

# Thèmes de min projet

1. Les isolants solides utilisés en électrotechnique
2. Le transformateur haute tension
3. Rigidité diélectrique des liquides, des solides et gaz
4. Coordination de l'isolement
5. Utilisation du SF6 en moyenne et haute tension
6. La foudre
7. Décharge dans les solides
8. Décharge dans les liquides
9. Effet de couronne
10. Arc Électrique
11. Huile pour transformateur
12. Mesure en haute tension
13. Générateurs de haute tension
14. Pollution des Isolateur de Haute Tension

# Matière: Techniques de la haute tension

## VHS: 37h30 (Cours: 1h30, TP: 1h00)

### Objectifs :

La matière a pour objectif la maîtrise des énergies électriques tant sur la plan de la compréhension des phénomènes physique que sur le plan conception et dimensionnement des isolations des matériels de haute tension. Aussi, à l'issu de cet enseignement, l'étudiant sera en mesure de maîtriser les problèmes de coordination d'isolement dans les réseaux électriques.

# Chapitre I : Familiariser aux phénomènes et aux techniques reliées à la haute tension

**I. Historiques**

**II. Généralité sur la haute tension**

**III. Champ électrique**

**IV. Importance de l'étude de champs électriques en haute tension :**

**V. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT**

**VI. Utilisation des Réseaux HVDC**

**VII. Réseaux HT dans le Monde**

**VIII. Phénomènes d'ionisation dans les gaz**

**IX. Décharge couronne**

# INTRODUCTION

## 1) Définition: Haute Tension

C'est le niveau de tension qui engendre un champ électrique suffisamment élevé capable de modifier les propriétés de la matière isolante des composants d'un système. La haute tension traite donc de l'ensemble des systèmes soumis aux champs électriques élevés.

## 2) Domaine de la haute tension

L'application de la haute tension dans le grand transport d'énergie électrique est la plus courante, mais l'ingénieur électricien utilise ce savoir-faire dans de nombreux autres domaines:

### Principaux domaines d'application de la haute tension {1}

Domaine	Application
Réseaux :	- lignes aériennes
- tension alternative	- câbles
- tension continue	- isolateurs
	- transformateurs de mesure de tension
	- transformateurs de mesure de courant
	- sectionneurs
	- disjoncteurs
	- parafoudres
	- mises à la terre
	- condensateurs
	- transformateurs de puissance
	- alternateurs
	- appareillage SF6
	- compatibilité électromagnétique (CEM)
Electricité statique	- générateurs électrostatiques
	- moteurs électrostatiques
Charge	- filtres électrostatiques
	- xérocopie
	- imprimante électrostatique
	- peinture électrostatique
décharge	- danger d'explosion et d'incendie
	- perturbations de l'électronique sensible
Physique	- microscope électronique
	- accélérateurs de particules
Médecine	- effets biologiques des champs électriques
	- diagnostique par rayons X
	- thérapie par rayons X
	- ozonothérapie
	- diélectrophorèse
	- chauffage

---

## Electronique

- tube cathodique
- générateurs piézo-électriques
- allumage électrique
- flash électronique
- lampe à décharge
- filtre bactériologique UV

---

## Foudre

- captage de la foudre
- protection contre la foudre (paratonnerre, éclateurs, parafoudre, câble de garde)
- aviation

---

## Impulsions électromagnétiques d'origines nucléaire (NEMP)

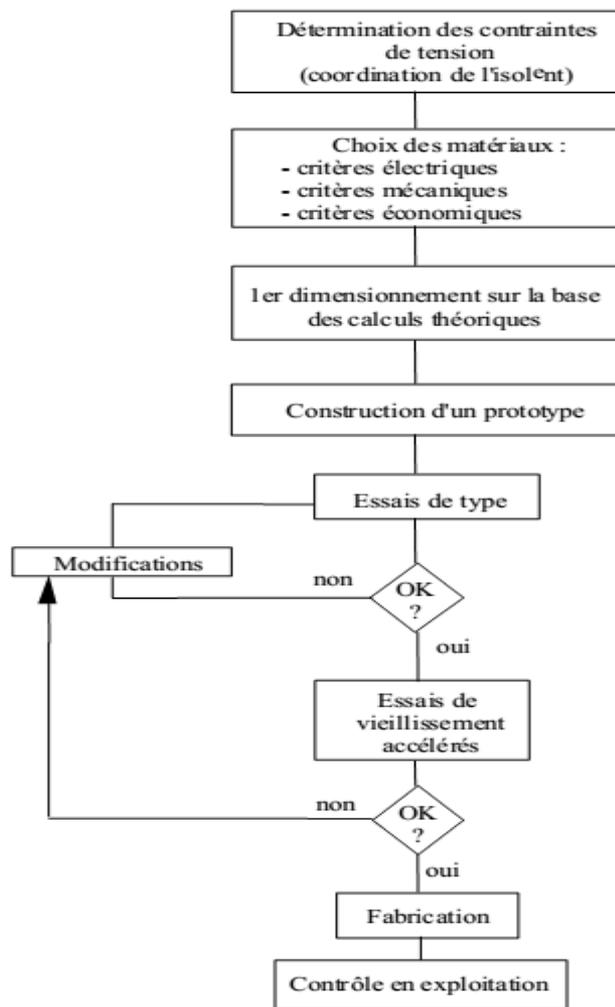
- protection des lignes de transmission
  - protection des antennes
  - protection des appareils électroniques
  - cages blindées
-

## Buts et méthodologie de la HT

L'ingénieur devra maîtriser ce système physique, de manière à concevoir des appareils résistant aux contraintes subies lors de son utilisation en HT.

Il peut s'appuyer sur des simulateurs, par ex. les calculs au moyen des "éléments finis", mais, dans ce domaine, l'approche expérimentale reste importante.

La méthodologie de construction est souvent la suivante (fig.1.1):

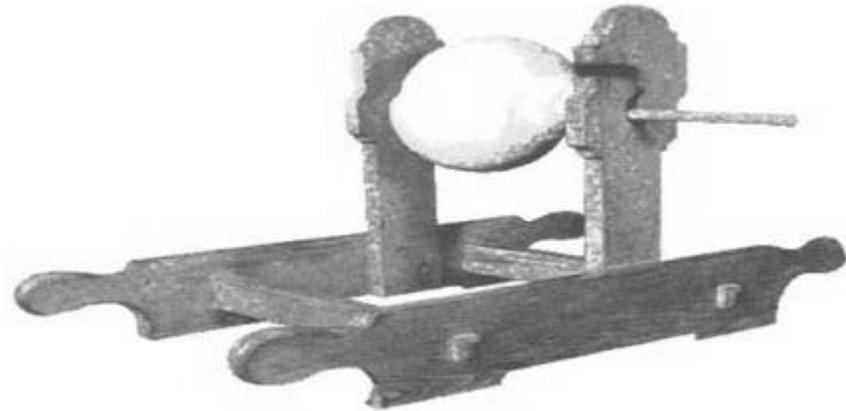


# I. Historique

C'est à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle seulement, que l'éclosion d'une multitude d'applications de l'électricité donnera naissance aux techniques de la haute tension.

## A. Découvertes

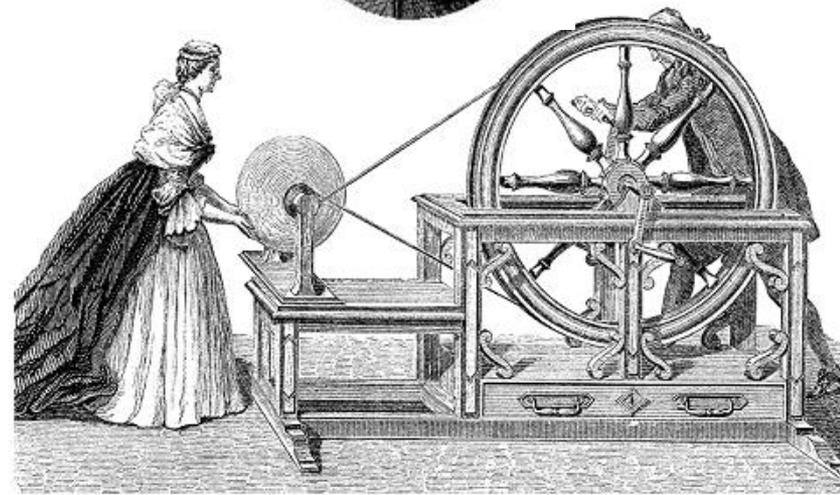
En **1673** *Otto von Guericke* (**1602-1686**). Le physicien allemand, bourgmestre de la ville de Magdeburg, invente la ***première machine électrostatique***, formée d'une boule de soufre montée sur un axe de rotation. Le but est d'essayer d'augmenter la force d'attraction électrostatique. Mais le résultat, c'est qu'à partir d'une certaine charge, des étincelles éclatent: surprise ! *Otto von Guericke* est aussi connu pour la célèbre expérience des hémisphères de Magdeburg, montrant l'effet de la pression atmosphérique.



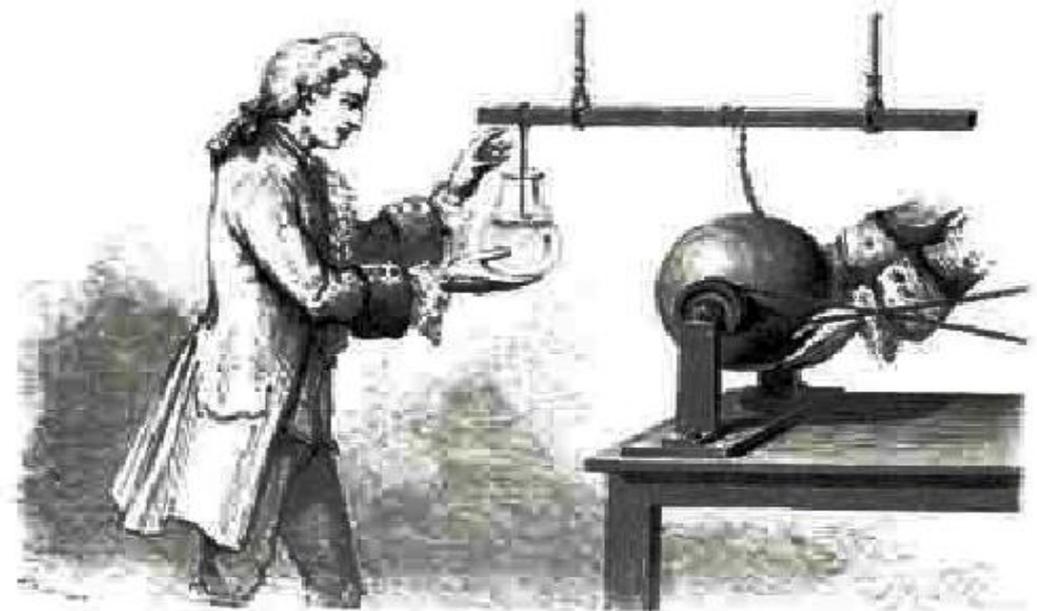
*Stephen Gray* (1666-1736). Physicien anglais, constate que l'on peut **charger un corps en le mettant en contact avec un autre corps préalablement chargé**, à condition de les relier par certains types de matériaux (par exemple un fil métallique). Les « **corps électriques** » sont en réalité les matériaux isolants, alors que les « **corps anélectriques** » sont des matériaux conducteurs. On ne comprendra que plus tard qu'un corps conducteur peut aussi rester chargé, à condition de l'isoler de la Terre.



Au 18<sup>ème</sup> siècle *Jean-Antoine Nollet* (1700-1770) passe pour l'un des meilleurs experts européen en électricité, bien que ses compétences soient surtout expérimentales. Grand adversaire de Benjamin Franklin, il ne comprendra jamais la véritable nature de l'électricité en général et de la foudre en particulier. En revanche ses fameuses machines électrostatiques sont réputées pour leurs performances. L'efficacité d'une machine se mesure à la longueur des étincelles qu'elle permet de « tirer ». **Avec des étincelles d'une vingtaine de centimètres, de telles machines permettaient probablement d'atteindre une centaine de kilovolts !**



En **1746** le physicien hollandais de l'Université de Leyde Petrus van *Musschenbroek* (**1692-1761**), Il charge d'électricité un liquide contenu dans une bouteille de verre qu'il tient d'une main. Il forme ainsi un condensateur qui va se décharger à travers son propre corps, si jamais son autre main entre en contact avec le liquide. À cette époque, le condensateur s'appelle « bouteille de Leyde ». Le physicien et homme politique américain et l'artisan de l'indépendance américaine. Benjamin Franklin (**1706-1790**), il réalise de nombreuses expériences et devine qu'il ne s'agit pas à proprement parler d'une matière (« fluide électrique », comme on disait en son temps) mais plutôt d'une influence immatérielle (le champ électrique qui ne sera clairement défini qu'un siècle plus tard).



En **1752**, Franklin n'imagine pas du tout qu'une simple tige métallique puisse réellement attirer la foudre. L'expérience qu'il propose (et qu'il ne réalisera jamais lui-même) vise à capter un peu de « fluide électrique » des nuages, pour vérifier s'il ressemble à celui que l'on produit en laboratoire. L'expérience sera réalisée avec succès en France : des étincelles jailliront dans la guérite, lorsqu'un nuage orageux passe dans le ciel. Mais l'année suivante, à Saint Pétersbourg, le physicien Wilhelm Richmann qui tente la même expérience sera bel et bien tué par la foudre. Dés lors, Franklin se rend compte que ces tiges peuvent effectivement protéger de la foudre, en la canalisant vers la terre, même si beaucoup de physiciens considèrent encore comme impossible de « vider un nuage » de toute son électricité. Les polémiques sur le paratonnerre durèrent un bon siècle. Les paratonnerres protègent-ils de la foudre ? Ou l'attirent-ils ? Fallait-il les faire pointus ou arrondis ? La superstition des sonneurs de cloches, censés éloigner l'orage, fera encore de nombreux morts jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle.



## B. Expériences

En 1800 Alessandro Volta (1745-1827) invente la pile électrique (courant continu) en empilant des rondelles de zinc et de cuivre, séparée par un électrolyte.



En 1831 Joseph Henry (1797-1878) et Michael Faraday (1791-1867) inventent indépendamment le courant alternatif.



## C. Théories

André-Marie Ampère (1775-1836), mathématicien, physicien, chimiste et le philosophe français, est le premier qui formule les lois de l'électrocinétique et de l'induction magnétique. Il les expose l'année suivante devant l'Académie des sciences de Paris.



Michael Faraday (1791-1867) est un physicien et un chimiste britannique, Ses plus grands travaux concernent l'électricité. En 1821, après la découverte du phénomène de l'électromagnétisme par le chimiste danois Ørsted, Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appelle une rotation électromagnétique : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration d'un moteur électrique.

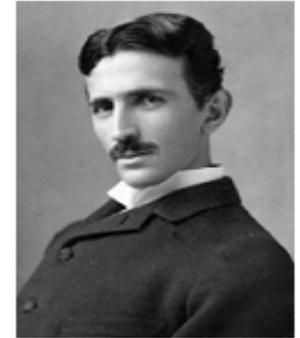


James Clerk Maxwell (1831-1879), mathématicien et physicien anglais, il a présenté les équations générales de l'électromagnétisme à la Royal Society de Londres. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Il a également développé la distribution de Maxwell, une méthode statistique de description de la théorie cinétique des gaz.



## D. Applications

Nikola Tesla (1856-1946) est un inventeur et ingénieur américain d'origine serbe, ayant principalement œuvré dans le domaine de l'électricité. Souvent considéré comme l'un des plus grands scientifiques dans l'histoire de la technologie, pour avoir déposé plus de sept cents brevets (qui seront pour beaucoup d'entre eux attribués à Thomas Edison) et avoir décrit de nouvelles méthodes pour réaliser la « conversion de l'énergie », Tesla est reconnu comme l'un des ingénieurs les plus créatifs de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle. Quant à lui, il préférerait plutôt se définir comme un découvreur.



Ses travaux les plus connus et les plus largement diffusés portent sur l'énergie électrique. Il a mis au point les premiers alternateurs permettant la naissance des réseaux électriques de distribution en courant alternatif, dont il est l'un des pionniers. Tesla s'est beaucoup intéressé aux technologies modernes se focalisant sur l'électricité qui était le noyau de ses inventions. Il est connu pour avoir su mettre en pratique la découverte du caractère ondulatoire de l'électromagnétisme (théorisé par James Clerk Maxwell en 1864), en utilisant les fréquences propres des composants des circuits afin de maximiser leur rendement. Son nom a été donné au tesla (symbole : T) qui est l'unité d'induction magnétique du Système international d'unités. Le tableau suivant résume les principaux domaines d'application de la haute tension:

## II. Généralité sur 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...

## □ **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

## B. Utilité 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 :

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

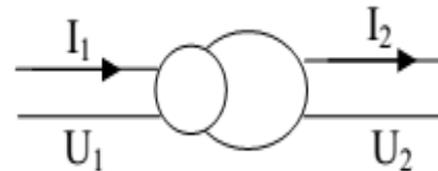
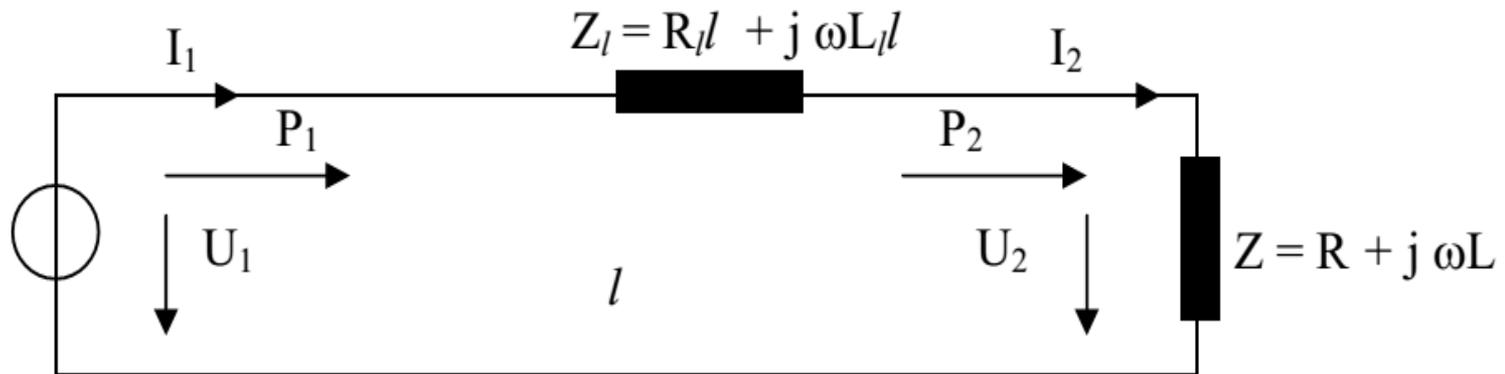


Figure 1 : Transformateur élévateur

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.

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:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \quad \text{ave } I_1 = I_2 = I \quad \text{et } \varphi : \text{ est l'angle de déphasage ( tension, courant)}$$



$R_l$  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.

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

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

*Exemple* : dans le cas d'une ligne triphasée et pour  $R_l = 0.1 \text{ m}\Omega/\text{m}$  ,  $l = 100 \text{ km}$  ,  $\cos \varphi = 0.8$  ,  $P_2 = 300 \text{ MVA}$

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.

Ainsi, les phénomènes traditionnellement attribués au domaine de la haute tension sont en réalité des phénomènes liés à des champs électriques élevés.

## 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 1200 kV.

- Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz.
- Les courant transportés vont de 400 à 3000 A.

## C. Quelles sont les Perturbations dues à la Haute Tension ?

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

- **Claquage diélectrique** ⇒ Détérioration provisoire ou définitive des spécifications de l'isolant.
- **L'effet de couronne** ⇒ Perturbations sonores, rayonnement électromagnétique, perte d'énergie active, production d'ozone.
- **Décharges partielles** ⇒ Détérioration des isolants.
- **Dangers des tensions et des champs électriques** pour l'être humain

## D. Grandeurs physiques

### a. Charges au repos

- *densité de charge électrique*

1.  $\rho_v$  (volumique) [C/m<sup>3</sup>]

2.  $\rho_s$  (superficielle) [C/m<sup>2</sup>]

### b. Charges en mouvement (courants)

- *densité de courant*

1.  $J$  (volumique) [A/m<sup>2</sup>]

2.  $J_s$  (superficielle) [A/m]

## c. Champs dans le vide

1. champ électrique  $E$ , engendré par les charges [V/m]
2. champ magnétique  $H$ , engendré par les courants [A/m]

## d. Champs dans la matière

- |   |   |  |
|---|---|--|
| 1. polarisation $P$ [C/m <sup>2</sup> ]           | } | $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ |
| 2. déplacement électrique $D$ [C/m <sup>2</sup> ] |   |  |
| 3. aimantation $M$ [A/m]                          | } | $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$    |
| 4. densité de flux magnétique $B$ [T]             |   |  |

$$\mu_0 = 1,256637064 \dots 10^{-6} \cong 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{Vs/Am}]$$

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \dots 10^{-12} \cong (1/36\pi) \cdot 10^{-9} \quad [\text{As/Vm}]$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \text{la vitesse de propagation du champ électromagnétique dans le vide}$$

( $c_0 = 299\,792\,458 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$ ), dans un matériau de permittivité relative  $\epsilon_r$  et de perméabilité

relative  $\mu_r$  cette vitesse est donnée par :  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}}$

**E. Effet de pointe** : aussi appelé **pouvoir des pointes**, est un phénomène physique expliquant l'influence d'un objet métallique pointu sur le champ électrique environnant. Les applications typiques de ce phénomène sont les paratonnerres.

### ❖ Principe

Considérons deux boules conductrices. Une grande boule de rayon  $R$  et une petite de rayon  $r=R/2$ . Si on les porte au même potentiel électrique  $V$ , la charge de chaque boule peut être calculée d'après cette formule :

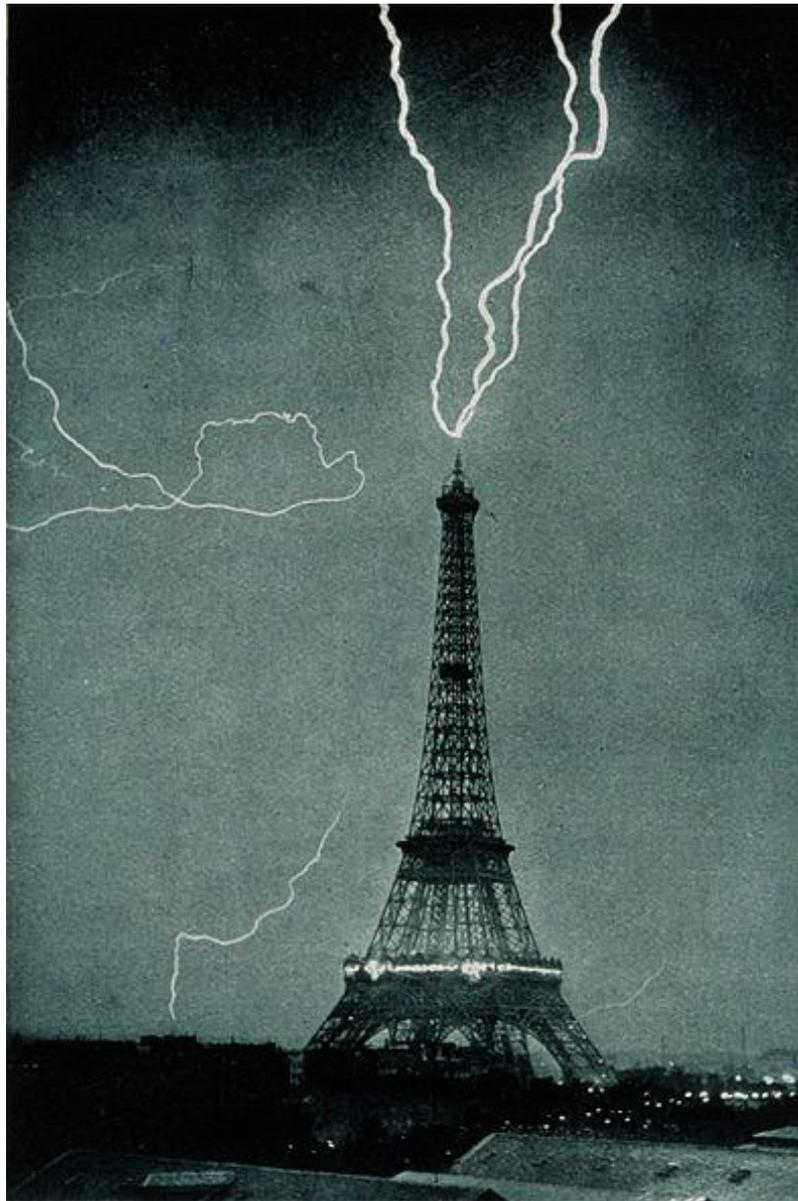
$$q_R = V \times 4\pi\epsilon_0 R$$

$$q_r = V \times 4\pi\epsilon_0 r = \frac{V \times 4\pi\epsilon_0 R}{2} = \frac{q_R}{2}$$

La petite boule aura donc une charge électrique moitié moins importante que la grosse boule. Le module du champ électrique s'exprime alors ainsi :

$$E_R = \frac{V \times R}{d^2}$$

$$E_r = \frac{V \times r}{d^2} = \frac{V \times R/2}{d^2} = \frac{1}{2} \frac{V \times R}{d^2} = \frac{E_R}{2}$$



**« La Tour Eiffel, paratonnerre géant. »  
La foudre la frappant en 1902**

À une même distance donnée  $\mathbf{d}$ , il sera donc deux fois moins important pour la petite boule. Or nous pouvons nous rapprocher de leur voisinage ( $\mathbf{d} = \mathbf{r}$  pour la petite,  $d = R$  pour la grande, car c'est la distance par rapport à leur centre) :

$$E_R = \frac{V \times R}{R^2}$$

$$E_r = \frac{V \times r}{r^2} = \frac{V \times R/2}{(R/2)^2} = \frac{V \times R/2}{R^2/4} = 2 \frac{V \times R}{R^2} = 2E_R$$

Finalement, nous obtenons que le champ électrique au voisinage de la petite boule sera deux fois plus important qu'au voisinage de la grosse boule.

## 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.

## Exemple : vente électrique

Le champ très intense au voisinage d'une pointe peut ioniser l'environnement. Le mouvement des ions dans ce champ engendre un déplacement d'air, appelé vent électrique qui peut, par exemple, incliner la flamme ionisée d'une bougie (fig. 4).

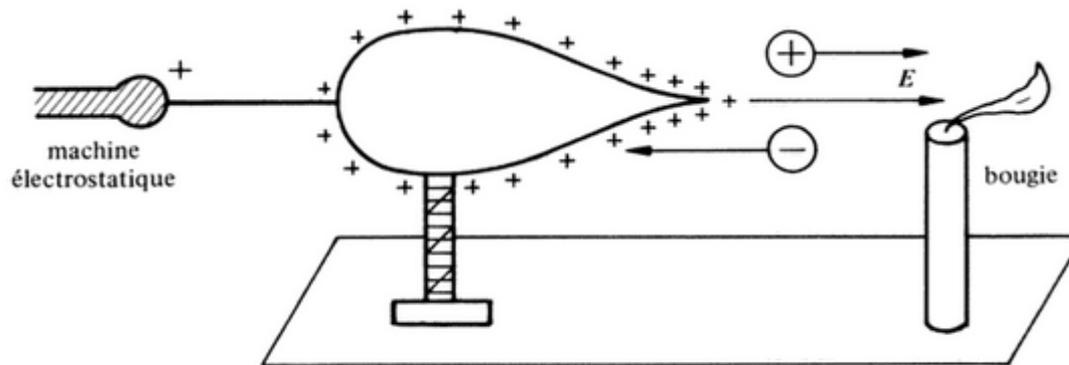
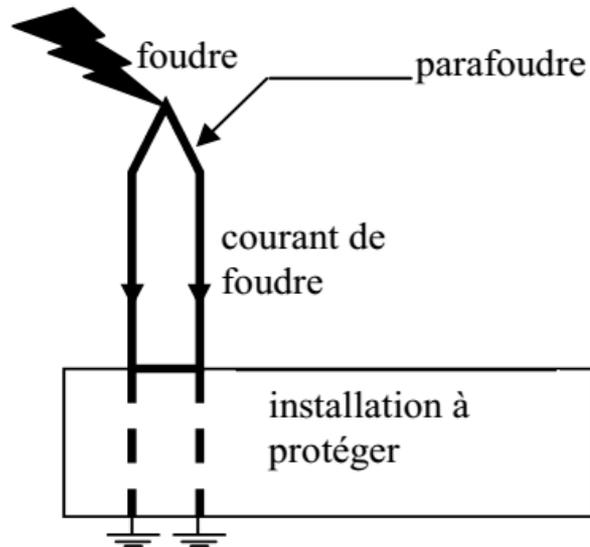


Fig 4: Vente électrique

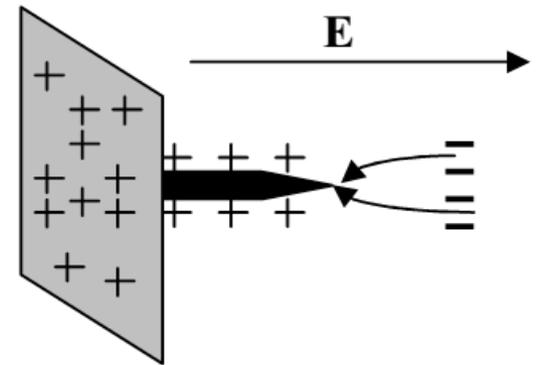
## Quelques applications du pouvoir de pointe :

a) **Parafoudre** : Le champ élevé de la pointe attire la foudre pour écouler le courant vers la terre (figure 5).

b) **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 6).



**Figure 5**

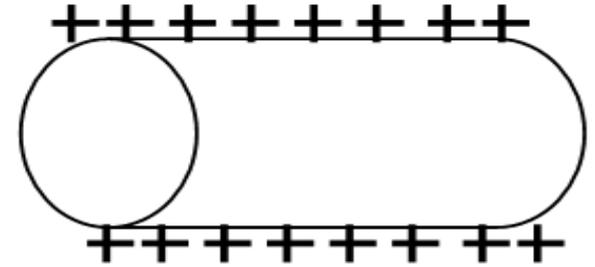


**Figure 6**

- c) Séparateurs électrostatiques ;
- d) Filtres électrostatiques ;
- e) Autres...

## F. CAGE DE FARADAY

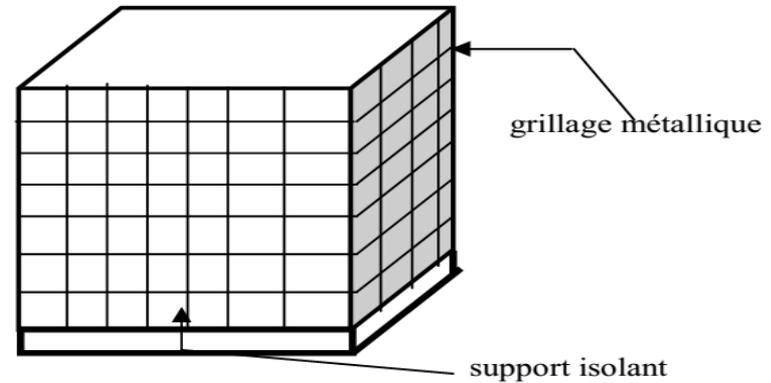
Conducteur en équilibre ( $I=0$ ) $\Rightarrow E=0$  Le champ à l'intérieur d'un conducteur est nul. Dans un conducteur, si des charges sont injectées à l'intérieur elles se répartissent à l'extérieur (Figure 7).



**Figure 7**

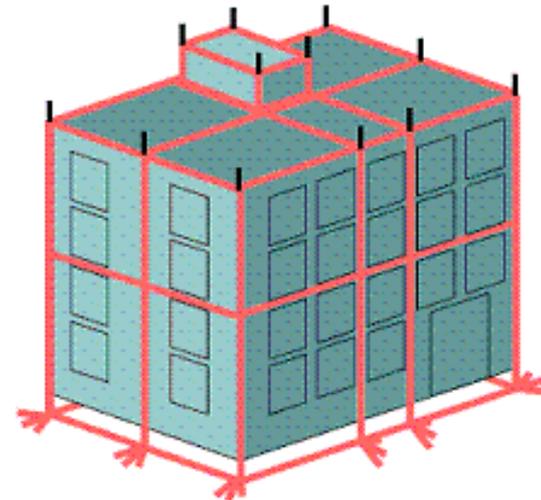
### Application : Cage de Faraday

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).



**Figure 9 : Cage de Faraday**

**Exemple** de cage de faraday sur une habitation, les tiges métalliques sont en rouge :



### III. 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 –

## **IV. Importance de l'étude de champs électriques en haute tension :**

Les champs électriques élevés constituent :

- ✓ Une contrainte pour le matériel électrique;
- ✓ Un danger pour le personnel d'exploitation des postes, des lignes et des laboratoires à haute tension;

## 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.

## **V. 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.

I. Historiques

II. Généralité sur la haute tension

III. Champ électrique

IV. Importance de l'étude de champs électriques en haute tension :

V. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT

VI. Utilisation des Réseaux HVDC

VII. Réseaux HT dans le Monde

**VIII. Phénomènes d'ionisation dans les gaz**

IX. Décharge couronne

# VIII. Phénomènes d'ionisation dans les gaz

## ➤ 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;
- 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.
- 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.

## Exemples et utilisation des diélectriques Gazeux

- l'air sec, qui a l'avantage d'être abondant.
- l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>),

# Exemples et utilisation des diélectriques solides

- le verre, utilisé pour faire des isolateurs de lignes haute tension;
- la céramique, très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques;
- la plupart des plastiques, en particulier polyéthylène sous sa forme réticulée (XLPE) et PVC, tous deux utilisés pour les câbles ;
- le Polypropylène, utilisé en particulier dans les condensateurs en HTA ou HTB ;
- la bakélite, autrefois très utilisée pour l'appareillage électrique basse tension ;
- le téflon, utilisé pour certaines pièces des disjoncteurs à haute tension.
- certains matériaux sous forme cristalline perovskite comme le PZT qui sont actuellement en cours de développement pour être utilisés comme condensateur à capacité variable.

# Exemples et utilisation des diélectriques Liquides

- l'[huile végétale](#), innovation récente dans l'isolation diélectrique dans les transformateurs électriques.
- le [pyralène](#) (PCB), autrefois utilisé dans les [transformateurs](#), mais depuis interdit dans la plupart des pays à cause de sa toxicité.
- l'[eau pure](#). Si l'eau est habituellement conductrice, une eau parfaitement pure est un très bon isolant. La difficulté de garder une eau très pure (sans aucune impureté) rend toute utilisation industrielle difficile.
- l'[azote liquide](#), l'[hélium liquide](#) ou le SF<sub>6</sub> permet d'isoler des composants [supraconducteurs](#) à très basse température.

## ➤ 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 :  $m_n = 1,6748.10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

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

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 ;  $A + 1e \rightarrow A_-$

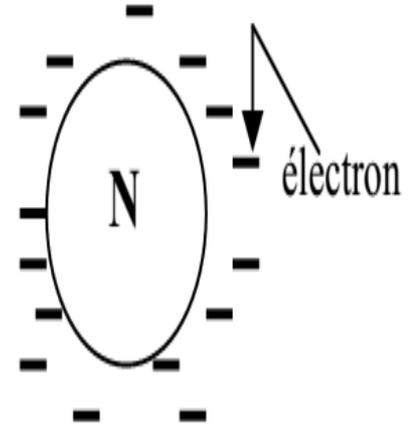


Figure 1 : Constitution d'un atome

## ➤ **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.

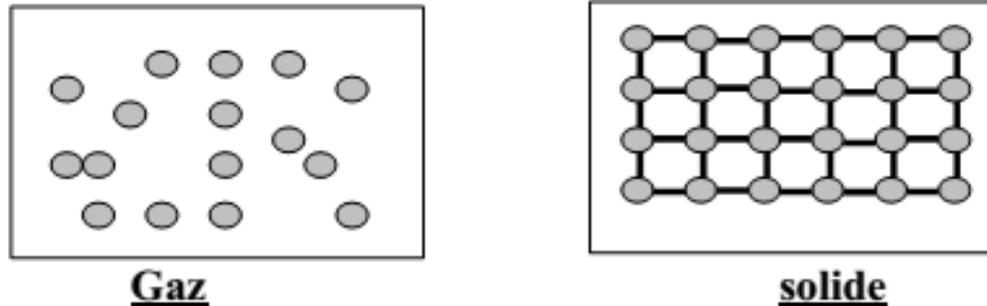


Figure 2

## ➤ **Claquage**

### ▪ **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  $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$

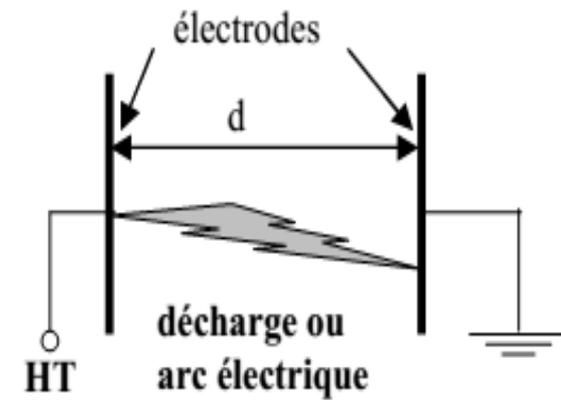


Figure 4

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

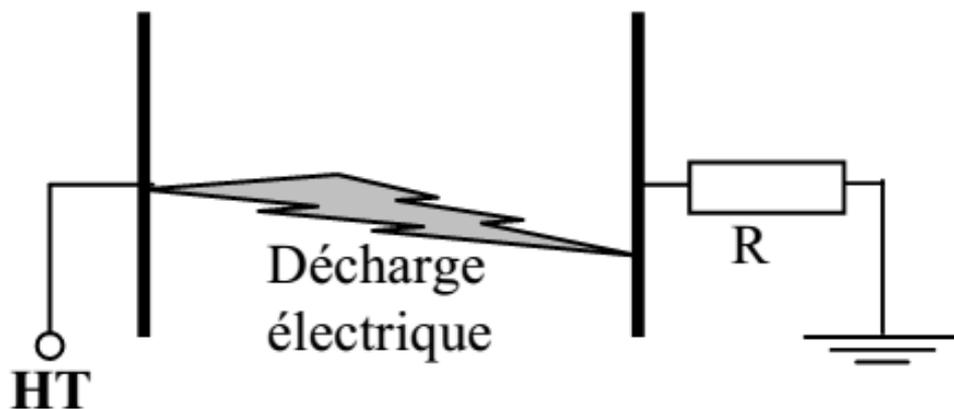
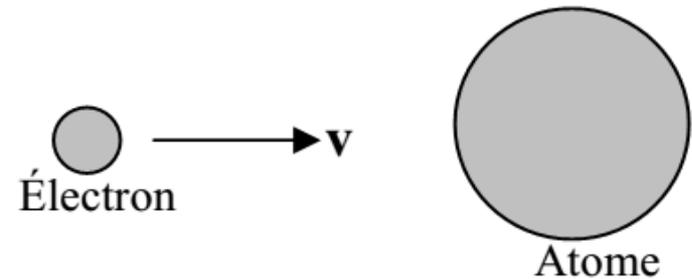


Figure 5

## ➤ Phénomènes de collision

*Collision* : choc entre deux particules.



**Figure 6**

### ▪ 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.
- a) 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. 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.

## ➤ **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

## ▪ Ionisation par collision

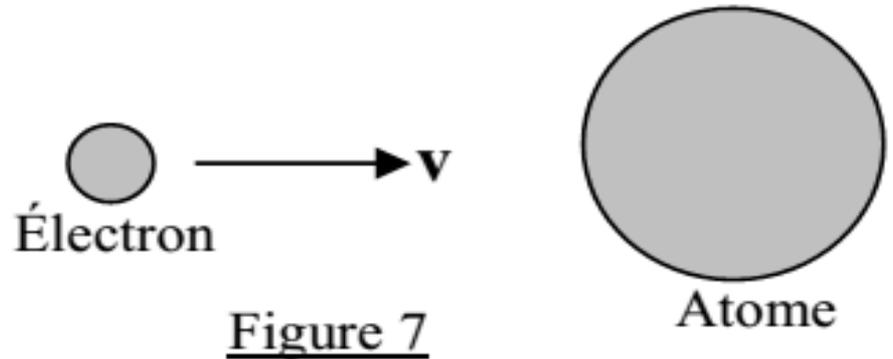
### a) Ionisation :

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



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.

❖ Le **potentiel d'ionisation** ou **énergie d'ionisation** d'un atome ou d'une molécule est l'énergie qu'il faut fournir à un **atome neutre** pour arracher un électron (le moins lié) à l'état gazeux et former un ion positif.

## 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  $W_i$  ( $W_c < W_i$ )  $\Rightarrow$  excitation de l'atome.



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.

## • Ionisation thermique

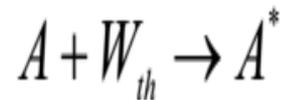
Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée ( $> 1500$  °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée  $W_{th}$ .

- 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.

# Avalanche Electronique

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

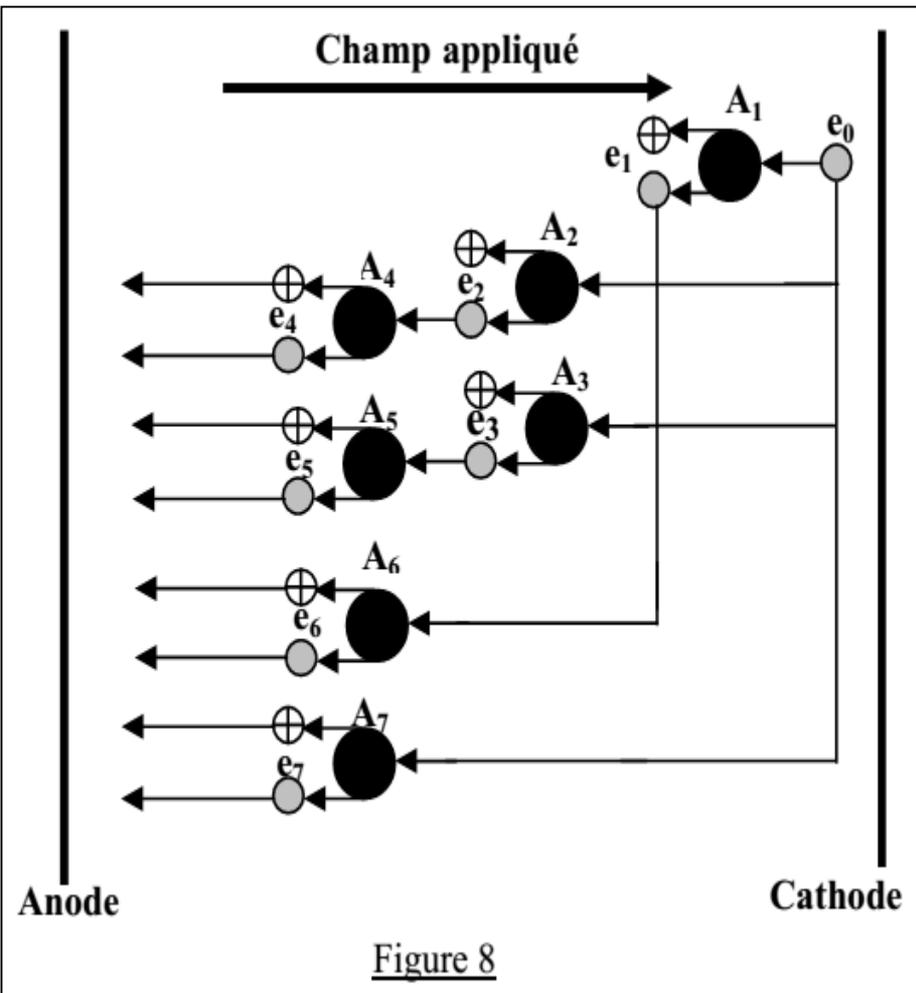
*Electron primaire* : crée par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

## 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



## 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→Anode).

## ➤ **Gaz Electro-Negatifs**

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.

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

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

En chimie, l'**électronégativité** d'un élément est une grandeur qui caractérise sa capacité à attirer les électrons lors de la formation d'une liaison chimique avec un autre élément.

## 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...).

## ➤ **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 SF<sub>6</sub> ;
- L'huile minérale.

**I. Historiques**

**II. Généralité sur la haute tension**

**III. Champ électrique**

**IV. Importance de l'étude de champs électriques en haute tension :**

**V. Comparaison entre lignes aériennes et câbles souterrains HT**

**VI. Utilisation des Réseaux HVDC**

**VII. Réseaux HT dans le Monde**

**VIII. Phénomènes d'ionisation dans les gaz**

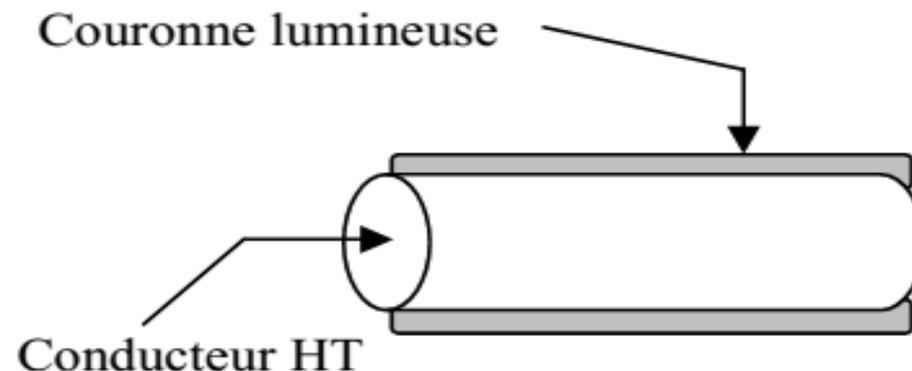
**IX. Décharge couronne**

# IX. Décharge couronne

## IX. 1. NOTIONS GENERALES

**Définition:** L'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air,  $\approx 30$  kV/cm), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse (**Figure 1**).

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ( $U \geq 400$  kV ), lorsqu'il fait sombre.



**Figure 1**

**Inconvénients** : pertes couronne, interférence avec les ondes radio, bruit et vibrations des conducteurs.

**Avantages** : plusieurs applications industrielles (Filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie...).

L'effet couronne devient très gênant pour les réseaux à partir de **345 kV**. Le bruit et le champ électrique superficiel représentent actuellement les paramètres d'environnement les plus importants à prendre en considération lors de la construction de nouvelles lignes  **$U \geq 750 \text{ kV}$** .

L'effet couronne se produit principalement sur **les conducteurs de ligne**, mais aussi sur **les parties métalliques pointus** reliées à la haute tension, telles que sur **l'isolateur**, surtout par temps **humide**.

## ➤ **Champ électrique**

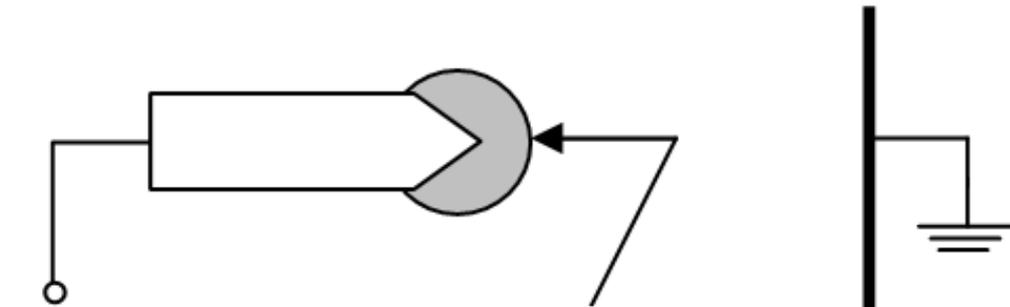
Le champ électrique produit par le conducteur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du conducteur, il s'agit donc d'un champ non uniforme.

**Important** : *L'effet couronne a lieu dans un champ non uniforme.*

Soit un système d'électrodes **pointe-plan**. Que se produit-il si le champ près de la pointe est égal à 30 kV/cm ?

**Réponse** : Décharge couronne

*Le champ étant non uniforme, l'ionisation se produit uniquement près de la pointe et ne se produit pas près de l'électrode plane.*

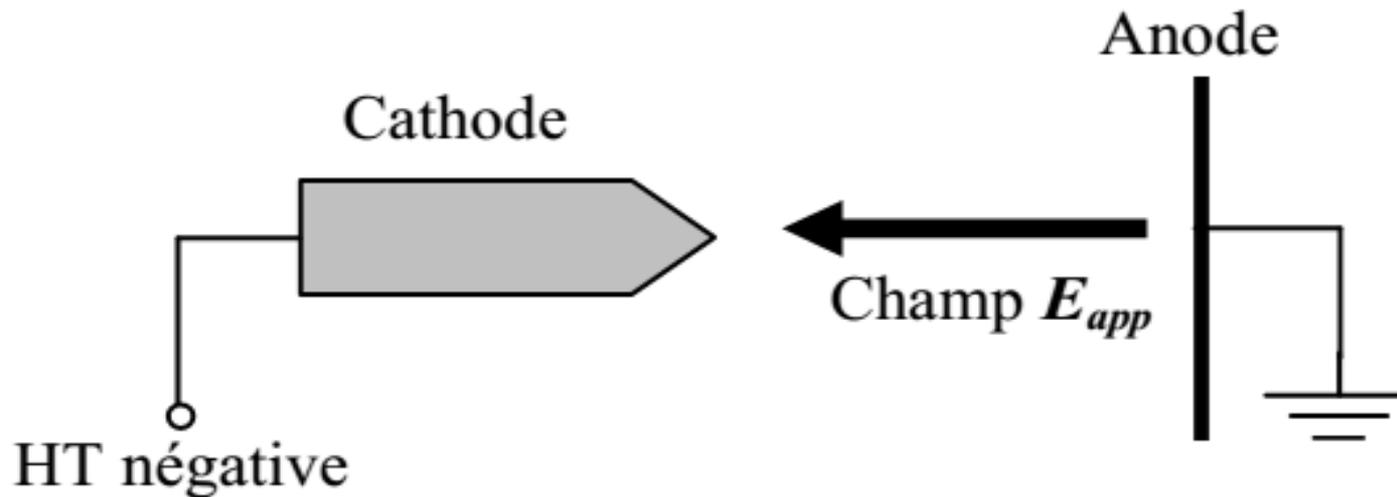


**H** Figure : Zone où se produit l'effet couronne



## IX. 2 Décharge Couronne en Polarité Négative

- Pointe portée à un potentiel HT négatif ;
- Electrode plane : Reliée à la terre

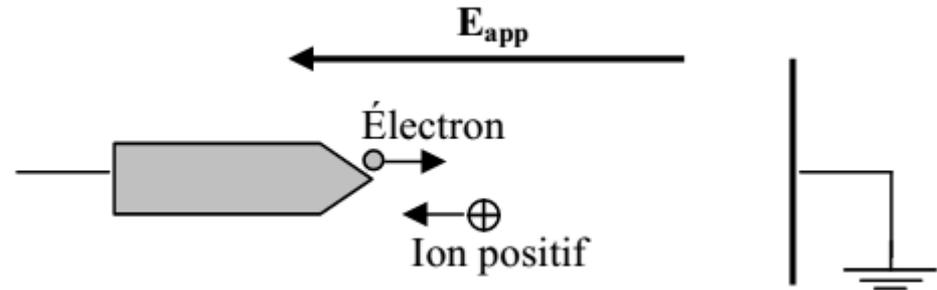


**Figure : Polarité négative**

## ➤ Courant de la décharge couronne

### a) Nature du courant

Seuls les **électrons** traversent tout l'espace inter-électrodes  $\Rightarrow$  **courant électronique**.

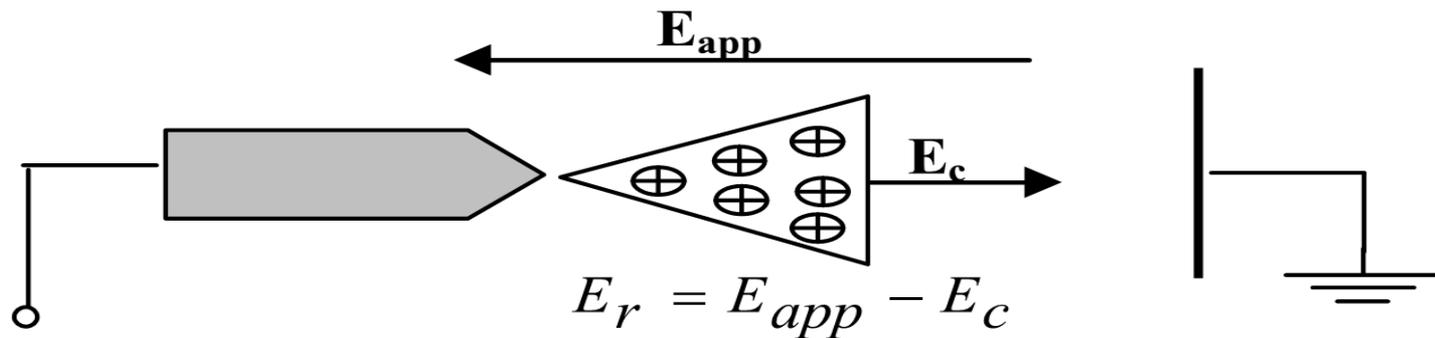


### Remarques :

- Dans les gaz électronégatifs (air, SF<sub>6</sub>...), les électrons s'attachent aux atomes pour former des ions négatifs  $\Rightarrow$  **le courant électronique devient courant ionique**.
- Le courant de la décharge couronne est très faible : de quelques  $\mu\text{A}$  à quelques mA.

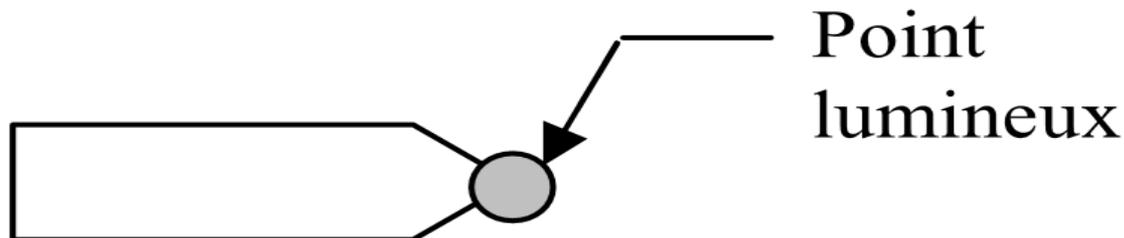
## ➤ Apparence lumineuse

Comme le champ de la charge d'espace est **opposé** au champ appliqué, on dit qu'en polarité négative l'effet couronne se déroule dans un « champ décroissant ». L'aspect lumineux est **limité** dans l'espace.



Figure

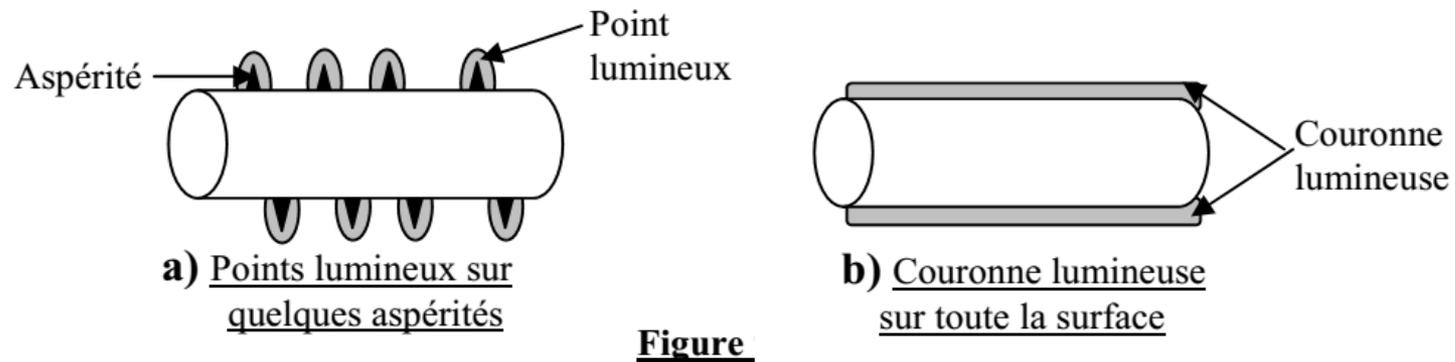
**Pointe-plan** : Sur la pointe apparaît un point lumineux



Figure

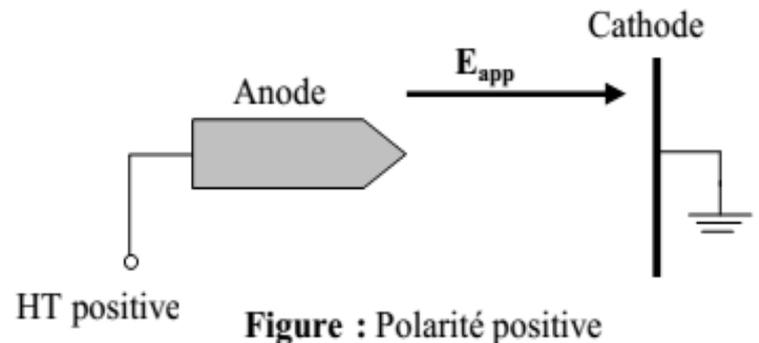
## Ligne HT :

- Apparition de points lumineux sur les aspérités.
- Pour une ligne THT, une couronne lumineuse peut couvrir tout le conducteur.



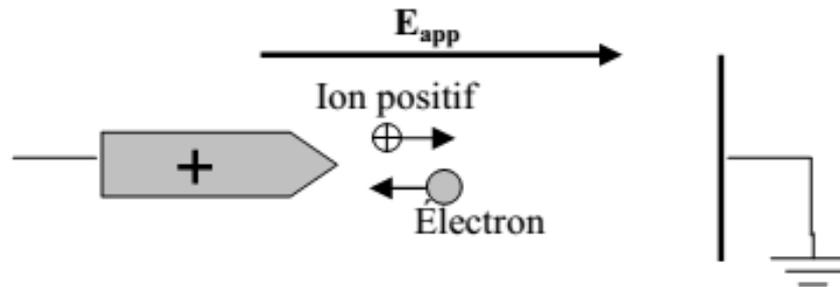
## **IX. 3. Décharge couronne en polarité positive**

- Pointe portée à un potentiel HT positif ;
- Electrode plane reliée à la terre.



## b) Nature du courant :

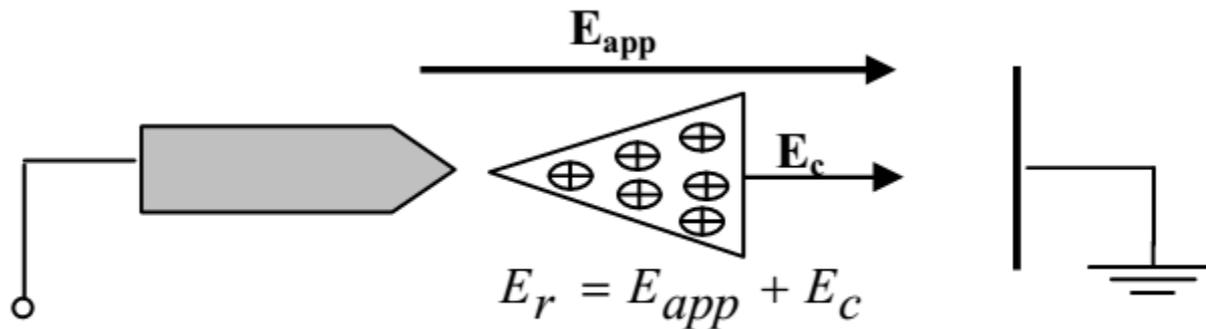
Seuls les **ions positifs** traversent l'espace inter-électrodes  $\Rightarrow$  **courant ionique**



Figure

### ➤ Apparence lumineuse

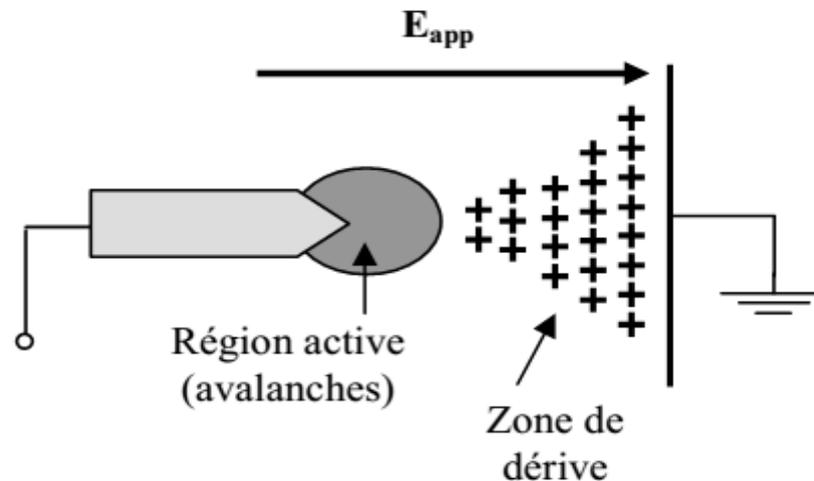
Le champ de la charge d'espace a même sens que le champ appliqué, on dit qu'en polarité positive l'effet de couronne se déroule dans un « champ croissant ». L'aspect lumineux **s'étend** dans l'espace.



Figure

**Résumé :** L'application d'une tension de valeur suffisante pour créer un seuil de décharge couronne, entraîne une répartition de l'espace inter-électrodes en deux régions (voir figure).

- La première région voisine de l'électrode à faible rayon de courbure où le champ électrique est intense, elle est le siège d'ionisation du gaz, c'est la zone active. Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique provoquant ainsi des collisions avec des atomes neutres ou des molécules; il y a alors multiplication électronique par avalanche.
- Le reste de l'espace inter-électrodes constitue la deuxième région où le champ électrique est faible, c'est la zone de dérive. Dans cette zone, les électrons ne peuvent pas se multiplier, les ions créés par collisions dérivent vers l'électrode plane (ou à grand rayon de courbure) sous l'effet du faible champ en constituant ainsi une charge spatiale mono polaire.

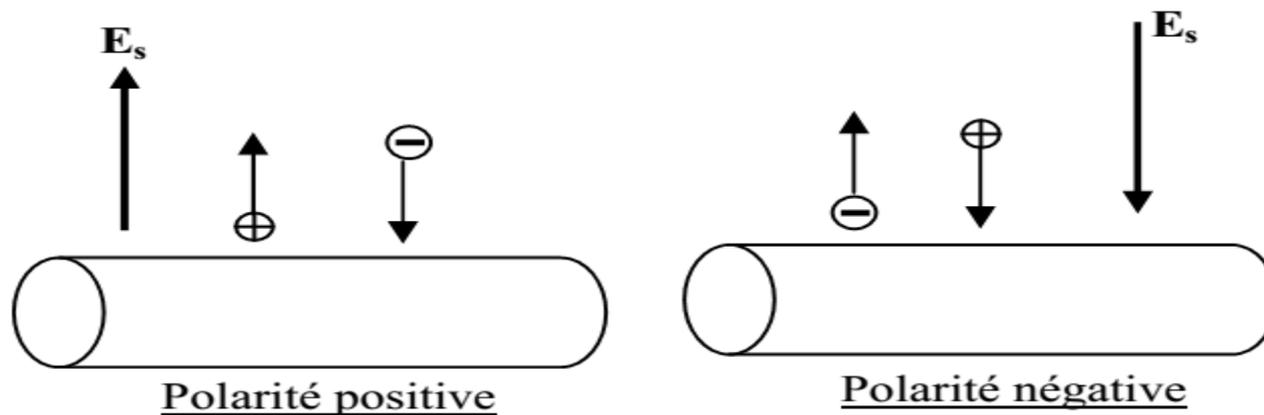


## IX. 4. Pertes Couronne dans les Réseaux

### Nature des pertes

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- **Alternance positive** : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions positifs.
- **Alternance négative** : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives. tout se passe comme si le conducteur émet des ions négatifs

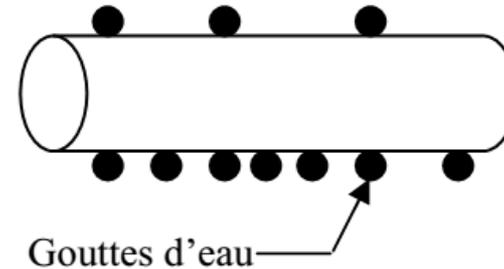


Figure

Le mouvement des **ions** provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les **atomes** de l'air. Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les **pertes couronne**. Les pertes sont dues à un courant dans le plasma formant la **couronne** autour du conducteur, dont l'ordre de grandeur est environ  $\Delta P \cong 100 \text{ kW/km}$ .

## Influence de la pluie

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et les pertes considérables.



### Remarques :

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec ; c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.
- Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur.
- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlée au fur et à mesure par la décharge elle même.
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules.

## **IX. 5. Perturbation électromagnétique**

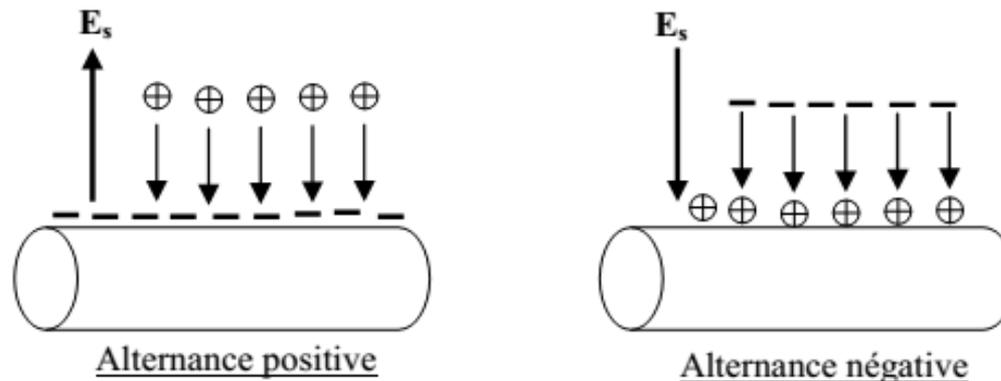
L'effet couronne est à l'origine des perturbations des ondes radio, car les fréquences du courant de couronne (de l'ordre du MHz) sont du même ordre de grandeur que celles des ondes radio. Les charges créées par ionisation sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Le courant qui en résulte crée un champ électromagnétique variable qui se propage dans l'air et provoque la perturbation des ondes radio.

## **IX. 6. Bruit**

L'effet couronne produit un bruit ressemblant au bourdonnement d'abeilles. Le déplacement brusque des ions par le champ superficiel produit une variation locale de la pression de l'air qui se transforme en ondes sonores. Le bruit est un facteur nuisible qui peut avoir des conséquences nuisibles sur le tissu biologique. Le bruit est tellement gênant pour l'environnement qu'il devient la paramètre principal à prendre en considération lors de la réalisation de réseaux THT ( $U \geq 1000 \text{ kV}$ ).

## IX. 7. Avantage de la Décharge Couronne dans le Réseau

Quand la champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension.



Figure

## IX. 8. Applications Utilisant la Décharge Couronne

### ❖ Parafoudre

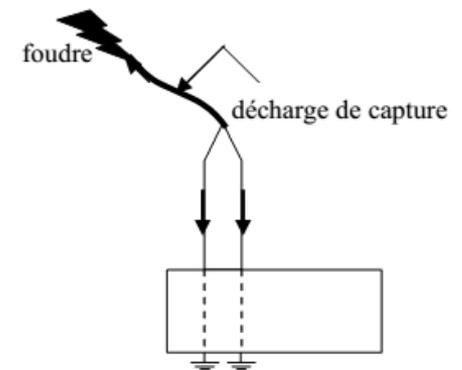
L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre

### ❖ Filtre électrostatique

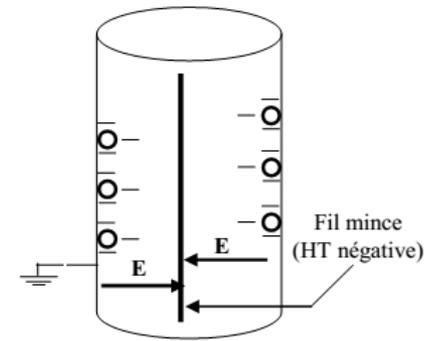
Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre.

### ❖ Séparateur électrostatique

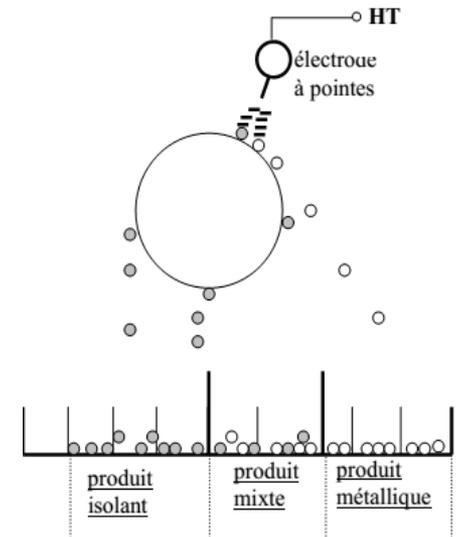
Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents.



Figure



Figure



Figure