

TECHNIQUES DE LA HAUTE TENSION

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA HAUTE TENSION

I. UTILITE DE LA HAUTE TENSION

Question : Pourquoi utilise-t-on la haute tension pour le transport de l'énergie électrique ?

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances.

Transformateur idéal :

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}} \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{U_1}{U_2}$$

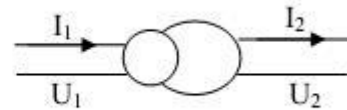


Figure 1 : Transformateur élévateur

D'après l'expression ci-dessus, l'élévation de la tension ($U_2 > U_1$) permet de limiter les pertes en diminuant le courant et permet également de faire transiter de plus grandes puissances.

Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100 MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 kV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. Or, il existe maintenant des groupes de 1 300 MVA ! Donc on est conduit à augmenter la tension des réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isolements.

Réseaux électriques HT

- ✓ Les réseaux de transport sont triphasés, sans conducteur de neutre.
- ✓ Le domaine de ce qu'on appelle Très Haute Tension va de 60 à 800 kV (entre phases). Il existe des projets jusqu'à 1 200 kV.
- ✓ Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz (quelques cas à 16 2/3 Hz).
- ✓ Les courants transportés vont de 400 à 3 000 A.

Problèmes liés à la haute tension :

Claquage ; Isolation ; effet couronne ; contournement des isolateurs ; pertes diélectriques...

II. POUVOIR DE POINTE

$$\rho_s = \frac{q}{S} \quad \text{densité surfacique de charge ;}$$

$$\text{pointe : } S \approx 0 \Rightarrow \rho_s = \frac{q}{S} \gg \Rightarrow E \gg$$

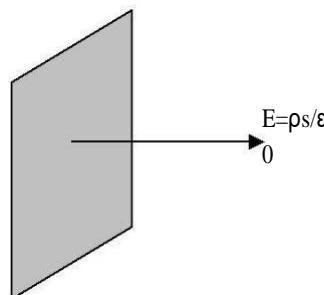


Figure 2 : Plan chargé

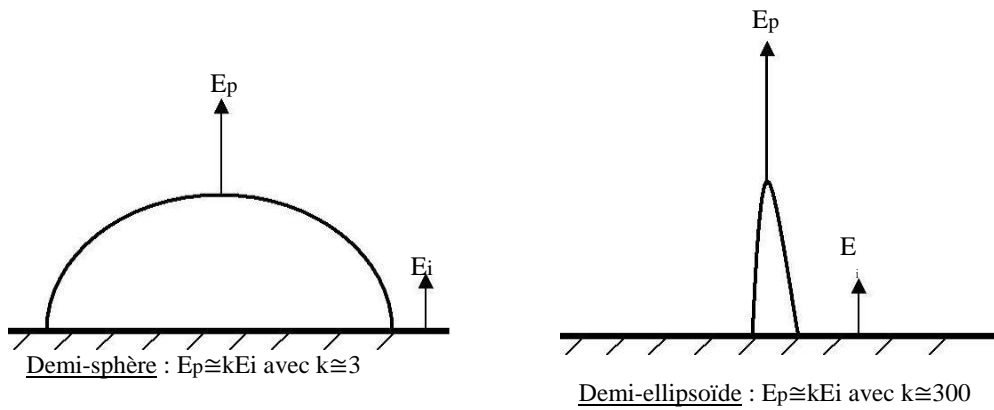


Figure 3

Conclusion : Sur les régions à faible rayon de courbure (pointe) le champ devient très intense. Cela représente un danger en HT (risque de claquage) mais aussi un avantage (paratonnerre...). Le pouvoir de pointe explique qu'en Haute Tension tous les appareils ont de grands rayons et sont munis d'anneaux de répartition du champ. En H.T on doit éviter les pointes à la surface des conducteurs. Par contre, quand on désire un champ élevé on utilise un conducteur pointu.

Vent électrique :

Le champ à la pointe est tellement grand que le mouvement des ions produit ce qu'on appelle « vent électrique » qui cause l'inclinaison de la flamme (Figure 4).

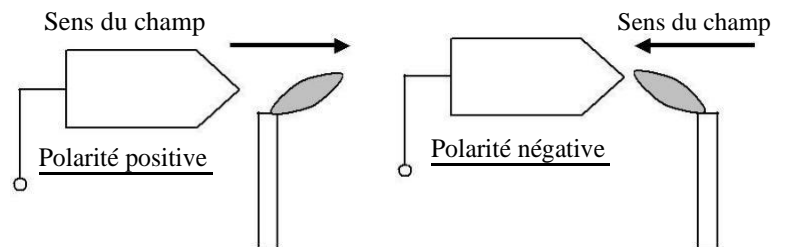


Figure 4

Quelques applications du pouvoir de pointe :

- Parafoudre :** Le champ élevé de la pointe attire la foudre pour écouler le courant vers la terre (voir figure 5).
- Charger des particules :** des flèches placées sur les ailes de l'avion neutralisent la charge se trouvant sur la surface de l'avion acquise par frottement avec l'air (figure 2).

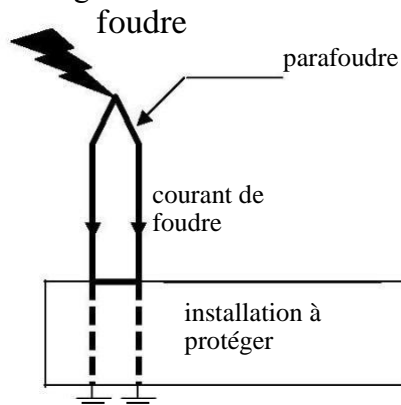


Figure 5

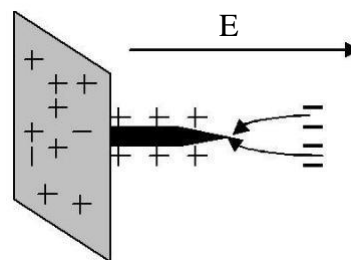


Figure 6

- Séparateurs électrostatiques ;
- Filtres électrostatiques ;
- Autres...

III. CAGE DE FARADAY

Conducteur en équilibre ($I=0$) $\Rightarrow E=0$

Le champ à l'intérieur d'un conducteur est nul.

Dans un conducteur, si des charges sont injectées à l'intérieur elles se répartissent à l'extérieur (Figure 7).

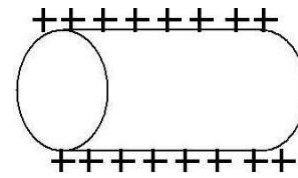


Figure 7

Application : Cage de Faraday

Si jamais un accident (défaut d'isolation) survient à l'intérieur, la personne ainsi que le matériel se trouvant à l'intérieur seront protégés (Figure 8).

Exemples :

Laboratoire HT ; tenue de travail sous tension ; carcasse métallique des habitations (contre la foudre)...

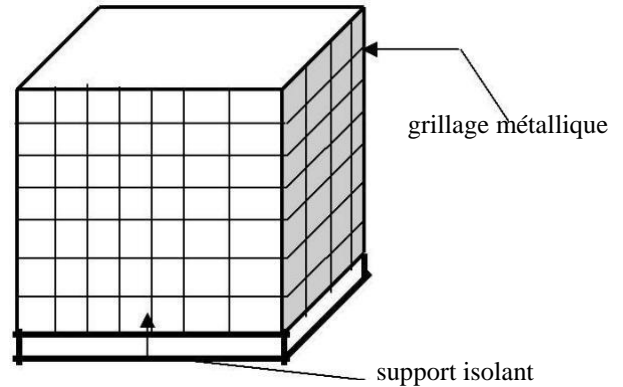


Figure 9 : Cage de Faraday

IV. CHAMP ELECTRIQUE

Dans un poste HT de 220 kV, le champ électrique à une distance de 6 m du conducteur central d'une ligne en nappe atteint 2 kV/m, ce qui pour le champ électrique est une valeur élevée. Par contre, le champ magnétique n'est que de 0,007 kA/m, ce qui pour le champ magnétique est une valeur faible. En haute tension, le champ électrique est prépondérant par rapport au champ magnétique.

Champs	Distance verticale par rapport au conducteur central (en m)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
H (kA/m)	0,096	0,049	0,025	0,017	0,012	0,009	0,007	0,005
E (kV/m)	62,7	29,9	12,6	6,7	4,5	2,8	2,0	1,8

Tableau : Champs magnétique et électrique sous un jeu de barre triphasé 220 kV, en nappe. Distance entre phases de 4m - diamètre du conducteur 25 mm -

V. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT

Inconvénients des câbles :

- Difficultés technologiques d'isolation des câbles qui ne permettent pas d'atteindre des tensions très élevées ;
- Problème de l'évacuation de la chaleur ;
- Difficulté de connexion entre ligne aérienne et câble ;
- Limitation de puissance due à la capacité élevée des câbles ;
- Difficulté de maintenance en cas de défaut ;
- Les coûts relatifs qui sont élevés pour les câbles, environ 10 fois supérieurs aux coûts des lignes.

Remarque : La pose des câbles se fait dans des situations bien particulières de technique, d'environnement. Par exemple, la liaison entre les rives Nord et Sud de la méditerranée...

VI. UTILISATION DES RESEAUX HVDC

HVDC: High Voltage Direct Current

L'utilisation de la Haute Tension continue dans les réseaux peut être possible dans les cas suivants :

- Lignes longues (> 1000 km) des réseaux UHT, où l'on gagne sur les distances d'isolement entre les valeurs crête et efficace ;
- Longs câbles souterrains (dans les mers ou dans les villes), pour s'affranchir du problème de transit de l'énergie réactive.

Utilisation de convertisseurs statiques pour transformer l'énergie alternative en continu et vice-versa, vu que la majorité des appareillages utilisent la tension alternative.

VII. RESEAUX HT DANS LE MONDE

- USA : tension maximale de transport est 765 kV;
- CANADA, elle est de 735 kV;
- EUROPE DE L'OUEST : elle est de 400 kV;
- JAPON: une ligne de 1000 kV a été construite ;
- Dans la plupart des pays la tension varie entre 220 et 500 kV.

CHAPITRE II

PHENOMENES D'IONISATION DANS LES GAZ

I. NOTIONS SUR LES GAZ

Tous les gaz sont isolants

Ont la même constante diélectrique $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F / m}$

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 : $m_p = 1,6725.10^{-27} \text{ kg}$; $q_p = 1,6.10^{-19} \text{ C}$

des neutrons : $m_n = 1,6748.10^{-27} \text{ kg}$; $q_n = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

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

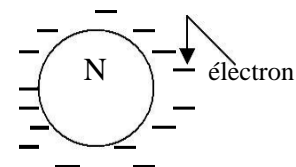


Figure 1 : Constitution d'un atome

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.

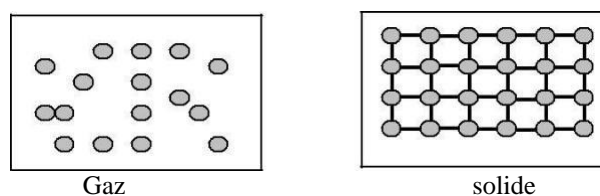


Figure 2

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.

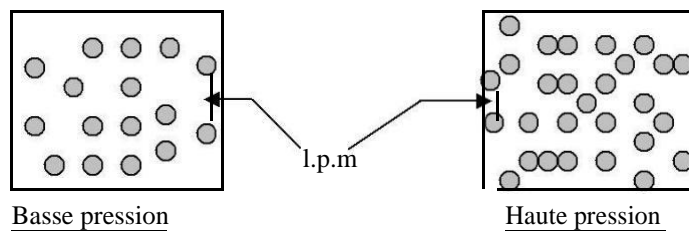


Figure 3

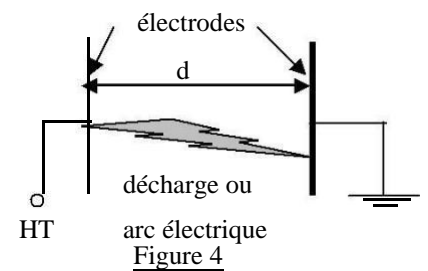
II. CLAQUAGE

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).

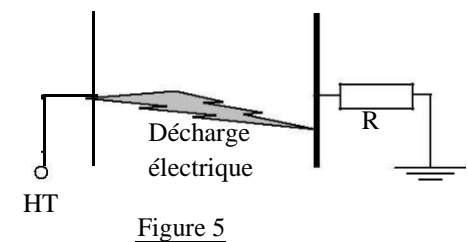
Remarque :

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



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 GA (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.



III. PHENOMENES DE COLLISION

Collision : choc entre deux particules.

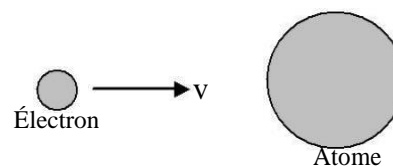


Figure 6

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 :

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

- 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 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

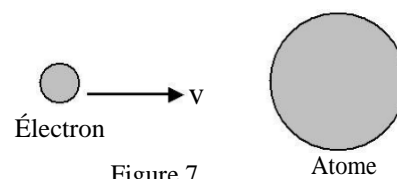


Figure 7

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

avec $W = W_c - W_i$ 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.

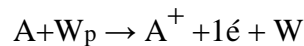
Après un temps très bref (entre 10^{-7} et 10^{-10} s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie $W_p = h\nu$ ($A^* \rightarrow A + W_p$)

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

IV.2. Photo-ionisation

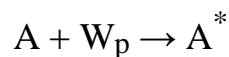
L'atome absorbe l'énergie d'un photon W_p .

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



avec $W = W_p - W_i$ 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 $W = W_{th} - W_i$ 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.

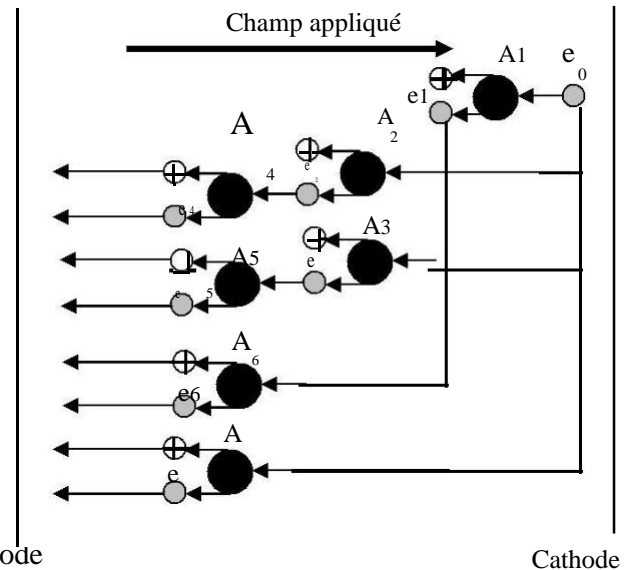


Figure 8

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, $P = 1$ atm, $\alpha = 18,4$; $d = 10$ mm

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

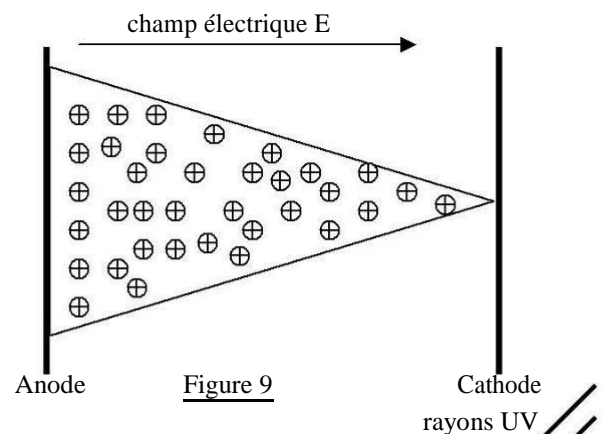


Figure 9

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.

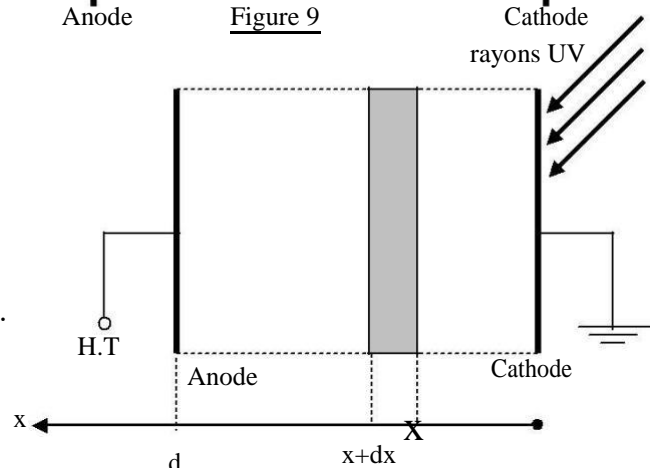


Figure 10

Chapitre 2 : Phénomènes d'ionisation dans les gaz

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

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

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

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

Coefficient α :

$\alpha = dn/ndx$ nombre de paires électrons-ions positifs créés par un électron sur un parcours de 1cm.

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

Nombre total de paires électrons-ions positifs créés dans une

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

Nature du courant de l'avalanche

: Rappel : $J = Nev$

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

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

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

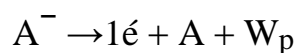
Courant total par avalanche :

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

VIII. DETACHEMENT ET RECOMBINAISON 1)

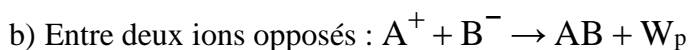
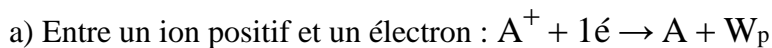
Détachement d'électron

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 :

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

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.

$$\frac{U_c(SF6)}{U_c(Air)} = 1,6 + 2,62 ;$$

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 $W_{ext} = 0,1$ eV ; Nickel $W_{ext} = 0,075$ eV ; Alliage Al-Ni $W_{ext} = 0,15$ eV.

XIII.1. Emission par bombardement d'ions positifs

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

$$W_c = \frac{1}{2} m v^2 \text{ et la bombardent. } E_{\text{électron}} 2$$

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

Remarques :

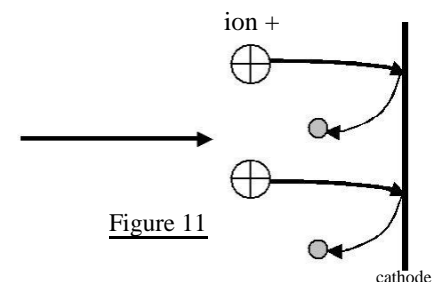


Figure 11

le surplus d'énergie $W = W_c - W_{ext}$ 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 METASTABLES

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