

# GENERALITES SUR LA HAUTE TENSION

## I. UTILITE DE LA HAUTE TENSION

### A. Qu'est-ce que la haute tension ?

Une *haute tension* est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants. Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés. Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires et complexes, où se produisant à partir d'un seuil. Exemple : l'arc électrique, effet couronne, claquage des matériaux isolants (solides, liquide), etc...

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

Le développement des réseaux électriques a constitué la première utilisation, à grande échelle, des hautes tensions. Les centrales de production d'énergie électrique sont fréquemment situées à de grandes distances de lieux de consommation. Dans ces conditions, on recourt au transport de l'énergie électrique à moyenne de 20 à 100 km et grandes distances de 100 à 1000 km.

Transformateur idéal :

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

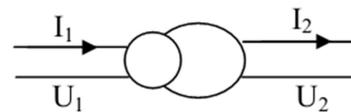
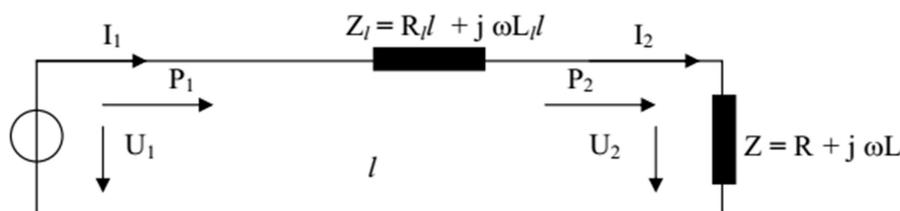


Figure 1 : Transformateur élévateur

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.

Soit une ligne de transport monophasée où l'on néglige en première approximation les capacités et les conductances transversales. La puissance délivrée en un point de consommation (2) située à une distance  $l$  vaut:  $P_2 = U_2 I_2 \cos \phi$  avec  $I_1 = I_2 = I$  et  $\phi$  : est l'angle de déphasage (tension, courant)



$R_l$  et  $L_l$  sont respectivement la résistance linéique et l'inductance linéique de la ligne. On constate d'après la relation de la puissance que deux variables entrent en jeu afin d'augmenter la puissance électrique transportée soit:

- **l'élévation du courant :**

- ⇒ augmentation de l'échauffement (maximum admis: 60°C)
- ⇒ augmentation de la section
- ⇒ augmentation du poids

- **l'élévation de la tension :**

- ⇒ augmentation du champ électrique
- ⇒ augmentation des distances d'isolement
- ⇒ apparition de phénomènes potentiellement perturbants

Le rendement de la ligne de transport est un autre paramètre entre en jeu et qui nous a permis de choisir la bonne technique pour augmenter la puissance transportée

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_e} \quad P_e = R_l I^2 l \text{ (puissance perdue par effet de joule)}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_l l}{\cos^2 \varphi} \frac{P_2}{U_2^2}}$$

*Exemple :* dans le cas d'une ligne triphasée et pour  $R_l = 0.1 \text{ m}\Omega/\text{m}$ ,  $l = 100 \text{ km}$ ,  $\cos \phi = 0.8$ ,  $P_2 = 300 \text{ MVA}$ , En fonction des niveaux de tension composée on trouve :

U (kV)	132	220	380	750
$\eta$	0.79	0.91	0.97	0.99

Il est clair qu'avec l'augmentation de la tension le rendement s'améliore. C'est pour quoi en pratique on utilise la haute tension pour le transport de l'énergie électrique.

La stabilité des isolants utilisés en haute tension, ainsi que leurs propriétés macroscopiques sont en grande partie déterminées par les champs électriques qui règnent à l'intérieur des atomes et entre les atomes. On doit donc s'attendre à ce que l'application d'un champ électrique sur la matière puisse en modifier les propriétés, telles que les

### B. Seuils de tensions :

Basses tensions : au-dessous de 1 kV. - Moyennes tensions : 1 ~ 33 kV. - Hautes tensions : 33 ~ 230 kV - Très hautes tensions : 230 ~ 800 kV - Ultra hautes tensions : au-dessus de 800 kV

### Problèmes liés à la haute tension :

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

Différents phénomènes potentiellement perturbants sont propres à la haute tension (champs électriques élevés) :

- **Claquage diélectrique** ⇒ Détérioration provisoire ou définitive des spécifications de l'isolant

Une isolation est dite *autorégénératrice* si elle retrouve ses propriétés isolantes à peu près intactes après le claquage. Ce n'est pas le cas des solides qui, une fois perforés, doivent être remplacés. Les isolations au papier imprégné d'huile sont aussi *autorégénératrices*, car l'huile va remplir un éventuel trou provoqué par un claquage à travers le papier.

- **L'effet de couronne** ⇒ Perturbations sonores, rayonnement électromagnétique, perte d'énergie active, production d'ozone

- **Décharges partielles** ⇒ Détérioration des isolants

## II. POUVOIR DE POINTE

$\rho_s = q/S$  densité surfacique de charge ;

Pointe :  $S \approx 0 \rightarrow \rho_s = q/S \gg \rightarrow E \gg$

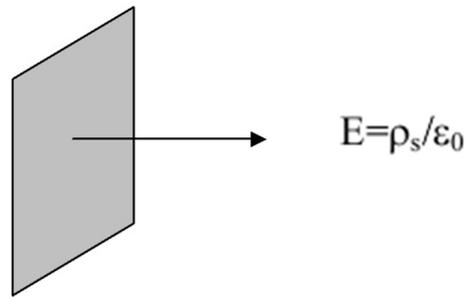


figure 2 : plan de charge

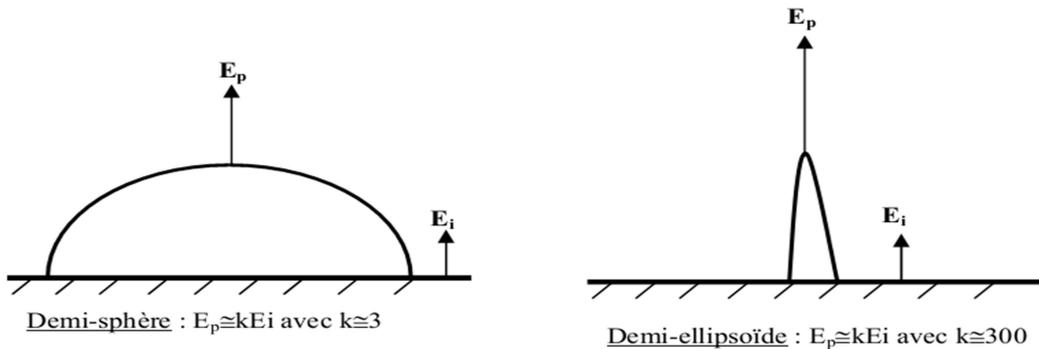


Figure 3

### 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.

## 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 4).

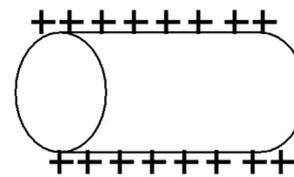


Figure 4

### 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 5).

### Exemples :

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

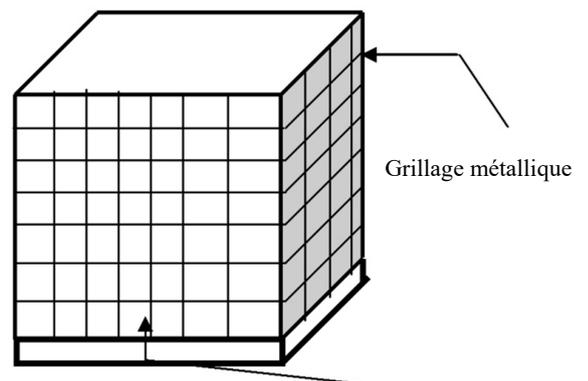


Figure 5 : Cage de Faraday

Support isolant

## 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.

# PHENOMENES D'IONISATION DANS LES GAZ

## 1. NOTIONS SUR LES GAZ

\_ 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 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.

\_ 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 toute toxicité ;  
- Maintenance pas chère et pratique.

### 1.1. Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

des protons :  $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

des neutrons :  $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q_n = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

$m_e = 9,1019 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  ;  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

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 ( $m=0$  ;  $q=0$ )

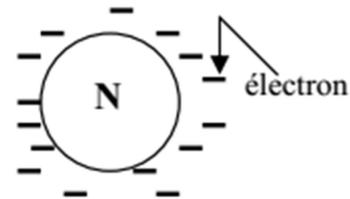


Figure 1 : Constitution d'un atome

### 1.2. 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.

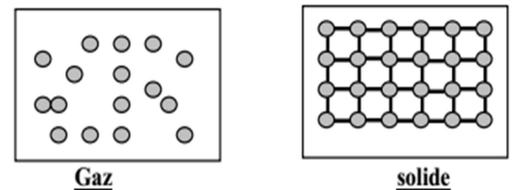


Figure 2

### 1.3. Pression du gaz

La pression P est proportionnelle à la densité atomique .

$\delta$  : Nombre d'atomes/unité de volume

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

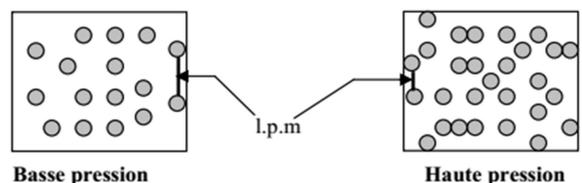


Figure 3

## 2. CLAQUAGE

### 2.1. 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  $\mu\text{A}$  (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.

**3. PHENOMENES DE COLLISION**

Collision : choc entre deux particules.

**3.1. Choc élastique**

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.

**3.2. 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) ⇒ choc non élastique.

**4. 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 <sub>2</sub>	13,7
N <sub>2</sub>	15,5
O <sub>2</sub>	12,2
H <sub>2</sub>	15,4
H <sub>2</sub> O	12,6

**4.1. 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 ;

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.**

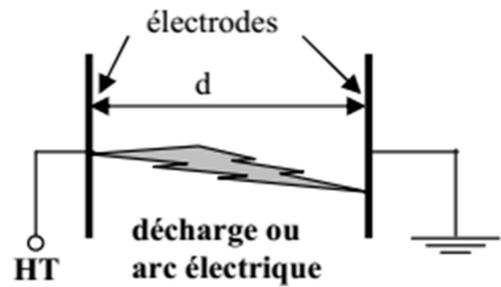


Figure 4

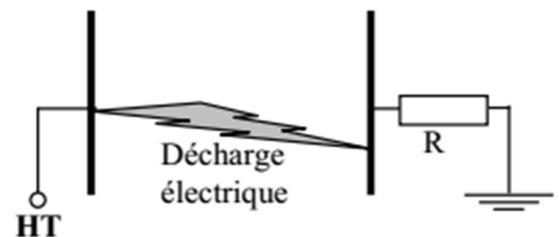


Figure 5

**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 ;  $\nu$  fréquence du photon

**4.2. Photo-ionisation**

L'atome absorbe l'énergie d'un photon  $W_p$ . Si  $W_p \geq W_i \Rightarrow$  photo-ionisation  $A + W_p \rightarrow A^+ + e^- + \Delta W$  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.  $A + W_p \rightarrow A^*$

**4.3. 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  $A + W_{th} \rightarrow A^+ + e^- + \Delta W$  avec  $\Delta W = W_{th} - W_i$  cédée à l'électron libéré.

Si  $W_{th}$  légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  excitation  $A + W_{th} \rightarrow A^*$

**4.4. 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.  $A^m + B \rightarrow A + B^+ + e^- + \Delta W$

C'est le processus le moins fréquent.

**5. 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

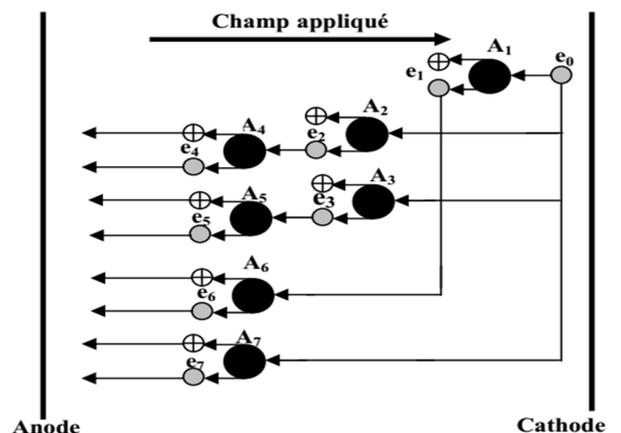


Figure 8

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.

*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).

## 6. 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 »

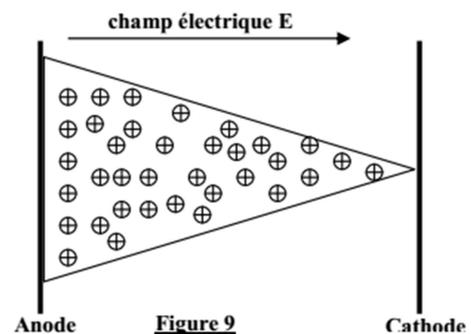
Forme de la charge d'espace :

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<sup>ème</sup> mm, il y a 5 fois plus d'ions positifs que dans les 9 premiers mm



## 7. 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

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

Le SF<sub>6</sub> est le meilleur isolant gazeux industriel qu'on connaît.