate de sodium $\text{Na}_4\text{XeO}_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (qui est un oxydant puissant), trioxyde de xénon XeO_3 (explosif), tétraoxyde de xénon XeO_4 , l'oxytétrafluorure de xénon XeOF_4 et le dioxydifluorure de xénon XeO_2F_2 [13,14].

Historique et application du xénon :

Au cours des années 1930, l'ingénieur Harold Edgerton a inventé un stroboscope au xénon, au sein duquel la lumière était générée par une décharge de courant très brève dans un tube rempli de xénon. En 1934, Edgerton était capable de générer des flashes d'une microseconde de durée grâce à cette technique[15]. En 1939, Albert R. Behnke Jr étudia les causes de l'ivresse des profondeurs chez les plongeurs en eaux profondes, amenés à respirer un air bien plus dense et à bien plus haute pression que l'air ambiant. En testant l'effet de changement de compositions de l'air contenu dans les bouteilles, il réalisa que l'organisme humain réagissait différemment selon la composition chimique du gaz inspiré à haute pression. Il en conclut que le xénon pourrait être utilisé en anesthésie. Bien qu'il semble que le Russe Lazharev ait étudié l'utilisation du xénon en anesthésie en 1941, les premiers travaux publiés confirmant l'effet du xénon datent de 1946 et concernent les expérimentations de J. H. Lawrence sur des souris. La première utilisation du xénon comme anesthésiant en chirurgie date de 1951, avec l'opération de deux patients par Stuart C. Cullen [16]

Actuellement, le xénon et ses dérivés sont utilisés pour de nombreuses applications de haute technologie. En optique, le xénon est fréquemment retrouvé dans les lampes à décharge puisqu'il permet de produire une lumière proche de celle du Soleil à midi. Les constructeurs automobiles emploient des lampes à xénon pour les phares de leurs voitures haut de gamme (Voir figure. I.7), elles leur conférant une lumière légèrement bleutée. Pendant plusieurs années les écrans à plasma ont été le leader dans le domaine d'écrans plats de grande taille. Dans ce type de dispositif, on utilise un mélange de xénon et de néon. Dans le domaine de l'aérospatial, la propulsion des satellites et des sondes spatiales s'effectue avec des moteurs ioniques au xénon. En électronique, le xénon et ses dérivés sont utilisés dans les lasers à excimère pour la lithographie à haute résolution [17]. En combinaison avec d'autres gaz réactifs, le xénon peut être aussi employé en gravure.

Les champs d'application du xénon ne s'arrêtent pas là mais s'étendent à la médecine puisqu'il est employé en imagerie médicale. Depuis le début des années 2000, le Xénon est également utilisé pour le préconditionnement des patients en réanimation, en cardiologie (conditionnement préchirurgical) et en neurologie (neurochirurgie) notamment, du fait de ses propriétés de protection des tissus contre les lésions dégénératives. Le xénon agit sur le corps humain en tant qu'agent anesthésique et protecteur d'organes. Récemment, il a été découvert que le xénon a été utilisé comme agent d'amélioration des performances dans les compétitions sportives internationales telles que les Jeux olympiques de Sotchi. Quelques études récentes

étudient si le xénon serait un des nouveaux produits dopants, entretenant l'avance des méthodes de dopage sur celles de détection.[18] Par conséquent, des méthodes de dépistage visant à détecter l'utilisation abusive du xénon par l'analyse d'échantillons biologiques et à surveiller la cinétique et l'efficacité de l'anesthésie sont à l'étude [19]



Figure. I.7 : Phare à décharge au xénon. [20]

Effets du xénon sur la santé :

Inhalation: Ce gaz est inerte et est classifié comme agent asphyxiant simple. L'inhalation dans des concentrations excessives peut avoir comme conséquence vertige, nausée, vomissement, perte de conscience, et mort.

Utilisé comme anesthésique, ce gaz est atoxique pour les patients et le personnel. Le xénon est également un gaz écologique ; il ne pollue pas et son utilisation n'a aucune incidence sur l'effet de serre.

1.3.6. Le radon :

Le radon est un élément chimique qui appartient aux gazes rares appartenant à la colonne 18 du tableau périodique. Il a pour symbole Rn et porte le numéro **86** dans la classification périodique des éléments. Le radon est un gaz noble radioactif naturel qui provient de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. Il est présent partout à la surface de la planète et provient surtout des roches granitiques et volcaniques ainsi que de certains matériaux de construction

Origine du nom et découverte :

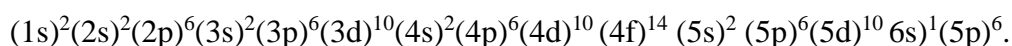
La découverte du radon a été initiée en 1899 par les travaux de plusieurs chercheurs dont Robert Bowie Owens et Ernest Rutherford qui le nomment « *emanation* » (du latin *emanare*, émaner, et *emanatio*, expiration), et plus tard, *emanation de thorium*. Mais la découverte réelle du radon est attribuée à Friedrich Ernst Dorn en 1900, qui le nomme « *emanation de radium* », ignorant à l'époque qu'il s'agit d'un nouvel élément gazeux émis par le radium. Ce n'est qu'en 1908 que William Ramsay et Robert Whytlaw-Gray isolent ce qu'ils appellent niton. De nombreux autres noms (thoron, actinon, émanation,...) furent attribués à cet élément, selon l'élément ou du minerai qui l'émettait. C'est en 1923 que le sixième élément de la famille des gaz rares prit le nom de radon, tout simplement parce que l'isotope le plus stable provient de la désintégration nucléaire du radium.

Abondance dans la nature :

Tous les isotopes du radon sont issus de réactions de désintégrations nucléaires. De plus ils subissent eux-mêmes des transformations nucléaires. Il est donc difficile d'en déterminer l'abondance dans la nature.

Structure électronique, configuration de l'état fondamental

La configuration électronique de l'état fondamental est :

**Propriétés atomiques et isotopes :**

Il existe 34 isotopes de radon connus jusqu'à ce jour. Seuls 3 de ces isotopes se rencontrent dans la nature :

^{222}Rn - 100 % - demi vie : 3,824 j. émetteur « alpha ».

^{220}Rn - - demi vie : 55,6 s. émetteur « alpha ».

^{219}Rn - - demi vie : 3,96 s. émetteur « alpha ».

Propriétés physique et chimiques :

- Le radon est radioactif
- Sa masse volumique : $9,73 \text{ kg/m}^3$
- Sa température de fusion : $-71 \text{ }^\circ\text{C}$
- Sa température d'ébullition : $-61,7 \text{ }^\circ\text{C}$

- Sa masse atomique : 222 u
- Le radon est le gaz plus lourd (le plus *dense*) des gazes rares ; Il est l'une des substances les plus lourdes qui puissent demeurer gazeuses aux conditions normales de températures et de pression.
- Le radon peut s'infiltrer dans votre maison sans que vous puissiez vous en apercevoir.
- Dans les conditions normales de température et de pression, le radon est un gaz monoatomique d'une masse volumique de : 9,73 kg/m³.
- À température et pression standard, le radon est incolore, mais lorsque la température est abaissée en dessous de son point de congélation (202 K ; -71 °C), il devient phosphorescent puis jaune si la température baisse encore et finalement rouge-orangé aux températures de l'air liquide (< -180 °C). Quand il est dans un état condensé, le radon paraît également lumineux, à cause de l'intensité des radiations qu'il dégage. Il est dit « autofluorescent ».

Applications du radon:

De sa nature radioactive, le radon a plusieurs applications ; Il est principalement utilisé dans le traitement de tumeurs cancéreuses comme source de rayonnement, avec certains avantages par rapport au radium. Il est également utilisé comme traceur radioactif pour repérer les poireaux et pour la mesure des fluides. Il est donc utilisé dans les recherches hydrologiques d'interactions entre l'eau du sol, des ruisseaux et des rivières : Tout changement significatif dans la concentration en radon dans un ruisseau ou une rivière est un indice d'apport local d'eau souterraine, ou pour évaluer le degré d'aération de galeries de mines, de caves, de logements, ou l'évaluation de fuites à partir d'un réservoir souterrain. De même, la climatologie l'utilise pour étudier la circulation atmosphérique : suivant la quantité mesurée, on détermine l'origine continentale (riche en radon) ou océanique (pauvre en radon) d'une masse d'air. Le temps de transit de cette masse d'air au-dessus d'un continent va également jouer sur les concentrations de cet élément. Les éruptions volcaniques peuvent être extrêmement meurtrières. C'est pourquoi il peut être intéressant de les prévoir afin de mettre en sécurité les populations aux alentours.

Effet du radon sur la santé :

Le radon est présent naturellement dans l'environnement principalement en phase gazeuse. Par conséquent, les gens y sont principalement exposés en respirant l'air. Le niveau de radon dans l'air en extérieur est généralement assez faible, mais dans les lieux intérieurs le niveau peut être plus élevé. Dans les maisons, les écoles, et les immeubles, les niveaux de radon sont plus élevés car le radon, que l'on trouve essentiellement dans les sols et les roches, peut pénétrer dans l'immeuble par les fissures dans les fondations et les sous-sols, par les joints...

Certains puits profonds qui nous alimentent en eau potable peuvent aussi contenir du radon. Donc certaines personnes peuvent être exposées au radon par l'intermédiaire de l'eau potable.

Les niveaux de radon dans les eaux souterraines sont plutôt élevés mais, en général, le radon est assez vite libéré dans l'air dès que ces eaux rejoignent les eaux de surfaces. Respirer des concentrations importantes de radon provoque des maladies des poumons. Une exposition à long terme pourrait même augmenter les risques de développer un cancer (mais ceci après plusieurs années d'exposition). Le radon peut être radioactif, mais il dégage peu de radiation gamma réelle. Par conséquent, il est peu probable d'être confronté à des effets nocifs des radiations du radon s'il n'y a pas de réel contact avec les composés du radon. On ne sait pas si le radon peut être nocif pour d'autres organes que les poumons. Les effets du radon présent dans la nourriture ou dans l'eau potable ne sont pas connus [20]

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les gaz rares ou on a vu certains caractéristiques communes entre eux puis nous avons regardé de près chacun des gaz avec son histoire et ses propriétés physiques et chimiques qui lui distingue des autres gaz ensuite on a trouvé dans la littérature que les gaz rares ont divers applications dans les différents domaines ; l'industrie, la médecine même dans la vie quotidienne en effet les gaz rares influence sur la santé, nous les avons donc passé en vu.

Chapitre II :

Le milieu plasma :

***Aspect physique et approche
numérique***

II.1. Introduction :

Nous avons vu dans le chapitre précédent les différentes applications des gaz rares aussi bien dans l'industrie que dans la vie quotidienne comme l'éclairage, les lasers, les téléviseurs, la médecine et bien d'autres. Ces gaz sont connus par l'émission de lumière ultraviolette induite par les différentes particules existantes. Cette émission étant le fruit des processus que font ces particules dans le gaz lors de leur mouvement, et cela sous l'effet d'une tension appliquée. Dans ce cas ces gaz rares acquièrent certaines propriétés et caractéristiques qui leur confèrent le nom de plasma de décharge.

Il existe différents plasmas ; naturels et artificiels. Ces derniers peuvent être créés par l'homme par différentes méthodes dont le calquage électrique. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à ce type de plasma. Dans ce chapitre, nous présenterons ce qu'est un plasma et les particules qui peuvent y exister de décharge, la méthode de sa production ainsi que les processus et les mécanismes de réactions faites par ces particules lors de leur déplacement. Ensuite, nous allons décrire les modèles qui peuvent nous aider à comprendre et interpréter ces mécanismes. Nous allons par la suite définir les paramètres nécessaires pour ces modèles.

II.2. Le plasma :

Le plasma est désigné comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz. Le terme de « Plasma » (du grec « matière informe ») a été utilisé en physique pour la première fois par le physicien américain Irving Langmuir en 1928 par analogie avec le plasma sanguin auquel ce phénomène s'apparente visuellement. Ainsi, un plasma est défini comme étant analogue à un gaz mais constitué de particules chargées, d'ions et d'électrons telle que cet ensemble soit globalement électriquement neutre. On peut également dire que les plasmas sont des milieux réactifs dans lesquels on trouve des espèces chimiques neutres (atomes et molécules) et chargées (ions et électrons).

On distingue deux types de plasma :

Plasma naturels : De façon plus générale, la physique des plasmas joue un rôle très important en astrophysique puisque l'on estime que près de 99 % de l'univers est constitué par de la matière à l'état plasma. On les trouve dans les étoiles, les nébuleuses, les queues des comètes et l'ionosphère.

Plasma artificiels ou de laboratoire : Les plasmas peuvent être produits par la focalisation de faisceaux laser, par des ondes de choc, par des flammes éventuellement dopées avec des matériaux facilement ionisables ou la fusion nucléaire. Ils peuvent être générés aussi en faisant passer un courant électrique à travers un gaz. Ces plasmas ont toujours suscité un vif intérêt en vue des différentes applications où il est utilisé. Nous nous intéressons dans ce travail au plasma créé dans une décharge électrique.

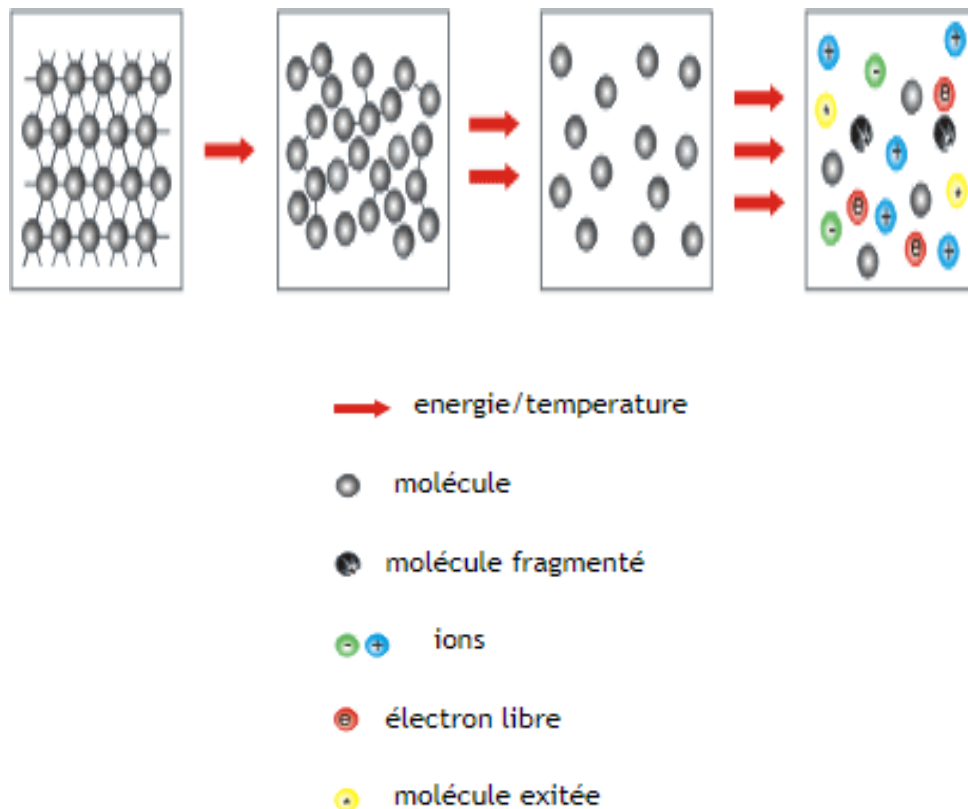


Figure .II.1: L'état plasma

II.3.Particules existantes :

II.3 .1. L'électron : est une particule de matière douée d'une masse ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) et chargée négativement (avec une valeur $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Il est l'un des composants des atomes avec les noyaux constitués de protons et de neutrons. À ce titre il est responsable des propriétés physiques et chimiques des gaz, liquides et solides (conductivité électrique, magnétisme, émission et absorption de la lumière, liaisons chimiques) et même du quatrième état de la matière, le plasma. Jusqu'à preuve du contraire, c'est une particule

élémentaire au même titre que les quarks qui composent les neutrons et les protons. On le note : « e »

II.3 .2. L'atome:

L'atome est élément électriquement neutre composée :

- D'un noyau atomique, lui-même constitué de protons et de neutrons et concentrant pratiquement toute la masse de l'atome.
- Des électrons qui gravitent autour du noyau.
- Plus lourd que l'électron, il a une vitesse initiale que l'on peut considérer comme nulle par rapport à celle des électrons

II.3 .3. L'électron dans l'atome :

Au sein de l'atome, les électrons gravitent autour du noyau et forment ce que l'on appelle le *cortège électronique*. Ils se répartissent dans des couches (notées K, L, M, N,O,P,Q) de plus en plus éloignées du noyau, correspondant à des niveaux d'énergie de plus en plus élevés. Chaque couche admet un nombre maximum d'électron (sur K c'est 2; sur L c'est 8 ...). C'est la structure électronique de l'atome, et elle a une influence considérable sur ses propriétés chimiques. Le nombre d'électrons de la dernière couche électronique occupée, appelés les électrons de valence, détermine les propriétés chimiques de l'atome.

II.3 .4. L'atome neutre à l'état fondamental : est un atome électriquement neutre où la charge négative des électrons compense la charge électrique positive portée par les protons du noyau. Par conséquent le nombre d'électrons d'un atome correspond aussi au nombre de protons, indiqué par le numéro atomique Z de l'atome. On le note (A)

Les atomes ont une structure interne, ils peuvent ainsi avoir des états d'énergie différents.

II.3 .5. L'atome neutre à l'état excité : L'état excité est l'état de l'atome dont l'énergie est supérieure à celle de l'état fondamental. Cet état est instable, c'est-à-dire que sa durée d'existence est très brève : l'atome excité revient dans l'état stable d'énergie la plus basse. Il existe différents types comme les états métastables, résonants, notés (A*) ou les niveaux supérieurs notés (A**).

II.3 .6. L'ion : est un atome où le nombre d'électrons est différent de celui des protons. On note qu'il existe deux types d'ions :

Les ions positifs : où l'atome a perdu un ou plusieurs électrons. Certains ions sont simplement ionisés (perte d'un électron sur la couche externe), notés A^+ , doublement ionisés (perte de deux électrons), A^{2+} , et les ions moléculaires, A_2^+ , qui jouent un rôle important dans les plasmas composés de gaz rares.

Les ions négatifs : où l'atome a gagné un ou plusieurs électrons. Ils sont notés (A^-). Dans le cas des gaz rares, ces ions ne figurent pas dans le bilan des espèces.

II.4. Génération d'un plasma :

Les gaz à température ambiante sont des excellents isolants, il convient de générer un nombre suffisant de porteurs de charge pour rendre le gaz conducteur, plasma. Cela est connu sous le nom de phénomène de **claquage électrique**. Il existe différentes façons de produire un plasma [21–24] selon le type de plasma voulu. On présente dans ce chapitre deux apports énergétiques à fournir à un gaz pour produire un plasma froid, utilisé dans les applications industrielles et quotidiennes. Il s'agit ici de présenter succinctement les phénomènes physiques en jeu lors de la production d'un plasma.

- A température ambiante, les gaz sont pratiquement non ionisés, en élevant la température du gaz, on apporte à certaines molécules une énergie d'agitation thermique suffisante pour que, sous l'effet des collisions, des électrons soient arrachés de certaines molécules. Il est donc possible de produire un plasma en chauffant suffisamment un gaz. Il faut cependant atteindre des températures très élevées pour que les molécules puissent s'ioniser mutuellement lors des collisions. Il s'agit ici du cas des *plasmas froids thermiques* où la température de chaque espèce est la même.

- On peut produire un plasma à température ambiante en appliquant un champ électrique au milieu, ce dernier accélère les électrons libres à des énergies suffisantes pour qu'ils puissent, par collisions, ioniser les molécules. Un phénomène d'avalanche électronique peut se produire (si le champ est suffisamment élevé) conduisant à une décharge électrique et à la formation d'un plasma. Il s'agit ici du cas qui nous intéresse des *plasmas froids hors équilibre thermodynamique* où la température électronique, T_e , est supérieure à la température des autres espèces.

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. Les particules qui existent ; électrons, ions et atomes, sont alors en mouvement. Lors de leur déplacement, ils vont entrer en collision avec

d'autres particules et vont générer de nouvelles. Nous allons alors définir les réactions les plus importantes qui peuvent exister dans un plasma soumis à une différence de potentiel. Mais avant cela définissons ce qu'une décharge électrique.

II.5. Décharge électrique :

Le terme de décharge électrique s'applique à tout mécanisme de passage de courant dans un gaz. Autrement dit, c'est l'ensemble des phénomènes qui accompagnent le passage d'un courant électrique dans un milieu gazeux. Les plasmas de décharges réalisés au laboratoire et utilisés pour des applications technologiques sont des milieux faiblement ionisés contenant des électrons libres, des ions positifs et éventuellement des ions négatifs. Selon les valeurs de températures et/ou de degré d'ionisation ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques et les plasmas non thermiques hors équilibre. Selon les techniques utilisées pour les générer, la pression appliquée et la géométrie des électrodes, les plasmas hors équilibre se présentent sous différentes formes telles que la décharge luminescente, couronne ou encore les décharges à barrière diélectrique (DBD)

On distingue plusieurs types de décharges électriques autonomes générées par une tension continue à faible pression et courant faible ; cette méthode reste la plus classique pour réaliser une décharge. On observe dans les tubes à gaz une colonne neutre uniforme lumineuse diffuse constituée d'un plasma froid occupant le volume total du tube sauf au voisinage des électrodes, on parle alors de décharge lumineuse ; et pour une pression plus importante proche de la pression atmosphérique et une intensité importante de l'ordre de l'ampère, on obtient une décharge d'arc ou (arc électrique) à partir d'une tension modérée d'une dizaine de volts. Les décharges dans les gaz sont dues à l'apparition d'électrons et d'ions libres.

II.6. Interactions entre les particules dans une décharge :

Soumises à un champ électrique, les particules chargées vont entrer en collision avec les espèces environnantes. On distingue alors différentes collisions ; élastiques et inélastique (ionisation, excitation,...). Chacune d'elles peut être caractérisée par plusieurs propriétés dont la création ou disparition d'une ou plusieurs particules et l'énergie transmise, on parle de gain ou perte d'énergie.

II.6.1. Les collisions élastiques :

Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. Globalement, l'énergie cinétique du système reste inchangée. Ces collisions ne modifient pas l'énergie interne des particules en question, mais sont responsables des phénomènes thermiques (conduction et diffusion de chaleur au sein du gaz).

II.6.2. L'ionisation :

Est définie comme le processus physique qui entraîne soit l'addition d'un ou plusieurs électrons au nuage électronique de l'atome ou l'élimination d'un ou plusieurs électrons de ce même nuage électronique de l'atome. Dans ce processus, l'interaction est assez intense, le transfert d'énergie peut être suffisant pour arracher un électron de l'atome cible. Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur qu'on appelle plasma.

L'ionisation d'un atome peut se faire par deux méthodes :

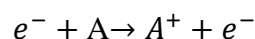
* *par impact électronique* : où un électron entre en collision avec l'atome et lui arrache un électron

* *par impact des photons* : où c'est un photon qui apporte l'énergie à l'atome.

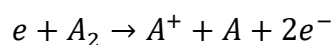
Nous nous intéressons dans ce travail à l'ionisation par impact électronique.

L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive est connue sous le nom « d'avalanche électronique ».

La réaction d'ionisation de l'atome A s'écrit :



La réaction d'ionisation dissociative s'écrit comme :



Ce phénomène est généralement caractérisé par deux paramètres que nous allons décrire; l'énergie seuil d'ionisation et le coefficient d'ionisation α , qui est une fonction du Champ électrique réduit (E/P).

Le coefficient d'ionisation sera décrit dans la partie (II.10.3) Puisqu'il sera un des paramètres calculés dans notre travail

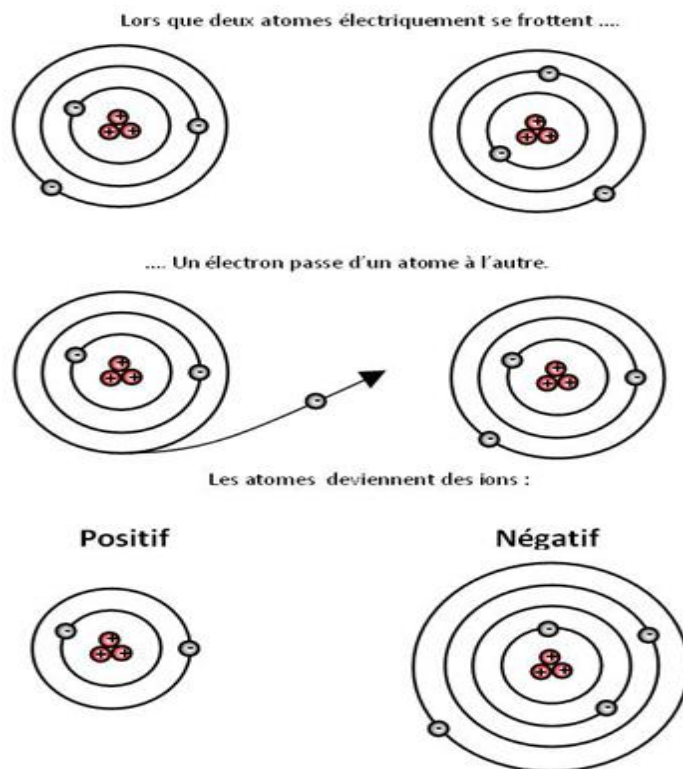


Figure. II.2 : Le processus d'ionisation [25]

❖ L'énergie d'ionisation :

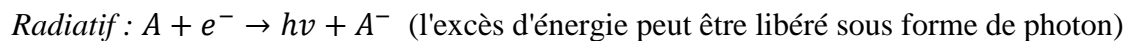
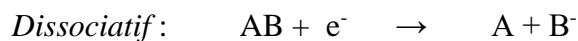
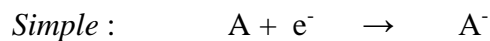
L'énergie d'ionisation d'un atome ou d'une molécule est l'énergie qu'il faut fournir à un atome neutre pour arracher un électron (le moins lié) à l'état gazeux et former un ion positif. Plus généralement, la $n^{\text{ième}}$ énergie d'ionisation est l'énergie requise pour arracher le $n^{\text{ième}}$ électron après que les $n - 1$ premiers électrons aient été arrachés. Elle s'exprime en eV ou en Joule ou en *kiloJoule/mole* (kJ/mole)

L'énergie d'ionisation varie en fonction de l'atome ou de la molécule considérée, ainsi que de son état d'ionisation. Le tableau (II.1) résume l'énergie seuil de chacun des gaz rares considérés dans notre travail.

Le gaz rares	L'énergie d'ionisation (eV)
He	24.6
Ne	21.6
Ar	15.8
Kr	14.0
Xe	12.0

Tableau (II.1) : Energie du seuil d'ionisation des gaz rares

L'attachement : Ce processus correspond à la capture d'un électron par une particule neutre, ce qui conduit à la création d'un ion négatif. L'attachement peut être :

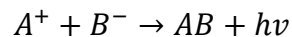
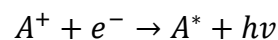
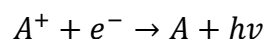


II.6.3. La dé-ionisation :

Ce phénomène se produit lorsqu'un ion perd son ou ses électrons, et ceci soit par :

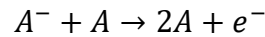
Recombinaison : la recombinaison est le phénomène d'attachement de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron (négatif) ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent.

Les réactions peuvent être comme suit :



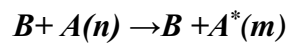
Détachement : contrairement à l'attachement, c'est le phénomène qui se produit lorsqu'un ion perd son électron supplémentaire ; soit par collisions avec molécules, ou par détachement associatif ou collisionnel, ou par photo-détachement (par absorption de radiations) ou par recombinaison des ions atomiques positifs et négatifs pour former une molécule diatomique neutre par collision à trois corps avec des électrons.

Le détachement par collision avec un neutre peut être décrit de la forme:



II.6.4. L'excitation :

On appelle **excitation** tout phénomène qui sort un système de son état de repos pour l'amener à un état d'énergie supérieure. En effet, lorsqu'un atome, à la suite d'un apport extérieur, a acquis suffisamment d'énergie pour qu'un des électrons passe à un niveau (*orbital*) d'énergie plus élevé, l'atome passe alors de son état fondamental à un état excité.



Avec : n : le niveau initial, m : le niveau final, B : la particule incidente, A : la particule cible dans l'état d'énergie inférieur (E_n) qui n'est pas nécessairement l'état fondamental, A^* : la particule excité dans l'état d'énergie (E_m).

Il faut noter que des états excités peuvent être également formés par d'autres réactions que nous ne citons pas dans ce paragraphe.

L'énergie d'excitation : est l'énergie nécessaire pour qu'un noyau, un atome, une molécule,... passe de son état fondamental à un état excité donné.

Dans le tableau (II.2) sont données les énergies seuil d'excitation des gaz rares considérés dans ce travail.

Gaz et états excités	Energie du seuil (eV)
He : He -> He*	19.80
Ar : Ar -> Ar*	11.50
Ne : Ne ->Ne (3P2)	16.62
Ne :Ne -> Ne(3P1)	16.67
Ne ->Ne (1P1)	16.84
Ne ->Ne (2P)	18.72
Ne ->Ne (2S+3D)	20.00
Ne ->Ne (3P)	20.65
Xe ->Xe (1s5)	8.310
Xe ->Xe (1s4)	8.440
Xe ->Xe (1s3-1s2-2p)	9.690
Xe ->Xe (2s-3d)	10.00
Xe ->Xe (2p-)	12.12
Xe ->Xe (11.7eV)	11.70
Kr -> Kr	9.915
Kr ->Kr (b10.033eV)	10.03
Kr ->Kr (c10.563eV)	10.56
Kr ->Kr (10.644eV)	10.64
Kr -> Kr	11.30

Tableau .II.2 : Les énergies seuil d'excitation pour différents gaz.

Ces atomes excités qui présentent des électrons à des niveaux d'énergie supérieurs retournent spontanément à leur état fondamental lorsqu'ils ne sont pas impliqués dans des réactions chimiques, ce qu'on appelle désexcitation.

II.6.5. La désexcitation : un atome dans un niveau supérieur peut se désexciter spontanément vers le niveau fondamental, libérant un photon $h E$. Elle est donc à l'origine de la luminosité des décharges plasma.

A cette liste, il faut ajouter d'autres processus de collision que font les ions et les neutres que nous n'avons pas mentionné dans ce chapitre.

Les probabilités des divers types de collisions électron - molécule sont fonctions de l'énergie de ces derniers. Elles ont été déterminées expérimentalement pour un certain nombre de gaz. Elles sont traduites en termes de sections efficaces d'ionisation, de dissociation, d'attachement.

II.7. La diffusion:

Dans les décharges électriques, quand il y a une concentration non uniforme d'ions, il y'aura déplacement des ions des régions à concentration élevée vers les régions à faible concentration afin d'uniformiser sa répartition. Ce processus qui est appelé diffusion, est relativement faible à pression élevée pour laquelle la recombinaison est particulièrement importante.

II.8. L'émission de lumière spontanée :

L'état excité étant instable, pour se désexciter, l'électron libère spontanément son excès d'énergie sous forme de photon. Chaque gaz peut émettre un photon propre à lui qui le distingue des autres gaz. Nous allons voir dans le prochain paragraphe c'est quoi un photon, un rayonnement de lumière et surtout ce qu'est une lumière ultraviolette qui est caractérisée les décharges à plasma.

II.8.1. Le rayonnement électromagnétique :

Correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Il est l'une des nombreuses formes sous lesquelles l'énergie se propage dans l'espace.

II.8.2. Le spectre de la lumière :

Le spectre de la lumière est l'ensemble des rayonnements électromagnétiques classés par fréquence, longueur d'onde ou énergie. Le spectre électromagnétique s'étend théoriquement de zéro à l'infini en fréquence (ou en longueur d'onde), de façon continue. Pour des raisons tant historiques que physiques, on le divise en plusieurs grandes classes de rayonnement, qui s'étudient par des moyens particuliers à chacune d'entre elles.

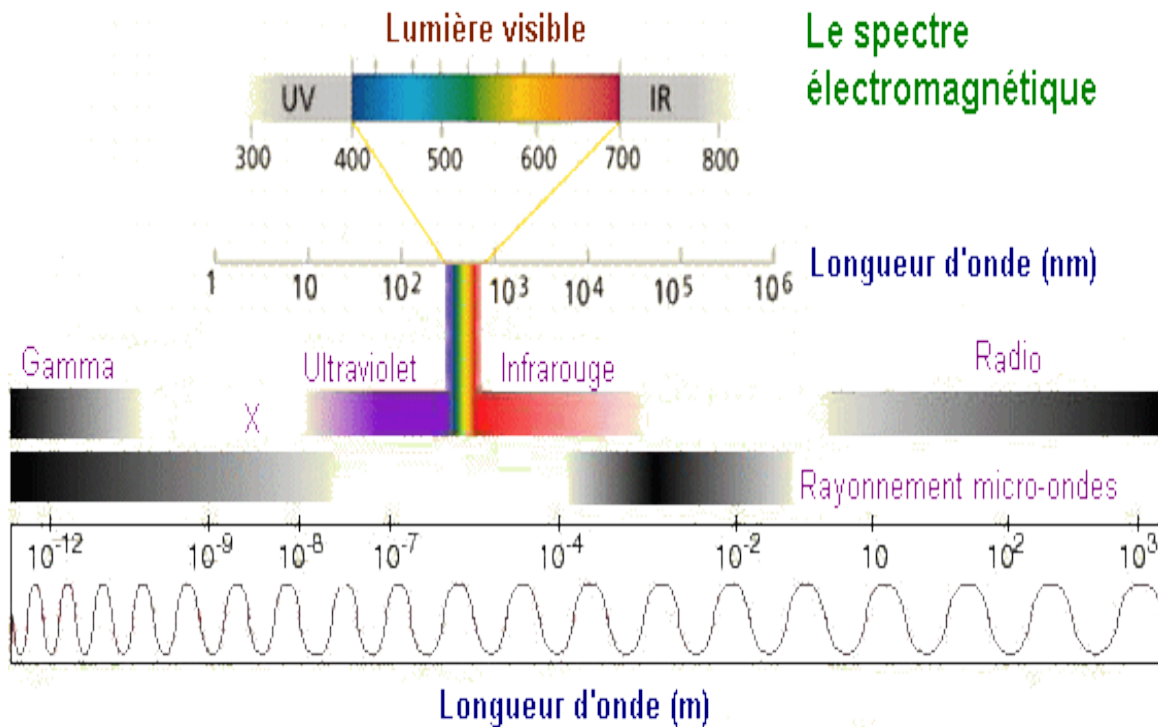


Figure. II.3 : Le spectre électromagnétique [26].

Le spectre électromagnétique est un ensemble de rayonnement étant couramment divisé en plusieurs parties ou domaines. Ces domaines vont du rayonnement gamma ; défini par des énergies et des fréquences très élevées, au rayonnement radio, qui correspond à des énergies transportées par chacun de ses photons très faibles. La lumière visible, encadrée par le rayonnement ultraviolet (UV) et l'infrarouge (IR) correspond pour sa part à un domaine intermédiaire du spectre. Dans ce travail, nous nous intéressons aux rayonnements ultraviolets car les gaz rares émettent dans cet intervalle.

II.8.3. Le rayonnement UV :

Le rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde inférieure (haute fréquence) à celle de la lumière visible est appelé rayonnement ultra violet (abréviation : UV). Ce nom souligne un rayonnement «de l'autre côté du violet». La gamme des UV s'étend de la lumière visible jusqu'aux rayons X, lesquels commencent avec une longueur d'onde d'environ 4 nm.

Il est une partie intégrante du rayonnement solaire, cependant les longueurs d'ondes courtes inférieures à 280 nm n'atteignent pas la surface de la terre, mais sont absorbées dans la haute atmosphère. Un rayonnement UV est également émis par les ions qui se recombinent avec des électrons libres pour former des atomes neutres. Ceci est l'origine du rayonnement

UV dans un plasma. Cette radiation UV du plasma induit la formation de radicaux. Ces radicaux, réactifs, sont indispensables à tous les processus plasma techniques telles que le nettoyage plasma, l'activation plasma, la gravure plasma et revêtement plasma.

Les gaz rares émettent des rayons UV différents, cette diversité de l'émission ouvre un large champ d'applications selon la nécessité d'utilisation. Le tableau II.3 montre le rayonnement UV émis par les gaz rares pur et par les mélanges gaz rares-halogènes.

Gaz rares			He	Ne	Ar	Kr	Xe
			74nm	84nm	126nm	146nm	172nm
Halogènes	F	157 nm		108 nm	193nm	248nm	354nm
	Cl	259nm			175nm	222nm	308nm

Tableau .II.3 : Longueurs d'onde maximales émises par les gaz rares pur et en mélange avec les halogènes

Nous avons décrit le plasma et les différents processus qui peuvent se produire lors de l'application d'un champ électrique pour obtenir une décharge plasma. La compréhension de des phénomènes qui existent dans ces décharges dans le but d'optimiser leur fonctionnement peut se faire expérimentalement, chose qui est coûteuse. Une alternative est la simulation et/ou la modélisation qui fera l'objet du prochain chapitre

II.9. Modèles pour l'étude des plasmas :

La modélisation semble un outil efficace afin d'étudier les décharges à plasma avec moindre coût contrairement à l'expérience [27,28] qui coute assez cher. Différents modèles ont été développés à l'échelle microscopique ou macroscopique. Nous décrivons dans cette partie le modèle fluide, modèle particulaire ou pic et le modèle hybride.

II.9.1. Le modèle fluide :

Le modèle fluide décrit le plasma en se basant sur la densité, la vitesse moyenne et l'énergie moyenne des espèces. Les valeurs de ces quantités macroscopiques sont obtenues en résolvant les équations de continuité, de flux et de l'énergie pour chaque espèce dans le plasma. Ces équations fluides sont obtenues en prenant les moments de vitesse de l'équation de Boltzmann. Les équations de Maxwell (ou de Poisson) sont couplées avec les équations fluide pour obtenir l'auto-cohérence des champs électriques électromagnétiques. L'approximation majeure faite dans les modèles fluides est l'hypothèse d'une vitesse spécifique de distribution basée sur la valeur locale du champ électrique.

Des modèles fluides sont largement utilisés en raison de leur avantage en vitesse de calcul. Les simulations à deux et trois dimensions du fluide peuvent être réalisées en un temps raisonnablement court. Le modèle fluide décrit le transport des ions en ne considérant que les deux premiers moments de l'équation de Boltzmann, ce qui correspond à la continuité et aux équations de transport d'ions. [29-32]

II.9.2. Le modèle particulaire (Particle In Cell, PIC) :

Les simulations PIC profitent du comportement collectif des particules chargées dans les plasmas pour modéliser la cinétique de diverses espèces en simulant un nombre réduit de particules numériques (aussi appelé super - particules ou macro particules). Etant donné que les super - particules sont suivies en résolvant les équations fondamentales (équation de Newton – Lorentz pour le mouvement des particules chargées couplé avec les équations Maxwell pour le calcul auto- cohérent des champs électriques et magnétiques) sans faire aucune hypothèse sur leur distribution de la vitesse, la cinétique de chaque espèce est simulée avec très peu d'approximations. En règle générale, les électrons et les ions sont simulés. Les neutres sont supposés être uniformément répartis dans l'espace.

La méthode **PIC-MCC** (**P**article-**I**n-**C**ell**M**onte-**C**arlo **C**ollision) est un outil très performant et efficace pour l'étude des plasmas car il permet de décrire l'évolution dans le

temps et dans l'espace, des particules chargées sous l'effet des champs et des collisions. Dans un cas purement électrostatique, la méthode consiste à suivre les trajectoires d'un nombre représentatif de particules chargées, des électrons et des ions, dans l'espace des phases, et de décrire l'interaction collective de ces particules par la résolution de l'équation de Poisson. Les modèles particuliers nécessitent de plus la connaissance de nombreuses données de base, en particulier les sections efficaces de collisions [33-36].

II.9 .3. Le modèle hybride :

Les modèles hybrides sont une combinaison de modèles fluide et PIC. L'idée des modèles hybrides est d'obtenir un modèle qui surpasse les deux modèles fluides et PIC en combinant la vitesse rapide de la simulation fluide et la cinétique des particules précises des modèles PIC. Le résultat final est que les codes hybrides sont plus rapides que les codes PIC et plus lents que les codes fluides, de plus ils décrivent certaines cinétiques plus précisément que les modèles fluides.

Une des étapes cruciales dans l'application de codes hybride est la communication entre le fluide et les particules. Les exigences sur le Pas en temps sont en général très différentes que dans les simulations fluides et particulières. C'est le même problème confronté lorsque la physique se produisant à différentes échelles de temps est incluse dans le même modèle.

Une approche pour résoudre cette difficulté est d'utiliser le pas en temps le plus petit requis pour l'un des deux. Cette approche prend en compte le comportement transitoire du plasma même si un long temps de simulation est nécessaire. Le but du modèle hybride est de combiner les avantages des modèles microscopique et fluide [37-40]

Dans la description fluide nous avons besoin de l'énergie moyenne, la mobilité des charges, le coefficient de diffusion, la fréquence des collisions, les taux de réactions, le coefficient de Townsend. Tandis que dans le modèle particulier, les sections efficaces des collisions que font les particules, comme les électrons et les ions, sont nécessaires.

L'objectif de notre travail est de calculer les paramètres nécessaires au modèle fluide. Pour cela nous utilisons le code BOLSIG, un code numérique résolvant l'équation de Boltzmann, qui sera décrit dans le prochain paragraphe.

III.10. Le code Bolsig+ :**III.10.1. Principe :**

Le code Bolsig+ est un logiciel facile à utiliser pour la résolution numérique de l'équation de Boltzmann pour les électrons dans un gaz faiblement ionisé et pour un champ uniforme.

L'équation de Boltzmann étant écrite come suit :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \nabla f - \frac{e}{m} E \nabla_v f = C[f] \quad (\text{II.1})$$

Où f est la distribution électronique, v est la vitesse des électrons, e est la charge élémentaire, m la masse de l'électron, E est le champ électrique, ∇_v est l'opérateur gradient de la vitesse et C le taux de changement de f en raison des collisions.

Le premier terme décrit la dépendance temporelle, le deuxième terme explique les changements de la vitesse dus à la présence d'un champ de force extérieure, le troisième rend compte de l'influence des inhomogénéités spatiales causés par les vitesses des particules et le gradient de la densité et le second membre représente l'intégrale des collisions entre deux espèces.

Ce code permet d'obtenir les grandeurs physiques tel que les mobilités, les coefficients d'ionisation et de diffusion, les fréquences de collisions, les énergies moyennes,...et cela en fonction du champ réduit ; E/N tel que N est la densité du gaz. Ces valeurs sont ensuite tabulées, comme paramètre d'entrée, dans le modèle fluide.

Ce programme a été réalisé par G ; Hagelaar, en 2005 [41], qui utilise des sections efficaces mises à jour à partir du site Web LXcat créé par Pancheshnyi et al [42].

II.10.2. Paramètres d'entrée du code bolsig+ :

Les données de l'entrée principale pour BOLSIG+ sont des tables des sections efficaces pour les différents types de collisions de l'électron en fonction de l'énergie de l'électron. Les autres paramètres de l'entrée telle que le champ électrique, composition du gaz, etc.

Dans le fichier fourni avec Bolsig+ [43], on trouve toutes les données électroniques nécessaires concernant les collisions via les variations de sections efficaces, qui sont également nécessaires dans le modèle particulaire, pour les processus de collision pour

différents gaz et cela en fonction de l'énergie de l'électron incident. On trouve les collisions élastiques, l'excitation, dissociation éventuellement, ionisation et attachement, sans oublier les rotations et vibrations dans le cas des molécules.

Les sections efficaces de collision :

Les collisions électron- molécule conduisent généralement à l'ionisation et à la formation de produits plus ou moins excités (électroniquement, vibrationnellement, rotationnellement...) dont on cherche à déterminer la nature et le taux de formation en fonction de l'énergie électronique. Pour cela, Il n'est pas nécessaire de générer un plasma, mais simplement de bombarder le gaz à étudier avec des électrons issus d'une source dont on peut contrôler l'énergie. Le taux de formation des espèces excitées peut être alors déterminé en étudiant les variations de leur spectre d'émission ou de masse.

En balayant toute la gamme d'énergie des électrons (de 0 à quelques centaines d'eV), on peut alors déterminer le seuil énergétique des diverses excitations, ionisations, dissociations...

On traduit généralement les diverses probabilités de ces processus (qui sont donc fonction de l'énergie) en terme de sections efficaces d'excitation, ionisation...

Les figures suivantes présentent la variation des sections efficaces utilisées par le code Bolsig pour certains gaz rares et cela en fonction des énergies. Les réactions qui peuvent prises en considération sont : élastiques, effectives, excitation à plusieurs niveau et ionisation.

[41-43]

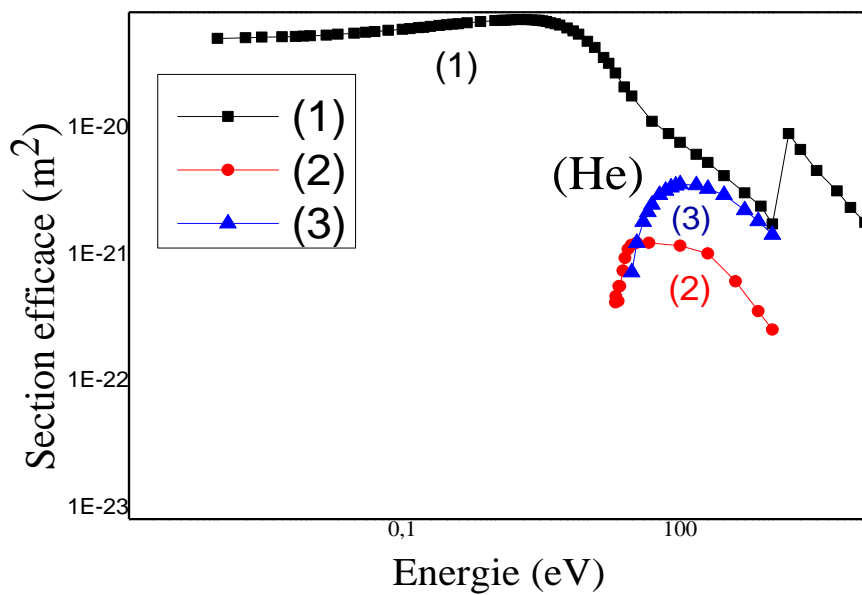


Figure. II.4: Sections efficaces de collisions électron-atome du l'hélium. (1) transfert de quantité de mouvement, (2) excitation vers le niveau He*(19.80 eV), (3) ionisation directe.

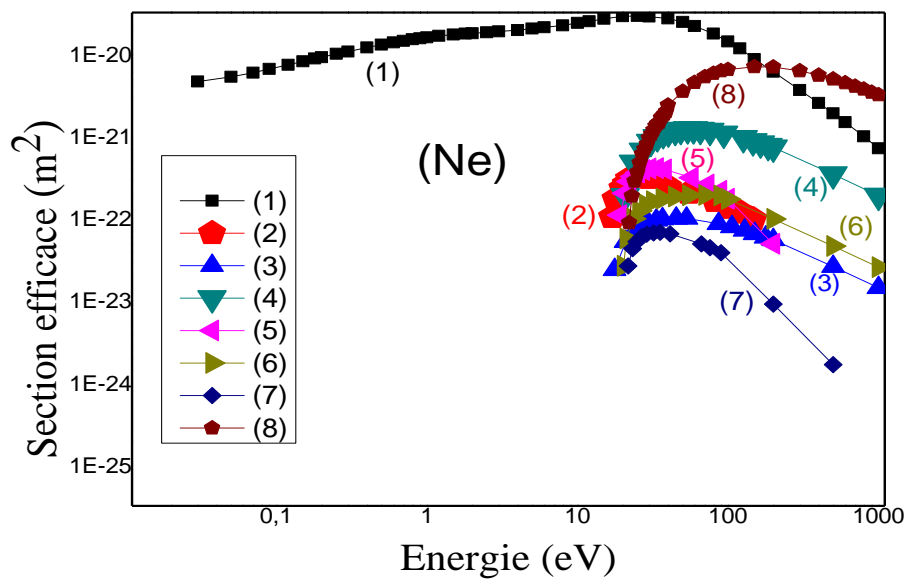


Figure. II.5 : Sections efficaces de collisions électron-atome du néon. (1) transfert de quantité de mouvement, (2) excitation vers le niveau (3) excitation vers le niveau résonant $1s_4$ (3P_1), (4) excitation vers le deuxième niveau résonant $1p_1$ (1S_2), (5) excitation vers le niveau

supérieur 2p (18.72 eV), (6) excitation vers le niveau supérieur 2s+3d (20 eV), (7) excitation vers le niveau supérieur 3p (20.65 eV), (8) ionisation direct

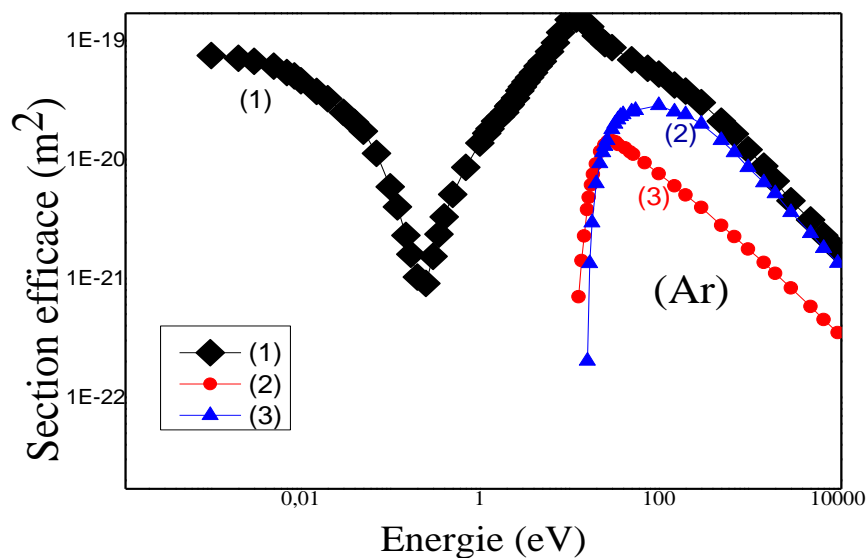


Figure. II.6: Sections efficaces de collisions électron-atome d'argon. (1) transfert de quantité de mouvement, (2) excitation vers le niveau Ar* (19.80 eV), (3) ionisation direct.

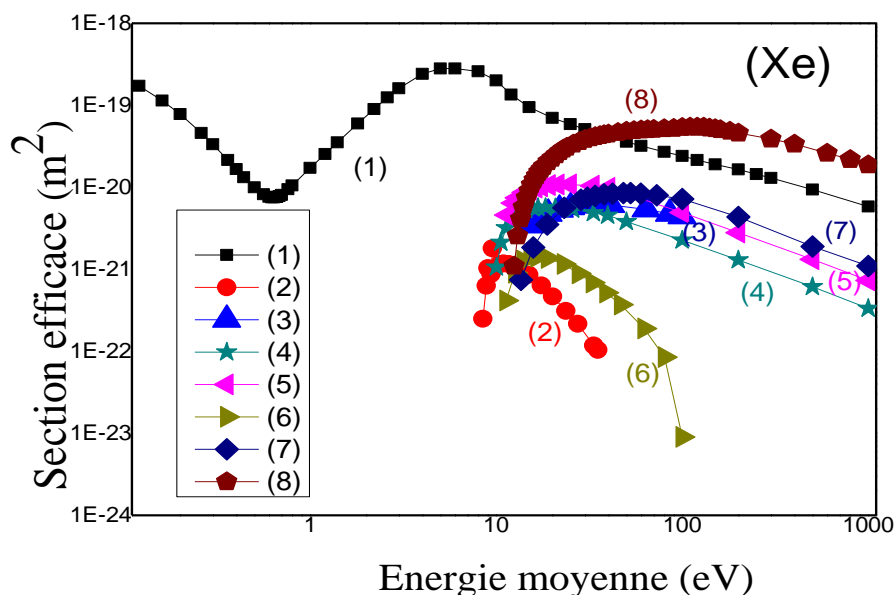


Figure. II.7 : Sections efficaces de collisions électron-atome du xénon ;(1) transfert de quantité de mouvement, (2) excitation vers le niveau métastable ³P₂ (1s₅), (3) excitation vers

l'état résonant $3P1(1s_4)$, (4) excitation vers les niveaux supérieurs ($1s_3-1s_2-2p$, 9.69 eV), (5) excitation vers les niveaux supérieurs ($2s-3d$, 10 eV), (6) excitation vers les niveaux supérieurs $2p$ (11 eV), (7) excitation vers le niveau supérieur (11.7eV), (8) ionisation directe.

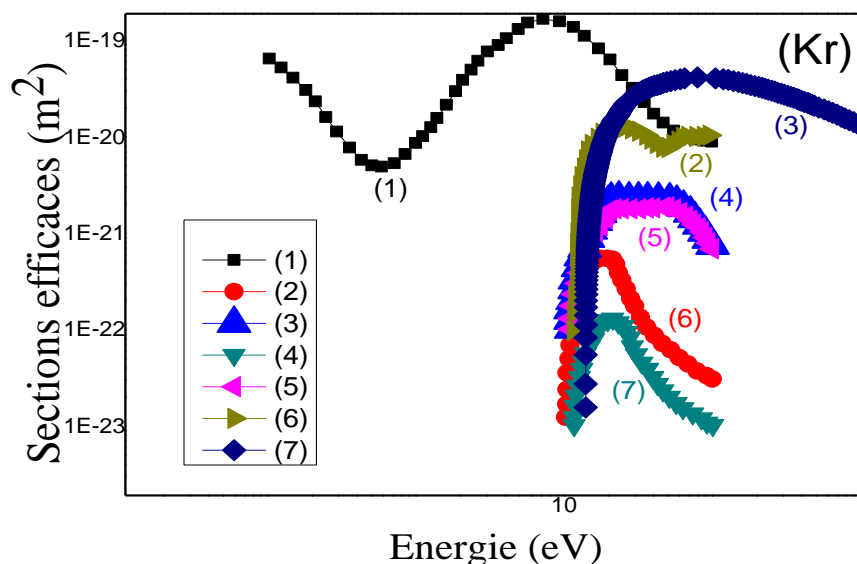


Figure. II.8 : Sections efficaces de collisions électron-atome du krypton. [1] transfert de quantité de mouvement, [2] excitation vers le niveau supérieur (9.915 eV), [3] excitation vers le niveau supérieur (10.033 eV), [4] excitation vers le niveau (10.563 eV), [5] excitation vers le niveau (10.643 eV), [6] excitation vers le niveau supérieur (11.30 eV) [7] ionisation direct.

Ces sections efficaces sont utilisées comme paramètre d'entrée dans le code Bolsig. Les résultats obtenus seront décrits dans le prochain paragraphe.

II.10.3. Paramètres de sortie :

En plus de la fonction de distribution en énergie des électrons (FDEE), Bolsig+ calcule les coefficients de transport et les taux de réactions nécessaires pour la description fluide. Citons à titre d'exemples : l'énergie moyenne, la mobilité, le coefficient de diffusion, la fréquence totale de collision, la fréquence de collision d'ionisation totale, le coefficient d'ionisation, ou premier coefficient de Townsend. Ses grandeurs sont multipliées par la densité totale du gaz, N .

La mobilité :

Le concept de mobilité est utilisé en physique des plasmas pour décrire la vitesse moyenne de particules chargées sous l'impact d'un champ électrique.

La vitesse moyenne avec laquelle le centre de masse de cet ensemble de particules se déplace dans la direction du champ électrique E est appelée vitesse de dérive (notée V).

La mobilité μ des particules se déduit de la vitesse de dérive au moyen de la relation :

$$V = \mu E \quad (\text{II.2})$$

La mobilité très différente des électrons et des ions dans les plasmas faiblement ionisés est d'une importance cruciale pour la compréhension de questions fondamentales telles que le potentiel du plasma et la tension à polarisation automatique dans le traitement des matériaux.

Le coefficient de diffusion :

C'est une grandeur caractéristique du phénomène de diffusion de la matière. Le coefficient de diffusion mesure le rapport entre le flux molaire dû à la diffusion moléculaire, et le gradient de concentration de l'espèce chimique considérée (ou, plus généralement, de la variable d'effort entraînant cette diffusion), comme formulé par la loi de Fick qui décrit la diffusion de la matière dans un milieu binaire. Elle a été établie par Adolf Fick [44] en 1855.

Il est obtenu à partir de la relation du flux de diffusion $J_{diffusion}$ par unité de surface qui est proportionnel au gradient de densité suivant la relation :

$$J_{diffusion} = -D\nabla n \quad (\text{II.3})$$

La fréquence de collision :

La fréquence de collision est la vitesse moyenne de collision de deux réactifs pour un système donné. Elle est utilisée pour exprimer le nombre moyen de collisions par unité de temps dans un système défini.

La fréquence d'ionisation :

La Fréquence totale d'ionisation est le nombre d'électrons créés par unité de temps.

Le coefficient d'ionisation

Le degré d'ionisation d'un plasma est défini par

$$\alpha = \frac{n_0}{n+n_0} \quad (\text{II.4})$$

Où n_0 est la densité des électrons (ion positifs) et n est la densité des espèces neutres.

Si $\alpha < 10^{-4}$, alors le plasma sera dit « faiblement » ionisé et si $\alpha > 10^{-4}$, alors il est dit « fortement » ionisé. Le mouvement des particules chargées peut être alors dominé par des collisions avec d'autres particules chargées si le plasma est « fortement ionisé » ou par collision avec des neutres s'il est « faiblement ionisé ».

II.11. Conclusion :

Ce chapitre est une introduction générale à la physique des plasmas, il nous a paru utile, en premier lieu, de faire une présentation élémentaire de certaines notions. Nous avons défini d'abord les plasmas, les particules excitantes dans un plasma puis la décharge électrique dans laquelle les gaz rares deviennent plasma ; il nous a été alors nécessaire de décrire les processus élémentaires qui peuvent avoir lieu lors d'une décharge électrique dans un gaz rare

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté les différentes approches numériques ; microscopique (modèle particulaire), macroscopique (modèle fluide) et le modèle hybride de ces deux modèles. Ces modèles utilisent des paramètres d'entrées nécessaires pour leur fonctionnement. Nous avons donc présenté les sections efficaces nécessaires au modèle particulaire. Le modèle fluide ayant besoin des paramètres de transport ; nous avons donc présenté le code Bolsig+ que nous avons utilisé dans notre travail. Nous avons terminé ce chapitre par donner une idée sur les paramètres calculés par ce code. Les résultats de calcul seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Résultats de calcul

III.1. Introduction :

Dans le chapitre 2, nous avons vu que les modèles physiques étudiant les décharges électriques avaient besoin de paramètres d'entrée. Nous avons alors utilisé le modèle Bolsig qui est basé sur la résolution de l'équation de Boltzmann. Ce logiciel nous a permis de calculer les paramètres de transport ainsi que de collision et cela pour les gaz purs et les mélanges gaz.

III.2. Les résultats pour les gaz rares purs:

III.2.1. Les paramètres de transport :

La figure .III.1. Représente la variation de la mobilité électronique en fonction du champ réduit et cela pour différents gaz. On remarque le même comportement des mobilités pour le xénon et le krypton ; la mobilité de ces gaz est légèrement variable, alors que la mobilité du néon et de l'argon diminue en fonction du champ réduit. Néanmoins celle de l'argon est très faible. Le comportement de la mobilité de l'hélium est différent ; elle augmente avec le champ réduit jusqu'à 500 Td puis elle diminue

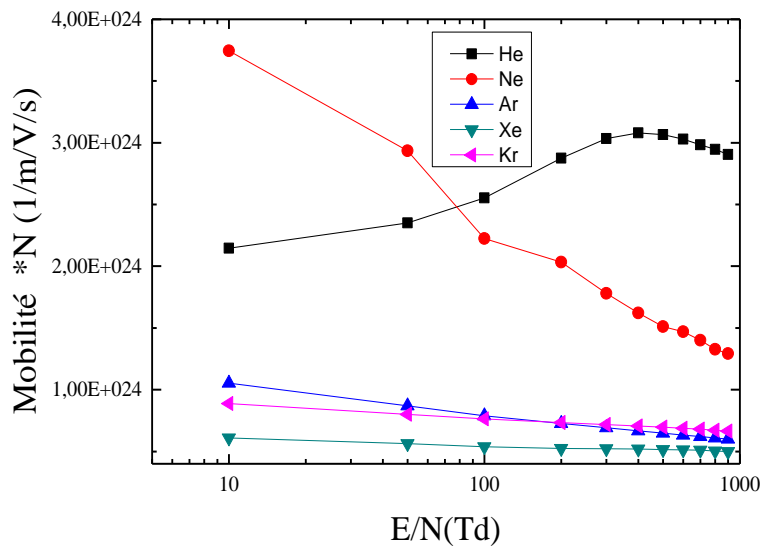


Figure .III.1. : La variation de la mobilité électronique en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

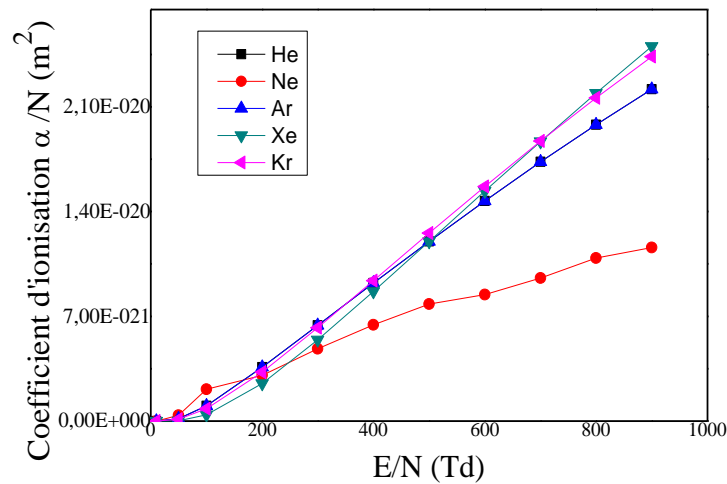


Figure .III.2 : La variation du premier coefficient de Townsend en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

La figure.III.2. Représente la variation du premier coefficient de Townsend, appelé également coefficient d'ionisation, en fonction du champ réduit et cela pour différents gaz. On remarque qu'à faible champ tous les coefficients d'ionisation sont du même ordre sauf celui du néon qui est légèrement plus important. À fort champs on constate que ce dernier augmente lentement par rapport aux autres gaz et le coefficient d'ionisation du xénon et krypton sont presque les mêmes. Le Néon a un coefficient d'ionisation plus faible.

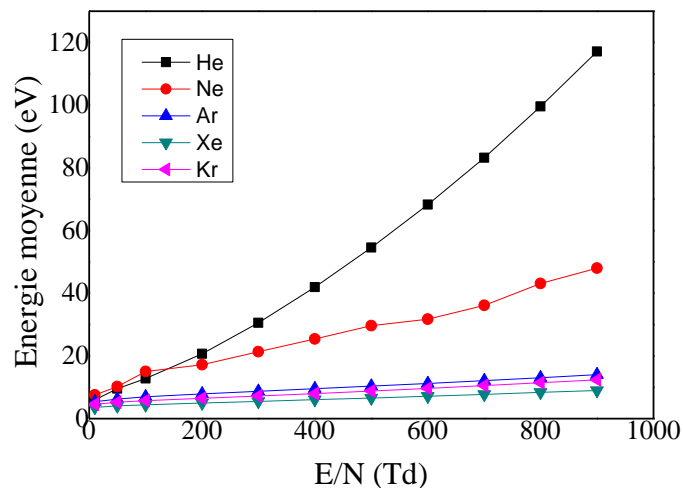


Figure .III.3 : La variation de l'énergie moyenne en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

La Figure.III.3. Représente la variation de l'énergie moyenne en fonction du champ réduit et cela pour différents gaz. On remarque que les gaz : xénon, krypton et argon ont des énergies moyennes faibles de l'ordre de 5 à 16 eV et ne sont pas presque influencées par le champ. Alors que le néon et l'hélium ont des énergies qui augmentent avec le champ réduit ; leurs valeurs sont presque égales à faible champ ; de l'ordre de 6 eV. La différence se voit avec l'augmentation du champ ; l'énergie moyenne atteint alors des valeurs de 117.1 eV pour l'hélium et de 48 eV pour le néon

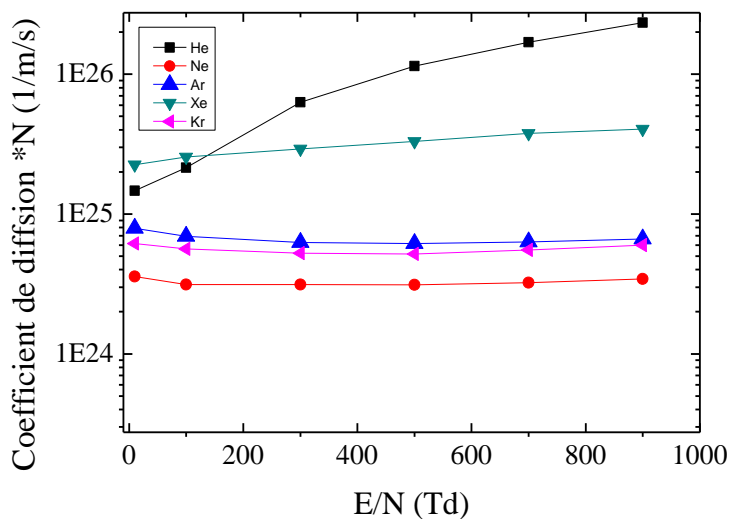


Figure .III .4 : La variation du coefficient de diffusion en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

La Figure .III .4. Représente la variation du coefficient de diffusion pour chaque gaz rare. On remarque que pour l'hélium, le coefficient a une augmentation importante en fonction du champ réduit. Alors que pour le néon, l'argon et le krypton ce paramètre diminue légèrement pour les faibles champs mais pour les forts champs, il est presque constant. Pour le xénon, le coefficient de diffusion augmente légèrement d'une pour une variation du champ de 10 à 900 Td.

III.2.2. Les fréquences de collision :

Les figures III.5 et III.6 représentent, respectivement, la variation des fréquences de collision totale et d'ionisation des gaz rares. On note que les fréquences de collision totale de la majorité des gaz rares augmentent avec le champ réduit à part l'hélium qui a un comportement différent ; elle diminue lorsque le champ augmente. On remarque aussi que malgré que la fréquence de collision totale du xénon qui est plus importante c'est la fréquence d'ionisation de l'hélium qui est la plus élevée.

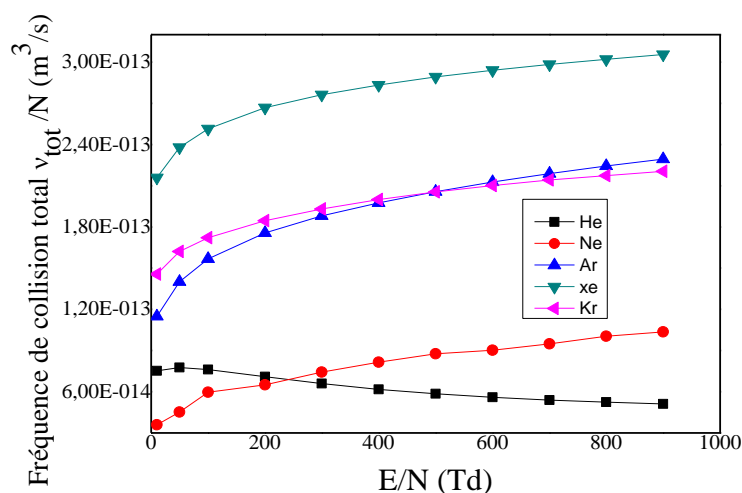


Figure.III.5. : La variation de la fréquence de collision totale en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

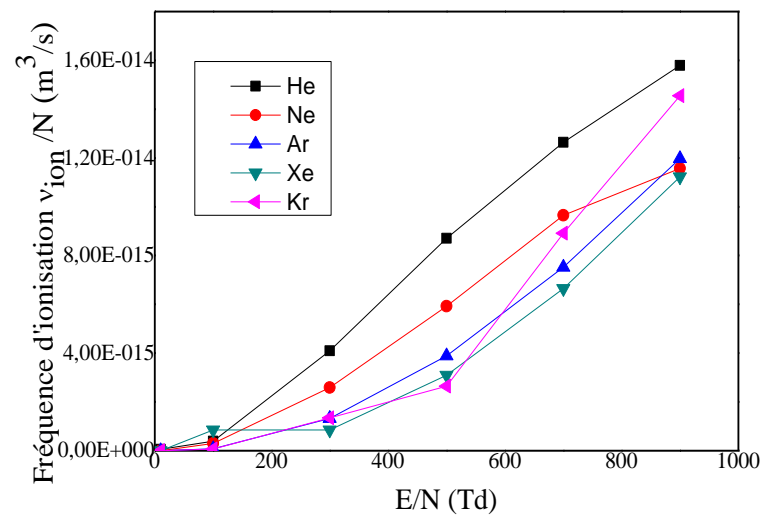


Figure.III.6 : La variation de la fréquence de collision d'ionisation en fonction du champ réduit pour différents gaz rares.

Notre explication est que pour les autres gaz, Il y'a d'autres réactions plus importantes ce qui fait que, pour le xénon, néon, krypton, la fréquence d'ionisation totale est faible. Nous avons donc tracé le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation sur la figure.III.7.

Pour un champ réduit variant de 10 à 900 Td. On remarque sur la figure III.7.b que le rapport est important à faible champ (10 ,100 Td) mais qu'à fort champ variant de 200 à 1000 Td (figure III.7.c), il est plus petit.

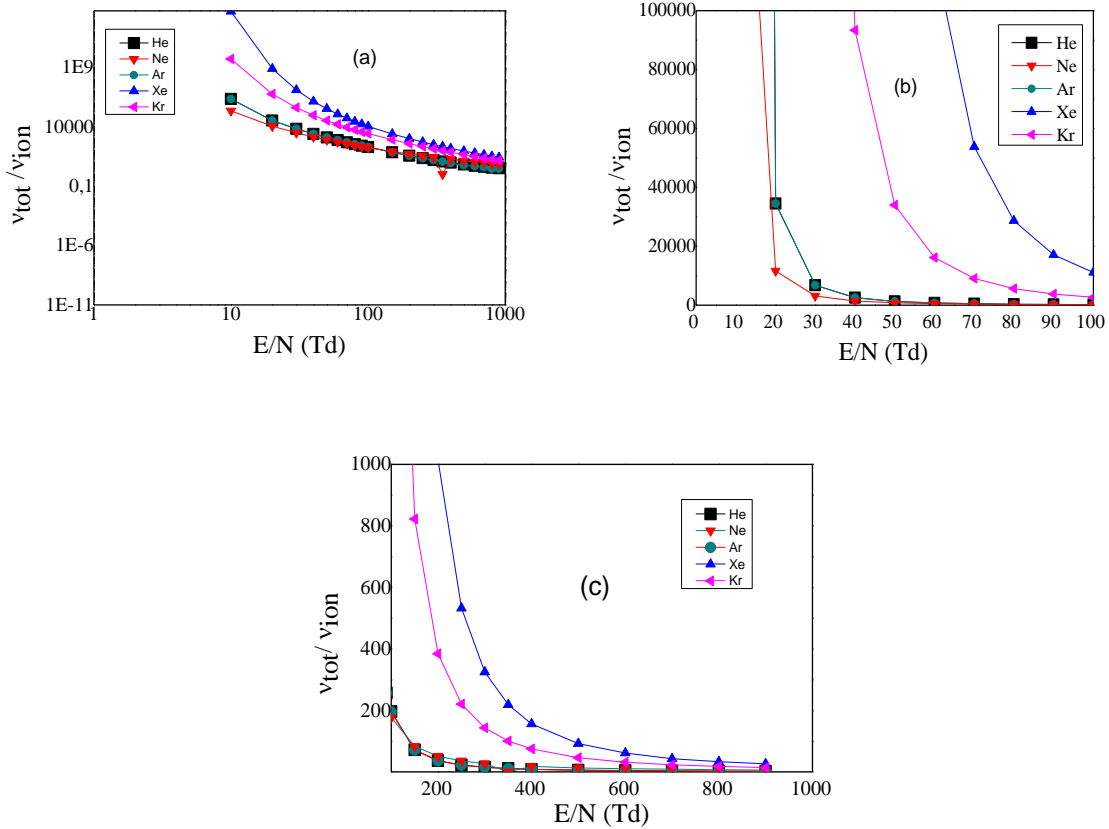


Figure III.7. : La variation du rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence de collision d'ionisation totale pour différents gaz rares

On peut dire qu'à fort champ, les collisions sont dues essentiellement à l'ionisation mais qu'à faible champ, les collisions qui nécessitent des énergies plus faibles sont dominantes. En effet nous avons montré dans le tableau (II.2) que l'énergie seuil d'excitation est plus faible que celle d'ionisation, ce qui nous pousse à dire qu'à faible champ c'est l'excitation qui domine.

On peut conclure que le xénon, l'argon et le krypton sont les plus capables de produire plus les états excités ce qui induira par la suite une production plus importante des photons UV.

III.3. Conclusion sur les résultats pour les gaz purs :

Nous avons vu que les mobilités et les énergies moyenne de l'argon, le xénon et le krypton sont faibles mais elles sont plus importantes pour l'hélium à fort champ et le néon a faible champ. Le coefficient d'ionisation est important pour le xénon et le krypton et plus faible pour le néon mais le coefficient de diffusion d'hélium et du xénon est plus important. Celui du néon est plus faible. On a remarqué aussi que la fréquence de collision de xénon, krypton et l'argon est plus important et elle est faible pour le néon et l'hélium cependant la fréquence d'ionisation d'hélium est plus importante par rapport au autres gaz. Nous avons déduit que les gaz ; l'argon le xénon et le krypton sont des milieux favorables pour l'excitation et pour l'hélium et le néon c'est l'ionisation qui est dominante. En effet, Ghaleb et al [45,46] ont trouvé une minimum tension de claquage pour le néon de l'ordre de 218V, 210V pour l'hélium alors qu'elle est égale à 270 volt pour le xénon environ 220 V pour le krypton. C'est la raison pour laquelle on l'utilise comme gaz parent afin d'utiliser une tension de claquage plus faible

III.4. Résultats pour les mélanges des gaz :

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les gaz rares avaient un grand champ d'application ou on utilise des gaz purs et des mélanges. Dans cette partie nous allons présenter les paramètres de transport et de collisions des mélanges utilisés dans certaines applications trouvées dans la littérature en prenant en considération les résultats trouvés dans les gaz purs. Nous avons donc étudié quatre cas :

- Un mélange de deux gaz rares bon émetteurs des UV ; comme les Kr-Xe, Kr-Ar
- Un mélange de deux gaz rares qui ont la tension de claquage faible ; comme le mélange He-Ne
- Un mélange de deux types de gaz ; comme le mélange Ne-Xe
- un mélange d'un gaz rare émetteur d'UV avec un gaz d'une autre famille de gaz ; halogène ; comme les mélanges Kr-F, Kr-Cl₂

Le choix des concentrations est basé sur les mélanges qui sont utilisés dans les différentes applications et dans les travaux de recherches

III.4.1. Le mélange Kr-Xe:

Nous avons calculé les paramètres de transport et de collisions pour le mélange xénon- krypton (Xe-Kr) avec différentes concentrations ; 5% ,10%, 15% et 20% du xénon dans le krypton. Ce mélange est utilisé dans les lampes à excimer. [47]

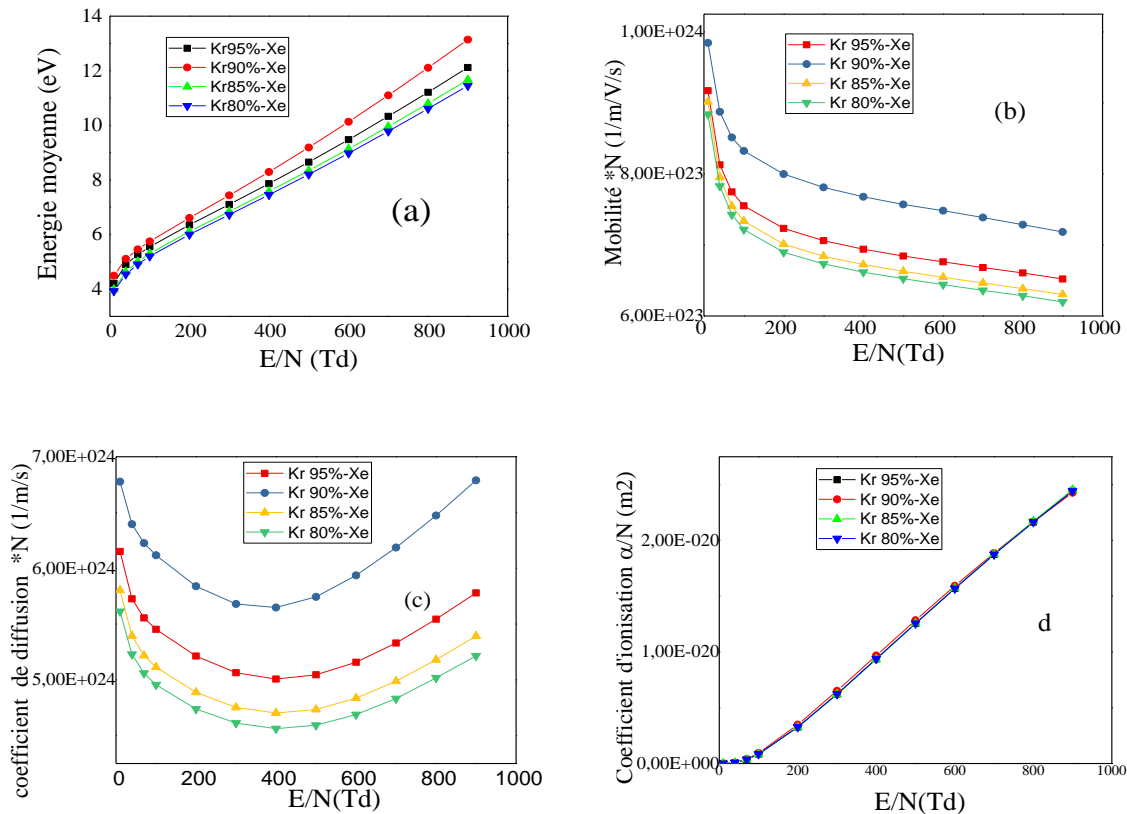


Figure.III.8 : La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon.

La figure Figure.III.8 représente la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon ; (a) : l'énergie moyenne ; (b) : la mobilité, (c): le coefficient de diffusion, (d) : le coefficient d'ionisation de Townsend

On remarque une croissance importante de l'énergie moyenne et une chute rapide de la mobilité et cela à faible champ. On note aussi que ces valeurs augmentent si on ajoute le xénon de 5 à 10 %. Au-delà, elles sont plus faibles. La même chose est observée pour le coefficient de diffusion qui, d'après la figure.III.8.c, a une forme parabolique avec un minimum à 400 Td. Nous observons sur la figure.III.8.d que le coefficient d'ionisation qui

augmente avec le champ n'est pas affecté par le pourcentage du Xe. Le mélange Xe10%-Kr a une mobilité et un coefficient de diffusion plus important que les autres

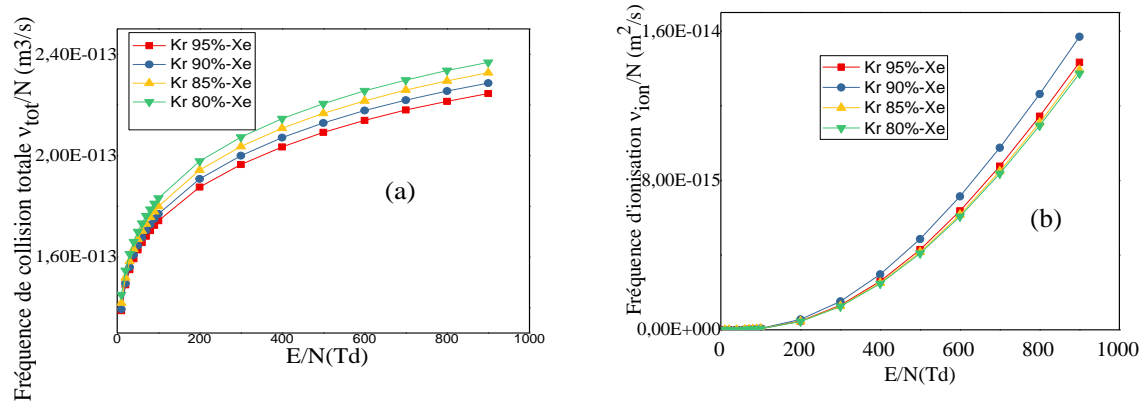


Figure.III.9 : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon ; (a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

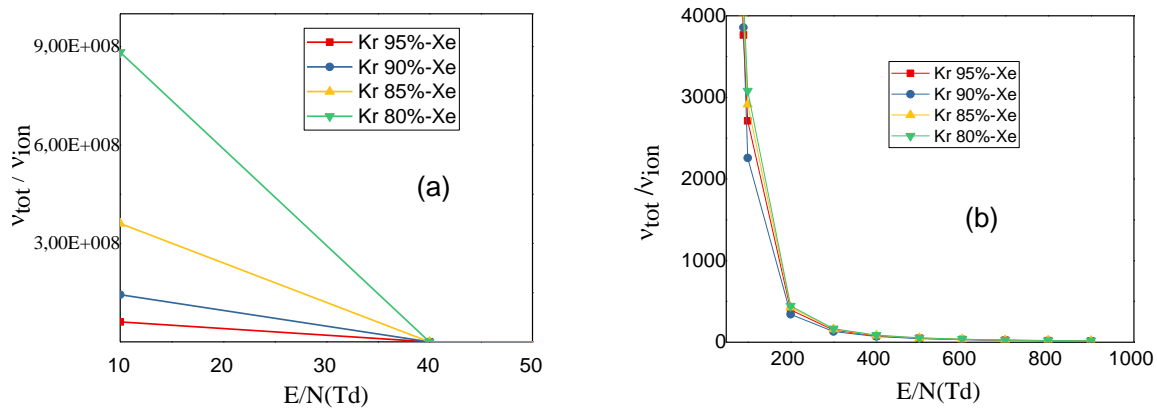


Figure.III.10 : Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-xénon, (a) : pour un faible champ, (b) pour un fort champ

Si on regarde les collisions, on constate sur les figures III.9.a et .III.9.b que la fréquence de collision totale augmente avec le champ et que la fréquence d'ionisation est faible à des champs inférieurs à 200 Td puis elle augmente au-delà de cette valeur. Il est à noter que la concentration de 20% du xénon dans le krypton est plus importante pour la fréquence de collision totale mais elle est plus faible pour la fréquence d'ionisation.

On observe, sur la figure .III.10, que le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation indique qu'à faible champ (figure .III.10.a) les autres collisions sont dominantes puisque leur énergie seuil est moins élevée. Ceci est plus important lorsque l'on augmente la concentration en xénon.

III.4.2. Mélange krypton-Argon :

Ce mélange est employé pour l'isolation dans les doubles vitrages [48]. C'est le meilleur isolateur, mais son coût implique l'utilisation de l'argon qui est plus abondant et moins cher. Nous avons donc calculé les paramètres du transport pour différentes concentrations de ce mélange ; Ar85%-Kr, Ar90%-Kr ,Ar95%-Kr.

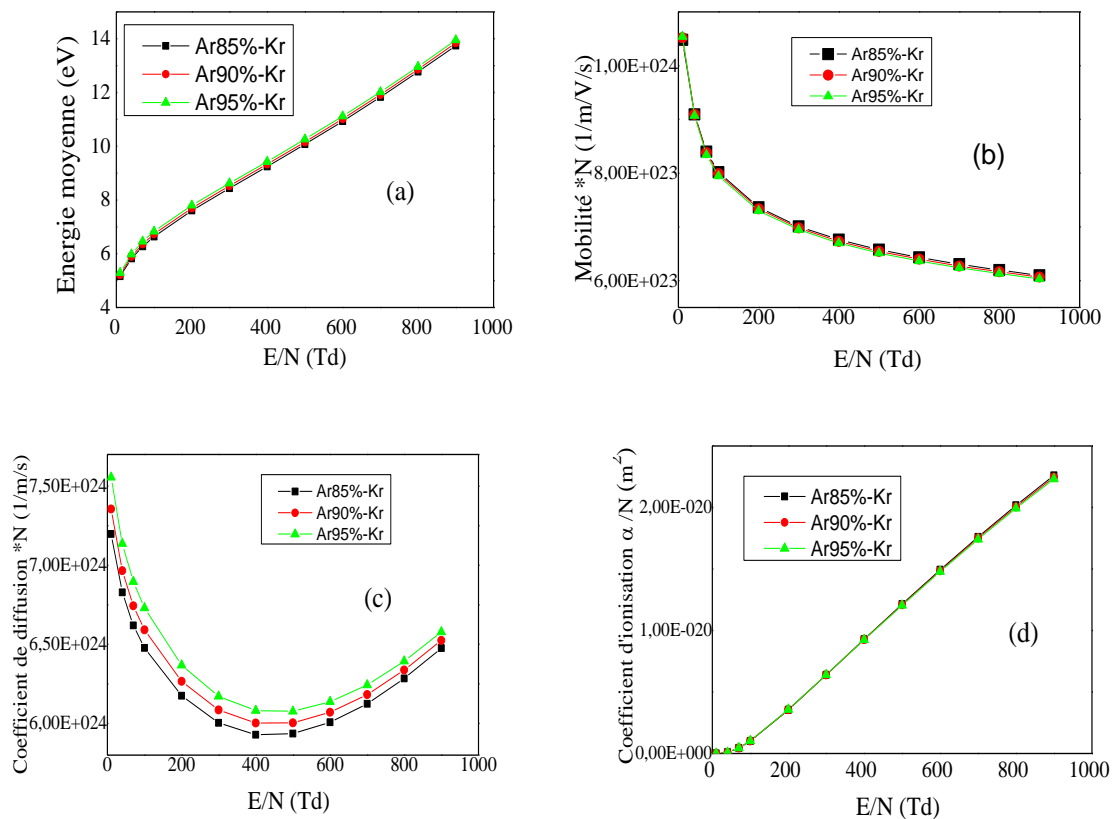


Figure III.11 : La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton

La figure.III.11 montre la variation des paramètres de transport pour différentes concentration de Krypton dans l'argon ; (a) : énergie moyenne, (b) : mobilité, (c) : coefficient de diffusion, (d) : coefficient d'ionisation de Townsend

On remarque que l'énergie moyenne et le coefficient d'ionisation augmente en fonction du champ réduit et la mobilité. La variation de concentration en argon n'a pas d'influence sur les coefficients de transport comme on la vu pour le mélange xénon-krypton

On constate que le coefficient de diffusion forme une parabole avec un minimum à 400Td avec une légère augmentation si on varie les concentrations

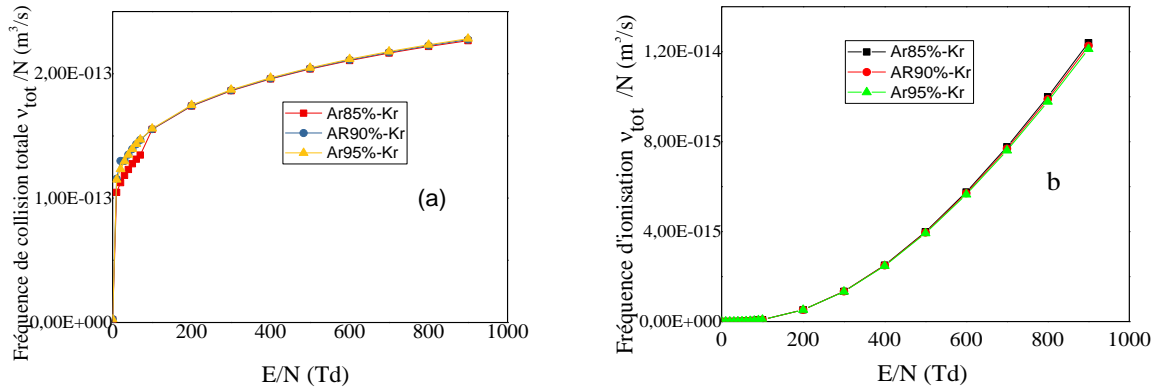


Figure III.12 : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton ; (a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

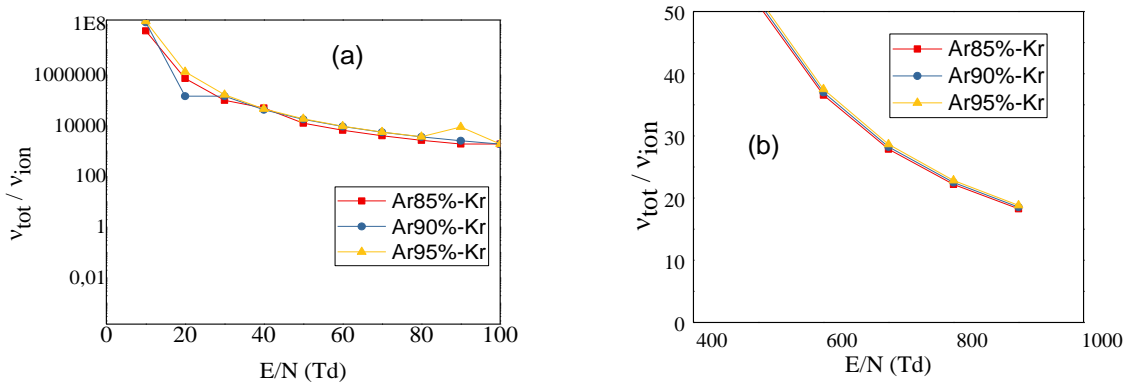


Figure III.13. : Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence de collision d'ionisation en fonction du champ réduit cela pour différentes concentrations du mélange argon-krypton ;, (a) : pour un faible champ, (b) pour un fort champ

On remarque que les fréquences de collision totale et d'ionisation augmentent avec le champ réduit. La concentration de krypton ajouté à l'argon n'a aucune influence.

Si on observe la figure.III.13, qui montre le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation, on note que ce rapport est faible à fort champ (figure.III.13.a) ; alors on dit que l'ionisation est dominante dans ce cas.

III.4.3. Le mélange Hélium-Néon :

Un laser **hélium-néon** est un laser à gaz de petite dimension. Il a de nombreuses applications scientifiques et industrielles, on l'utilise aussi au laboratoire pour les démonstrations d'optique. Il émet dans le rouge à 632,8 nm (nanomètres) [49]

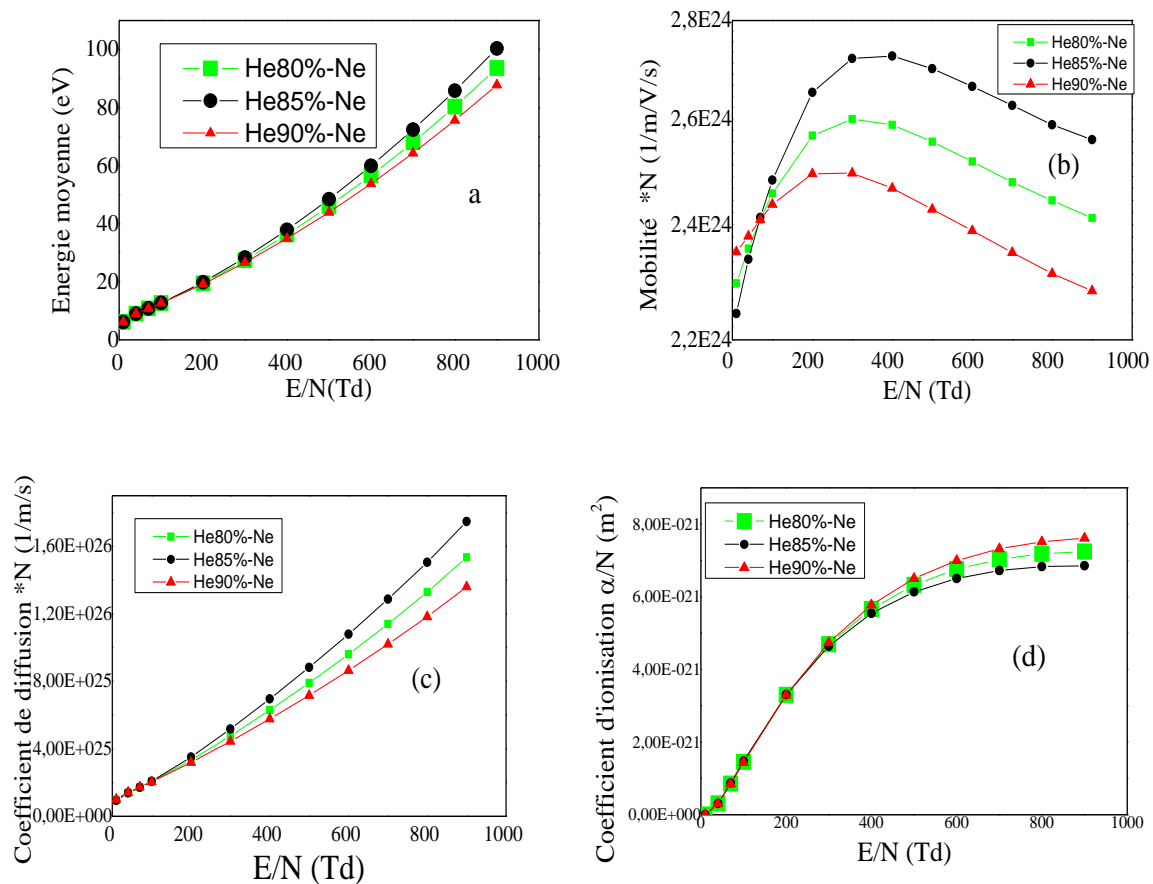


Figure III.14 : La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon

La figure. III.14. montre la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon ;(a) : énergie moyenne, (b) : mobilité, (c) : coefficient de diffusion, (d) : coefficient d'ionisation de Townsend

Le fait d'ajouter le néon à l'hélium, on remarque que la mobilité a un comportement différent de celui des gaz purs ; elle augmente à faible champ et diminue à fort champ mais

l'influence de la concentration d'hélium est clair. L'énergie moyenne augmente en fonction du champ réduit avec une légère augmentation si on varie la concentration d'hélium. On constate aussi que le coefficient de diffusion augmente avec le champ, il est plus important pour des concentrations en hélium plus fortes dans le mélange. La figure (III.14.d) montre que le coefficient d'ionisation augmente avec le champ, cette augmentation est moins importante à fort champ avec une légère diminution si on varie les concentrations

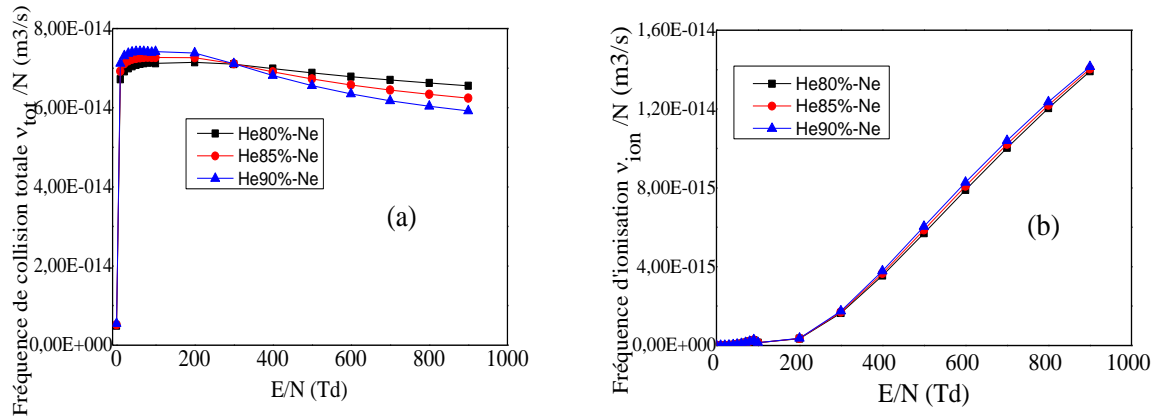


Figure.III.15. : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon ;(a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

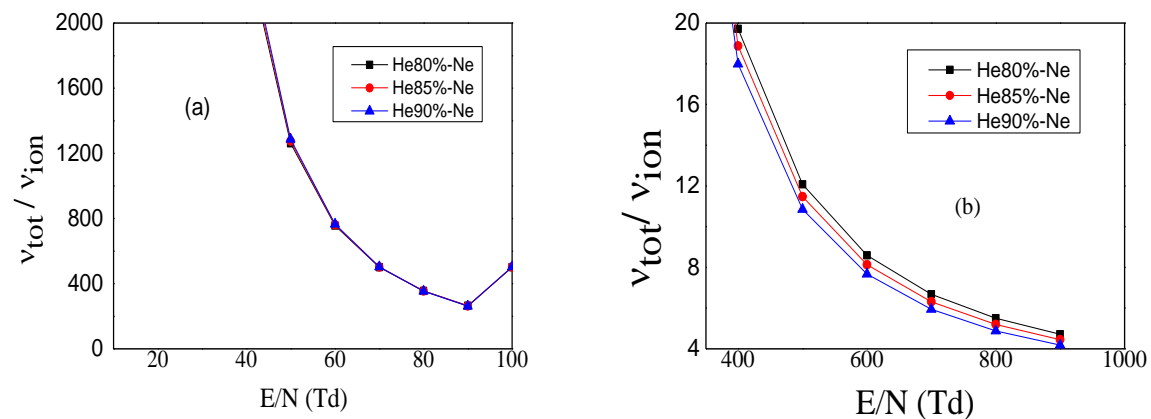


Figure.III.16 : le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour la différente concentration du mélange hélium-néon ; (a) : pour un faible champ, (b) : pour un fort champ

La figure.III.15 représente la variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange hélium-néon ; (a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

On remarque qu'à faible champ, la fréquence de collision totale du mélange He90%-Ne est plus importante par rapport aux autres concentrations. Elle diminue légèrement mais à fort champ, elle est moins importante. Si on observe sur la figure.III.15.b, on note que la concentration en hélium n'a pas d'effet sur la fréquence d'ionisation.

La figure.III.16 qui présente le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation indique qu'à fort champ (figure.III.16.a) l'ionisation est plus importante que les autres collisions ; le mélange He80%-Ne a plus de possibilité d'excitation

III.4.4. Le mélange néon-xénon :

Ce mélange est utilisé dans les décharges électrique ; en particulier les écrans à plasma [50]. Nous avons donc calculé les paramètres du transport pour différents concentration de ce mélange avec des pourcentages de 10% ,15%,20% et 50% de xénon dans le néon.

La figure.III.17. présente la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange xénon-néon ; (a) : énergie moyenne, (b) : mobilité, (c): coefficient de diffusion,(d): coefficient d'ionisation de Townsend.

On remarque que l'énergie moyenne augmente linéairement avec le champ réduit avec une chute de la mobilité. A faible champ le coefficient d'ionisation augmente mais à fort champ, ils a une variation légère ; presque Constant. On constate également que le coefficient de diffusion est constant à faible champ mais il augmente faiblement à fort champ.

On note aussi que le fait d'ajouter le xénon de 10 à 15 % au mélange réduit ces paramètres. Au delà de cette valeur l'énergie moyenne ainsi que la mobilité, le coefficient de Townsend, et le coefficient de diffusion sont plus importants pour plus de xénon dans le mélange.

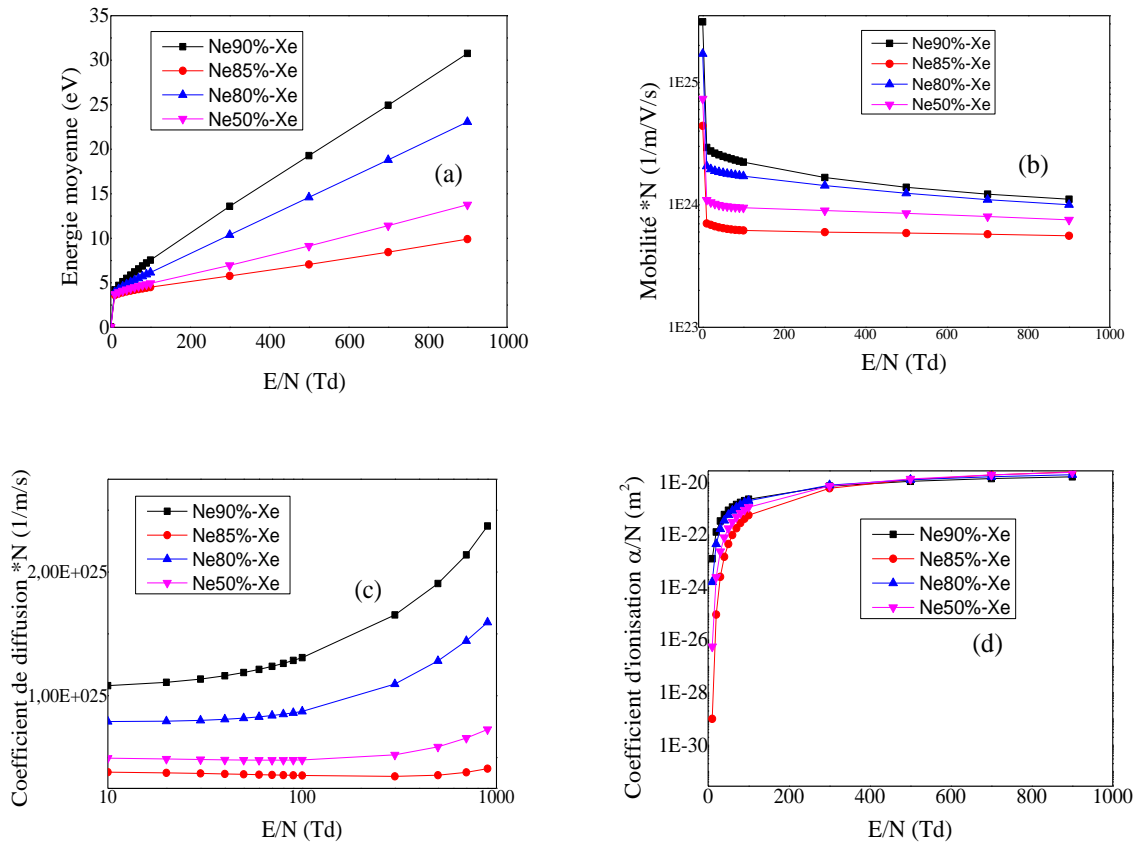


Figure III.17. : La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange néon-xénon

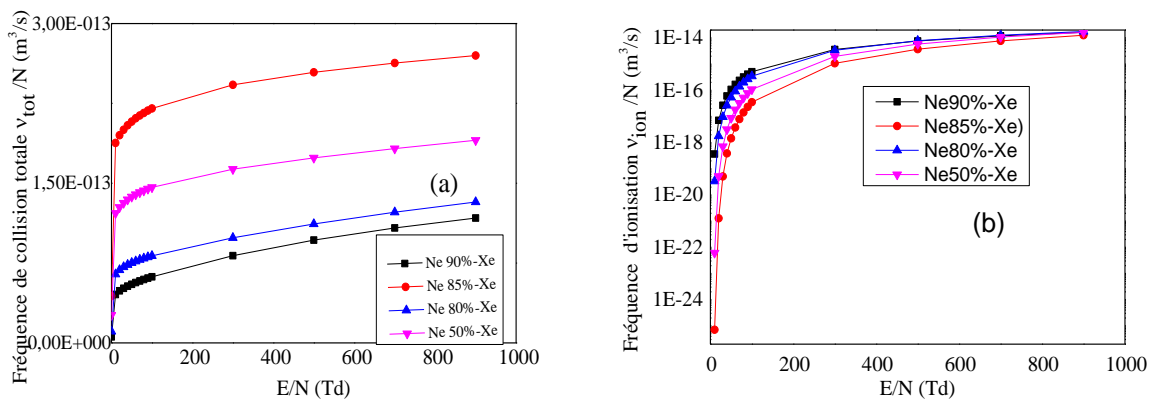


Figure.III.18 : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange néon- xénon ; réduit et cela pour différentes concentrations du mélange néon-xénon ;(a) :fréquence de collision totale,(b) :fréquence d'ionisation

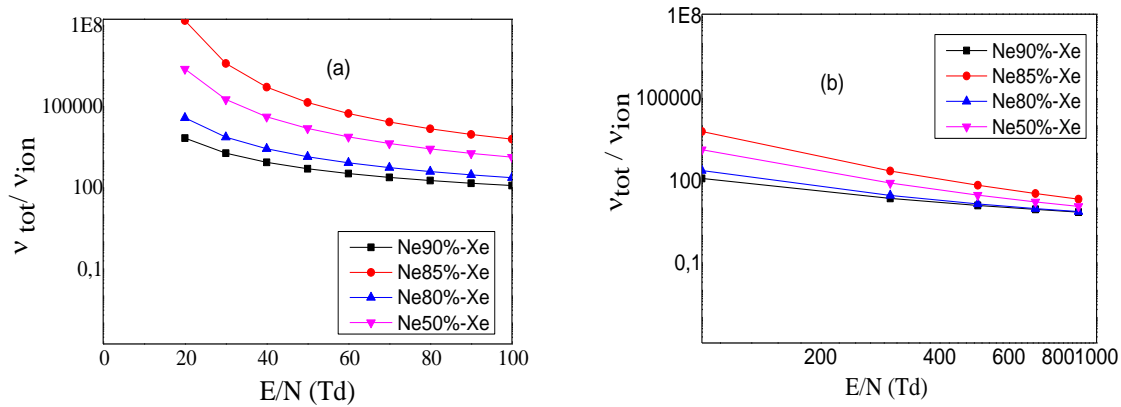


Figure .III.19. : Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange xénon-néon ;(a) : pour un faible champ, (b) : pour un fort champ

On remarque une croissance importante de la fréquence de collision totale à faible champ, et l'augmentation de la fréquence d'ionisation n'as pas d'importance. Le fait d'ajouter le xénon de 10 à 15 % au mélange réduit ces paramètres. Au delà de cette valeur la fréquence de collision est plus importante pour plus de xénon dans le mélange. Alors que la fréquence d'ionisation est plus importante à 15% de Xe. Si on regarde la figure.III.19 qui montre le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit de ce mélange ; sur la figure .III.19.a , on remarque qu'à faible champ c'est l'excitation qui domine dans ce cas. Ce rapport est plus important pour un mélange de 15% de xénon dans le néon

III.4.5. Mélange krypton-Fluor:

Nous avons calculé les paramètres de transport pour les différentes concentrations du mélange krypton-fluor. Ce mélange est utilisé dans les lasers à excimère KrF donnant une radiation ultraviolette (248 nm) [11]. Les mélanges étudiés sont : kr 90%-F, kr 95%-F, kr 99%-F.

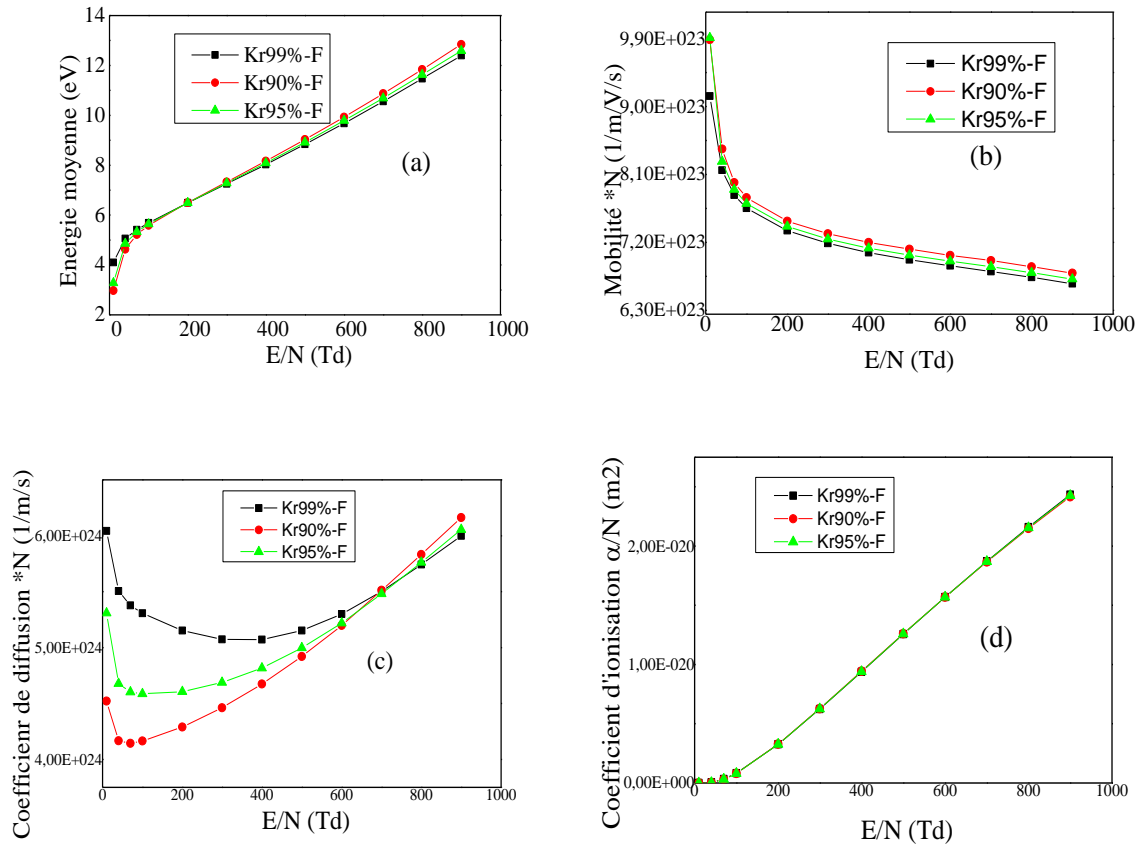


Figure.III.20 : la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor.

La figure.III.20. Représente la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor ; (a) : énergie moyenne, (b) : mobilité,(c) : coefficient de diffusion, (d) : coefficient d'ionisation de Townsend

En ajoutant le fluor au krypton à une concentration de 1%, on constate que la mobilité diminue et l'énergie moyenne et le coefficient d'ionisation augmente avec une variation rapide à faible champ. On note également que la variation de la concentration du fluor de 1% à 10% n'affecte pas ces paramètres mais le coefficient de diffusion qui a une forme parabolique est remarquablement affecté par la concentration du mélange. A faible champ, sa valeur est moins importante pour une concentration plus élevée en fluore.

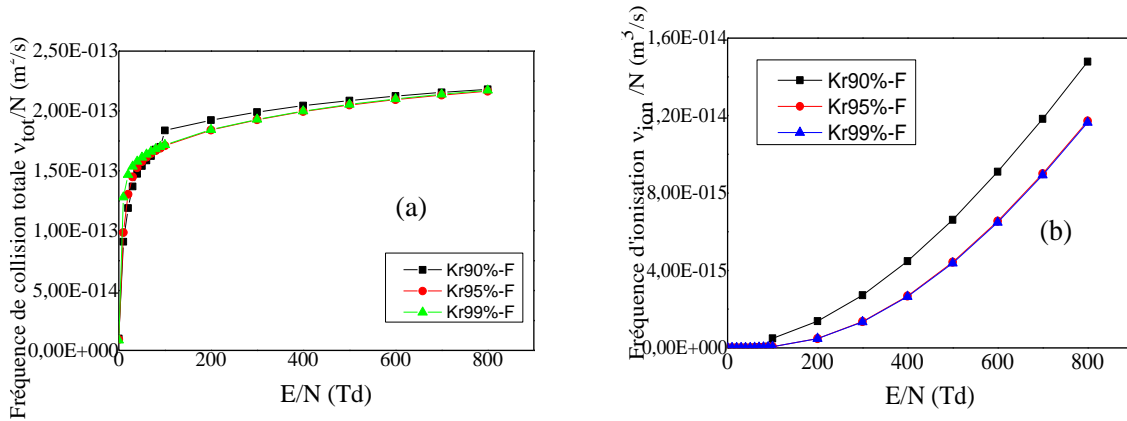


Figure .III.21. : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-Fluor ; (a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

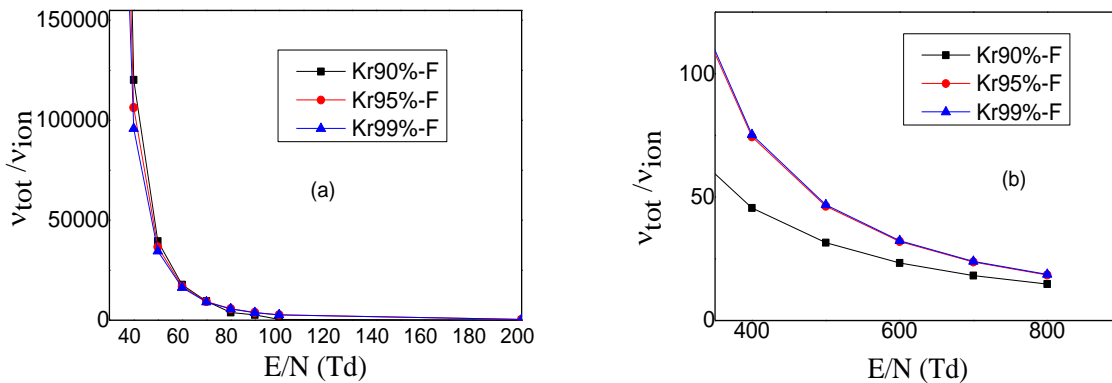


Figure.III.22 : Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence d'ionisation en fonction du champ réduit ;(a) : pour un faible champ, (b) : pour un fort champ

Les figures. III.21.a et III.21.b montrent que les collisions augmentent avec le champ réduit. A faible champ le pourcentage n'affecte pas les fréquences de collisions, mais qu'à fort champ, l'ionisation augmente par rapport aux autres collisions pour une concentration de 10% de fluor.

Si on regarde le rapport entre ces deux fréquences (figure.III.22), on voit bien la grande différence à faible champ (figure.III.22.a), on dit que l'augmentation de la fréquence de collision totale est due à une importante excitation mais à fort champ, entre 400 et 800 Td, elle est faible (figure III.22.b) ; l'ionisation est alors plus importante

L'ionisation est plus dominante pour un mélange de 10% de fluor dans le krypton

III.4.6. Le mélange Kr- Cl₂ :

Ce mélange est utilisé dans les lampes de décharge à barrières diélectriques [51]. Nous avons donc calculé les paramètres du transport pour différentes concentrations du mélange Kr-Cl₂ ; kr80- Cl₂, kr85- Cl₂, kr90- Cl₂.

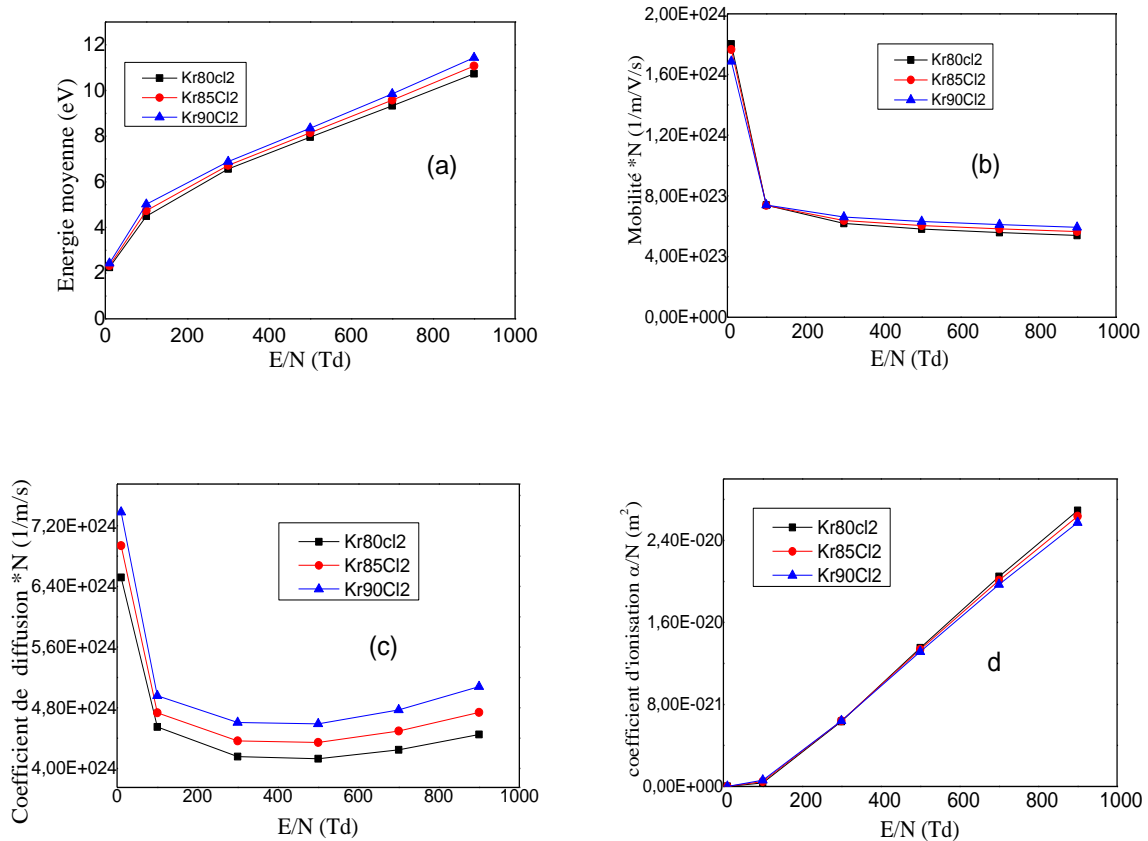


Figure III.23. : La variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-chlore.

La figure.III.23. Présente la variation des paramètres de transport en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange krypton-chlore ;(a) : énergie moyenne, (b) : mobilité ; (c) : coefficient de diffusion, (d) : coefficient d'ionisation de Townsend

On remarque que l'énergie moyenne augmente rapidement en fonction du champ réduit et le coefficient d'ionisation est constant à faible champ mais il augmente linéairement à fort champ. On note aussi qu'à faible champ la mobilité diminue rapidement mais qu'à fort champ, elle est presque constante avec une légère différence si on varie la concentration du mélange en krypton. Le coefficient de diffusion a une forme parabolique.

L'effet de la concentration du mélange en krypton est bien clair ; le coefficient de diffusion est plus important pour une concentration Kr90%-Cl₂.

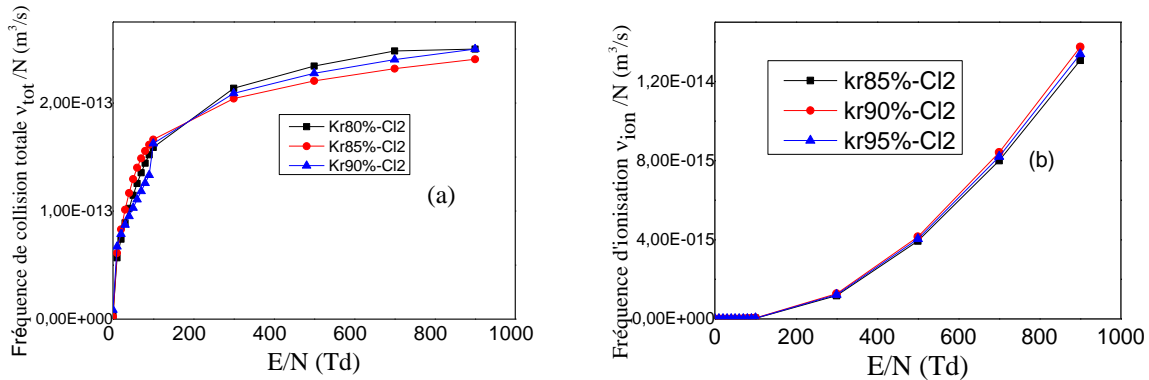


Figure III.24 : La variation des fréquences de collision en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentrations du mélange Kr-Cl₂ ;(a) : fréquence de collision totale, (b) : fréquence d'ionisation

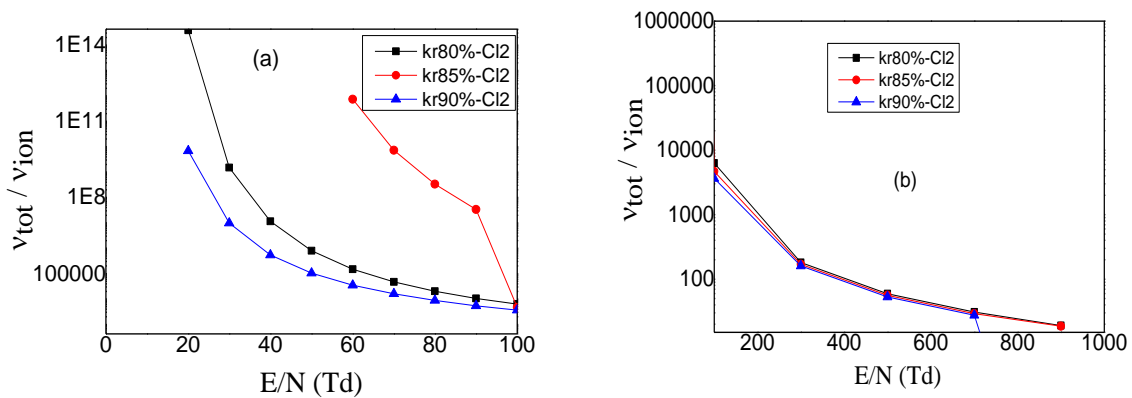


Figure III.25. : Le rapport entre la fréquence de collision totale et la fréquence de d'ionisation en fonction du champ réduit et cela pour différentes concentration du Kr-Cl₂ ;(a) : pour un faible champ, (b) :pour un fort champ

On remarque, sur la figure III.24, que les fréquences de collision augmentent avec le champ mais ne sont que légèrement affectées par la concentration en Krypton. Sur la figure.III.25, on voit bien l'effet de l'ajout du Cl₂ sur le rapport de collisions et cela à faible champ ; dans ce cas, on dit que l'augmentation de la fréquence de collision totale est due à une importante excitation. Sur la figure.III.25.b, on constate que c'est l'ionisation qui est plus importante ; pour un champ entre 400et 800 Td. l'excitation est dominante pour un mélange de 15% de chlore dans le krypton.

III.5. Conclusion pour les mélanges gaz :

Nous avons étudié quatre types de mélanges selon leurs propriétés d'ionisation ou d'excitation nous nous sommes basés sur la littérature pour trouver les mélanges utilisés dans plusieurs applications

- Deux gaz bon émetteur UV ; Xe-Kr et Ar-Kr
- Deux gaz qui sont facilement ionisable ; hélium- néon
- Deux gaz un qui favorise l'excitation et le 2^{ème} a une ionisation facile ; Xe-Ne
- Un gaz bon émetteur UV avec des gaz qui appartient a la famille des halogènes Kr-F, Kr-cl

Nous avons remarqué que les coefficients de transport ont le même comportement pour les mélanges Xe-Kr, Ar-Kr

La concentration du xénon influe sur la mobilité et l'énergie moyenne et le coefficient de diffusion .Néanmoins l'ajout de l'argon n'affecte pas les coefficients de transport mais a une légère influence sur le coefficient de diffusion si on varie la concentration. Les fréquences de collision ont aussi le même comportement et nous avons trouvé que le xénon a plus d'influence. Nous avons trouvé que l'excitation est plus dominante pour un mélange de Xe20%-Kr

Nous avons étudié aussi deux gaz qui ont l'ionisation facile hélium- néon. Nous avons remarqué que le coefficient d'ionisation et la mobilité ont un comportement mixte des deux ; Ils suivent l'hélium à faible champ et le néon à fort champ. L'ajout de l'hélium affecte légèrement le coefficient d'ionisation, l'énergie moyenne et le coefficient de diffusion à fort champ mais il a une influence claire sur les mobilités. La fréquence de collision totale a un comportement comparable à celui du néon à faible champ et à l'hélium à fort champ. Les concentrations en hélium affectent la fréquence de collision totale à fort champ ; le mélange He80%-Ne a plus d'excitation.

Nous avons aussi présenté un mélange d'un gaz qui favorise l'excitation avec un gaz qui a une ionisation facile ; Xe-Ne. Nous avons constaté que l'énergie moyenne, la mobilité et le coefficient d'ionisation ont un comportement mixte entre le néon à fort champ et le xénon à faible champ mais le coefficient de diffusion est comme le xénon à fort champ et le néon à faible champ. La fréquence de collision d'ionisation a un comportement différent à celle des gaz pur. L'effet de la concentration en xénon est clair pour l'énergie moyenne, la mobilité et

Le coefficient d'ionisation et les fréquences de collision. Il est léger pour la fréquence d'ionisation à faible champ. Nous avons constaté aussi qu'un mélange de Xe15%-Ne a une excitation dominante

Nous avons étudié également l'ajout des gaz qui appartiennent à la famille des halogènes dans le krypton ou nous avons trouvé que le coefficient d'ionisation a un comportement identique comme le krypton pur mais pour les autres coefficients de transport sont différents.

Lorsque nous avons ajouté le fluor, l'énergie moyenne et le coefficient d'ionisation sont importants mais la mobilité et le coefficient de diffusion sont faibles. La concentration affecte le coefficient de diffusion à faible champ et a une légère influence sur l'énergie moyenne et la mobilité. Les fréquences de collision ont le même comportement pour les deux mélanges mais la fréquence de collision lorsque on ajoute 10% du fluor dans le krypton est importante. Nous avons remarqué qu'à fort champ c'est l'ionisation qui est dominante pour un mélange de 10% de fluor dans le krypton et pour un mélange de 15% de chlore dans le krypton à faible champ c'est l'excitation qui est dominante.

Nous avons ajouté l'argon, le xénon et deux gaz qui appartiennent à la famille des halogènes et on a constaté que lorsqu'on ajoute un gaz rare ; les mobilités sont faibles mais les autres paramètres de transport sont de même ordre ainsi que les fréquences de collision.

III.6. Conclusion :

Nous avons calculé à l'aide de Bolsig+ les paramètres de transport et les fréquences de collisions des gaz rares utilisés dans les décharges électriques à plasma. Nous avons remarqué que ces gaz se distinguent par la mobilité des charges dans leur milieu et la dominance des collisions ; excitation soit-elle ou ionisation. Nous avons donc étudié quelques mélanges de gaz selon notre classement de ces gaz et en prenant en considération la littérature. Il nous a été possible de voir l'effet de ces mélanges sur le comportement des coefficients de transport et de collisions. L'effet de la concentration de chaque mélange a été alors analysé.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous avons présenté dans le premier chapitre de ce travail, les gaz rares utilisés dans les décharges à plasma. Ces gaz ont plusieurs utilités technologiques importantes. Ils ont chacun des utilisations et des caractéristiques qui les distinguent les uns des autres. En particulier l'émission dans l'UV. Toutefois, les chercheurs, dans le but d'améliorer le fonctionnement des applications, ne cessent d'essayer de nouveaux mélanges avec des concentrations différentes.

Dans le chapitre 2, Nous avons commencé par donner quelques notions sur les plasmas et les différentes collisions faites par ses particules lors de leur déplacement dans une décharge électrique à plasma. Nous avons ensuite décrit les modèles utilisés par les chercheurs afin de comprendre les phénomènes existants dans les décharges ; modèle particulaire ou PIC, modèle fluide, et le modèle hybride. Ces modèles utilisent des paramètres d'entrées nécessaires pour leur fonctionnement ; le modèle particulaire a besoin des sections efficaces de collisions ; le modèle fluide, qui est le modèle le plus couramment utilisé, nécessite les coefficients de transport comme l'énergie moyenne, la mobilité, le coefficient d'ionisation le coefficient de diffusion, la fréquence de collision et la fréquence d'ionisation de collision. Nous avons alors utilisé le code bolsig+ basé sur la résolution de l'équation de Boltzmann et cela afin de calculer ces paramètres pour non seulement les gaz rares mais aussi pour les mélanges gaz.

Notre étude nous a conduits à calculer les coefficients de transport et les fréquences de collision des gaz purs. Nous avons constaté que le xénon, l'argon et le krypton avaient des coefficients d'ionisations importants mais des fréquences d'ionisation faibles. Les collisions d'excitation sont les plus dominantes en particulier à faible champ. Ces gaz produisent donc plus d'états excités ce qui implique plus de production UV, c'est ce qui leur donne le nom de bon émetteur d'UV que les industriels cherchent. Nous avons trouvé également que l'hélium et le néon avaient des propriétés de gaz parent au gaz émetteur d'UV, ils sont utilisés dans le but de réduire la tension de calquage.

Nous avons donc étudié plusieurs mélanges de gaz en faisant la combinaison de bon émetteur UV, de gaz parents et nous avons ajouté les halogènes qui sont utilisés dans l'industrie. L'étude de deux mélanges de bon émetteurs d'UV comme les mélanges ; krypton-xénon et krypton-argon ont permit de trouver que le mélange Kr-Xe avait une mobilité plus importante à fort champ et un faible coefficient de diffusion par rapport à celui du mélange

Conclusion générale

Kr-Ar. L'ajout du xénon au krypton a une influence plus importante sur les fréquences de collision et les paramètres de transport sauf le coefficient d'ionisation. Nous avons trouvé que l'excitation est plus dominante pour un mélange de Xe20%-Kr.

Nous avons aussi étudié le mélange de deux gaz parents ; l'hélium- le néon. Le coefficient d'ionisation, la mobilité a un comportement mixte des deux ; Ils suivent l'hélium à faible champ et le néon à fort champ. et la fréquence de collision a un comportement comparable à celui du néon à faible champ et à l'hélium à fort champ Ceci se remarque de plus en plus au fur et à mesure que l'on augmente la concentration en hélium. Nous avons trouvé que le mélange He80%-Ne a plus d'excitation

Nous avons également présenté les résultats de calcul pour le mélange xénon-néon, le xénon étant un bon producteur d'UV, le néon étant un gaz parent. Les paramètres de transport sont autrement affectés par la présence de ces deux types de gaz ; nous avons constaté un comportement similaire à celui du néon à faible champ et du xénon à fort champ et le comportement de la fréquence d'ionisation est différent. L'effet d'augmentation de la concentration en xénon est remarquable, nous avons constaté aussi qu'un mélange de 15% du xénon dans le néon a une excitation dominante

Nous avons aussi présenté le mélange d'un gaz qui favorise l'excitation avec un gaz qui a une ionisation facile ; Xe-Ne. Nous avons constaté que l'énergie moyenne, la mobilité, le coefficient d'ionisation et le coefficient de diffusion ont un comportement mixte entre le néon à fort champ et le xénon à faible champ. La fréquence de collision d'ionisation a un comportement différent à des gaz pur. L'effet de la concentration en xénon est clair pour l'énergie moyenne, la mobilité et le coefficient d'ionisation et les fréquences de collision .Il est léger pour la fréquence d'ionisation à faible champ .Nous avons constaté aussi qu'un mélange de Xe15%-Ne a une excitation dominante

Nous avons également étudié l'ajout des halogènes comme (le chlore et le fluor) ; la mobilité de ces mélanges a des valeurs plus élevées lorsque l'on ajoute le chlore. La concentration en krypton n'affecte pas le coefficient d'ionisation lorsqu'il est ajouté au fluor mais une légère augmentation quand il est ajouté au Cl₂. Pour le coefficient de diffusion l'effet de la concentration est clair. Nous avons trouvé également qu'à fort champ c'est l'ionisation qui est dominante pour un mélange de 10% de fluor dans le krypton et pour un mélange de 15% de chlore dans le krypton, c'est l'excitation qui est dominante à faible champ

Conclusion générale

Nous avons vu à travers les résultats de calculs que les gaz rares avaient des propriétés différentes les uns des autres, c'est ce qui les distingue pour une éventuelle application dans le domaine des décharges électriques. L'utilisation de mélanges de ces gaz a des effets sur le comportement des paramètres de transport et de collisions ; la concentration du mélange doit être prise en considération selon le besoin lors de leurs utilisations ; soit on veut plus d'excitation avec une tension élevée ou on choisit l'économie en énergie en réduisant la production UV. Le choix revient aux chercheurs et les industriels.

Bibliographie :

- [1] The periodic table of elements (DOI · 10.13140/RG.2.1.4509.7129). Last updated: May 7, 2018
- [2] John Emsley, Les blocs de construction de Nature: Un guide AZ des éléments, Oxford University Press, New York, 2^e édition, 2011.
- [3] Installation de Thomas Jefferson pour les accélérateurs nationaux - Office of Science Education, It's Elemental - Le tableau périodique des éléments , consultée Décembre 2014.
- [4] https://www.allodocteurs.fr/media/larger/6485-ballons_helium.jpg
- [5] https://docteurimago.fr/web/app/uploads/2018/06/img_9867180618-3178-1119x603.jpg
- [6] <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/tout-niveau/tableau-periodique/neon.html>
- [7] A. LOUNIS, mémoire-magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohamed BOUDIAF (2010)
- [8] Luis de Miranda, Neon. Le Néon dans l'art des années 1940 à nos jours (ouvrage publié à l'occasion de l'exposition Néon : Who's afraid of red, yellow and blue ? à la Maison Rouge), Archibooks, 2012, 183 p.
- [9] Étienne Roth (dir.), Bernard Poty (dir.), Robert Delmas et al. (préf. Jean Coulomb), Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels, Paris, Éditions Masson, coll. « Collection CEA », 1985, 631 p. , chap. 17 (« Silicium 32 et argon 39 »)
- [10] www.lenntech.fr
- [11] D. Basting and G. Marowsky, Eds., Excimer Laser Technology, Springer, 2005
- [12] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/50/Krypton_discharge_tube.jpg/220px-Krypton_discharge_tube.jpg
- [13] H. Claassen, H. Selig et J.G. Malm, « Xenon Tetrafluoride », J. Am. Chem. Soc., vol. 84, n° 18, 1962, p. 3593 (DOI 10.1021/ja00877a042).
- [14] R. Hoppe, W. Daehne, H. Mattauch et K. Roedder, « Fluorination of Xenon », Angew. Chem. Intern. Ed. Engl., vol. 1, 1^{er} novembre 1962, p. 599
- [15] James Burke, *Twin Tracks: The Unexpected Origins of the Modern World*, New York, Oxford University Press, 2003 , p. 33.

- [16] Thomas Marx, Michael Schmidt, Uwe Schirmer et Helmut Reinelt, « Xenon anesthesia », *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 93, 2000, p. 513–517.
- [17] N. G. Basov, V. A. Danilychev et Yu. M. Popov, « Stimulated Emission in the Vacuum Ultraviolet Region », *Soviet Journal of Quantum Electronics*, vol. 1, n° 1,) p. 18–22 ,1971
- [18] *La Presse Médicale* Volume 45, Issue 4, Part 1, April 2016, pp. 422-430]
- [19] *Journal of Forensic and Legal Medicine* Volume 58, August 2018, Pages 14-19
- [20] fr.wikipedia.org/wiki/Xénon
- [21] A. Grill. *Cold Plasma in Material Fabrication, From Fundamental to Applications*. IEEE Press, 1994.
- [22] J.J. Cuomo S.M. Rossnagel and W.D. Westwood. *Handbook of Plasma Processing Technology*. Park Ridge :Noyes, 1990.
- [23] A. Rutscher and H. Deutsch. *Wissensspeicher Plasmatechnik*. Leipzig : Fachbuchverlag, 1983.
- [24] H. Conrads and M. Schmidt. Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, 9(4) :441–454, 2000.
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Ionisation-7a14b.jpg>
- [26] www.cosmovisions.com
- [27] Callegari. Th, Ganter. R, and Bœuf. J.P, Diagnostic and modeling of a macroscopic plasma display panel cell, *J. Appl. Phys.* 88 (7) (2000) 3905-3912.
- [28] E. Esarey, et al., *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 1229.
- [29] Ingold J H 1989 *Phys. Rev. A* 40 3855–63
- [30] Graves D B and Jensen K F 1986 *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-14 78
- [31] Boeuf J-P 1987 *Phys. Rev. A* 36 2782
- [32] Salabas A, Gousset G and Alves L L 2002 *Plasma Sources Sci. Technol.* 11 448
- [33] Birdsall C K and Langdon A B, “*Plasma Physics via Computer Simulation*”, (New York: McGraw-Hill) 1985.
- [34] Hockney R W and Eastwood J W, “*Computer Simulation Using Particles*” (New York: McGraw-Hill) (1981).
- [35] Verboncoeur J P, Alves M V, Vahedi V and Birdsall C K, “Simultaneous potential and circuit solution for 1d bounded plasma particle simulation codes”, *J. Comput. Phys.* 104 321–8 (1993).
- [36] V. Vahedi and M. Surendra, “Monte Carlo collision model for particle-in-cell method: Application to argon and oxygen discharges”, *Comput. Phys. Commun.* 87 179–98 (1995)

- [37] T. R. Govindan and M. Meyyappan «One-Dimensional Modeling Studies of the Gaseous Electronics Conference RF Reference Cell», Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol 100, NO 4, pp.463-472 (1995).
- [38] T. J. Sommerer and M. J. Kushner, « Numerical investigation on the kinetics and chemistry of RF glow discharge plasmas sustained in He, N₂, O₂, He/N₂/O₂, He/CF₄/O₂, and SiH₄/NH₃ using a Monte Carlo-fluid hybrid model », J. Appl. Phys. 71, 1654 (1992)
- [39] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, «Pseudospark discharges via computer simulation», IEEE Trans. on Plasma Science 19 (2), 286, (1991).
- [40] P. Hartmann, H. Matsuo, Y. Ohtsuka et al , « Heavy-Particle Hybrid Simulation of a High-Voltage Glow Discharge in Helium », Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003).
- [41] G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, “Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models”, Plasma Sources Sci. Technol., vol. 14, pp. 722–733 (2005).
- [42] Bolsig, CPAT et kinema software, <http://www.siglo-Kinema.com / bolsig.htm>
- [43] S. Pancheshnyi, et al., 2012. The LXCat project: Electron scattering cross sections and swarm parameters for low temperature plasma modeling. Chemical Physics, 398, pp.148–153.
- [44] Adolf Fick, « Über Diffusion », Annalen der Physik und Chemie, vol. 94, 1855, p. 59–86
- [45] F. Ghaleb, W. Benstaali and A. Belasri, “Calculation of breakdown voltage in plasma display panels”, Journal of Materials Science and Engineering: C, V 28, Issues 5-6, July 2008, p791-794.
- [46] F. Ghaleb and A. Belasri, “Numerical and theoretical calculation of breakdown voltage in the electrical discharge for rare gases”, Radiation Effects & Defects in Solids, V 167, N° 6, June 2012, p377–383.
- [47] A. Oda, Y. Sakai, H. Akashei and H. Sugawara, J phys D. 32, 2726-2736, 1999
- [48] Laure Noualhat, « Et un, et deux, et trois vitrages », sur Libération, 23 novembre 2010
- [49] International Union of Pure and Applied Chemistry, helium–neon laser, Compendium of Chemical Terminology, édition Internet
- [50] W. Benstâali, Z. Harrache, and A. Belasri, Phys. Scr. Vol 85, 065502 (10p), 2012.
- [51] A. Belasri, N. Arbi Daho Bachir et Z. Harach, Plasma chemical and electrical modeling dielectric barrier discharge in Kr-Cl₂ GAZ MIXTURES. PLASMA S.C.I. TECHNOL. 33:131-146