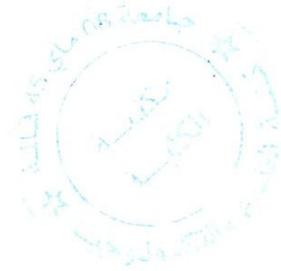


M/21.797

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine :** Sciences et Technologie  
**Filière :** Electrotechnique  
**Spécialité :** Réseaux Electriques

**Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de master académique**

---

*CLAQUAGE DES ISOLANTS GAZEUX*

---

Présenté par :  
*Benteboula Abdalwahab*

Sous la direction de :  
*Beloucif Faycel*

MAI 2013

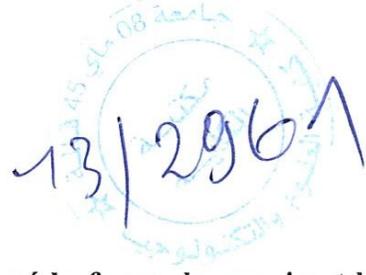


# REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبِّهِ أَشْرَحَ لِي صَدْرِي ﴿٢٥﴾ وَ يَسِّرْ لِي أَمْرِي ﴿٢٦﴾ وَأَخْلَصْ عُقْدَةَ مَنْ لَسَانِي ﴿٢٧﴾ يَتَّقَمُوا قَوْلِي ﴿٢٨﴾

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمِ



Tout d'abord je remercie le bon dieu qui m'a donné la force, le savoir et la patience pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier infiniment mon directeur de projet Mr le Docteur Beloucif Faycel qui m'a guidé, orienté et aidé inconditionnellement pendant ce travail.

Notre gratitude va également à :

Mr Dr Fraga Chams Eddine, Mr Dr Mousaoui abd-elkarim, Mr Dr Boudfel Amar, Mr Dr Boumaza Mohamed

Mes reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Finalement je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près et de loin à ma formation et surtout à nos collègues.

# *Introduction générale*

# Introduction Générale

---

## Introduction

*Le progrès technologique caractérisant le 20ème siècle a demandé l'augmentation de la puissance électrique fournie (la première ligne HT supérieure à 100kV a été réalisée en 1912, en Allemagne et en 1985, au Japon, une ligne de 1200kV a été construite). Cela a influencé l'évolution de l'appareillage à haute tension et a nécessité la construction d'appareillage qui peut gérer des tensions et des courants de plus en plus élevés. En parallèle, la concurrence a poussé les constructeurs à réaliser des appareils de plus en plus économiques et le développement des moyens de calcul a permis de mieux optimiser les dimensions et la géométrie de ces appareils.*

*L'isolation est réalisée par un gaz sous pression qui assure, à la fois, l'isolement à la masse, et l'isolement entre l'entrée et la sortie des appareils de coupure ou d'interruption. A 420kV, pour l'air à pression atmosphérique la distance minimale nécessaire entre le conducteur et la structure métallique reliée à la terre est d'environ 3 m et pour un poste sous enveloppe métallique cette distance peut être diminuée à 20 cm (en utilisant, par exemple, le SF6 à 7,3 bar). Les disjoncteurs à l'huile utilisés jusqu'aux années 60 pouvaient couper des courants inférieurs à 40 kA ; leur prix de construction et de maintenance ainsi que l'augmentation constante de la puissance circulée dans les lignes haute-tension ont provoqué l'apparition des disjoncteurs à gaz (SF6 ou vide) qui peuvent couper un courant jusqu'à une valeur 63 kA.*

*La réduction de la taille du matériel est une demande constante pour des questions du coût de production. Elle impacte directement les isolants et une*

## Introduction Générale

---

*optimisation diélectrique plus approfondie des composant et de l'ensemble est nécessaire.*

*L'utilisation des gaz isolants de forte rigidité diélectrique et s'impose pour le développement des équipements utilisés en électricité, le présent travail traite la dégradation de cette propriété par la présence des décharges électriques.*

*Une décharge électrique dans un gaz produit une ionisation du milieu, suivant les conditions tel que, le degré d'ionisation qui est exprimé par le rapport du nombre d'électrons au nombre de molécules neutres et la température dans la zone de déchargé ainsi que la pression du gaz seront plus au moins importants*

*Un régime d'arc apparait, si on continue d'augmenter la tension appliquée, l'arc électrique qui provoque le claquage se produit si les décharges électriques se propagent jusqu'à l'électrode opposée, à ce moment le gaz isolant perd toutes ces propriétés diélectriques et devient un milieu conducteur temporairement.*

*Donc notre travail comporte trois chapitres, dans le premier, nous avons étudié les différents types des isolants utilisés bien sûr dans notre domaines d'électrotechnique, de point de vue caractéristiques et lieu d'utilisation de ces matériaux diélectriques.*

*Le deuxième chapitre est consacré à faire une analyse détaillée sur les principales phénomènes physiques conduisent le changement d'état d'un gaz isolant soumis dans des conditions anormales come l'élévation de tension et température.*

*Dans le chapitre suivant , nous continuons d'écrire en détail dans un premier temps les différentes décharges électriques qui peuvent être produite, dans un gaz mis en être deux électrodes planes parallèles , puis en second temps analyser les principaux mécanismes de claquage des gaz isolants .*

## I.1. Introduction

*Les matériaux, dans leur acception la plus large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès accomplis dans la mise au point des matériels électriques. L'évolution des qualités de ces matériaux s'est étalée sur plus d'un siècle. Bien que cette évolution soit lente mais en terme de qualité elle a été considérable. En guise d'introduction à cette partie de notre travail nous donnons ici un aperçu général sur les matériaux isolant gazeux utilisés dans le domaine de l'industrie électrotechnique. Ces matériaux occupent une place importante dans les applications électriques puisque pouvant jouer un rôle de support mécanique en plus de leur fonction principale d'isolation.*

*Nous les retrouvons pratiquement partout où il y a des conducteurs électriques, même dans le cas des réseaux de transport ou de distribution où l'isolant principal est l'air, la liaison mécanique avec le pylône est assurée par un isolant gazeux. Les isolants gazeux sont aussi largement utilisés dans la confection des câbles, dans la majorité des transformateurs de puissance mais aussi dans les machines électriques tournantes. Du fait de leurs nombreuses qualités, les matériaux isolants sont vite devenus le point central dans la conception de beaucoup de catégories de matériels électriques puisque la fiabilité des dispositifs est largement déterminée par la pérennité des propriétés de ces isolants. Il est, en effet, vérifié que les défaillances du matériel électrique sont souvent associées à des phénomènes de rupture de leur isolation. Les phénomènes de rupture peuvent survenir même pour des champs électriques nettement inférieurs aux champs de rupture estimés. Ce genre de rupture est associé à une évolution temporelle des matériaux, c'est le processus de vieillissement. Il est donc nécessaire d'appréhender de la manière la plus précise les limites d'utilisation des isolants employés par la connaissance de leur évolution à long terme.*

### I.2. Généralités

*Lorsque l'on observe les matériaux sous l'angle de leur réponse à une sollicitation électrique on est appelé à parler soit de diélectrique soit d'isolant. Afin d'éviter toute incompréhension nous donnons les définitions suivantes :*

- **Un isolant** : *Est un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Sa destination première est d'empêcher tout contact entre des pièces métalliques portées à des potentiels différents. Une façon plus simple de définir un matériau isolant est de dire qu'il est caractérisé par une résistivité électrique très élevée. A l'opposé de celle des métaux, la résistivité de ces matériaux décroît lorsque leur température augmente.*
- **Un diélectrique** : *Est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à 5 eV. Dans la pratique technologique la différence entre isolant et diélectrique ne découle pas de propriétés différentes mais de l'angle sous lequel est vu le problème. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlerons d'isolant, par contre lorsque notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité plus ou moins accentuée nous invoquons le terme diélectrique.*

### I.3. Matériaux isolants

*Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{16} \Omega.m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.*

*Les isolants sont utilisés pour :*

- ✦ assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés  
→ protection des personnes et des équipements ;*
- ✦ supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;*
- ✦ remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.*

*Un système d'isolation est un isolant ou un ensemble d'isolants associés dans une machine électrique.*

### I.4. Les isolants utilisés dans l'industrie électrique

#### Isolants naturels :

- Minéraux ;*
- Organiques ;*

#### Isolants synthétiques :

- Matières plastiques ;*

## propriétés et utilisations des matériaux isolants

---

*La forme des électrodes, ainsi que leur état de surface, de petites irrégularités peuvent engendrer des décharges partielles.*

*Ces mécanismes provoquent généralement le vieillissement accéléré des matériaux isolant qui doivent conserver leur propriété d'isolation le plus longtemps possible*

*La dégradation de la fonction d'isolation électrique engendre des perturbations qui peuvent être fatales pour l'équipement. Du point de vue de l'ingénieur, le choix de l'isolation doit nécessairement prendre en considération les mécanismes de dégradation en condition réelle de service.*

### **I.7. Physique des diélectriques**

#### **I.7.1. Phénomène physique dans les milieux diélectrique**

*Les électrons présents dans un milieu diélectriques ne peuvent pas, par définition, se déplacer sur des grandes distances. Ils peuvent par contre présenter des mouvements d'amplitude très petite à notre échelle, mais qui peuvent être à l'origine de nombreux phénomènes. Ces mouvements sont souvent des mouvements d'oscillation autour du noyau : le nuage électronique peut être déformé et ainsi créer un dipôle électrostatique. Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (ils créent également des dipôles).*

##### **I.7.1.1. Création d'une polarisation**

*En soumettant le matériau à un champ électrique de tels dipôles peuvent être créés. S'ils existaient déjà, cela peut avoir comme effet de tous les aligner dans le*

même sens. D'un point de vue microscopique, on peut relier l'amplitude de l'onde au dipôle créé via la notion de polarisabilité, qui est une caractéristique propre à chaque atome. Il est cependant impossible de mesurer de telles grandeurs microscopiques. On préfère utiliser une grandeur macroscopique, la polarisation, qui vaut la somme de tous les dipôles du matériau.

La polarisation  $\vec{P}$  est souvent proportionnelle au champ électrique  $\vec{E}$  qui l'a créée (ce cas est dit linéaire) :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \dots \dots \dots (1.1)$$

Avec  $\epsilon_0$  la constante diélectrique et  $\chi$  la susceptibilité électrique du matériau, qui est un nombre complexe.

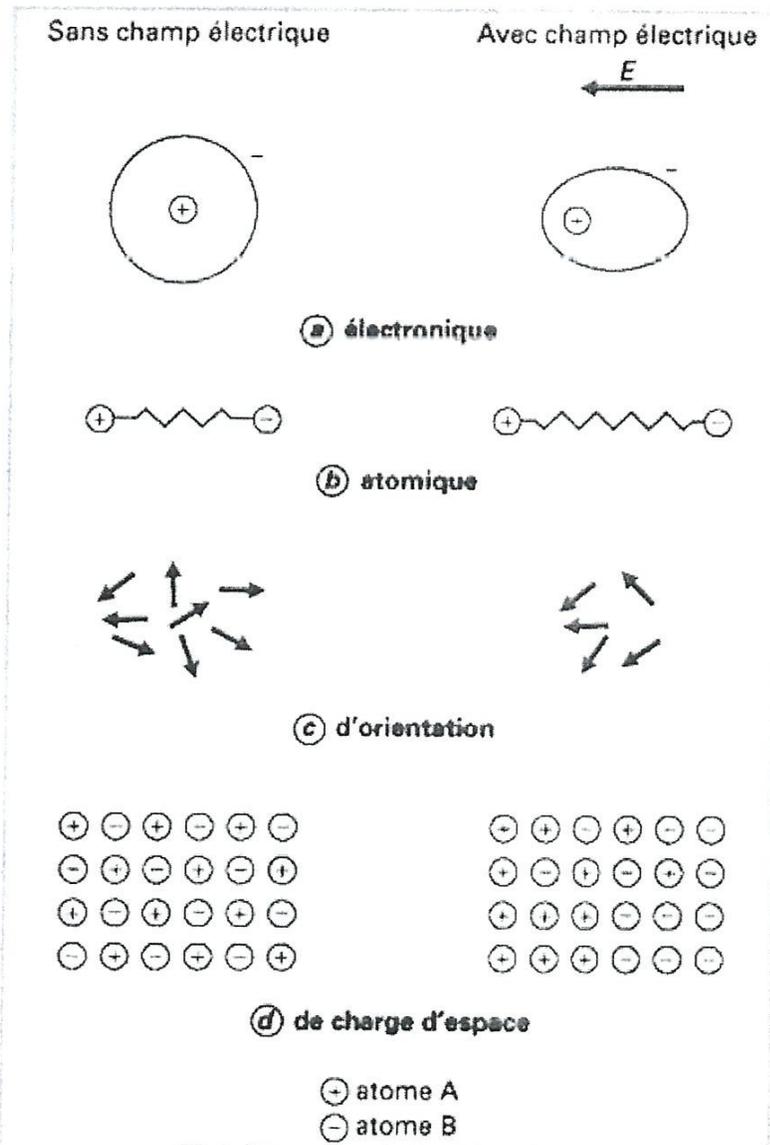
### I.7.1.1.a. Différents mécanisme de polarisation

Les plus importants mécanismes de polarisation dans les matériaux polymères sont :

- **La polarisation électronique**, toujours présente, due au déplacement et à la déformation du nuage électronique,
- **La polarisation atomique** ou ionique due aux déplacements des atomes ou des ions dans la structure du matériau
- **La polarisation d'orientation**, pour les matériaux qui sont initialement déjà polarisés de façon microscopique, mais dont les éléments n'ont pas forcément la même orientation,

## propriétés et utilisations des matériaux isolants

- **La polarisation macroscopique** due à des déplacements de charge dans l'ensemble du matériau.



Représentation schématique de quatre types de polarisation

### I.7.1.1.b. Susceptibilité électrique

*En électromagnétisme, la susceptibilité électrique  $\chi$  est une grandeur caractérisant la polarisation créée par un champ électrique. Ce phénomène se produit uniquement par l'intermédiaire d'un milieu matériel (souvent un matériau diélectrique), et dans de nombreux cas, l'intensité du champ électrique utilisé est suffisamment faible pour que la polarisation vérifie la relation (I.1)*

*Ce cas est dit linéaire car il s'agit d'une relation de proportionnalité. Il permet d'interpréter le phénomène de réfraction : en effet, la susceptibilité est reliée, d'après les équations de Maxwell, à l'indice de réfraction  $n$  par la relation :*

$$n = \sqrt{1 + R(x)}.$$

*Où  $R(x)$  désigne la partie réelle de la susceptibilité électrique.*

### I.7.2. Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques

*Les matériaux diélectriques sont caractérisés en particulier par : leur rigidité diélectrique ; leur permittivité diélectrique  $\epsilon$ , ou constante diélectrique et leur angle de perte.*

#### I.7.2.1. Rigidité diélectrique

*La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif. Pour un condensateur, quand cette valeur est dépassée, l'élément est détruit. La valeur*

maximale de la tension électrique appliquée aux bornes, est appelée tension de claquage du condensateur.

Si le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique du matériau, on parle de claquage, et le matériau peut voir ses propriétés physiques modifiées, parfois de façon réversible, et parfois de façon irréversible.

### I.7.2.1.a. Cas particulier d'un isolant gazeux

Dans le cas d'un isolant gazeux, la rigidité diélectrique dépend de la pression du gaz, selon une relation non linéaire. (Loi de Paschen).

#### ➤ Le champ disruptif de l'air

À la base, l'air est un fort isolant. Mais sous de fortes tensions, les électrons qui composent les atomes des molécules de l'air sont littéralement arrachés à leur orbite de valence pour participer à la conduction électrique : la foudre traverse alors l'atmosphère. La valeur du champ disruptif de l'air la plus communément admise est :

$$\vec{E}_{\text{disruptif}}(\text{air}) \approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \approx 36\,000 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$$

On peut interpréter de manière très simple cette formule, en disant que dans de l'air sec, il faut une différence de potentiel de 36 000 Volts pour faire une étincelle entre 2 points écartés de 1 centimètre, ou 3600 Volts pour faire une étincelle entre 2 points écartés de 1 millimètre.

## propriétés et utilisations des matériaux isolants

---

*Cette interprétation étant plus connue sous le nom de « règle des 30 000 V par cm ». Cela laisse présager en outre de l'ordre de grandeur des tensions mises en jeu dans le phénomène de la foudre.*

*Pour un air saturé en humidité, cette valeur peut tomber à 10 000 V par cm.*

### ➤ **Autres gaz diélectrique**

*Des gaz autres que l'air, sont utilisés dans l'appareillage à haute tension afin de réduire son encombrement. L'hexafluorure de soufre est largement utilisé en haute tension car son champ disruptif est au moins deux fois supérieur à celui de l'air.*

**Rigidité diélectrique de quelques diélectriques usuels**

Materiau	Rigidité Diélectrique (MV/m)
Air	3
Quartz	8
titanate de Strontium	8
Néoprène	12
Nylon	14
Pyrex	14
huile silicone	15
Papier	16
Bakelite	24
Polystyrene	24
Teflon	60

### I.7.2.2. Constante diélectrique

*La constante diélectrique ou constante électrique, également nommée permittivité du vide ou encore permittivité diélectrique du vide, est une constante physique. Elle est notée par  $\epsilon_0$ .*

*Le constant diélectrique se définit comme le rapport entre la permittivité  $\epsilon$  du matériau considéré et la permittivité du vide.*

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

*Ou :*

- $\mu_0$  : est la constante magnétique
- $c$  : est la vitesse de la lumière dans le vide.

*Dans le système d'unité SI  $\epsilon_0$  a pour valeur :  $\epsilon_0 = 8,854187817... \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$*

*Il ne s'agit pas à proprement parler d'une valeur approchée : les valeurs de .... Et  $c$  étant parfaitement déterminées, il est possible de connaître celle de  $\epsilon_0$  avec autant de chiffres significations que désiré.*

*Le constant diélectrique décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Elle intervient dans de nombreux domaines, en particulier en optique, via l'indice de réfraction.*

*Au niveau microscopique, le constant diélectrique est lié à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le milieu*

## propriétés et utilisations des matériaux isolants

### Interprétation physique

La permittivité d'un matériau est définie comme le rapport entre la norme du champ de déplacement électrique et celle du champ électrique appliqué au matériau.

Pour des champs suffisamment grand, ce rapport n'est pas constant et tend vers  $\epsilon_0$ .

$\epsilon_0$  peut être vue comme la permittivité intrinsèque du vide.

Pour un matériau donné de permittivité  $\epsilon$ , il est possible de définir la permittivité

relative, normalisée par rapport à celle du vide  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ . cette valeur ne possède pas

d'unité et est toujours supérieure à 1.

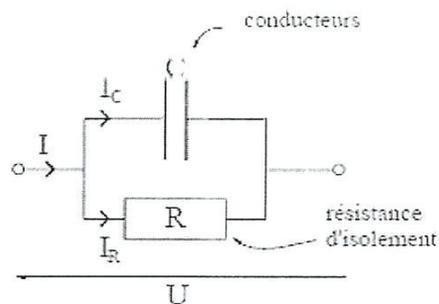
### Permittivité de quelques Matériaux

matériau	classe	condition	permittivité $\epsilon_r$
vide	gaz	0c, 1Atm	1
air	gaz	0c, 1Atm	1,00069
anhydride chlorhydrique (HCL)	gaz	0c, 1Atm	1,0046
soufre S	solide	20c	4
polyéthylène	solide	20c	2,25 – 2,3
eau (H <sub>2</sub> O)	liquide	20c	80
benzène (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	liquide	20c	2,28
quartz	cristal	20c	4,27 – 4,34

### I.7.2.3. Angle de pertes diélectrique et facteur de dissipation diélectrique

#### I.7.2.3.a. Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

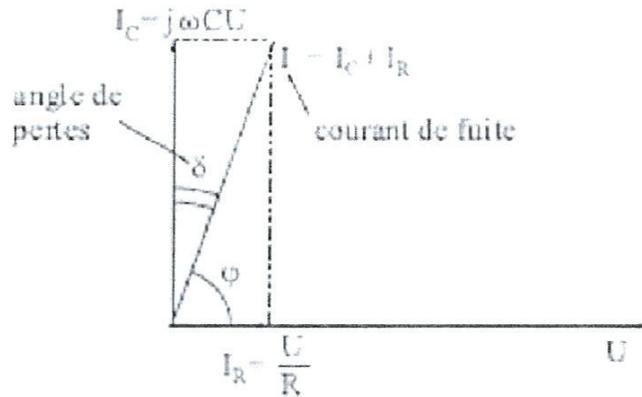
Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant :



La capacité  $C$  représente les conducteurs et la résistance  $R$  est la résistance d'isolement de l'isolant, elle est toujours  $\geq 10^{12} \Omega$ .

#### I.7.2.3.b. Calcul de l'angle de pertes diélectrique

L'angle de pertes  $\delta$  est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension  $U$  entre les conducteurs et le courant de fuite  $I$  traversant l'isolant :



On a :

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega \dots \dots \dots (1.3)$$

$$\Rightarrow \tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega} \dots \dots \dots (1.4)$$

La valeur  $\tan \delta$  est appelée facteur de dissipation diélectrique.

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- ⚡ Bon isolant  $\rightarrow$  résistance d'isolement  $R$  élevée  $\Rightarrow \delta$  faible ;
- ⚡ Mauvais isolant  $\rightarrow R$  faible  $\Rightarrow \delta$  élevé.

En pratique, le facteur de dissipation  $\tan \delta$  varie entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$ .

## Chapitre II

# Phénomène d'ionisation dans les gaz

## II .1. QUELQUES NOTIONS DE BASE

*Un gaz est constitué d'un grand nombre de particules de types différents, atomes, molécules, ions, électrons en agitation incessante. Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une de ces particules, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen. A l'équilibre, et en l'absence de forces extérieures, un gaz est constitué d'un ensemble de particules uniformément réparties, dont les vitesses n'ont aucune direction privilégiée (distribution isotrope).*

*L'énergie de chaque particule peut être stockée sous différentes formes, énergie de translation dans le cas d'un atome, énergie de rotation et de vibration dans le cas d'une molécule. Le théorème d'équipartition de l'énergie attribue à chaque degré de liberté définissant ces différents mouvements, une énergie égale à 1/2 kT. Dans le cas simple d'un atome en translation, son énergie est définie à partir des composantes cartésiennes de la vitesse, d'où une énergie égale à :*

$$\frac{1}{2} mV^2 = \frac{3}{2} kT \dots\dots\dots(II.1)$$

*Où V est la vitesse quadratique moyenne,*

*T la température thermodynamique,*

*k = 1,38.10<sup>-23</sup> J/K la constante de Boltzmann.*

*Il en résulte que pour un gaz composé de particules de masses différentes mais à température uniforme, les plus rapides sont aussi les plus légères. En particulier les électrons sont animés de vitesses très supérieures à celles des atomes ou des ions lourds [4].*

## II.1.1 Phénomènes de collision

*Au cours de leur mouvement, les particules peuvent se rencontrer, au sens où elles se rapprochent suffisamment pour donner lieu à une modification de leurs énergies respectives (avec conservation de l'énergie totale).*

*Si les particules n'échangent que de l'énergie cinétique de translation, on parle de choc élastique. C'est le cas de presque tous les atomes dans un gaz pris dans des conditions de pression et température normales.*

*Si les particules échangent une partie de leur énergie interne, on parle de choc non élastique.*

*Quel que soit le résultat de la collision, on ne peut définir que le comportement moyen d'une particule, et donc seulement définir la probabilité  $P$  qu'a une particule de donner lieu à une collision d'un type donné.*

*Cette probabilité n'est autre que le rapport du nombre de collisions  $dn_c$  subies par la particule pendant un déplacement élémentaire  $dx$ .*

*Par définition on pose :*

$$P = \frac{dn_c}{dx} = n\sigma(V) \dots \dots \dots (II.2)$$

*Où  $n$  est la densité de particules du gaz et  $\sigma(V)$  la section efficace de collision relative au type de collision considéré et qui dans le cas général dépend de la vitesse relative des deux particules en interaction.*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

Dans le cas simple d'un gaz monoatomique au sein duquel ne se produisent que des collisions élastiques on peut, en assimilant chaque atome à une sphère indéformable de diamètre  $d$  bien défini, donner une illustration physique de la notion de section efficace (hypothèse des boules de billard). Dans ce cas,  $dn_c$  n'est autre que le nombre de particules, supposées immobiles, dont le centre se trouve dans un cylindre de longueur  $dx$  et de rayon  $d$ , soit  $\pi d^2 dx$ . Alors, en comparant à la définition qui précède on a  $\sigma = \pi d^2$ .

Bien sûr, cette théorie ne s'applique bien qu'aux particules neutres pour lesquelles les champs d'interaction n'interviennent qu'à de très faibles distances. La notion de section efficace est plus difficile à appréhender pour des collisions entre particules chargées dont les interactions, de type Coulombien, ont des rayons d'action beau coup plus grands.

Une autre grandeur moyenne fréquemment utilisée et directement liée à la section efficace de collision est le libre parcours moyen  $\lambda$ . C'est la distance moyenne parcourue par l'atome entre deux chocs successifs et donc :

$$\lambda = \frac{1}{P} = \frac{1}{n\sigma} \dots \dots \dots (11.3)$$

La littérature donne généralement  $P$ , en fonction de l'énergie ou de la vitesse. Pour un type de collision donné, dans les conditions suivantes :

$$P = 1 \text{ torr} .$$

$$n = 3,56 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} .$$

$$T = 273 \text{ K} .$$

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

Dans ces conditions le libre parcours moyen est pour quelques gaz courants :

Gaz	$H_e$	$H_2$	A	$N_2$	$O_2$
$\lambda(\mu m)$	176	142	81	67	70

### a) Chocs élastiques

On a vu que dans un choc élastique, seul existait un transfert d'énergie cinétique de translation. Les lois de la mécanique permettent de déterminer les transferts d'énergie cinétique.

Si l'on considère deux particules de masse  $m_1$  et  $m_2$ , on peut montrer que les échanges d'énergie ne dépendent que de leurs masses respectives :

- Ces échanges sont d'autant plus importants qu'ils ont lieu entre des particules de masses voisines.
- Si l'une des particules est beaucoup plus légère (cas d'un électron) le transfert d'énergie est très faible et la particule lourde est peu influencée.

Il faut noter ici que l'équilibre thermodynamique est la conséquence des échanges d'énergie qui se font dans le gaz au cours des phénomènes de collision.

Il en résulte que dans les décharges gazeuses, constituées d'électrons, d'ions et de molécules neutres, l'équilibre thermodynamique n'est généralement pas réalisé. En effet, les électrons reçoivent de l'énergie du champ électrique appliqué, mais n'en cèdent qu'une très faible part par collision aux autres particules. Les électrons possèdent donc une énergie supérieure à celle des ions et des molécules neutres, ce qui conduit à l'existence d'une température électronique, dans le cas où celle-ci peut encore être définie, différente de celle des molécules neutres contenues dans le gaz.

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

### ***b) Chocs non élastiques***

*Pour étudier sous quelle forme peut être stockée l'énergie interne d'une particule, on doit revenir à la constitution de l'atome.*

*Celui-ci est constitué d'un noyau de particules lourdes autour duquel gravitent des électrons placés sur des orbites de différents rayons. Le niveau d'énergie d'un électron autour du noyau ne peut prendre que certaines valeurs discrètes. Cette quantification fait que les électrons ne peuvent graviter que sur un nombre discret d'orbites. L'état fondamental correspond à l'orbite la plus basse, c'est-à-dire au niveau d'énergie le plus faible. L'atome est dit excité si un ou plusieurs électrons sont situés sur des orbites de niveau supérieur, correspondant à de plus hauts niveaux d'énergie. Pour que l'énergie totale de l'atome soit conservée, la transition d'une orbite supérieure à une orbite inférieure ne peut se faire que par émission d'un quantum d'énergie radiée (photon) dont la fréquence  $\nu$  est donnée par la relation :*

$$h\nu = \Delta\varepsilon$$

*Où  $\Delta\varepsilon$  est la différence d'énergie entre les deux niveaux orbitaux, et  $h$  la constante de Planck ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ )*

*Il existe une infinité de niveaux discrets d'excitation, le plus grand correspondant à un électron dont le rayon orbital est infini, c'est-à-dire à l'ionisation.*

*Les énergies nécessaires à l'excitation ou à l'ionisation des atomes sont habituellement exprimées en électron-volt (eV),*

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

*C'est la variation d'énergie d'un électron lorsque celui-ci traverse une différence de potentiel de 1 V. Ceci explique que fréquemment, l'énergie d'un électron soit exprimée*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

*par la différence de potentiel qu'il doit franchir pour acquérir (ou perdre) cette énergie. On parle alors de potentiel d'excitation (ou d'ionisation).*

*En ce qui concerne la décharge dans les gaz, les collisions non élastiques n'intéressent que les électrons de la couche supérieure, électrons dits de valence qui sont impliqués dans les réactions chimiques [4].*

### **II.1.2 Processus d'excitation et d'ionisation**

*L'existence d'une décharge électrique résulte du passage d'un courant d'un le diélectrique gazeux et donc de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou molécules neutres constituant ces gaz. Nous verrons qu'a fait ce courant est « porté » essentiellement par les particules rapides, c'est-à-dire les électrons.*

*Il est donc important d'étudier tous les mécanismes régissant l'existence de cas électrons libres, d'une part les mécanismes d'ionisation tendant à faire croître leur densité et d'autre part les mécanismes de recombinaison et d'attachement tendait au contraire à réduire l'extension de la décharge.*

#### **a) Ionisation thermique**

*A la température ordinaire, l'énergie cinétique de translation acquise par les particules n'est généralement pas suffisante pour produire des chocs inélastiques (signalons toutefois la possibilité, dans le cas des gaz moléculaires, d'une excitation rotationnelle à température ordinaire).*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

*Cependant une élévation de température, et donc une agitation thermique croissante, pourra rendre un tel processus efficace, surtout si la pression est élevée.*

*Dans ce cas l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives. En effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs très élevée ; le temps moyen entre chocs successifs d'atomes déjà excités se cumulent pour éventuellement aboutir à l'ionisation.*

### **b) ionisation par choc**

*Un électron peut ioniser une particule neutre à condition qu'il ait une énergie supérieure à l'énergie d'ionisation  $eV_i$  de la particule. La probabilité d'ionisation croît assez rapidement des que l'énergie de l'électron dépasse  $eV_i$ , pour décroître à nouveau pour les grandes énergies.*

*Dans le cas d'une collision avec une particule excitée, l'énergie requise pour l'ionisation est plus faible et est donnée par la relation :*

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_i - eV_e \dots\dots\dots(11.4)$$

Où  $V_e$  est le potentiel d'excitation de l'atome.

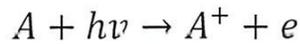
*L'ionisation peut être également produite par les ions positifs, mais ce processus exige que la particule incidente ait un haut niveau énergétique, de l'ordre de 100 ou 200 eV. Le phénomène n'intéresse que certains types de décharges à basse pression, dans lesquelles les ions, accélérés par le champ électrique, peuvent acquérir une énergie importante entre deux collisions.*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

### **c) ionisation par photon**

*Un photon suffisamment énergétique peut exciter ou même ioniser une particule neutre suivant le principe :*



*Dés que :*

$$h\nu \geq eV_i$$

*Ou :*

$$\lambda(A) \leq \frac{12400}{V_i(\text{volts})}$$

*L'excédent d'énergie du photon par rapport au potentiel d'ionisation  $V_i$  de A est alors fourni à l'électron libre sous d'énergie cinétique :*

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - eV_i$$

### **II.1.3. Processus de désexcitation et de désionisation**

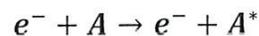
*A tout processus d'excitation ou d'ionisation est associé un processus inverse tendant à ramener les particules à leur état fondamental ou à réduire la concentration des particules ionisées.*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

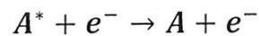
---

*Une caractéristique importante de l'équilibre thermodynamique d'un gaz est que les taux de production liés à des processus homologues inverses sont égaux.*

*Ainsi la réaction d'excitation d'un atome  $A$  par un électron  $e^-$  d'énergie supérieure au potentiel d'excitation de l'atome*



*Est compensée à l'équilibre par la réaction inverse :*



*Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément. Lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale, la perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.*

*La désexcitation peut aussi résulter du choc avec une particule, celle-ci bénéficiant alors, sous forme d'énergie cinétique, de la perte d'énergie interne subie par l'atome (on parle de collision superplastique).*

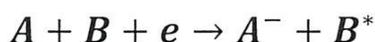
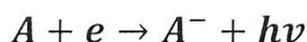
*La probabilité qu'a un processus ou l'autre de se produire, dépend du rapport entre la durée de vie de l'atome à l'état excité et la fréquence des collisions [4].*

### II.1.4. Attachement. Recombinaison

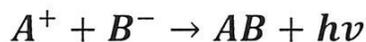
*Les processus conduisant à la diminution du nombre d'électrons libres dans un gaz ionisé peuvent être de deux types, attachement ou recombinaison.*

*L'attachement consiste en la fixation d'un électron par une molécule ou un atome neutre, d'où formation d'un ion négatif. Ce phénomène est d'autant plus important que la molécule présente une importante affinité électronique. C'est le cas des halogènes, et aussi de l'oxygène, d'où l'importance de ce processus et du processus inverse (détachement) dans l'étude de la décharge dans l'air. L'excédent de l'énergie fournie par l'électron incident, c'est-à-dire la différence entre son énergie cinétique et l'affinité électronique de la molécule, peut se retrouver, soit sous la forme d'une émission radiative dans le cas d'une collision entre deux corps, soit sous la forme d'une fourniture d'énergie cinétique à une troisième particule dans le cas d'une collision à trois corps.*

*Ces processus sont décrits respectivement par les équations :*



*La recombinaison est obtenue par collision d'un ion positif avec un électron ou un ion négatif suivant le schéma :*



*En général on n'utilise pas la section efficace pour étudier la fréquence des recombinaisons, mais le taux de recombinaison, dépendant de la concentration en ions positifs et négatifs, respectivement  $n^+$  et  $n^-$  :*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{dn^-}{dt} = -an^+n^-$$

On peut relier de façon approximative la constante de vitesse  $a$  à la section efficace  $\sigma$  pour le processus de recombinaison :

$$\frac{dn^+}{n^+} = -n^- \sigma dx$$

Cette relation est valable pour un faisceau d'ions positifs monocinétiques,  $a$  étant alors donné pour cette vitesse. Si l'on admet la même relation, pour une distribution aléatoire d'ions positifs,  $\sigma$  étant alors calculé pour la vitesse moyenne  $v$  de la population, on obtient :

$$\frac{dn^+}{n^+} = -n^- \sigma v dt \quad \text{d'où} \quad \frac{dn^+}{dt} = \frac{dn^-}{dt} = -n^- n^+ (\sigma v)$$

La constante  $a$  apparaît donc comme le produit de la vitesse relative par la section efficace.

Si :

$$n^+ = n^- = n, \quad \frac{dn}{dt} = -an^2 \quad \text{d'où} \quad n = \frac{n_0}{1 + n_0 at} \quad \text{et}$$

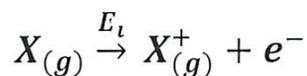
$$n = n_0 \quad \text{pour} \quad t = 0$$

Le taux de la recombinaison ion-ion est généralement beaucoup plus élevé que le taux de la recombinaison électron-ion, ce qui est dû à la faible mobilité des ions. Pour la même raison, à croître avec la pression jusqu'à un maximum au voisinage de la

*pression atmosphérique, la vitesse moyenne des ions décroissant alors avec leur libre parcours moyen [4].*

### II.2. Énergie d'ionisation

*Le potentiel d'ionisation  $E_i$  est l'énergie qu'il faut fournir à un atome à l'état gazeux pour lui arracher un électron.*



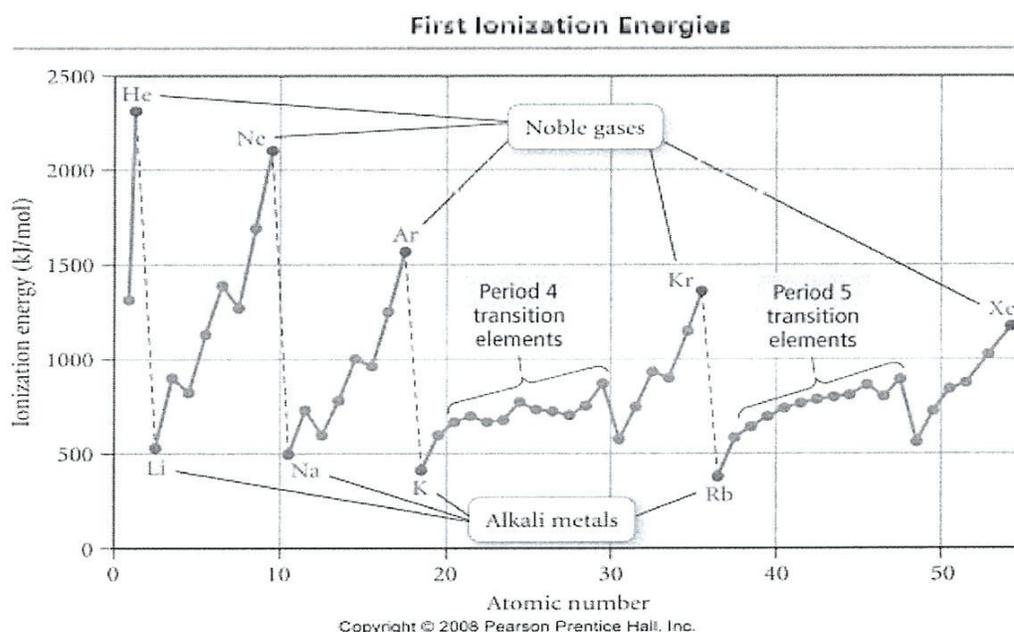
*L'énergie d'ionisation correspond à l'énergie qu'il faut fournir à un atome pour lui arracher un ou plusieurs électrons. Cette énergie peut avoir pour origine un rayonnement, une température élevée ou bien une réaction chimique.*

**Remarque :** *une augmentation de température provoque une élévation de l'énergie cinétique des atomes (ou molécules) et par conséquent leur énergie cinétique. Cela se traduit par un accroissement des chocs entre atomes et molécules.*

*L'énergie de première ionisation varie d'un atome à l'autre. On constate que l'énergie de première ionisation évolue avec le numéro atomique des atomes et met bien en évidence le caractère périodique des éléments. L'énergie d'ionisation augmente au cours d'une période, puis diminue brusquement d'une période à la suivante. On comprend facilement que l'énergie d'ionisation augmente dans une période car la charge du noyau, qui exerce une attraction sur les électrons, augmente*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

régulièrement (le rayon atomique diminue au cours d'une période montrant le caractère plus attractif du noyau sur les électrons pour les éléments placés à droite de la classification). La diminution de l'énergie d'une période à l'autre s'explique par le fait que l'électron arraché appartient à une couche de niveau supérieur, c'est-à-dire à une distance plus éloignée du noyau. À cela s'ajoute la répulsion électrostatique des charges négatives des électrons des couches inférieures sur les électrons de valences (effet d'écran).



L'énergie d'ionisation est la plus élevée pour les gaz rares qui, comme on l'a vu précédemment, possèdent une configuration électronique fondamentale saturée. Les gaz rares étant inertes on conclue que la saturation de la couche de valence en électron est un facteur de stabilité.

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

Au cours d'une ionisation successive de plusieurs électrons d'un atome, les énergies d'ionisation sont de plus en plus grandes (tableau). L'ordre de départ des électrons se fait depuis la couche électronique d'énergie la plus élevée vers la couche électronique d'énergie la plus faible. C'est-à-dire, à l'inverse de l'ordre de remplissage des orbitales atomiques lorsque l'on établit leur configuration électronique fondamentale. Au fur et à mesure qu'un électron est arraché, l'effet d'écran diminue et la charge nucléaire exerce une attraction plus forte sur les électrons restants. On peut remarquer dans le tableau qu'il y a un saut énergétique important à chaque fois que l'on arrache les électrons de cœur, c'est-à-dire ceux situés sous la couche de valence.

Lorsque les électrons de la couche de valence sont arrachés, l'atome correspondant adopte une configuration de type gaz rare, ce qui signifie stabilité.

$E_i$ Number	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
$E_{i1}$	496	738	578	787	1,012	1,000	1,251	1,520
$E_{i2}$	4,562	1,451	1,817	1,577	1,903	2,251	2,297	2,665
$E_{i3}$	6,912	7,733	2,745	3,231	2,912	3,361	3,822	3,931
$E_{i4}$	9,543	10,540	11,575	4,356	4,956	4,564	5,158	5,770
$E_{i5}$	13,353	13,630	14,830	16,091	6,273	7,013	6,540	7,238
$E_{i6}$	16,610	17,995	18,376	19,784	22,233	8,495	9,458	8,781
$E_{i7}$	20,114	21,703	23,293	23,783	25,397	27,106	11,020	11,995

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

*Par conséquent, dans les conditions d'une réaction chimique, seuls les électrons de la couche de valence peuvent s'échanger. Les électrons de cœur ne participent donc pas aux réactions.*

*La configuration électronique de la couche de valence détermine donc les propriétés des éléments de la classification périodique [6].*

### **II.3. Paramètres physiques d'initiation de la décharge**

*Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres qui sont essentiellement :*

**La densité électronique :** *la densité électronique ne est le nombre d'électrons libres par unité de volume  $\text{cm}^{-3}$ . C'est un paramètre important du fait de l'efficacité des processus de collisions. Les électrons sont les principaux responsables du transfert d'énergie du champ électrique externe vers le gaz. Le rendement du processus d'ionisation augmente lorsque l'on augmente la densité des électrons dans le milieu.*

**Le taux d'ionisation :** *le taux d'ionisation  $\tau_i$  représente le rapport du nombre d'électrons libres  $n_e$  sur le nombre de particules totales  $n_e + N$ , où  $N$  est le nombre de particules neutres. Il spécifie la fraction des particules dans une phase gazeuse où elles sont ionisées.*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

**La température :** La génération d'une décharge est influencée par de nombreux paramètres propres au gaz d'une part, à l'alimentation électrique d'autre part, et surtout à la température qui reste le facteur le plus important. Ainsi, en fonction de la température et de la concentration des électrons, on distingue différents types de plasmas naturels ou artificiels.

**Le libre parcours moyen (lpm):** Le libre parcours moyen  $\lambda$  correspond à la distance moyenne parcourue par une particule entre deux collisions successives. Intuitivement, et dans l'hypothèse d'un déplacement rectiligne des particules, la probabilité de collision est liée à la densité de particules. En faisant abstraction de la vitesse des particules susceptibles d'être heurtées et en prenant un modèle de type boule de billard représenté sur la **figure II.1**, on voit que le nombre  $n_c$  de chocs successifs subi par une particule incidente sur un déplacement  $dx$  est égal au nombre de particules contenues dans le volume  $\sigma dx$ ,  $\sigma$  désignant la section efficace de collision, soit :

$$n_c = \sigma dx$$

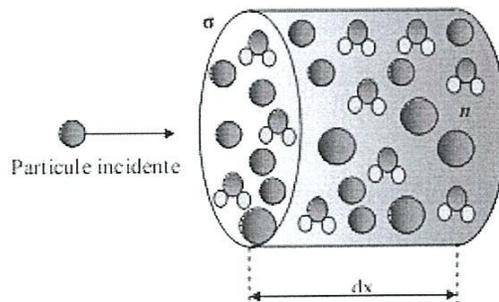


Figure II.1 - Volume d'interaction et Section efficace

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

La probabilité d'obtention d'un choc s'obtient donc pour une longueur  $\lambda$  telle que :

$$1 = n\sigma\lambda \quad \text{Soit} \quad \lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

Il apparaît donc que, le  $\lambda_{pm}$  est fonction de la concentration en particules  $n$  et de la section efficace de collision  $\sigma$  exprimée en  $cm^2$ . Précisons que cette section  $\sigma$  dépend également de la charge et de l'énergie de la particule incidente.

Il faut également ajouter que la densité de particules  $n$  est elle même liée à la pression et à la température par la loi des gaz parfait défini par :

$$P = nkt$$

Il en ressort que  $\lambda_0$  correspond au  $\lambda_{pm}$  à la pression  $P_0$  et à la température  $T_0$ , et  $\lambda$  au  $\lambda_{pm}$  à la

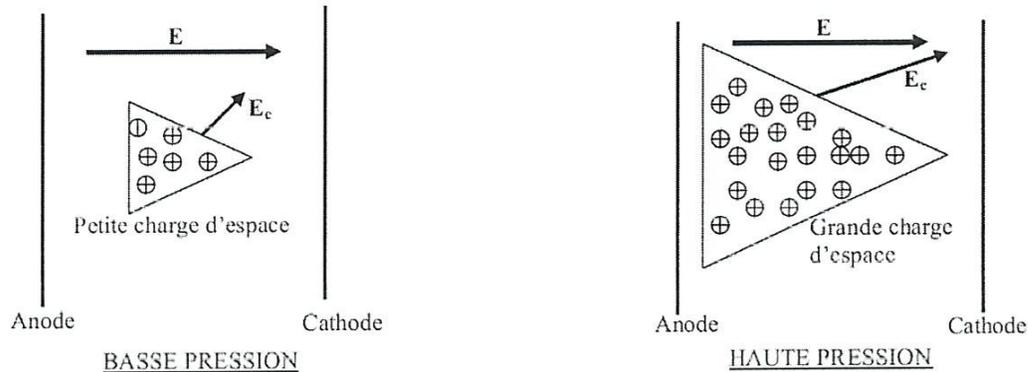
pression  $P$  et à la température  $T$ , on peut alors écrire :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0}$$

Au cours de l'évolution du  $\lambda_{pm}$  lors de la variation des conditions atmosphériques, il apparaît donc par exemple qu'une augmentation de température est "équivalente" à une réduction de pression, sans toutefois perdre de vue que le  $\lambda_{pm}$  dépend également de l'énergie de la particule incidente et donc du champ électrique auquel elle est soumise. Ce point sera à nouveau discuté ultérieurement.

Ainsi, plus la densité des molécules est grande, plus il y aura de chances que celles-ci se percutent, de sorte que le  $\lambda_{pm}$  s'en trouvera réduit [7].

## Influence de la pression :



**Figure 1**

*Durant l'avalanche électronique les électrons rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs moins rapides forment dans le gaz une charge d'espace. La taille de la charge d'espace dépend de la pression du gaz :*

### **a) Basse pression :**

*Comme la densité atomique est faible, la charge d'espace est telle qu'elle génère un champ électrique*

*$E_c$  faible et négligeable  $\Rightarrow$  MECANISME DE TOWNSEND.*

### **b) Haut pression :**

*La densité atomique est grande, la charge d'espace est volumineuse ; Elle crée un champ  $E_c$  considérable qui joue un rôle important dans le claquage  $\Rightarrow$  MECANISME DE STREAMER.*

### II.4. Avalanche électronique

*Le claquage des gaz est initié par une phase d'ionisation de ces gaz. L'ionisation est la dissociation des molécules de gaz en ions. Les gaz sont ionisés soit par bombardement d'électrons, soit par d'autres particules (rayonnement  $\alpha$ , UV) et surtout par chocs électrons ce dernier cas est énergétiquement le plus important.*

*Un électron dans un champ électrique se déplace et quand son énergie est suffisante, il ionise la molécule de gaz qui crée un autre électron, qui à son tour ionise une autre molécule, etc.*

*C'est ce qu'on appelle « avalanche électronique ».*

*Cette avalanche se manifeste par une décharge dite « non autonome » puisque cette décharge n'existe qu'en présence d'un agent ionisant (dans ce cas le champ électrique) [3].*

#### ✦ *Electron primaire :*

*Crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.*

#### ✦ *Description de l'avalanche :*

*L'électron primaire  $e_0$  accéléré par le champ  $E$  entre en collision avec un atome  $A_1$  et l'ionise,  $A_1$  libère un électron et devient lui même un ion positif.*

*Les électrons  $e_0$  et  $e_1$  ionisent par collision deux atomes  $A_2$  et  $A_3$  qui libèrent deux électrons  $e_2$  et  $e_3$ . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent  $\Rightarrow$  avalanche électronique.*

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode.

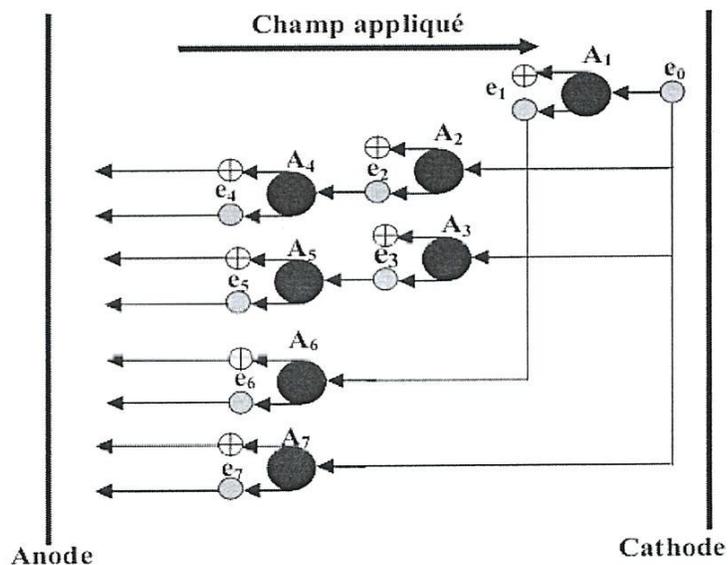


Figure II.2 : description de l'avalanche [2]

Donc dans un déplacement  $dx$ , un électron crée  $\alpha dx$  électrons.  $\alpha$  est appelé "premier coefficient de Townsend" et il désigne le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron effectue par unité de longueur dans la direction du champ. L'unité de  $\alpha$  est  $[cm^{-1}]$ .

Si  $n_0$  est le nombre d'électrons initialement existant dans le gaz, à la distance  $x$ , le nombre d'électrons créés par avalanche est :

$$n(x) = n_0 e^{\alpha x} \dots \dots \dots (II.6).$$

## Phénomènes d'ionisation dans les gaz

---

Si la densité de courant initiale étant  $j_0$ , par avalanche, ce courant devient :

$$j = j_0 e^{\alpha x} \dots\dots\dots (11.7).$$

## Chapitre III

Mécanisme de claquage des  
gaz isolant.

# Mécanisme de claquage des gaz isolants

## III.1 : Introduction :

L'application d'une tension continue sur deux électrodes planes séparées par une distance  $d$ , et on met en gaz. Isolant tel que l'air, et sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels (radiation sur la cathode par ses rayons ( $\alpha, \beta$  ou  $\gamma$ )), l'air peut perdre leurs propriétés diélectriques et devenu plus ou moins conducteur. ce phénomène dit l'ionisation de l'air. se traduit par dissociation de molécules neutres en électrons libres et en ions.

Le mouvement de ces porteurs de charge, en présence d'un champ électrique plus ou moins important produit une création de décharges de plusieurs types.

## III.2 : Caractéristique courant - tension :

La variation du courant produit par le mouvement des porteurs de charges en particulier les électrons, en opposition des lignes de champ électrique. Dans l'espace inter électrode peut donner lieu, selon le niveau de la tension appliquée, à ses décharges non autonomes (dépendantes) et des décharges autonomes (indépendantes).

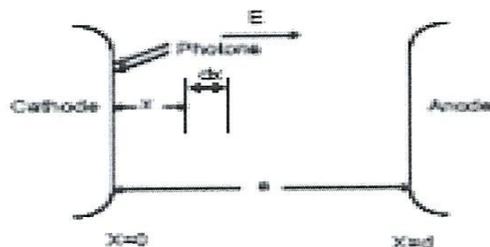


Figure III.1 : configuration des électrodes (plane –plane)

# Mécanisme de claquage des gaz isolants

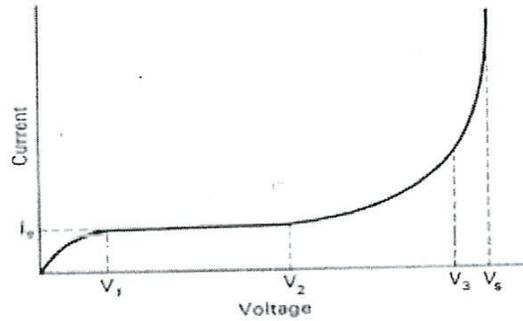


Figure III.2 : Caractéristique courant –tension en tension continue

## III.3 : Différentes décharges produites dans l'espace inter électrodes :

Pour mieux comprendre le développement de toutes les décharges, on a procédé de diviser les caractéristique en plusieurs zones (parties).

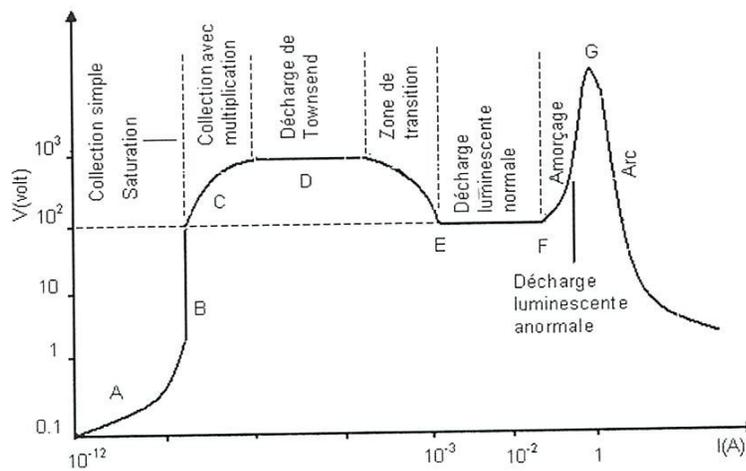


Figure III.3. : Régimes de décharges en courant continu.

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

- *On applique une tension, aucun courant ne circule ou très faible courant dès à ce présence de quelques électrons libres, mais pour un procédé thermique bombardement de la cathode pour un rayonnement ultraviolet, un agent extérieur, on provoque une émission thermo électronique ou photoélectrique à la cathode, des électrons sont émis et forment une charge d'espace. Prés de la cathode (partie A), si la tension est continue à augmenter jusqu'à ce qu'il aura une saturation. (Partie B), la décharge produite dans ces deux parties A, B est de type ou bien de caractère non autonome, dont le courant cesse dès que l'on arrête d'application de processus extérieur ( absence des rayons).*
- *Si la tension appliquée atteint une valeur dite critique dite tension de rupture, les électrons accélérés dans le champ inter électrodes acquièrent une énergie cinétique  $W C$ . supposant pour ioniser les atomes et les molécules de l'air, créent ainsi ces nouveaux électrons qui peuvent ioniser d'autres atomes, ce phénomène forme une avalanche électrique peut produire rapidement de fort courant. (**partie c**).*
- *Le courant n'est plus conditionné par la présence des agents extérieurs ionisants, et les décharges. Produites deviennent indépendantes, caractérisé par un régime un peu compliquer. Dépend seulement des autres .physiques et structure. (**partie D**), à cet effet la température du gaz devient suffisamment grande pour échauffer considérablement la cathode.*
- *Cette émission thermo électrique plus l'émission due à l'impact des ions positifs et négatifs et les atomes excités métastables. Provoque l'accroissement*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

*considérable du courant électronique et finalement l'application d'un arc électrique entre les électrodes. Produit ainsi un claquage du gaz isolant.*

### **III.4 : Processus de claquage :**

#### **III.4.1 : Initiation et développement :**

*Deux théories qui sont été développées pour expliquer comment et dans quelles conditions à partir de ces avalanches, le claquage ce produit.*

- *La théorie de TOWNSEND qui est valable pour seulement des gaz. En faible pression sous l'influence des champs électriques uniformes.*
- *La deuxième théorie est appelé la théorie des streamers, dans laquelle le claquage résulte d'une superposition de trois phénomènes :*
  - ⊕ *L'ionisation telle qu'elle est décrite dans la théorie de TOWNSEND*
  - ⊕ *Les effets de charge d'espace*
  - ⊕ *La photo ionisation dans le gaz qui entraine la production d'électrons germes à l'avant du front de l'onde d'ionisation, assurant ainsi sa propagation. Dans l'espace inter électrodes et partant de la pointe atteindre le plan et conduire ainsi au claquage.*

*En fonction de la nature de la tension appliquée et du type du gaz isolant (électro négatif)*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

*La formation des décharges et leurs analyses deviennent très compliquées, et ne peut être analysée et étudiée que par un support des essais pratiques.*

### III.4.2 : Processus de TOWNSEND :

*Dans la théorie de TOWNSEND, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante.*

*Ce processus se développe en deux phases d'ionisation du gaz soumis à une tension de rupture.*

#### III.4.2.1 : Première émission de TOWNSEND :

*Elle traduit le nombre total des électrons arrachés de la cathode par la présence d'un agent extérieur. (Rayonnement)*

- *Chaque électron libéré de la cathode, et dont leur mouvement vers l'anode. Sous l'effet du champ, entre en collision avec les atomes du gaz et en fonction de la pression et la température du milieu peu produire autres électrons.*

*D'après la figure*

*A une distance  $x = 0$  sur la surface cathodique*

*$x = 0$  il se produit  $N_0$  électrons.*

*à  $x = dx$  on aura  $N$  électrons nouveaux.*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

$$dN = \alpha \cdot N \cdot s \cdot dx \dots\dots\dots (III.1)$$

Tel que  $S$  : le surface unitaire =  $1 \text{ cm}^2$ .

$$dN = \alpha \cdot N \cdot dx.$$

$$\frac{dN}{N} = \alpha \cdot dx \dots\dots\dots (III.2)$$

La résolution de cette équation différentielle et on prenant les conditions limite suivante

$$\ln N = \alpha \cdot x + A. \quad (x = 0 \rightarrow A = \ln(N_0)).$$

$$\ln N = \alpha x + \ln N_0 \dots\dots\dots (III.3)$$

Ce qui donne :

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot x} \dots\dots\dots (III.4)$$

Sur la distance totale inter électrode ( $x = d$ ) il se produit :

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha_0 d} \dots\dots\dots (III.5)$$

Cette équation donne le nombre total des électrons ( $e$ ) arrivant à la surface anodique.

Par analogie le courant circulant dans l'espace inter électrode peut s'exprimer par :

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \dots\dots\dots (III.6)$$

Sachant que :

$\alpha$  : Le premier coefficient de TOWNSEND, il désigné le nombre des électrons produits par un seul électron primaire sur une unité de longueur.

### III.4.2.2 : Deuxième émission de TOWNSEND :

Dans cette phase, et pour un champ.  $E$  élevé, les ions produits sur tout le volume du gaz se dirigent vers la cathode sous l'effet de la force Électrique, en produisant par bombardement de la cathode D'autres nouveaux électrons.

Ces charges d'espace (ions positifs), accélèrent le processus de claquage. Du gaz, par arrachement de  $N_0^+$  électrons sur la cathode, renforcent les électrons produits en première émission.

TOWNSEND à introduit un coefficient, qui caractérise le nombre des électrons émis par la cathode par les ions positifs incidents.

En se basant sur les étapes de la première phase. D'ionisation, le nombre des électrons et le courant total développés dans l'espace inter électrodes sont exprimés par les expressions suivantes :

$$N = \frac{N_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \beta(e^{\alpha d} - 1)} \dots \dots \dots (III.7)$$

Ainsi que le courant :

$$I = \frac{I_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \beta(e^{\alpha d} - 1)} \dots \dots \dots (III.8)$$

Courant total arrive à l'anode, pendant la deuxième émission de TOWNSEND.

### III.4.3 Condition d'amorçage d'une décharge autonome :

Pour avoir une avalanche électronique, dont le nombre des électrons crée dans le gaz, augmente progressivement avec l'augmentation de la tension appliquée, il faut que : le dénominateur de l'expression (III.8) soit nul.

$$1 - \beta(e^{\alpha d} - 1) = 0 \dots \dots \dots (III.9)$$

$$\beta(e^{\alpha d} - 1) = 1 \Rightarrow \beta e^{\alpha d} - \beta = 1 \Rightarrow \beta e^{\alpha d} = 1 + \beta.$$

Ce qui donne :

$$e^{\alpha d} = \frac{1+\beta}{\beta} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

Ou bien :

$$\alpha d = \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (III.10)$$

L'équation (III.10) donne la condition d'amorçage d'une décharge autonome indépendante, pour le début d'étincelle est connue comme le critère de TOWNSEND pour la formation des décharges lumineuses donnent la naissance des étincelles.

Pour des faibles valeurs de deuxième coefficient de Townsend  $\beta = 10^{-2} - 10^{-1}$

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

On aura les cas suivants :

Si :

$$\triangleright \beta e^{\alpha d} = 1$$

*Dans ce moment le nombre des ions est suffisamment pour l'établissement de l'arc, et les décharges sont sites autonomes qui restent existantes, même si la source produisant le courant initial  $I_0$  est éliminée*

*Ce critère définit le seuil d'enclenchement des décharges électriques.*

Si :

$$\triangleright \beta e^{\alpha d} > 1$$

*L'ionisation produite par des avalanches successives, est cumulative, et les étincelles (décharges lumineuses) augmentent plus rapidement que le  $\beta e^{\alpha d}$  dépasse l'unité.*

### III.4.4. Calcul de tension de claquage de l'air :

*Pour la même configuration des électrodes (plane- plane), alimentée par une tension continue, et on se basant sur l'expression originale qui permet de déterminer le paramètre réduit  $[\alpha/p]$  Pour calculer la tension de claquage de l'air.*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

$$\frac{\alpha}{P} = \frac{i}{K.T} \cdot e^{-\left(\frac{i}{K.T}\right) \cdot \left(\frac{V_i}{E/P}\right)} = A(T) \cdot e^{-\left[\frac{B(T)}{E/P}\right]} \dots \dots \dots (III.11)$$

Ou :

$$A(T) = \frac{i}{K.T} , \quad B(T) = \frac{V_{ii}}{K.T}$$

Avec :

$T$  : Température du milieu en  $^{\circ}C$ .

$K$  : Constante de Boltzmann.

$$K = 1.3804 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}.$$

$V_i$  : Potentiel d'ionisation.

$i$  : Section d'ionisation.

$A(T)$  et  $B(T)$  : sont des constantes d'ionisation des gaz isolants, peuvent être déterminés expérimentalement.

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

TABLEAU (III.1) : Valeurs des constantes A et B pour  $T = 20^\circ\text{C}$

gaz	A (par ions. $\text{cm}^{-1}$ . $\text{torr}^{-1}$ )	B ( $\text{v. cm}^{-1}$ . $\text{torr}^{-1}$ )	$E/P$ ( $\text{v. cm}^{-1}$ . $\text{torr}^{-1}$ )	$V^i(\text{v})$
$\text{H}_2$	5	130	150 / 600	15,4
$\text{N}_2$	12	342	100 / 600	15,5
air	15	365	100 / 800	–
$\text{CO}_2$	20	466	500 / 1000	12,6
$\text{H}_2$	3	34	20 / 50	24,5

D'après l'expression générale (III.11)

Et pour un champ uniforme, on peut écrire :

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots (III.12)$$

$V$  : Tension appliquée

$d$  : Distance entre les électrodes planes

Remplaçons le champ  $E$  par sa valeur,

L'expression (III.11) devient,

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-\left(\frac{Bpd}{V}\right)}$$

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

Ou bien :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp - \left( \frac{Bpd}{V} \right) \dots \dots \dots (III.13)$$

$$\alpha \cdot d = pd \cdot A e^{\left[ -Bpd/V \right]}$$

D'après la condition d'amorçage, équation (III.10).

$$\alpha \cdot d = \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Le Butt est de faire sortir la tension de claquage et l'écrire sous forme  $U = f(pd)$ .

$$e^{\left( -Bpd/V \right)} = \frac{\alpha \cdot d}{pd \cdot A} \Rightarrow e^{Bpd/V} = \frac{Apd}{\alpha \cdot d}$$

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

D'où :

$$\frac{Bpd}{V} = \ln \left[ \frac{Apd}{\alpha d} \right]$$

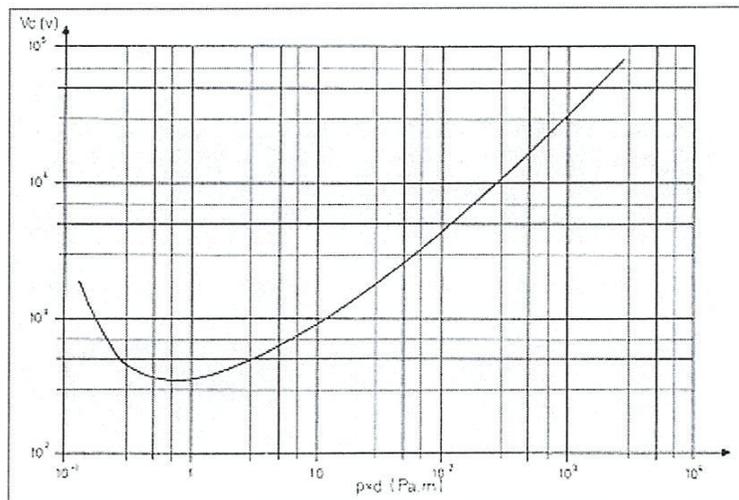
Et finalement la tension s'exprime comme suit :

$$V = \frac{Bpd}{\ln \left[ \frac{Apd}{\alpha d} \right]} \dots \dots \dots (III.14)$$

Si on remplace  $\alpha d = \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$  la tension peut avoir l'expression finale.

$$V = \frac{Bpd}{\ln \left[ \frac{Apd}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right]} \dots \dots \dots (III.15)$$

Cette expression s'appelle la loi de PASHEN



- Courbe de PASCHEN pour l'air à 20°C

FIGURE III.4 : courbe de PASCHEN pour l'air à 20°C

III.4.5 Calcul des valeurs minimales :

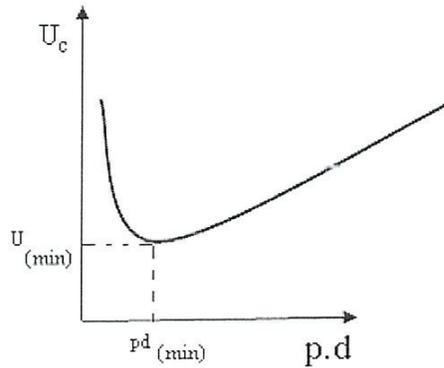


FIGURE III.5. Représentation des valeurs minimales (tension,  $p.d$ )

On dérive l'équation (III.15), par rapport à ( $p.d$ ).

$$\frac{dU}{d(p.d)} = 0$$

D'après le développement, on peut écrire :

$$\ln \left[ \frac{A.p.d}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right] = 1 \Rightarrow \frac{A.p.d}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} = e.$$

$$\Rightarrow \frac{A.p.d}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} = e \Rightarrow A.p.d = e. \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right).$$

D'où :

$$p.d_{min} = \frac{e}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (III.16)$$

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

Si on remplace  $pd_{min}$  Dans l'équation (III.15)

La tension minimale de claquage s'écrit :

$$U_{min} = \frac{Bpd_{min}}{\ln \left[ \frac{Apd_{min}}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right]} = \frac{B \cdot \left[ \frac{e}{A} \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]}{\ln \left[ \frac{A \frac{e}{A} \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right]}$$

$$U_{min} = \frac{B \cdot \frac{e}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)}{\ln e} = \frac{B}{A} \cdot e \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$U_{min} = \frac{B}{A} \cdot e \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (III.17)$$

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

### III.4.6 : Influence de la nature de gaz et de cathode :

#### III.4.6.1 : Influence de la cathode :

*La tension critique de claquage  $U_c$  dépend du type de la cathode utilisée.*

*Supposons 3 cathodes en matière différente : Aluminium, Nickel et l'Alliage AL-Ni.*

*Les énergies d'extraction d'électrons sont pour :*

- *Le Nickel  $W_{\text{ext}} = 0.075$  eV;*
- *L'Aluminium  $W_{\text{ext}} = 0.1$  eV;*
- *L'Alliage AL-Ni  $W_{\text{ext}} = 0.15$  eV.*
- *Il en résulte que  $U_c(\text{AL NI}) > U_c(\text{AL}) > U_c(\text{NI})$ .*

#### III.4.6.2: Nature de gaz :

*Le 1er coefficient de TOWNSEND est plus élevé dans le cas des gaz rares à cause de leur facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur, métallique...). Les gaz électronégatifs plus difficilement ionisables, possèdent un coefficient de TOWNSEND plus faible (cas du  $\text{SF}_6$ ,  $\text{O}_2$ ...).*

### III.5. les gaz électronégatifs :

#### III.5.1 : Définition :

*La diminution d'électrons dans le gaz, grâce à l'attachement aux atomes, rend le claquage plus difficile, pour cette raison, les gaz électronégatifs sont les meilleurs isolants gazeux utilisés dans l'isolation haute tension. Pour ce type de gaz, les molécules se combinent facilement avec les électrons libres et peuvent absorber une partie de l'énergie de l'électron incident*

#### III.5.2. Notions sur les gaz électronégatifs

- ❖ *Tous les gaz sont isolants*
- ❖ *Ont la même constante diélectrique  $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$*
- ❖ *L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par dessus la marche il est gratuit.*
- ❖ *Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen.*
- ❖ *N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que :*
  - *Grande résistivité ;*
  - *Pertes faible ;*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

- *Rigidité diélectrique élevée ;*
  - *Non inflammable ;*
  - *Résistant aux effets thermiques et chimiques ;*
  - *Absence de toute toxicité ;*
  - *Maintenance pas chère et pratique.*
- ❖ *Les gaz ne sont pas généralement considérés comme des "matériaux", parce que la distance entre les molécules adjacentes est si grande et le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume est si petit, qu'ils ne sont pas capables de résister aux forces mécaniques. Cependant, les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant [1].*

### **Exemple : Hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

*Dans les dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour raison d'encombrement et de coût, a conduit à rechercher d'autres types de gaz, possédant de meilleures propriétés d'isolation que l'air, tels que le SF<sub>6</sub>. Le SF<sub>6</sub> est un gaz inodore, incolore, non toxique, ininflammable et plus résistant au claquage. Il n'est pas toxique, chimiquement résistant et ne se décompose pas sous l'effet de la chaleur jusqu'à des températures de 800 °C [9].*

$$\frac{U_c(\text{SF}_6)}{U_c(\text{Air})} = 1; 6/2, 62$$

### III.6. Tension de claquage

*La tension de claquage (ou « tension disruptive ») d'un isolant électrique est la tension électrique minimale qui rend conductrice une portion d'un isolant. Ce terme est particulièrement utilisé pour les condensateurs, dont le fonctionnement repose sur l'isolant séparant ses deux bornes : si la tension de claquage est dépassée, un arc électrique se forme entre les deux bornes, ce qui détruit le condensateur par altération du matériau isolant, sauf si ce matériau est dit auto-régénérateur, comme l'air.*

*La tension de claquage d'une diode est la tension électrique inverse qui rend une diode conductrice dans le sens bloquant. Certains composants, comme les triacs, ont une tension disruptive directe.*

*Si  $U \geq U_c$  : l'isolant ne peut pas supporter cette tension  $\Rightarrow$  Claquage (décharge électrique).*

#### III.6.1. Cas des isolants

*La tension de claquage est une caractéristique des isolants électriques qui définit la différence de potentiel maximale qui peut être appliquée à un matériau avant qu'il ne devienne conducteur. Dans les gaz raréfiés que l'on trouve dans certains types de lampes à décharge, la tension de claquage est parfois appelée « tension d'amorçage».*

### III.6.2. Tension de rupture dans les gaz

*Dans les conditions standards, à pression atmosphérique, les gaz sont de très bons isolants qui nécessitent une différence de potentiel importante avant de produire un arc (comme la foudre par exemple). Dans le vide, cette tension de claquage peut décroître jusqu'au point où deux surfaces non isolées peuvent provoquer le claquage diélectrique du gaz du milieu. Ce phénomène a donné lieu à diverses applications dans l'industrie (comme la fabrication des microprocesseurs), mais, dans d'autres circonstances peuvent causer des dommages importants à un équipement car ce claquage se comporte comme un véritable court-circuit [6].*

*La tension de claquage dans le vide est décrite par la théorie de paschen:*

### III.7. Mesure de la tension de claquage ( $V_c$ )

*Quand une tension impulsionnelle est appliquée, la tension de claquage est une valeur statistique (la présence d'un électron germe n'est pas toujours assurée). La tenue diélectrique d'un gaz peut être présentée sous la forme de courbes de probabilité en fonction de la tension appliquée.*

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

---

circunstances peuvent causer des dommages importants à un équipement car ce claquage se comporte comme un véritable court-circuit [6].

La tension de claquage dans le vide est décrite par :

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln Apd - \ln \left[ \ln \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]} \dots\dots\dots (III.18)$$

$V_b$ : est la tension de claquage en volts de courant continu,

$A$  et  $B$  : sont des constantes qui dépendent du gaz du milieu,

$p$ : est la pression du gaz du milieu,

$d$ : est la distance en centimètres entre les électrodes ;

$\beta$ : est le coefficient d'émission électronique secondaire

### III.7. Mesure de la tension de claquage ( $V_c$ )

Quand une tension impulsionnelle est appliquée, la tension de claquage est une valeur statistique (la présence d'un électron germe n'est pas toujours assurée). La tenue diélectrique d'un gaz peut être présentée sous la forme de courbes de probabilité en fonction de la tension appliquée.

## Mécanisme de claquage des gaz isolants

### III.8. coefficient d'ionisation et de tension de claquage en fonction de pression.

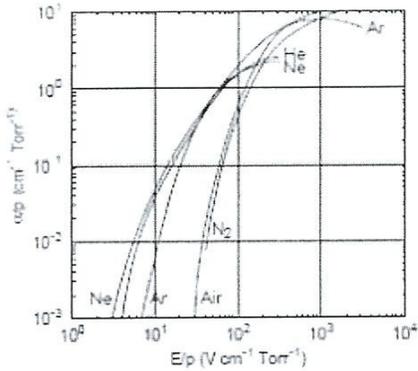


Figure III.7.a

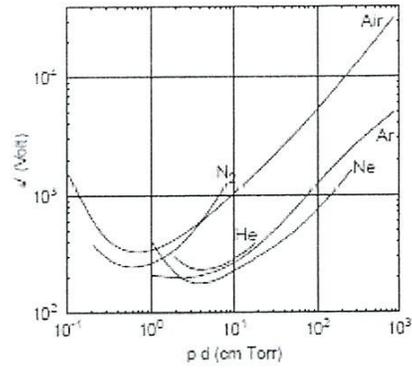


Figure III.7.b

Fig.III.7.a : dépendance de coefficient d'ionisation et le champ réduit  $E/P$

Fig.III.7.b : tension de claquage en fonction du produit ( $pd$ ) pour plusieurs gaz isolants

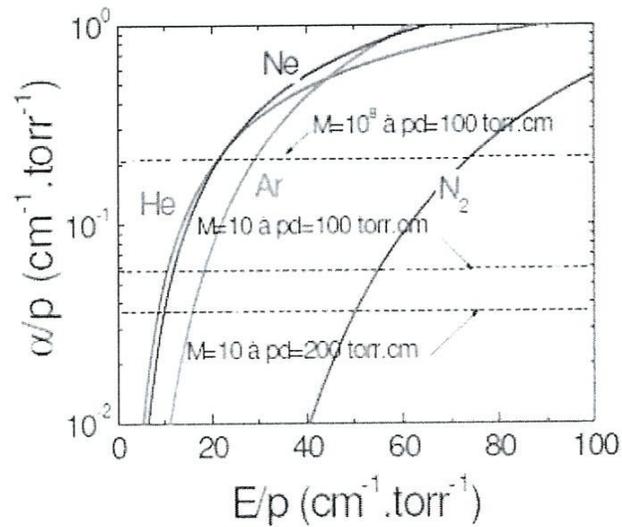
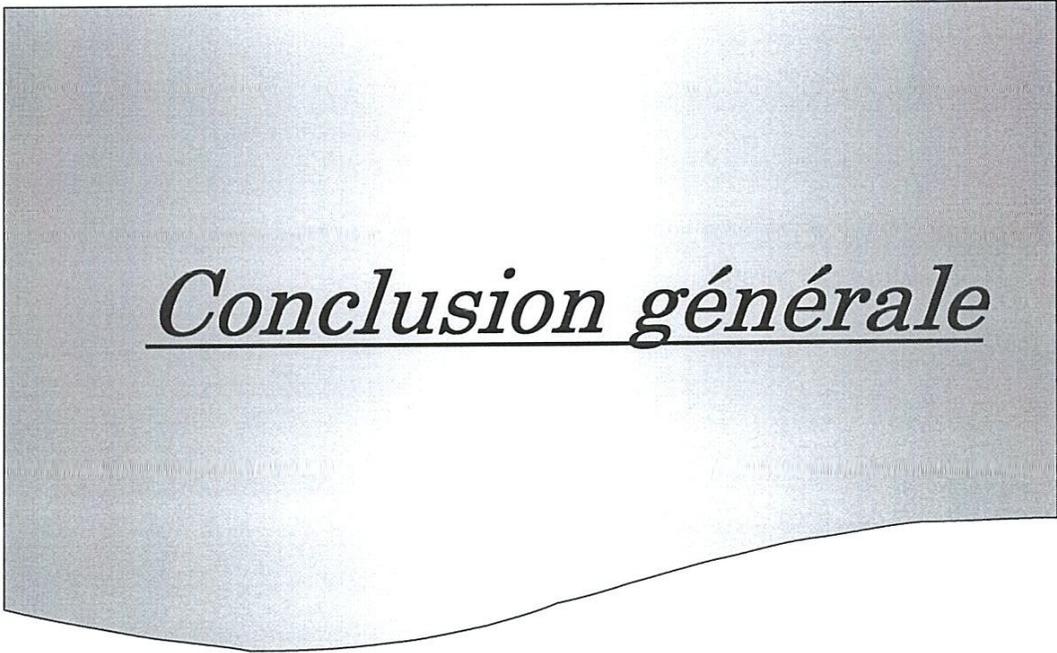


Figure III.7.a

### III.8. Conclusion

*Dans le gaz isolant, le critère de claquage basé sur la théorie de Townsend valable pour une distance inter-électrodes de l'ordre de 100 mm et une pression proche de la pression atmosphérique ne semble pas être adapté à notre cas (essais sous 0.4 MPA). Le critère de claquage basé sur la théorie du canal (streamer) semble être plus adapté mais, à cause des nombreux phénomènes qui interviennent, son application est très difficile. Nous avons donc établi un critère simple avec peu de paramètres qui explique bien les courbes de paschen.*



*Conclusion générale*

## Conclusion Générale

---

### **Conclusion :**

*L'étude que nous avons réalisée, présente une étape très importante pour l'analyse de la dégradation des isolants gazeux en présence de plusieurs décharges électriques.*

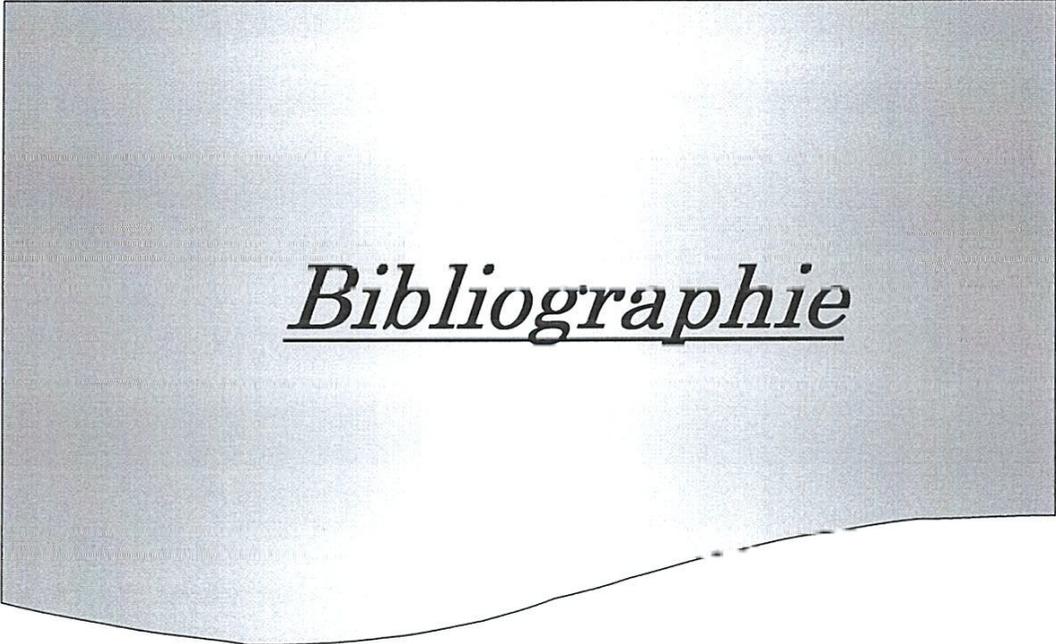
*Cette analyse permet d'établir tout d'abord les paramètres les plus sensibles entraînent le changement de comportement des gaz isolants, ainsi que le mécanisme le plus complet de processus de décharges électriques conduisent en phase finale d'une rupture certaine des isolants.*

- *Connaitre aussi les conditions d'établissement des décharges et leur évolution à partir d'un agent extérieur jusqu'au claquage.*
- *Tous les processus de claquage dépendent essentiellement d'un grand nombre de paramètres tel que la nature et la pression de gaz, géométrie des électrodes, forme et amplitude de la tension appliquée peuvent accélérer le processus de claquage, du fait que le degré d'ionisation s'est augmenté rapidement.*

*C'est dans les gaz que les mécanismes de claquage ont été les mieux élucidés et des bases théoriques ont été élaborées rappelons quelque particularité des gaz :*

- *De part leur faible permittivité diélectrique, dans le gaz la polarisation est négligeable ;*
- *En absence d'ionisation, les pertes diélectriques sont quasiment négligeable ;*
- *Dans le gaz, la pression a une grande influence sur les chocs moléculaires,*
- *Les porteurs de charge dans les gaz sont des ions et des électrons, dont la vitesse de déplacement des ions est plus faible par rapport à celle des électrons.*

On a conclu que les gaz électronégatifs sont plus favorisés du fait de leur coefficient d'attachement qui freine tout processus de claquage, ce qui augmente leurs tensions de claquage.



*Bibliographie*

# Bibliographie

---

## Bibliographie

[1] Michel Aguet, Michel Lanoz « Haut Tension : Traité d'électricité », presses polytechniques universitaires romandes.

[2] cours « techniques de la haut tension : master 1 ,chargé de cours beloucif f

[3] M. nemamcha, « haut tension : claquage des isolants » OPU, 2001.

[4] Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions

[5] [www.universalis/.../diélectrique -et-Isolants électrique](http://www.universalis/.../diélectrique-et-isolants-électrique)

[6] [fr.wikipedia.org/wiki/diélectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/diélectrique).

[7] THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Titre : " Formation de structures et phénomènes d'auto-organisation dans les Décharges à Barrière Diélectrique ".

[8] c.l.wadhwa .high voltage engineering.

[9] M.belhiteche elhadi : mémoire de magister en électrotechnique " thème : étude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharge électrique de surface.

[10] Lucian CALIAP : T H E S E pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'Université de Grenoble délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble.

[11] Mademoiselle SAAD Djedjiga : Magister Thème : Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques.

[12] yuri.p.raizer. gas discharges physics.

[13] E.kuffel . high voltage engineering fundamentals.