

CHAPITRE II

PHENOMENES D'IONISATION DANS LES GAZ

I. NOTIONS SUR LES GAZ

- Tous les gaz sont isolants
- Ont la même constante diélectrique $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85.10^{-12} F / m$
- L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par dessus le marché 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 ;
 - Rigidité diélectrique élevée ;
 - Non inflammable ;
 - Résistant aux effets thermiques et chimiques ;
 - Absence de toutes 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.

I.1. Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

- des protons : $m_p = 1,6725.10^{-27} kg$; $q_p = 1,6.10^{-19} C$
- des neutrons : $m_n = 1,6748.10^{-27} kg$; $q = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

$$m_e = 9,1019.10^{-31} kg ; q_e = -1,6.10^{-19} C$$

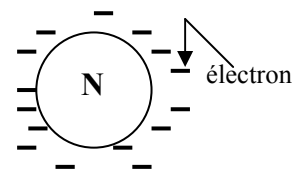


Figure 1 : Constitution d'un atome

A l'état fondamental, l'atome est neutre ;

- S'il libère un électron il devient un ion positif ; $A - 1e \rightarrow A_+$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif ; $A + 1e \rightarrow A_-$

Remarque : Le photon est un quantum d'énergie ($m=0$; $q=0$).

I.2. Mouvement des particules dans le gaz

Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est une masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes.

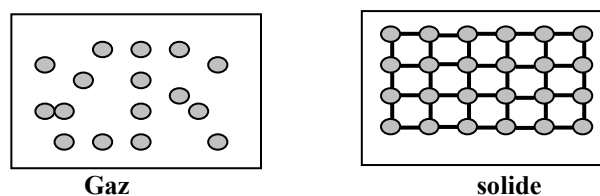


Figure 2

I.3. Pression du gaz

La pression P est proportionnelle à la densité atomique δ .

δ : Nombre d'atomes/unité de volume

λ : libre parcours moyen ($l.p.m$) : distance séparant deux particules voisines.

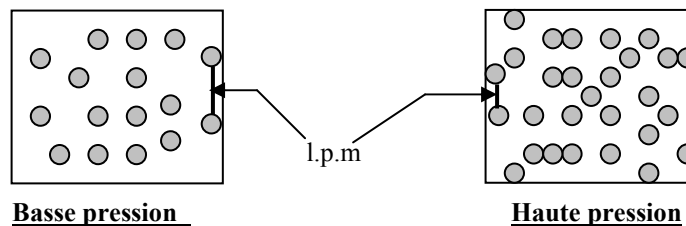


Figure 3

II. CLAUQUAGE

II.1. Tension critique de claquage U_c

Si $U \geq U_c$: l'isolant ne peut pas supporter cette tension \Rightarrow

Claquage (décharge électrique).

Remarque :

A la pression atmosphérique, si $d = 1\text{ cm}$: $U_c \approx 30\text{ kV}$;
donc le champ critique $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$.

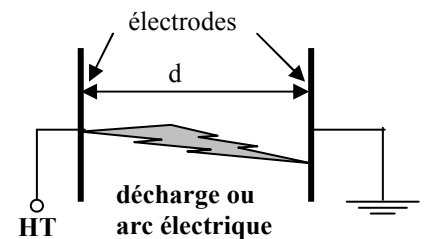


Figure 4

Etincelle-arc électrique :

Lors d'un claquage, si l'on contrôle le courant avec une résistance élevée, la décharge se stabilise pour des courants de l'ordre du μA (*Etincelle*). Sinon, s'il n'y a pas de résistance de protection R , la décharge évolue rapidement vers d'autres régimes caractérisés par des courants beaucoup plus élevés (*arc électrique*), si la source d'alimentation a une puissance suffisante.

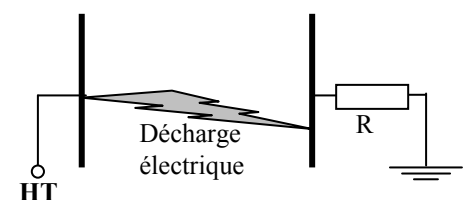


Figure 5

III. PHENOMENES DE COLLISION

Collision : choc entre deux particules.

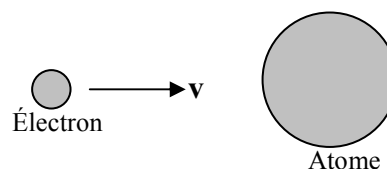


Figure 6

III.1. Choc élastique

On considère une boule de masse m qui entre en collision avec une autre boule de masse M .

Soient :

v : vitesse de m avant le choc ; v' : vitesse de m après le choc ; V : vitesse de M après choc.

- Principe de conservation de l'énergie cinétique W_c :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV^2 \quad (1)$$

- Principe de conservation de la quantité de mouvement :

$$mv = mv' + MV \quad (2)$$

A partir des équations 1 et 2, on obtient :

$$\frac{v'}{v} = \frac{M - m}{M + m}$$

- a) Si $M \cong m$: collision entre un atome et un ion ;
 $v' \cong 0 \Rightarrow$ la particule incidente perd son énergie cinétique.
- b) Si $M \gg m$: entre un atome et un électron ;
 $v' \cong v \Rightarrow$ la particule incidente conserve son énergie cinétique.

Conclusion : Dans un choc élastique, il y a un transfert d'énergie cinétique seulement.

Lors de chocs élastiques l'électron garde pratiquement toute son énergie et n'en cède 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. Comme l'électron conserve pratiquement toute son énergie cinétique après un choc élastique, il sera d'une grande importance pour les chocs non élastiques qui se produisent dans le mécanisme de claquage des gaz.

III.2. Choc non élastique

Au moment de la collision, si l'énergie cinétique de l'électron incident est suffisamment grande, l'atome libère un électron et devient ionisé (ionisation par collision) \Rightarrow choc non élastique.

IV. PROCESSUS D'IONISATION ET D'EXCITATION

Les électrons dans un conducteur sont libres, dès qu'on applique un champ aussi faible soit-il ils se détachent de l'atome et se déplacent avec le champ. Par contre dans un isolant, les électrons sont liés et ne se détachent que si on leur fournit une énergie suffisamment grande supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome.

Remarque : L'énergie d'ionisation W_i est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome.

$$W_i = e V_i$$

e : charge élémentaire d'un électron ; V_i : potentiel d'ionisation

On donne ci-dessous les énergies d'ionisation de quelques gaz.

Molécules	W_i (eV)
CO ₂	13,7
N ₂	15,5
O ₂	12,2
H ₂	15,4
H ₂ O	12,6

IV.1. Ionisation par collision

a) Ionisation :

Sous l'action de \mathbf{E} l'électron qui se déplace avec une énergie cinétique W_c , entre en collision avec l'atome ;

$$\text{Avec } W_c = \frac{1}{2} m v^2$$

m : masse de la particule

v : vitesse de la particule

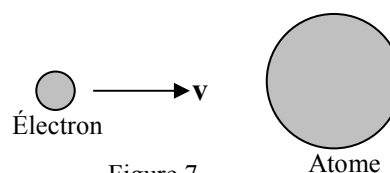


Figure 7

Si $W_c \geq W_i \Rightarrow$ ionisation de l'atome ; $A + W_c \rightarrow A^+ + 1e + \Delta W$

avec $\Delta W = W_c - W_i$ énergie supplémentaire cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

b) Excitation :

Un atome excité A^* est un atome qui a absorbé et emmagasiné une énergie. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique est légèrement inférieure à W_i .

Si W_c est légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ excitation de l'atome. $A + W_c \rightarrow A^*$

Chaque type de gaz possède une valeur propre de l'énergie d'excitation W_{ex} :

$$W_{ext} = e V_{ext}$$

V_{ext} : potentiel d'excitation

Désexcitation : 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.

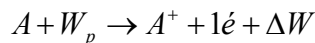
Après un temps très bref (entre 10^{-7} et 10^{-10} s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie $W_p = h\nu$ ($A^* \rightarrow A + W_p$)

avec $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s : constante de Planck ; ν fréquence du photon

IV.2. Photo-ionisation

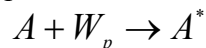
L'atome absorbe l'énergie d'un photon W_p .

- Si $W_p \geq W_i \Rightarrow$ photo-ionisation



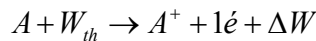
avec $\Delta W = W_p - W_i$ cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

- Si W_p légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ photo-excitation.

**IV.3. Ionisation thermique**

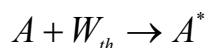
Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée (> 1500 °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée W_{th} .

- Si $W_{th} \geq W_i \Rightarrow$ ionisation



avec $\Delta W = W_{th} - W_i$ cédée à l'électron libéré.

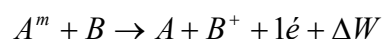
- Si W_{th} légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ excitation



L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. 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 élevée. Le temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation.

IV.4. Ionisation par les atomes métastables

Un métastable A^m est un atome excité qui garde assez longtemps l'énergie absorbée (de l'ordre de 1s). Lors de la rencontre avec un atome B, il peut se produire un transfert d'énergie qui permettra l'ionisation de ce dernier.



C'est le processus le moins fréquent.

V. AVALANCHE ELECTRONIQUE

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

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.

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

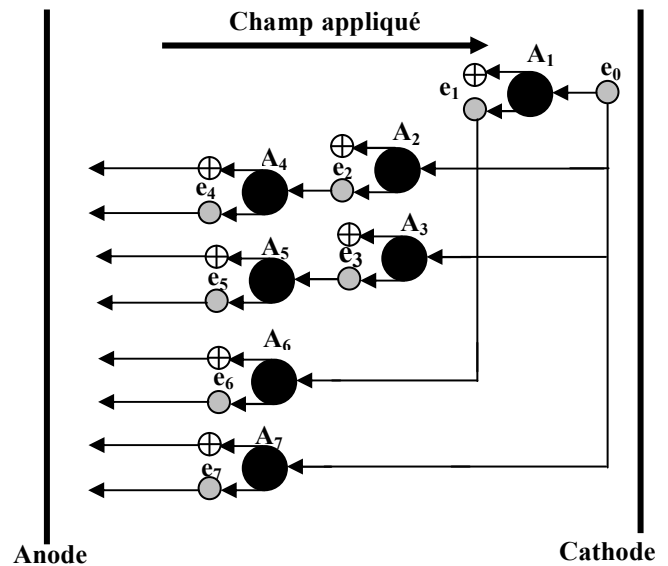


Figure 8

Remarques :

- L'avalanche prépare le chemin au claquage du gaz.
- Un atome ionisé fournit un électron et devient lui même un ion positif ; Il y a autant d'électrons dans l'avalanche que d'ions positifs. Chaque collision ionisante produit une paire électron-ion positif.
- L'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique (Cathode \rightarrow Anode).

VI. CHARGE D'ESPACE

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle « Charge d'espace ».

Forme de la charge d'espace :

Comme l'avalanche débute près de la cathode et finit sur l'anode, elle présente la forme d'un cône. Elle progresse dans le sens opposé à E .

Exemple :

Air, $P = 1 \text{ atm}$, $\alpha = 18,4$; $d = 10 \text{ mm}$

Dans le $10^{\text{ème}}$ mm, il y a 5 fois plus d'ions positifs que dans les 9 premiers mm.

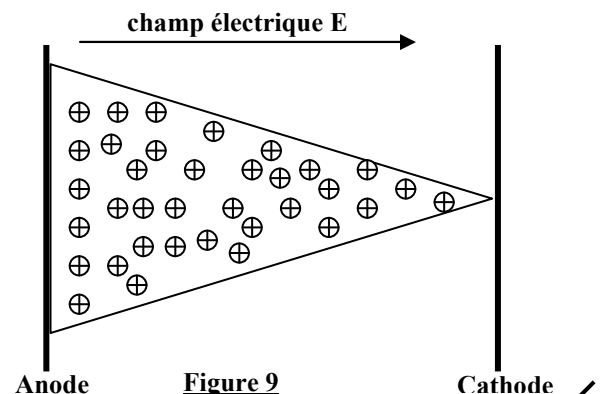


Figure 9

VII. ETUDE DE L'AVALANCHE

On considère deux électrodes planes de surface = unité, soumises à une haute tension.

Des rayons UV appliqués sur la cathode lui permet d'émettre n_0 électrons primaires/s.

- à l'abscisse x , l'avalanche produit n électrons.
- à l'abscisse $x+dx$, elle produit dn nouveaux électrons.

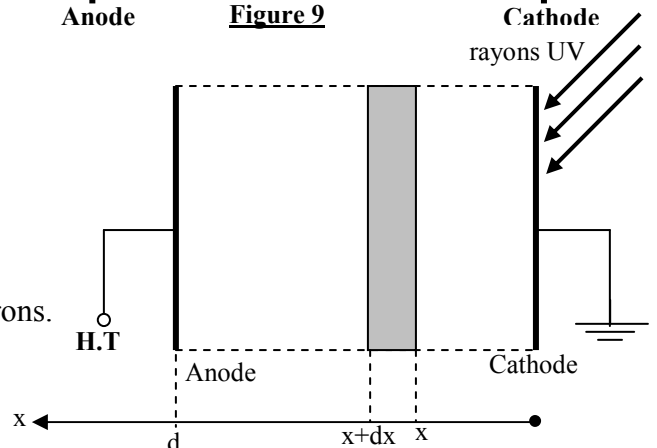


Figure 10

dn est proportionnel à n , dx et S : $dn = \alpha n S dx$.

Comme $S = 1 \text{ cm}^2$:

$$dn = \alpha n dx \Rightarrow \frac{dn}{n} = \alpha dx \Rightarrow \text{Log } n = \alpha x + C \Rightarrow n = e^C e^{\alpha x}$$

Condition limite : $x = 0 \Rightarrow n = n_0 = e^C \Rightarrow n = n_0 e^{\alpha x}$

Coefficient α :

$\alpha = dn \left(\frac{1}{n dx} \right)$ nombre de paires électrons-ions positifs créés par un électron sur un parcours de 1 cm.

α est appelé coefficient d'ionisation ou 1^{er} coefficient de Townsend.

Nombre total de paires électrons-ions positifs créés dans une avalanche:

$$x = d \Rightarrow n = n_0 e^{\alpha d}$$

Nature du courant de l'avalanche :

Rappel : $J = Nev$

avec N nombre de particules/volume ; e charge d'une particule ; v vitesse

$$\text{avalanche} \rightarrow \begin{matrix} N_e \text{ électrons} \\ N_i \text{ ions positifs} \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{courant électronique } J_e = N_e e v_e \\ \text{courant ionique } J_i = N_i e v_i \end{matrix}$$

comme $v_e \gg v_i \Rightarrow J_e \gg J_i \Rightarrow$ courant électronique.

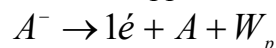
Courant total par avalanche :

$$n = n_0 e^{\alpha d} \Rightarrow i = n_0 e e^{\alpha d} \Rightarrow i = i_0 e^{\alpha d} \text{ avec } i_0 = n_0 e \text{ courant primaire}$$

VIII. DETACHEMENT ET RECOMBINAISON

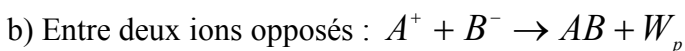
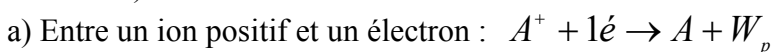
1) Détachement d'électron

Détachement : Quand l'ion négatif cède l'électron supplémentaire.



2) Recombinaison

Quand deux charges opposées se recombinent pour former une particule neutre (inverse de la photo ionisation)



IX. ATTACHEMENT

Quand un électron s'attache à un atome pour former un ion négatif ; $A + 1e \rightarrow A^- + h\nu$

L'attachement se produit pour des champs assez faibles. Les particules neutres (atomes et molécules) favorisent l'attachement des électrons

L'attachement correspond à une diminution d'électrons dans le gaz ; par analogie avec l'augmentation d'électrons par ionisation (α), on écrit :

$$\frac{dn}{n} = -\eta dx \quad \text{soit } n = n_0 e^{-\eta x}$$

avec η coefficient d'attachement, n_0 nombre d'électrons initial et n nombre d'électrons attachés.

X. GAZ ELECTRONEGATIFS

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.

Hexafluorure de soufre SF₆ :

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 SF₆. Le SF₆ 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.

$$\frac{U_c(SF_6)}{U_c(Air)} = 1,6 \div 2,62 ;$$

Le SF₆ est le meilleur isolant gazeux industriel qu'on connaît.

Remarques :

- Parallèlement, on a utilisé les bonnes caractéristiques du vide ($10^{-5} - 10^{-7}$ mm Hg) dans la technique de coupure (disjoncteurs, relais...) malgré des difficultés pratiques importantes.
- L'hydrogène et les gaz inertes (argon, néon, hélium,...) ont une rigidité diélectrique la plus faible que celle de l'air. Pour cette raison qu'ils sont employés dans les applications de la décharge électrique (lampe à décharge...).

XI. MILIEUX DE COUPURE DES DISJONCTEURS

Un grand nombre de substances possèdent des qualités, plus ou moins acceptables, pour être des milieux de coupure. Trois de ces milieux ont gagné l'attention des fabricants de disjoncteurs du fait que leurs propriétés excellentes ont permis des réalisations économiques à hautes performances. Ce sont :

- L'air comprimé ;
- L'hexafluorure de soufre ou SF₆ ;
- L'huile minérale.

XII. PROCESSUS CATHODIQUES

Si on fournit à un métal une énergie suffisante, supérieure à l'énergie d'extraction, il libère un ou plusieurs électrons situés à sa surface. Pour cette raison la cathode joue un rôle important car les électrons extraits participent au claquage.

Exemples: Aluminium $W_{\text{ext}} = 0,1$ eV ; Nickel $W_{\text{ext}} = 0,075$ eV ; Alliage Al-Ni $W_{\text{ext}} = 0,15$ eV.

XIII.1. Emission par bombardement d'ions positifs

Les ions positifs se dirigent vers la cathode avec une énergie cinétique

$$W_c = \frac{1}{2}mv^2 \text{ et la bombardent.}$$

Si $W_c \geq W_{\text{ext}}$, la cathode libère un ou plusieurs électrons. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

Remarques :

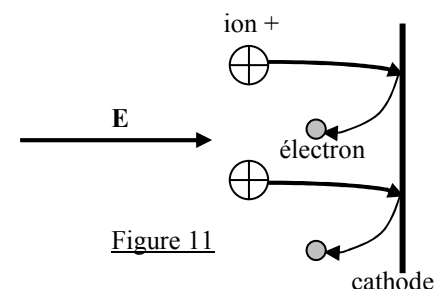


Figure 11

- le surplus d'énergie $\Delta W = W_c - W_{ext}$ est cédée à l'électron émis sous forme d'énergie cinétique.
- un électron parmi ceux émis sert à la neutralisation de l'ion incident : pour dégager un électron libre (secondaire) il faut que $W_c \geq 2W_{ext}$.

XIII.2. Emission par photon

La cathode absorbe un photon d'énergie $W_p = h\nu$; Si $W_c \geq W_p$, il y a extraction d'un ou plusieurs électrons.

XIII.3. Emission thermique

Quand la température de la cathode devient très grande (entre 1500 et 2500 °K), l'énergie thermique de la cathode extrait un ou plusieurs électrons. En effet, les vibrations élevées des particules aboutissent à la libération d'un ou de plusieurs électrons situés à la surface du métal.

XIII.4. Emission par champ

Si le champ à la surface est très élevé (10^7 à 10^8 V/cm), un ou plusieurs électrons peuvent être extraits par la force électrique.

Remarque : de tels champs peuvent être atteints lorsque la cathode présente des irrégularités et des imperfections à la surface (micro-pointes) même avec une tension appliquée de 2 à 5 kV. C'est un processus d'ionisation très peu fréquent.

XIII.5. Emission par les métastables

Le bombardement de la cathode par les métastables permet aussi l'extraction d'électrons. C'est aussi un processus peu fréquent.