

CHAPITRE III

MECANISMES DE CLAQUAGE DES ISOLANTS GAZEUX

C'est dans le gaz que le mécanisme de claquage a été le mieux élucidé et des bases théoriques ont été élaborées. Le mécanisme de claquage dans les solides et les liquides n'est pas encore aussi bien établi.

I) INFLUENCE DE LA PRESSION

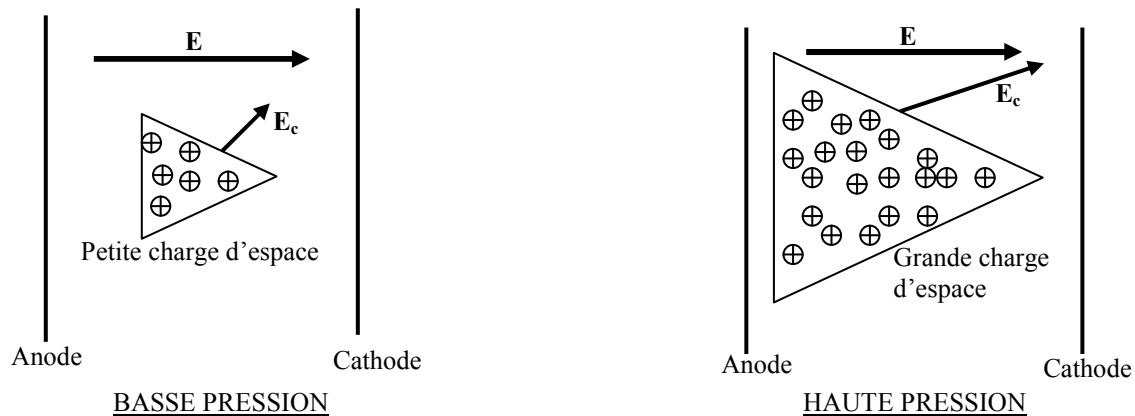


Figure 1

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) Haute 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) MECANISME DE TOWNSEND (Basse Pression)

Pour les distances faibles (max. 1 m), la théorie de Townsend est valable pour des pressions inférieures à 0,1 à 1 atmosphère tandis que la théorie de Streamer est valable pour les hautes pressions (≥ 1 atm).

Phase 1 : Un électron primaire situé près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire.

Phase 2 : Les électrons sont absorbés par l'anode tandis que les ions positifs bombardent la cathode avec leur énergie cinétique pour extraire des électrons secondaires.

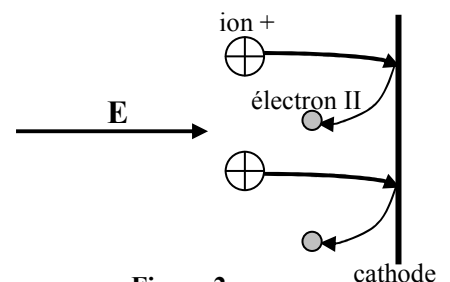


Figure 2

Phase 3 : Les électrons (secondaires) émis de la cathode par bombardement créent de nouvelles avalanches secondaires et provoquent le claquage du gaz.

Remarques :

- Dans le mécanisme de Townsend, l'étincelle de la décharge se produit dès que la cathode émet des électrons secondaires.
- La décharge de Townsend se situe entre 10^{-8} et 10^{-6} A, elle est donc peu lumineuse. La luminosité est à peu près uniforme dans tout l'espace compris entre les électrodes.

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

Il en résulte que $U_c(\text{Al-Ni}) > U_c(\text{Al}) > U_c(\text{Ni})$

Coefficients α et γ :

- Coefficient d'ionisation α : nombre d'électrons créés par ionisation par un électron sur 1 cm de parcours.
- Coefficient γ : nombre d'électrons secondaires émis par bombardement de la cathode par un ion positif.

Le premier coefficient de Townsend, appelé aussi coefficient d'ionisation, est plus élevé dans les gaz rares à cause de leur facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur métallique...). Ce coefficient est par contre plus petit dans le cas des gaz électronégatifs.

b) Critère de claquage : (EXERCICE)**III) CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION**

Les électrons primaires sont extraits artificiellement de la cathode grâce à des rayons UV. La cathode émet n_0/s électrons.

Partie OA : $I=f(U)$ droite $\Rightarrow U=RI$ (Loi d'Ohm);

R : résistance du gaz.

Le courant est dû au déplacement des n_0 électrons primaires

Partie AB : $I=I_0$ courant de saturation.

Le courant de saturation est dû au déplacement des n_0 électrons primaires. Même si la tension augmente, la cathode ne peut fournir plus de n_0 électrons/s \Rightarrow saturation. Le courant de saturation dans l'air est atteint à de faibles valeurs de champ électrique. Quand l'intervalle entre les électrodes est de 10 mm, la saturation est obtenue à seulement 0,5 V/m.

Partie BC ($U>U_B$) : croissance exponentielle de I .

Puisque le courant I augmente, il y a d'autres charges qui sont produites en plus des électrons primaires. Ces nouvelles charges sont créées car les électrons primaires ont l'énergie cinétique nécessaire pour provoquer des avalanches primaires.

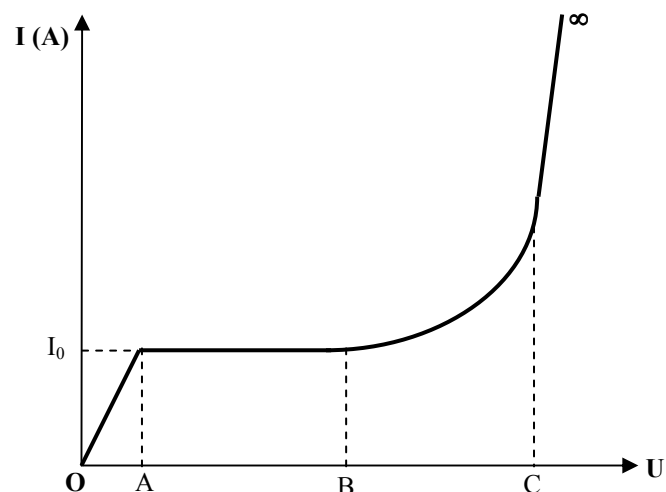


Figure 3

Partie C-∞ : I devient infini \Rightarrow Claquage.

Les ions positifs auront l'énergie nécessaire pour extraire de la cathode quelques électrons secondaires qui provoquent des avalanches secondaires, et produire le claquage.

U_c : tension critique de claquage.

IV) LOI DE PASCHEN

Considérons une enceinte pleine de gaz le quel on peut varier la pression (Figure 5).

La loi de Paschen décrit la variation de la tension critique en fonction du produit $P*d$ (Figure 6).

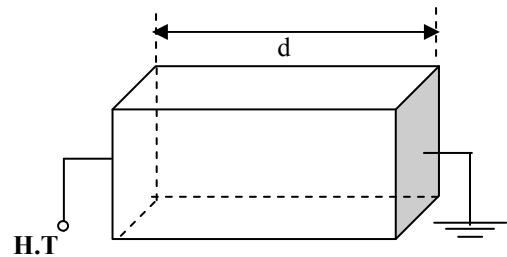


Figure 5 : Enceinte remplie par un gaz

U_c : tension critique de claquage ;

P : pression du gaz ;

d : distance inter-électrodes.

U_{cmin} : tension critique minimale ;

Si $U < U_{cmin} \Rightarrow$ pas de claquage.

Loi de Paschen est étudiée en champ homogène.

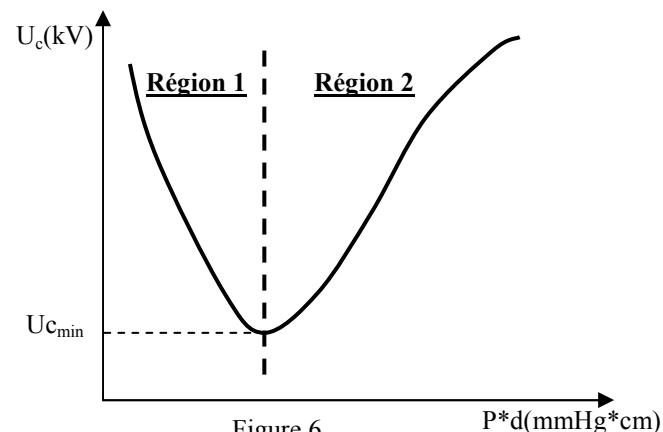


Figure 6

IV.1) Minimum de Paschen

On peut voir d'après la courbe de Paschen qu'il y a une valeur de tension U_{cmin} (voir tableau en page 2). Quand la tension est inférieure à cette valeur, l'intervalle gazeux de n'importe quelle longueur et sous n'importe quelle pression ne peut être claqué.

Pour l'air : $U_{cmin} = 326$ V

Pour l'argon pur : $U_{cmin} = 195$ V

Pour l'argon avec des impuretés de sodium : $U_{cmin} = 95$ V.

La courbe de Paschen présente un minimum qui correspond à 300-400 V dans l'air à la pression atmosphérique. Ce minimum est assez mal défini et dépend de l'état des électrodes et du gaz. Cela signifie qu'au dessous de cette tension aucun amorçage n'est possible. C'est ainsi qu'à 220 V, nous aurons seulement des étincelles de rupture de tension inductive et jamais d'étincelles dues à la tension elle même.

IV.2. Interprétation de la courbe : (d constante)

Région 1 : U_c diminue en fonction de la pression P

Quand la pression augmente, la densité atomique augmente ; Il y a plus de particules et donc plus d'ionisation par collision. Le gaz devient plus conducteur et le claquage plus facile $\Rightarrow U_c$ diminue.

Région 2 : U_c augmente avec la pression P .

Quand la pression augmente encore plus, malgré que la probabilité d'ionisation par collision augmente, le libre parcours moyen λ est tellement petit que l'énergie de l'électron $W = \int qE dr = qE\lambda$ nécessaire à l'ionisation des atomes devient insuffisante. Il y a peu d'ionisation et le claquage devient difficile $\Rightarrow U_c$ augmente

Déduction : Selon la loi de Paschen, il est plus recommandé d'utiliser les gaz à haute pression (et quelquefois à très basse pression) dans les appareillages HT, condensateurs, câbles... La validité

expérimentale de la loi de Paschen est vérifiée aux faibles distances jusqu'à 0,1 mm et des pressions jusqu'à 10 atmosphères.

V) MECANISME DE STREAMER (Haute pression)

Le mécanisme se déroule comme suit :

PHASE 1 : Un électron primaire se trouvant près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire. La vitesse des électrons étant 100 fois environ supérieure à celle des ions, l'avalanche se développe comme un nuage d'électrons laissant derrière elle une charge d'espace positive (Figure 7.a).

Les électrons sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs forment dans le gaz une charge d'espace positive. Le champ E_c de cette charge est maximal en tête d'avalanche (Figure 7.a).

PHASE 2 : Des électrons secondaires sont créés par photo-ionisation autour de la charge d'espace. Ces électrons provoquent en tête d'avalanche de petites avalanches secondaires (Figure 7.b). Le champ de la CE renforce le champ entre la tête de l'avalanche et la cathode et crée également une composante radiale.

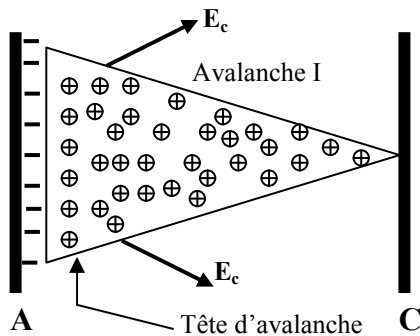


Figure 7.a

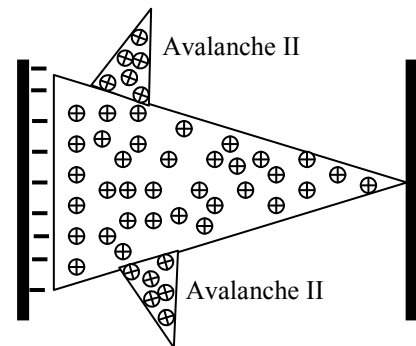


Figure 7.b

Origine des électrons secondaires : La tête d'avalanche est le siège d'une importante activité (collisions entre électrons et ions positifs) qui est source de photons qui sont absorbés par le gaz environnant. En particulier, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons ayant une énergie supérieure à 13 eV qui est suffisante pour ioniser les molécules d'oxygène dont l'énergie d'ionisation n'est que de 12,2 eV.

PHASE 3 : La charge d'espace augmente en volume et devient un « Streamer ». De nouvelles avalanches secondaires viennent s'ajouter à l'avalanche primaire et le Streamer progresse (Figure 7.c). Quand il touche la cathode, à ce moment se produit le claquage (Figure 7.d).

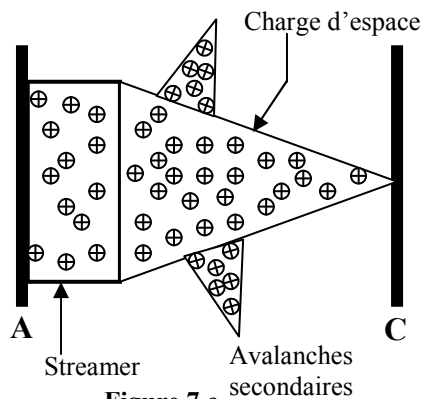


Figure 7.c

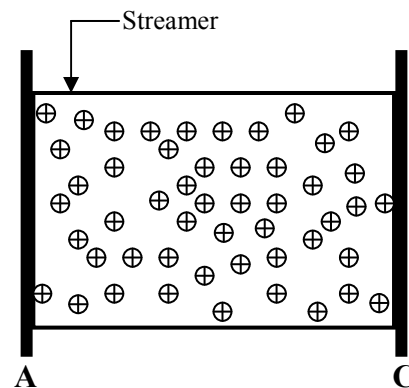


Figure 7.d

V.3) Caractéristique $U_c = f(P \cdot d)$

Elle est équivalente à la loi de Paschen.

La courbe suit la loi de Paschen jusqu'à p_0 puis augmente lentement avec la pression avant d'atteindre une valeur presque constante ; $p_0 \approx (10 \div 20) \text{ atm}$.

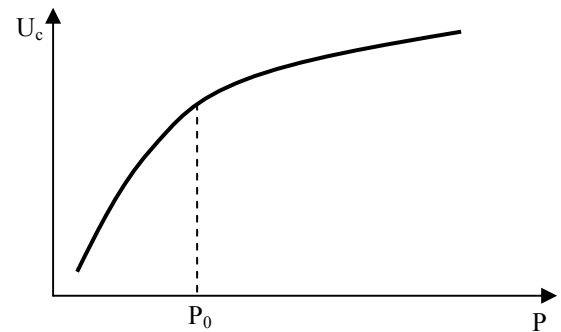


Figure 9

VI) CLAQUAGE SOUS TENSION DE CHOC

Le claquage d'un isolant gazeux ne peut pas se produire s'il n'existe pas au moins un électron primaire dans l'intervalle inter-électrodes. La présence de cet électron crée par les rayonnements cosmiques ou la radio-activité de la terre a un caractère aléatoire.

- **Tension continue** : il y a tout le temps nécessaire pour l'apparition d'un électron primaire dans l'espace inter-électrodes. Si $U \geq U_c$, il se produit forcément un claquage.
- **Tension alternative** : le temps d'une alternance est généralement suffisant (10 ms) à l'apparition d'au moins un électron primaire. Si $U \geq U_c$, il se produit forcément un claquage.
- **Tension de choc** : comme les impulsions sont très brèves (quelques μs), la probabilité qu'un électron se trouve dans le gaz durant la durée de l'impulsion est faible (Figure 10). Le claquage ne se produit pas forcément même si on applique une tension supérieure à U_c .

t_s : temps statistique d'apparition d'un électron primaire dans le gaz.

t_f : temps de formation de la décharge (très court par rapport à t_s).

$t = t_s + t_f$: Temps de retard du claquage.

Lorsque l'isolant est soumis à une tension de choc (impulsion), la tension U_c est plus grande que dans le cas d'une tension DC ou CA.

Remarque : Afin d'assurer la présence des électrons primaires lors des essais sous tension de choc, ceux-ci sont générés artificiellement dans le gaz en utilisant une source de lumière UV, des matériaux radio-actifs ou une décharge auxiliaire.

On peut le considérer comme étant égal à la somme du :

- Temps de retard statistique « t_s », c'est le temps requis pour la production d'un électron libre, il est le plus fluctuant à cause de la nature aléatoire de sa présence dans le volume critique. Si l'électron est pré-existant dans le volume critique, ce temps est par définition nul.
- Temps formatif « t_f », Il est relatif à la formation d'avalanches successives conduisant à l'avalanche de taille critique. Il est important dans le domaine de la décharge de Townsend et négligeable devant le temps statistique dans la théorie des Streamers.

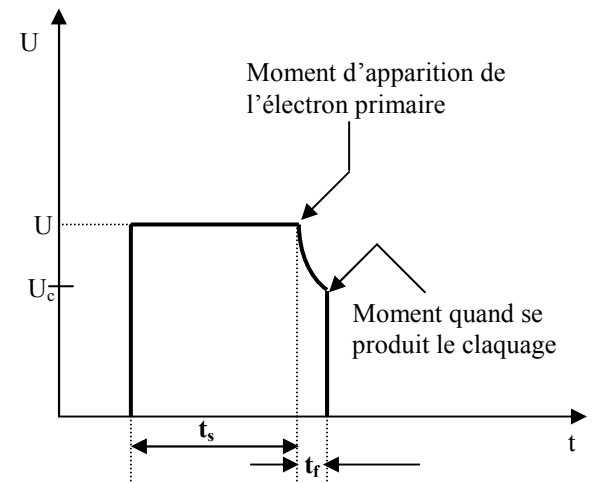


Figure 10

VII) DECHARGE PARTIELLE

Des bulles d'air existent toujours à l'intérieur des isolants solides et liquides.

D'après les conditions limites du champ électrique, nous pouvons écrire :

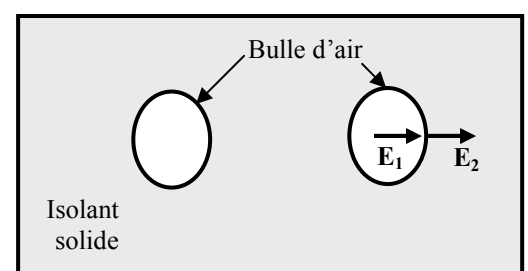


Figure 11

$$D_{n1} = D_{n2} \Rightarrow \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 \Rightarrow E_2 = E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

Comme la permittivité de tous les gaz est égale à celle du vide

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Comme en général la permittivité des isolants solides et liquides est supérieure :

$$\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2, \text{ donc } E_2 \gg E_1 \Rightarrow$$

Claquage dans la bulle seulement (décharge partielle), mais pas de claquage dans l'isolant.

Les décharges partielles qui apparaissent dans les bulles d'air affaiblissent la tenue diélectrique de l'isolant ; En plus des pertes, la probabilité du claquage de l'isolant augmente.

Remarque : l'huile des transformateurs est prélevée chaque année pour effectuer des analyses au laboratoire et la faire remplacer si elle renferme une grande quantité de bulles d'air.

VIII) EFFET PENNING

La rigidité diélectrique de certains gaz diminue fortement en y introduisant une petite quantité d'un autre gaz.

Exemple : mélange Néon- Argon entre deux électrodes planes ; $d = 2 \text{ cm}$.

Néon seul : $P \cdot d \approx 370 \text{ mm Hg} \cdot \text{cm} \Rightarrow U_c \approx 1800 \text{ V}$

Néon + 0,01 % Argon : $P \cdot d \approx 370 \text{ mm Hg} \cdot \text{cm} \Rightarrow U_c \approx 280 \text{ V}$

L'état métastable des atomes de néon est atteint avec une énergie de 16 eV, supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes d'argon (15,1 eV) ; les atomes d'argon sont facilement ionisés lors de la collision avec les atomes métastables du néon, ce qui fait diminuer considérablement la tension critique de claquage.

Remarque : l'effet Penning est mis à profit dans les applications où l'on utilise la décharge électrique, comme les lampes à décharge...