

TECHNIQUES DE LA HAUTE TENSION

SOMMAIRE :

Chapitre I : Généralités sur la haute tension

Chapitre II : Phénomènes d'ionisation dans les gaz

Chapitre III : Claquage des isolants gazeux

Chapitre IV : Décharge couronne

Chapitre VI : La foudre

Chapitre VI : Isolateurs des lignes HT

Chapitre VII : Générateurs de la haute tension

Chapitre VIII : Mesure en haute tension

Chapitre X : Claquage des isolants solides

Chapitre XI : Claquage des isolants liquides

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 :

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

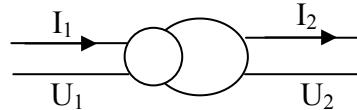


Figure 1 : Transformateur élévateur

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 courant 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

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

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

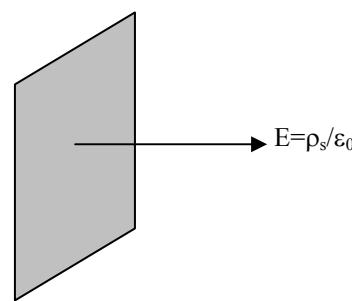
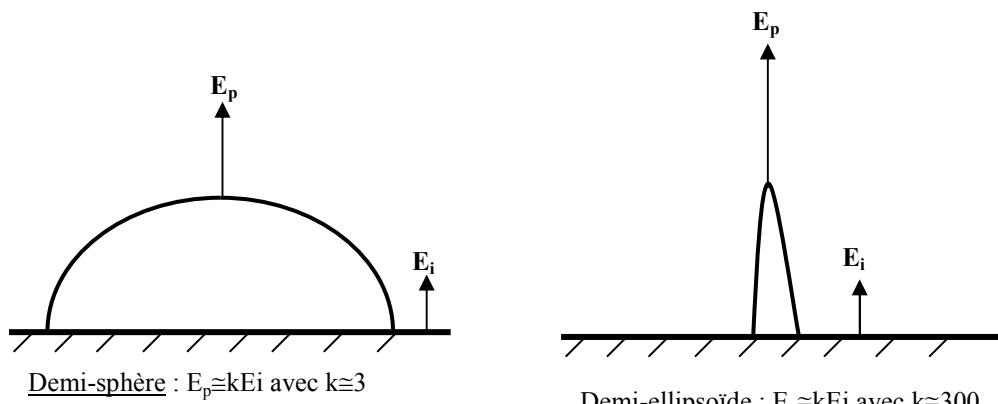


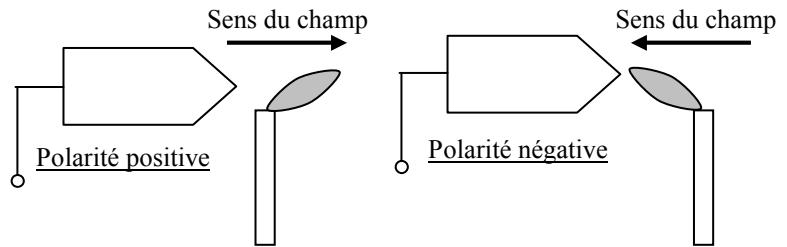
Figure 2 : Plan chargé

**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.

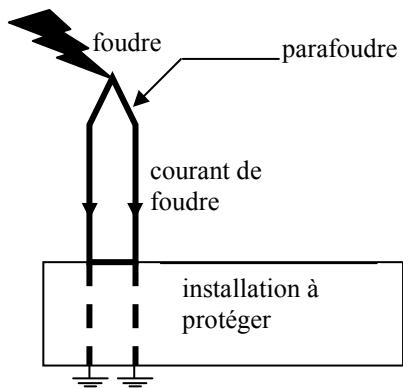
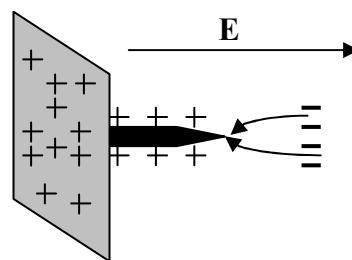
Vent électrique :

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).

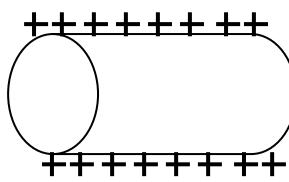


Figure 7

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)...

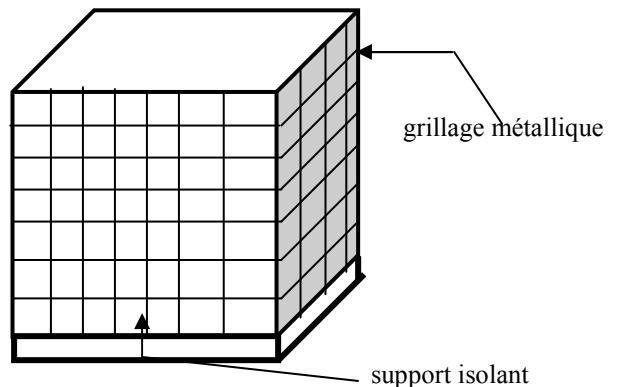


Figure 8 : Cage de Faraday

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 $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$
- L'air est l'isolant le plus disponible, le plus utilisé et par dessus le marché il est gratuit.
- Il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen.
- N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que :
 - Grande résistivité ;
 - pertes faible ;
 - Rigidité diélectrique élevée ;
 - Non inflammable ;
 - Résistant aux effets thermiques et chimiques ;
 - Absence de toutes toxicité ;
 - Maintenance pas chère et pratique.
- Les gaz ne sont pas généralement considérés comme des "matériaux", parce que la distance entre les molécules adjacentes est si grande et le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume est si petit, qu'ils ne sont pas capables de résister aux forces mécaniques. Cependant, les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant.

I.1. Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

- des protons : $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} kg$; $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} C$
- des neutrons : $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} kg$; $q = 0$

Les électrons gravitent autour du noyau :

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

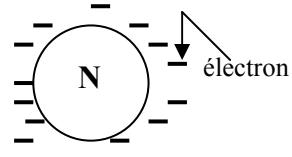


Figure 1 : Constitution d'un atome

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

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

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

I.2. Mouvement des particules dans le gaz

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

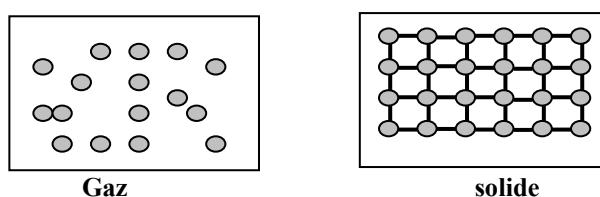


Figure 2

I.3. Pression du gaz

La pression P est proportionnelle à la densité atomique δ .

δ : Nombre d'atomes/unité de volume

λ : libre parcours moyen (*lpm*) : distance séparant deux particules voisines.

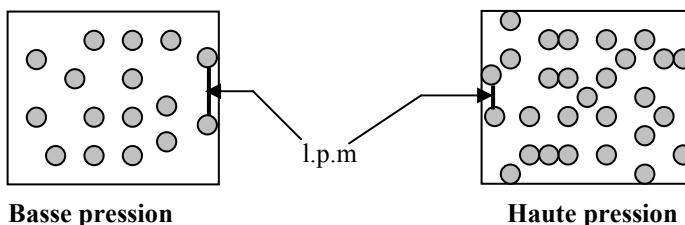


Figure 3

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 $E_c \approx 30\text{ kV/cm}$.

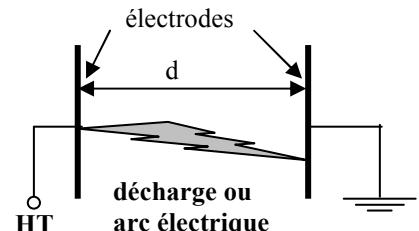


Figure 4

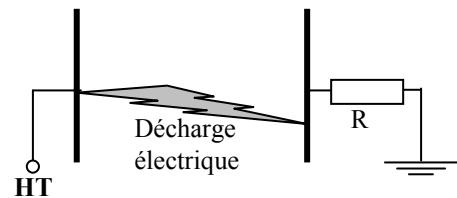


Figure 5

III. PHENOMENES DE COLLISION

Collision : choc entre deux particules.

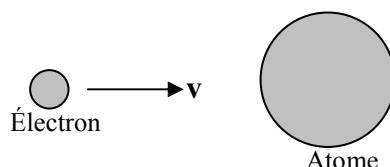


Figure 6

III.1. Choc élastique

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

Soient :

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

- Principe de conservation de l'énergie cinétique W_c :

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

- Principe de conservation de la quantité de mouvement :

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

A partir des équations 1 et 2, on obtient :

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

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

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

Lors de chocs élastiques l'électron garde pratiquement toute son énergie et n'en cède qu'une très faible part par collision aux autres particules. Les électrons possèdent donc une énergie supérieure à celle des ions et des molécules neutres. Comme l'électron conserve pratiquement toute son énergie cinétique après un choc élastique, il sera d'une grande importance pour les chocs non élastiques qui se produisent dans le mécanisme de claquage des gaz.

III.2. Choc non élastique

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

IV. PROCESSUS D'IONISATION ET D'EXCITATION

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

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

$$W_i = e V_i$$

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

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

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

IV.1. Ionisation par collision

a) Ionisation :

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

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

m : masse de la particule

v : vitesse de la particule

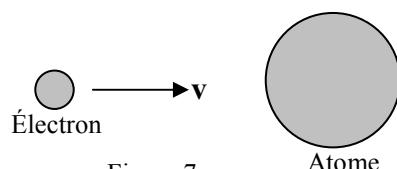


Figure 7

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

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

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

b) Excitation :

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

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

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

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

V_{ext} : potentiel d'excitation

Désexcitation : Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément, lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.

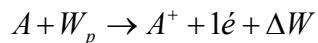
Après un temps très bref (entre 10^{-7} et 10^{-10} s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie $W_p = h\nu$ ($A^* \rightarrow A + W_p$)

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

IV.2. Photo-ionisation

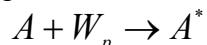
L'atome absorbe l'énergie d'un photon W_p .

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



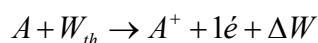
avec $\Delta W = W_p - W_i$ cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

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

**IV.3. Ionisation thermique**

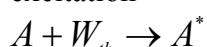
Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée (> 1500 °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée W_{th} .

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



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

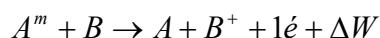
- Si W_{th} légèrement inférieure à $W_i \Rightarrow$ excitation



L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. Dans ce cas, l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives ; en effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs élevée. Le temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation.

IV.4. Ionisation par les atomes métastables

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



C'est le processus le moins fréquent.

V. AVALANCHE ELECTRONIQUE

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

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

Description de l'avalanche :

L'électron primaire e_0 accéléré par le champ E entre en collision avec un atome A_1 et l'ionise, A_1 libère un électron et devient lui-même un ion positif.

Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision deux atomes A_2 et A_3 qui libèrent deux électrons e_2 et e_3 . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent \Rightarrow avalanche électronique.

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

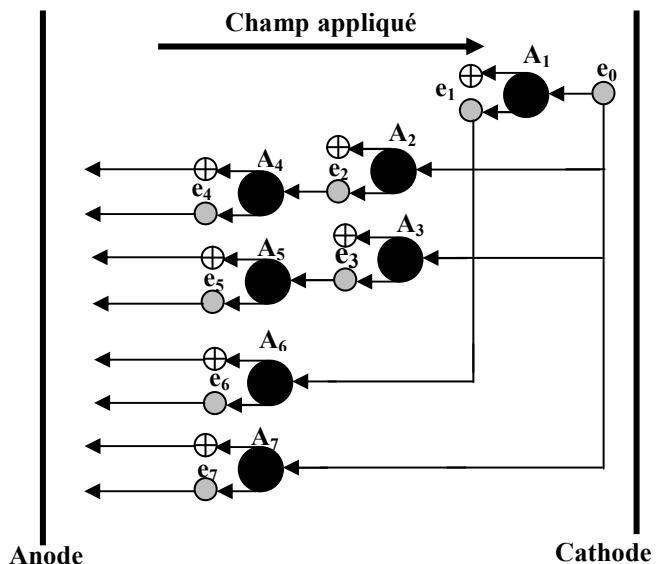


Figure 8

Remarques :

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

VI. CHARGE D'ESPACE

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

Forme de la charge d'espace :

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

Exemple :

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

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

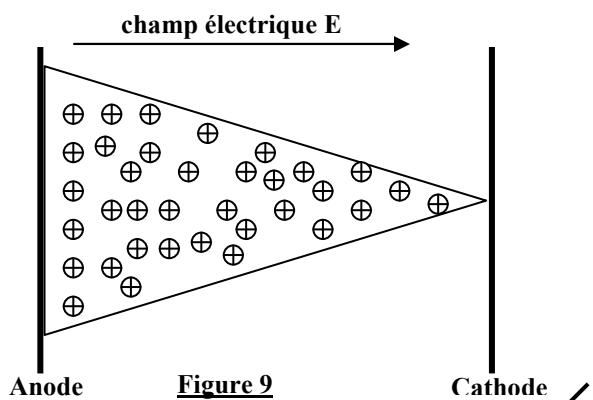


Figure 9

VII. ETUDE DE L'avalanche

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

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

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

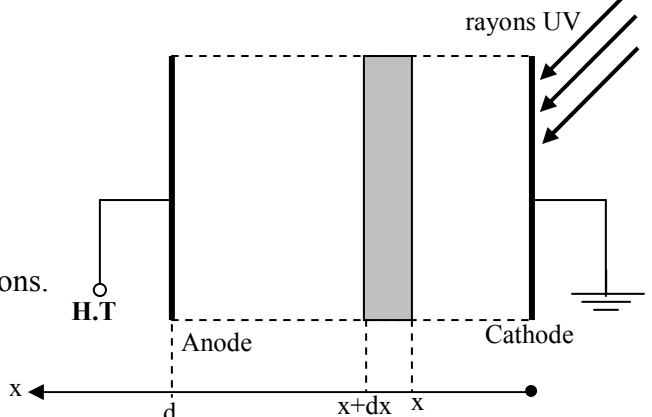


Figure 10

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

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

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

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

Coefficient α :

$\alpha = dn \left(\frac{1}{ndx} \right)$ nombre de paires électrons-ions positifs créées 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 créées dans une avalanche:

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

Nature du courant de l'avalanche :

Rappel : $J = Nev$

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

$$\text{avalanche} \rightarrow \frac{N_e \text{ électrons}}{N_i \text{ ions positifs}} \Rightarrow \begin{array}{l} \text{courant électronique } J_e = N_e ev_e \\ \text{courant ionique } J_i = N_i ev_i \end{array}$$

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

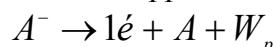
Courant total par avalanche :

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

VIII. DETACHEMENT ET RECOMBINAISON

1) Département 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)

a) Entre un ion positif et un électron : $A^+ + 1e^- \rightarrow A + W_p$

b) Entre deux ions opposés : $A^+ + B^- \rightarrow AB + W_p$

IX. ATTACHEMENT

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

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

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

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

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

X. GAZ ELECTRONEGATIFS

La diminution d'électrons dans le gaz, grâce à l'attachement aux atomes, rend le claquage plus difficile, pour cette raison, les gaz électronégatifs sont les meilleurs isolants gazeux utilisés dans l'isolation haute tension. Pour ce type de gaz, les molécules se combinent facilement avec les électrons libres et peuvent absorber une partie de l'énergie de l'électron incident.

Hexafluorure de soufre SF₆ :

Dans les dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour raison d'encombrement et de coût, a conduit à rechercher d'autres types de gaz, possédant de meilleures propriétés d'isolation que l'air, tels que le SF₆. Le SF₆ est un gaz inodore, incolore, non toxique, ininflammable et plus résistant au claquage. Il n'est pas toxique, chimiquement résistant et ne se décompose pas sous l'effet de la chaleur jusqu'à des températures de 800 °C.

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

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

Remarques :

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

XI. MILIEUX DE COUPURE DES DISJONCTEURS

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

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

XII. PROCESSUS CATHODIQUES

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

Exemples: Aluminium $W_{ext} = 0,1$ 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

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

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 :

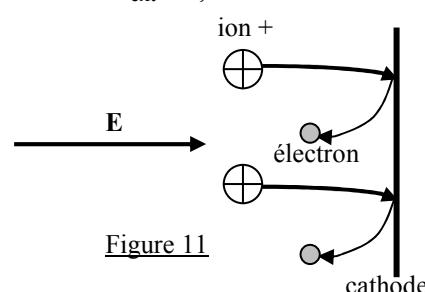


Figure 11

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

XIII.2. Emission par photon

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

XIII.3. Emission thermique

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

XIII.4. Emission par champ

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

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

XIII.5. Emission par les métastables

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

CHAPITRE III

MECANISMES DE CLAQUAGE DES ISOLANTS GAZEUX

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

I) INFLUENCE DE LA PRESSION

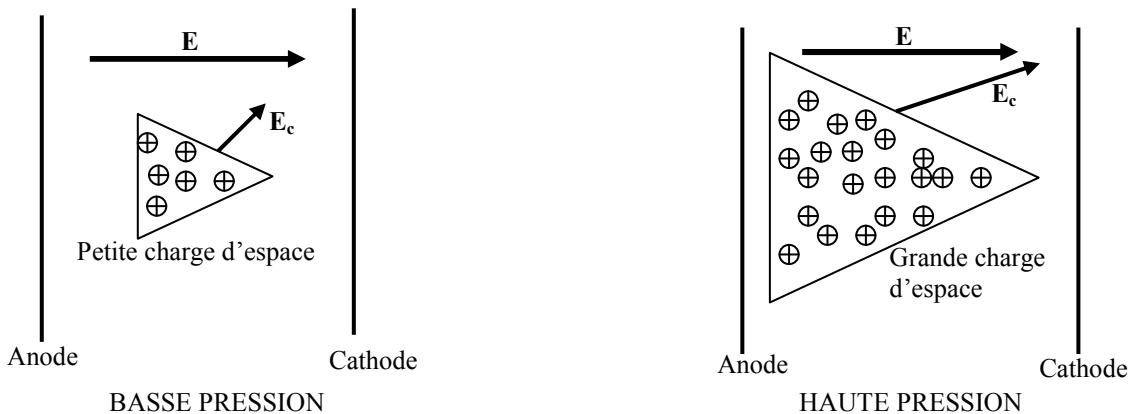


Figure 1

Durant l'avalanche électronique les électrons rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs moins rapides forment dans le gaz une charge d'espace. La taille de la charge d'espace dépend de la pression du gaz :

a) Basse pression :

Comme la densité atomique est faible, la charge d'espace est telle qu'elle génère un champ électrique E_c faible et négligeable \Rightarrow MECANISME DE TOWNSEND.

b) Haute pression :

La densité atomique est grande, la charge d'espace est volumineuse ; Elle crée un champ E_c considérable qui joue un rôle important dans le claquage \Rightarrow MECANISME DE STREAMER.

II) MECANISME DE TOWNSEND (Basse Pression)

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

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

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

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

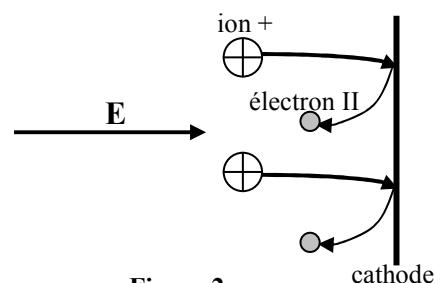


Figure 2

Remarques :

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

Influence de la cathode :

La tension critique de claquage U_c dépend du type de la cathode utilisée.

Supposons 3 cathodes en matière différente : Aluminium, Nickel et l'Alliage Al-Ni.

Les énergies d'extraction d'électrons sont pour :

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

Il en résulte que $U_c(Al-Ni) > U_c(Al) > U_c(Ni)$

Coefficients α et γ :

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

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

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

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

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

R : résistance du gaz.

Le courant est du au déplacement des n_0 électrons primaires

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

Le courant de saturation est du au déplacement des n_0 électrons primaires. Même si la tension augmente, la cathode ne peut fournir plus de n_0 électrons/s \Rightarrow saturation.

Le courant de saturation dans l'air est atteint à de faibles valeurs de champ électrique. Quand l'intervalle entre les électrodes est de 10 mm, la saturation est obtenue à seulement 0,5 V/m.

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

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

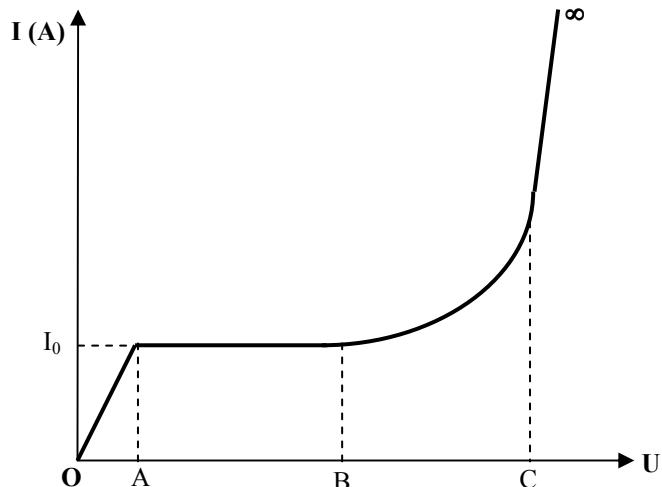


Figure 3

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

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

U_c : tension critique de claquage.

IV) LOI DE PASCHEN

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

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

U_c : tension critique de claquage ;

P : pression du gaz ;

d : distance inter-électrodes.

$U_{c\min}$: tension critique minimale ;

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

Loi de Paschen est étudiée en champ homogène.

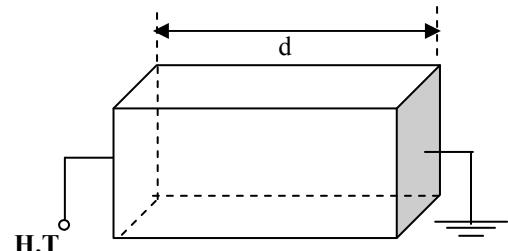


Figure 5 : Enceinte remplie par un gaz

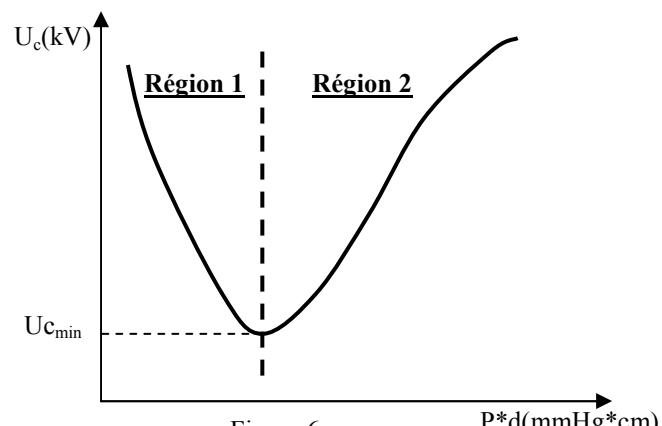


Figure 6

$P \cdot d(\text{mmHg} \cdot \text{cm})$

IV.1) Minimum de Paschen

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

Pour l'air : $U_{c\min} = 326$ V

Pour l'argon pur : $U_{c\min} = 195$ V

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

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

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

Région 1 : U_c diminue en fonction de la pression P

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

Région 2 : U_c augmente avec la pression P .

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

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

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

V) MECANISME DE STREAMER (Haute pression)

Le mécanisme se déroule comme suit :

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

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

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

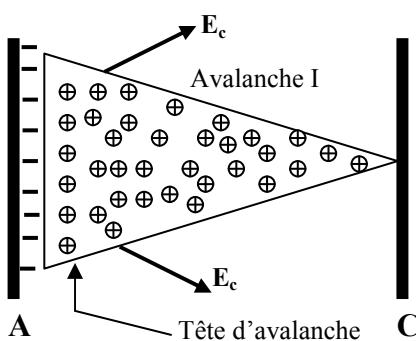


Figure 7.a

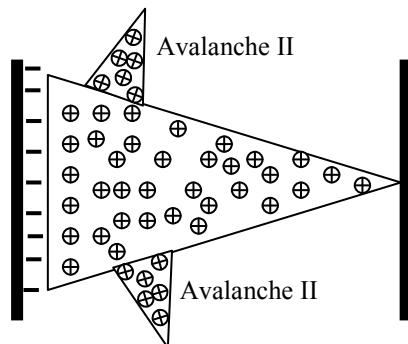


Figure 7.b

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

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

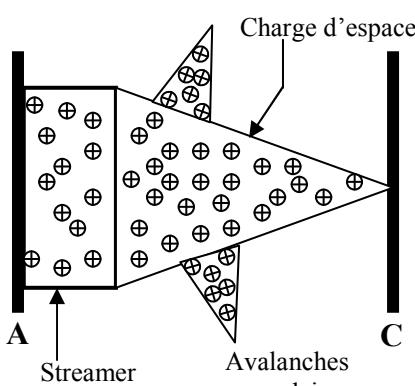


Figure 7.c

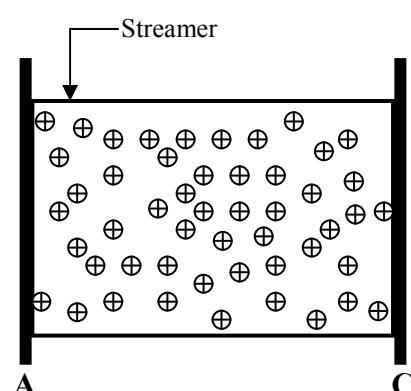


Figure 7.d

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

Elle est équivalente à la loi de Paschen.

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

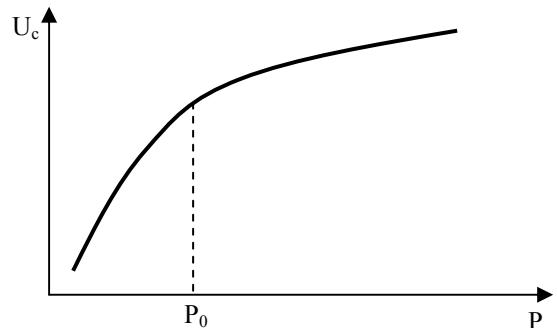


Figure 9

VI) CLAQUAGE SOUS TENSION DE CHOC

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

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

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

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

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

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

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

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

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

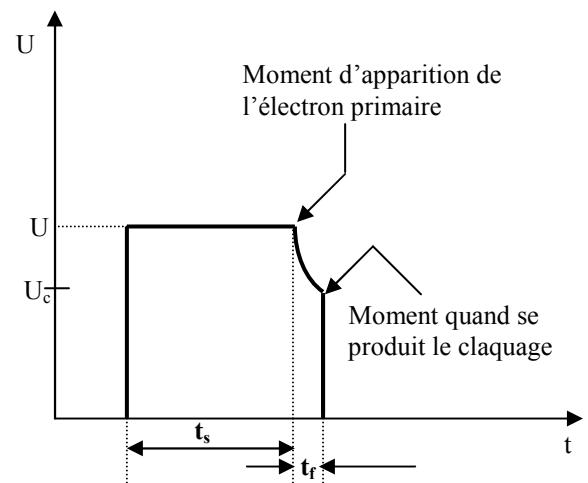


Figure 10

VII) DECHARGE PARTIELLE

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

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

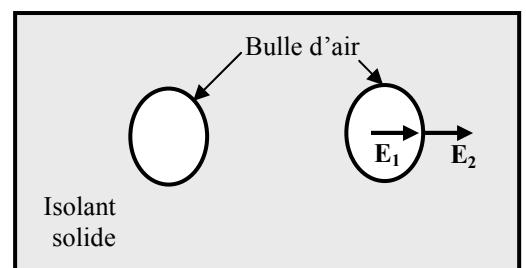


Figure 11

$$D_{n1} = D_{n2} \Rightarrow \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \Rightarrow E_2 = E_1 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

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

$$\epsilon_2 = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$$

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

$$\epsilon_1 \gg \epsilon_2, \text{ donc } E_2 \gg E_1 \Rightarrow$$

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

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

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

VIII) EFFET PENNING

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

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

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

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

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

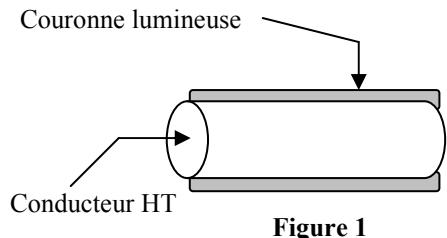
Remarque : l'effet Penning est mis à profit dans les applications où l'on utilise la décharge électrique, comme les lampes à décharge...

CHAPITRE IV

DECHARGE COURONNE

I) NOTIONS GENERALES

I.1) 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, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), 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 ($U \geq 400 \text{ kV}$), lorsqu'il fait sombre.

Inconvénients : pertes couronne, interférence ave 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 aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

I.2) 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.

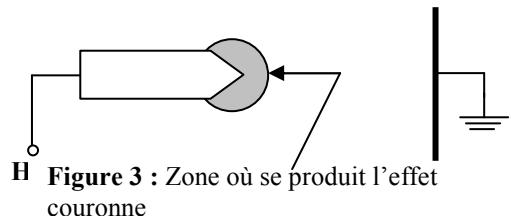
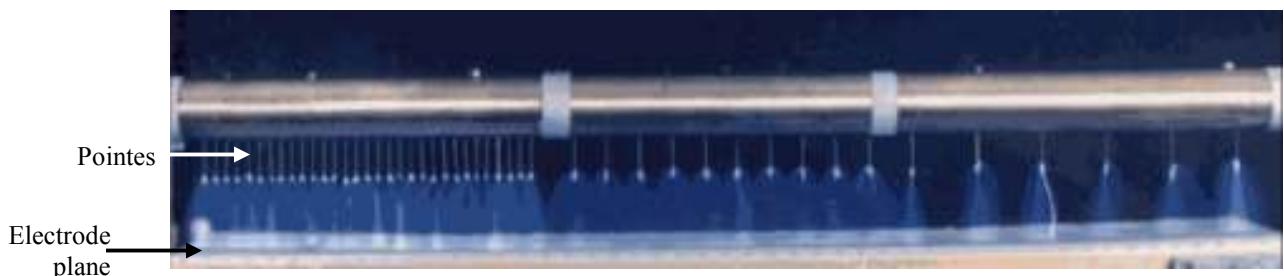


Figure 3 : Zone où se produit l'effet couronne



II) DECHARGE COURONNE EN POLARITE NEGATIVE

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

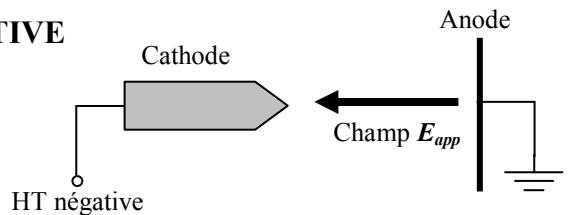


Figure 4 : Polarité négative

II.2) Courant de la décharge couronne

a) Nature du courant :

Seuls les électrons traversent tout l'espace inter-electrodes \Rightarrow courant électronique

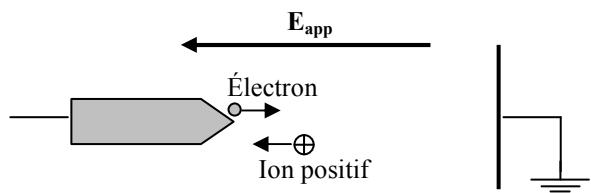


Figure 6

Remarques :

- Dans les gaz électronégatifs (air, SF₆...), 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 μA à quelques mA .

b) Courant à haute fréquence :

Δt : déroulement des avalanches

Δt_0 : arrêt des avalanches

Fréquence : environ 1 MHz

La fréquence des impulsions augmente avec la pression, car la charge d'espace qui s'oppose au champ appliqué est vite formée.

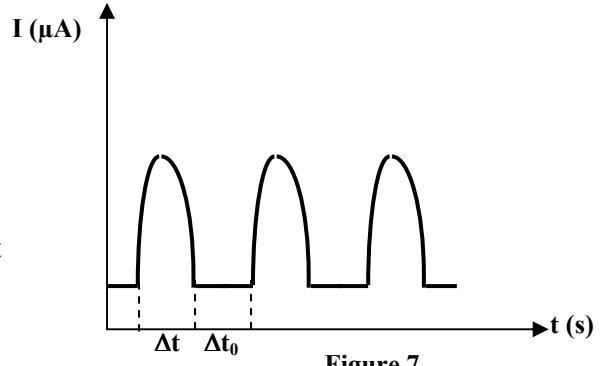


Figure 7

III.3) 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.

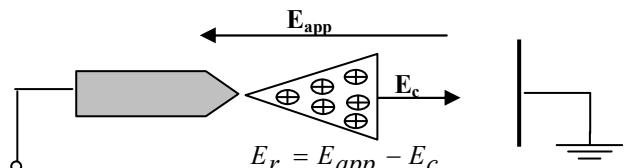


Figure 5.b

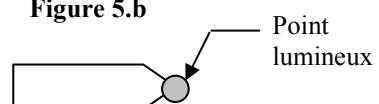


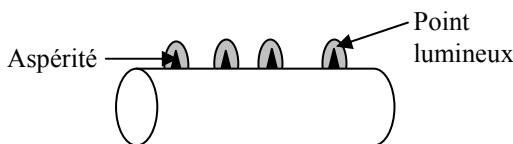
Figure 8

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

b) Ligne HT :

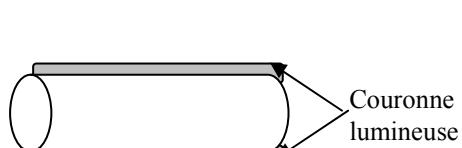
- a) Apparition de points lumineux sur les aspérités.

- b) Pour une ligne THT, une couronne lumineuse peut couvrir tout le conducteur



a) Points lumineux sur quelques aspérités

Figure 9



b) Couronne lumineuse sur toute la surface

III) DECHARGE COURONNE EN POLARITE POSITIVE

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

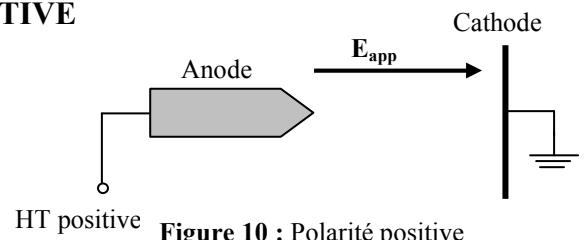


Figure 10 : Polarité positive

III.2) Courant de la décharge couronne

a) Courant à haute fréquence :

Mêmes impulsions qu'en polarité négative mais de fréquence plus petite, car les avalanches qui se déroulent dans un champ croissant ne s'arrêtent pas aussi rapidement qu'en polarité négative.

b) Nature du courant :

Seuls les ions positifs traversent l'espace inter-electrodes \Rightarrow courant ionique (Figure 11).

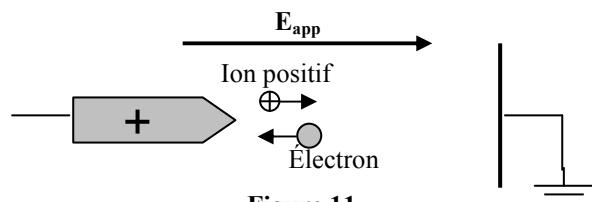


Figure 11

III.3) 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.

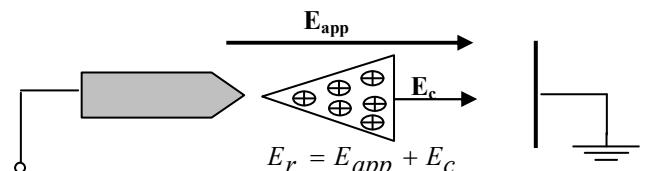


Figure 11bis

- Pointe-plan : longs filaments lumineux appelés « streamers » (Fig.12).
- Ligne HT : même apparence ; Cette apparence est dénommée *décharge-brosse* ou bien *décharge-plume* (Fig.13).



Figure 12

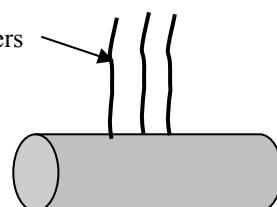


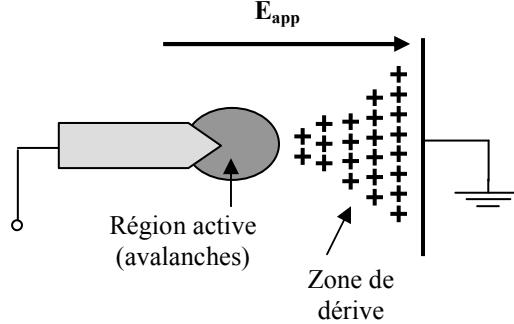
Figure 13

Effet de couronne en tension alternative : l'effet de couronne en tension alternative est la synthèse des deux polarités. Néanmoins, c'est l'apparence lumineuse de l'alternance positive (streamers) qui prédomine.

Résumé : L'application d'une tension de valeur suffisante pour créer un seuil de décharge couronne, entraîne une répartition de l'espace inter-electrodes 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-electrodes 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.



IV) LOI DE PEEK- CHAMP CRITIQUE

Le champ critique d'apparition de l'effet couronne sur un conducteur est :

IV.1) Conducteur lisse

$$E_{cc} = E_s \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \right) \text{ (kV/cm)}$$

Pour une tension continue : E_{cc} en valeur efficace ;

Pour une tension alternative : E_{cc} en valeur max ou amplitude

avec $\delta = \frac{3,92 P}{273 + t}$ densité relative de l'air

Remarque : conditions normales $P = 76 \text{ cm}$ et $t = 25^\circ\text{C} \Rightarrow \delta = 1$

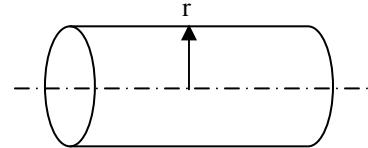


Figure 14 : conducteur aérien

Où

$E_s = 30 \text{ kV/cm}$;

r (cm) : rayon du conducteur ;

P (cm Hg) : pression en cm de mercure :

t ($^\circ\text{C}$) : température ;

$k = 0,308$.

IV.2) Conducteur réel

Le conducteur réel d'une ligne aérienne présente une surface non lisse et rugueuse (toronnée).

En plus, la graisse du conducteur favorise le dépôt de poussières, particules végétales et même des insectes. Ces particules forment des micro-pointes qu'on appelle **aspérités**.

Le pouvoir de pointe fait diminuer le champ

critique : $E_0 = m E_{cc}$

avec $0 < m < 1$: coefficient de l'état de surface.

Conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse, oxydé toronné	0,93 – 0,98
par défaut	0,72 – 0,9
	0,85

L'effet couronne dépend de la géométrie des conducteurs (forme, présence d'irrégularités...) et de l'environnement (pression, humidité, pollution)

V) PERTES COURONNE DANS LES RESEAUX

V.1) 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.

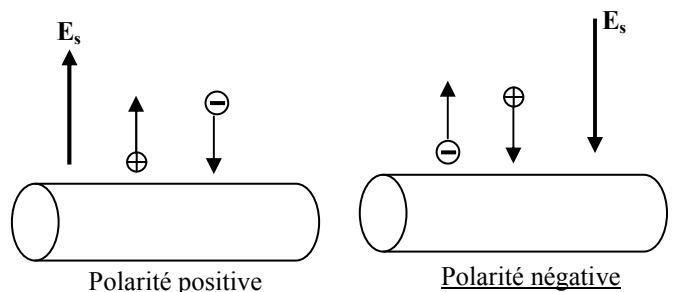


Figure 15

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 $\Delta P \approx 100 \text{ kW/km}$.

V.2) 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.

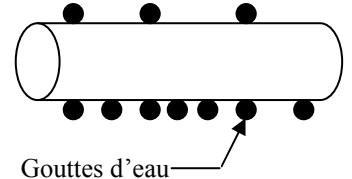


Figure 17

Remarques :

- a) 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.
- b) Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur.
- c) 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.
- d) Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules.

VI) PERTURBATION ELECTROMAGNETIQUE

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.

VII) 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 ($U \geq 1000 \text{ kV}$).

VIII) DEGAGEMENT D'OZONE

La décharge couronne, à l'instar de la décharge de claquage, est aussi accompagnée d'un dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone.

Par ailleurs, en présence de l'humidité, de l'acide nitrique est produit qui cause la corrosion du conducteur.

VIII) VIBRATIONS DES CONDUCTEURS

IX) REMEDE

Le champ électrique superficiel E_s produit à la surface d'un conducteur cylindrique peut être calculé par le théorème de Gauss : $E_s = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r}$

La seule solution utilisée pour remédier contre l'effet couronne est de diminuer le champ superficiel du conducteur en augmentant le rayon.

On utilise pour augmenter le rayon:

- soit un conducteur creux (cher)
- soit un conducteur en faisceaux (il permet en plus de faire transiter une plus grande puissance)

Conducteur en faisceaux :

$$R_{équ} = R \sqrt[n]{\frac{nr}{R}} \text{ avec } D = 2RSin\frac{\pi}{n}$$

avec n nombre de conducteurs ;

$R_{équ}$ rayon équivalent qu'aurait un conducteur central dans cette cellule.

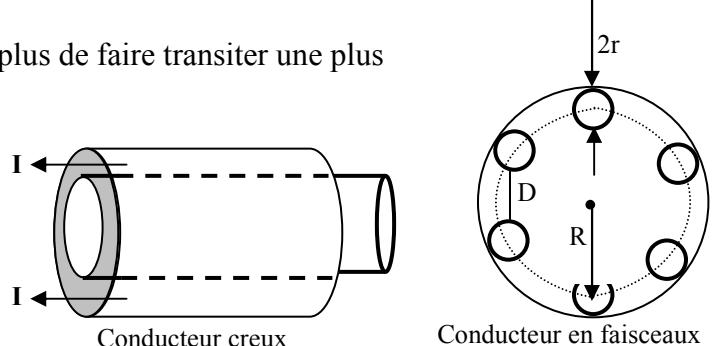


Figure 18

XI) AVANTAGE DE LA DECHARGE COURONNE DANS LE RESEAU

Quand le 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.

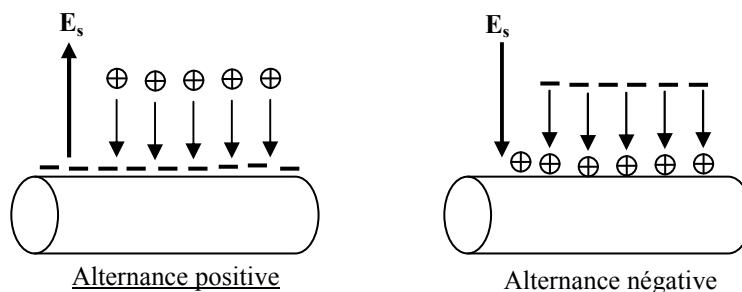


Figure 19

Conclusion : La décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour de l'air environnant,

celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur augmente, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc 1,2/50 μ s simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension.

XII) APPLICATIONS UTILISANT LA DECHARGE COURONNE

XII.1) 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 (Figure 20).

XII.2) Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

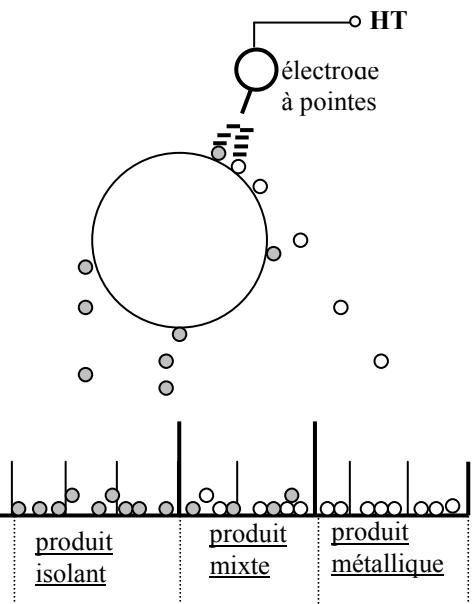
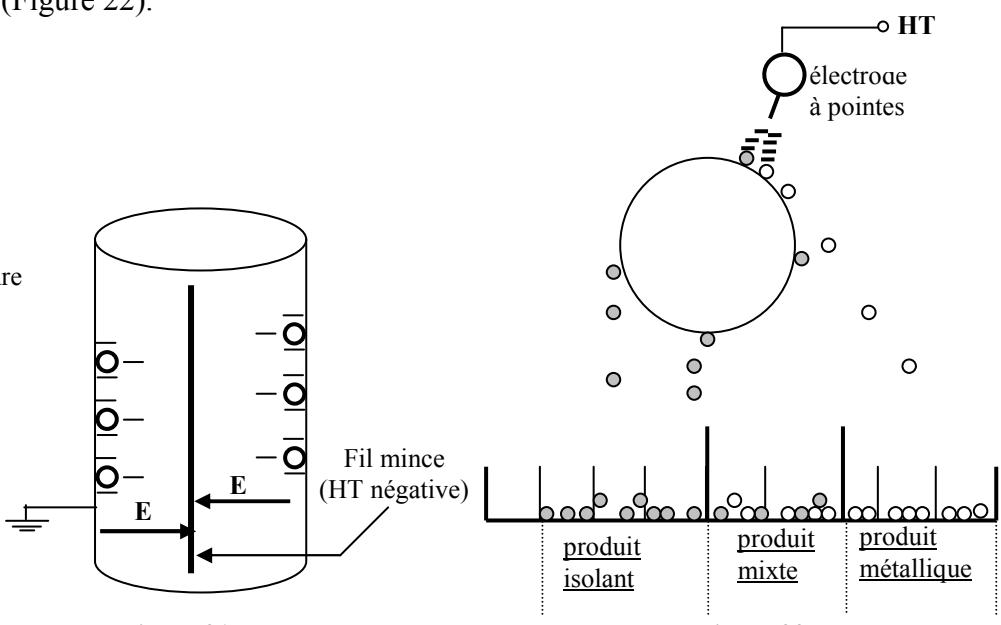
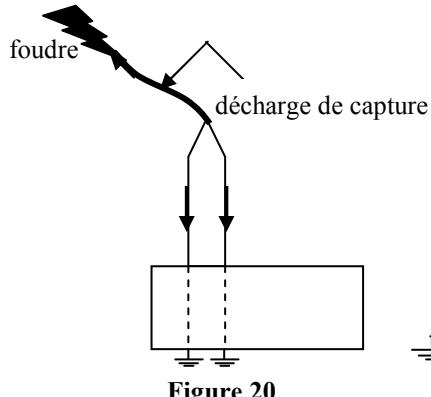
XII.3) Filtre électrostatique

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 (Figure 21).

XII.4) 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 22).



CHAPITRE V

LA FOUDRE

INTRODUCTION

- Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle dont les « électrodes » sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre.

La foudre reste scientifiquement assez mal connue car étant brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Dans les grands laboratoires on provoque le coup de foudre par le lancement d'une fusée reliée par un fil à la terre.

- L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une surtension considérable.
- L'étude de la foudre a deux aspects :
 - Aspect physique : mécanisme de la foudre ;
 - Aspect électrique : protection contre la foudre.

I) ÉLECTRICITÉ ATMOSPHERIQUE

I.1) Par beau temps

Electrosphère : couche atmosphérique ionisée.

L'électrosphère et la terre forment un gigantesque condensateur terrestre, où le champ électrique par beau temps dirigé du haut vers la terre vaut environ 100 à 120 V/m.

Les armatures du condensateur terrestre sont l'électrosphère et le globe terrestre, entre lesquelles il y a la troposphère et la stratosphère qui constituent le diélectrique, dont l'épaisseur est d'environ 100 km. L'épaisseur du diélectrique formant le condensateur terrestre est d'environ 50 km.

La capacité de ce condensateur sphérique est donnée par : $C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_t R_e}{R_e - R_t}$

où

$R_t = 6367$ km rayon de la terre.

$R_e = (6367 + 100)$ km = 6467 km est le rayon de l'électrosphère.

Dans ce cas, nous trouvons

$C = 46$ mF.

L'air comprend en permanence des charges électriques, positives et négatives, créées par les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la terre. Par beau temps, il en résulte un courant atmosphérique de densité J , tendant à décharger le condensateur.

I.2) Par temps nuageux

a) Formation du nuage :

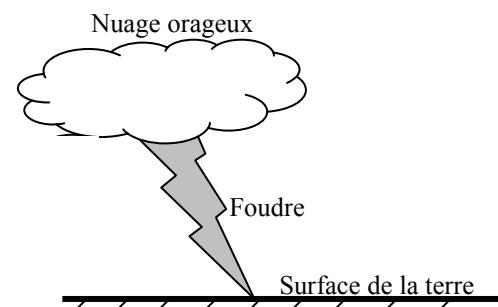


Figure 1

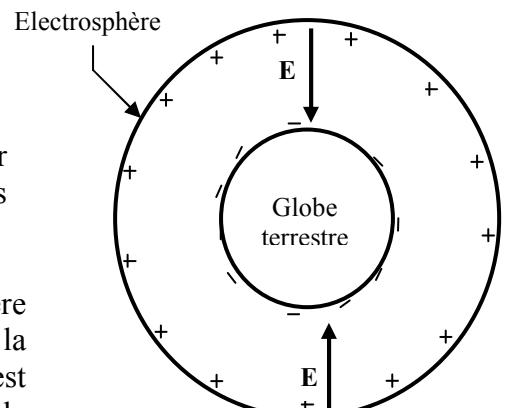


Figure 2 : Condensateur terrestre

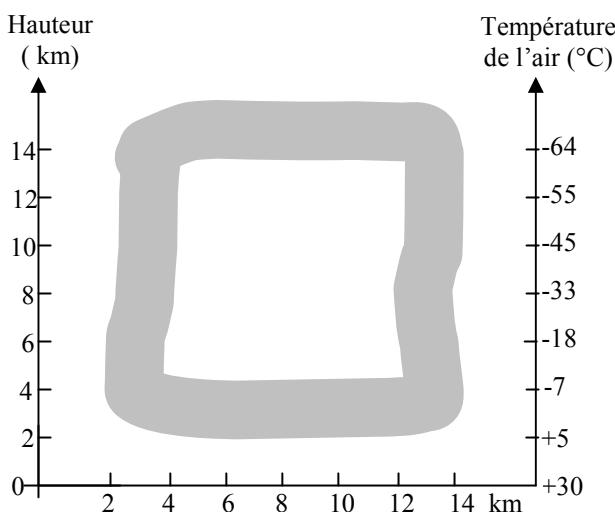


Figure 3 : Constitution du nuage

b) Formation des charges :

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les micro-particules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques par frottement.

c) Répartition des charges :

Les micro-particules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage.

Le nuage orageux est généralement du type Cumulo-nimbus (forme d'enclume, couleur sombre à la base). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure où il fait plus froid est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure. Ces dernières se chargent positivement tandis que les gouttes d'eau prennent une charge négative.

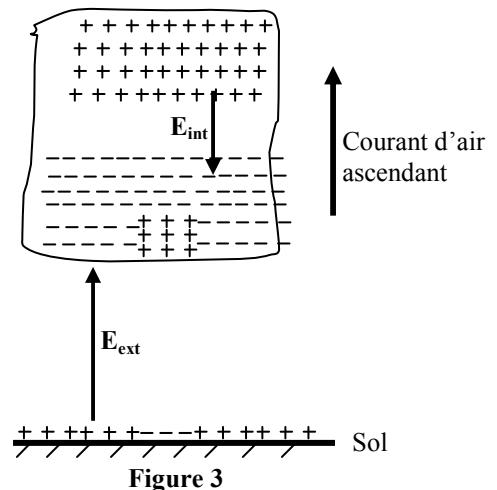


Figure 3

Le nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique, une charge de signe opposé et crée ainsi deux véritables dipôles électriques:

- Un dipôle interne, généré entre les pôles positif et négatif du nuage: si le champ interne E_{int} devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage \Rightarrow ECLAIR.
- Un dipôle externe, entre la base nuage et la surface de la terre: si le champ externe E_{ext} atteint les conditions critiques, il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la terre \Rightarrow FOUDRE.

II) CHAMP ELECTRIQUE (par temps nuageux)**II.1) Module et sens du champ**

Le champ électrique au sol qui était par temps normal de 120 V/m et dirigé vers la terre, avec l'arrivée du nuage chargé électriquement, il s'inverse et peut atteindre 15 à 20 kV/m. Au droit du nuage (sous le nuage), le module du champ atteint la valeur maximale $E_{max}=20$ kV/m, faisant apparaître entre le nuage et la terre une d.d.P (max) = 20 kV/m \times $2000m= 40$ MV.

II.2) Pouvoir de pointe

Sur les régions à faible rayon de courbure le champ atteint des valeurs très élevées (fig.5) :

- une demi-sphère : $E_p \approx kEi$ où $k \approx 3$;
- demi-ellipsoïde: $E_p \approx k Ei$ où $k \approx 300$.

Conclusion : Ce phénomène favorise l'apparition du coup de foudre à cet endroit; *pour cela, la foudre frappe en général les installations les plus élevées et les plus pointues (tours, montagne, arbre, pylônes...).* Il est donc recommandé de s'éloigner de ces endroits par temps orageux pour éviter l'impact de la foudre.

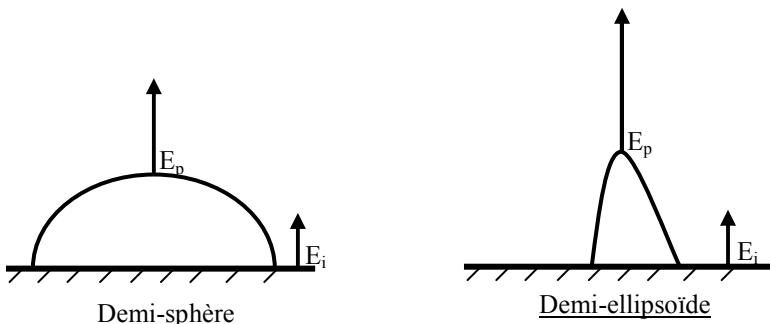
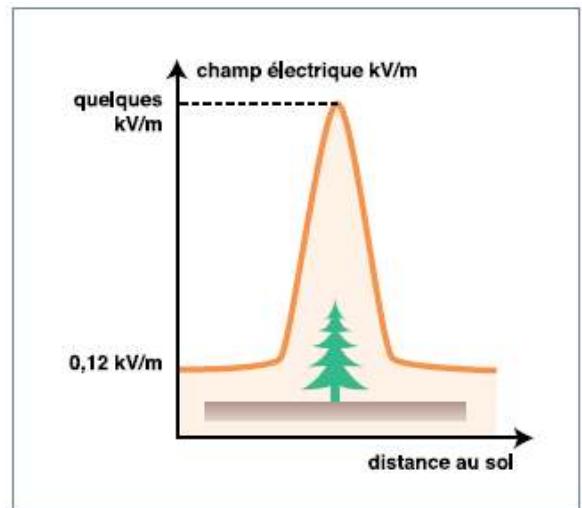


Figure 5



III) CLASSIFICATION DES COUPS DE FOUDRE

Le traceur: Le traceur est une décharge préliminaire peu lumineuse qui se produit entre la terre et le nuage, préparant le chemin au canal de la foudre.

Les coups de foudre sont classés selon :

- le sens de progression du traceur;
 - le signe de la charge qui se décharge.

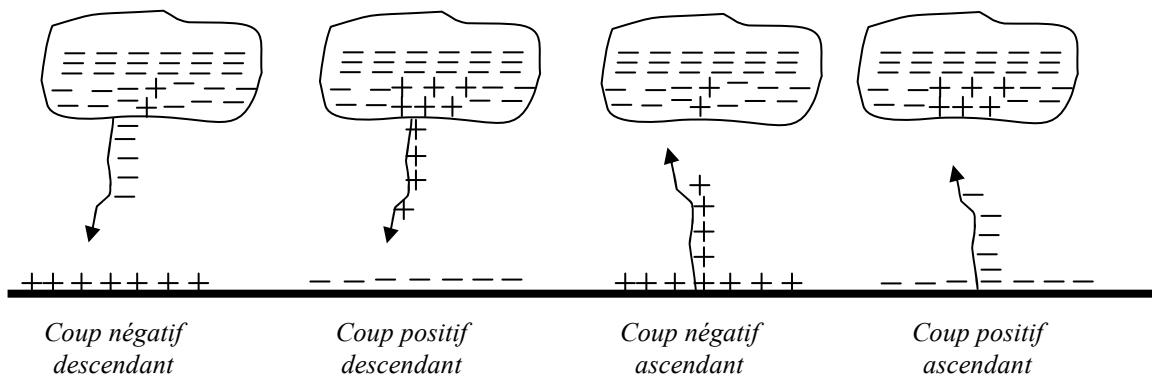


Figure 6

Remarque : Dans les régions à climat tempéré, il a été observé que 80 à 90 % des coups de foudre sont de type négatif descendant, mais les plus énergétiques sont les positifs. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups négatifs ascendants peuvent se développer. Dans les pays plats, les coups de foudre les plus fréquents sont les descendants négatifs. Pour qu'il y ait un coup de foudre ascendant, il faut la présence d'une proéminence importante, telle qu'une tour élevée.

IV) COURANT DE LA FOUDRE

Le coup de foudre est équivalent à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur : on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à 10^8 m/s. c'est « l'arc en retour » ou « return stroke ».

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé (voir figure 9). Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ de 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires.

Quelques chiffres concernant le courant :

- L'amplitude des courants des CdF positifs peut être considérable, supérieure à 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est de 25 kA.
 - L'amplitude des CdF négatifs est moins grande. Dans 10% des cas, elle est de l'ordre de 50 kA. Dans 50% des cas, l'intensité des CdF négatifs est de 18 kA.

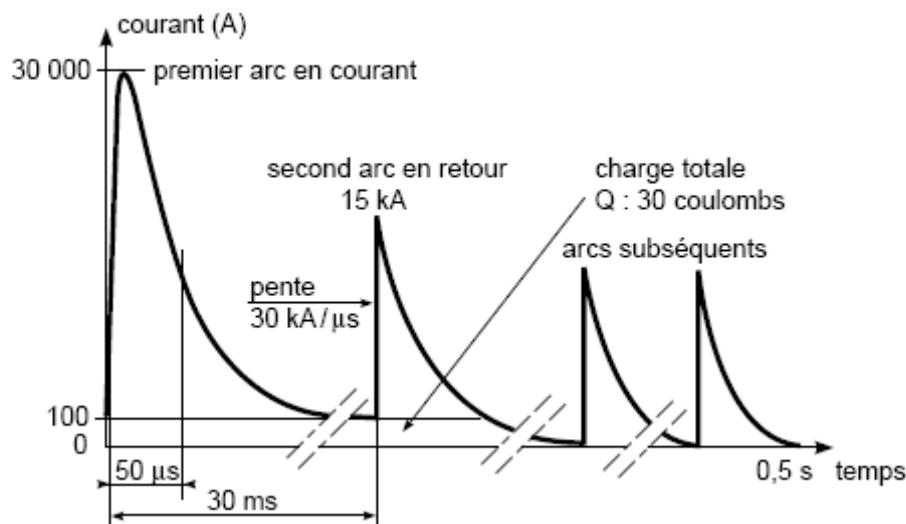


Figure 4 : forme du courant de la foudre

Onde conventionnelle : l'onde de choc conventionnelle est une onde normalisée que tous les constructeurs d'appareillage électrique HT utilisent pour effectuer les tests de contrôle.

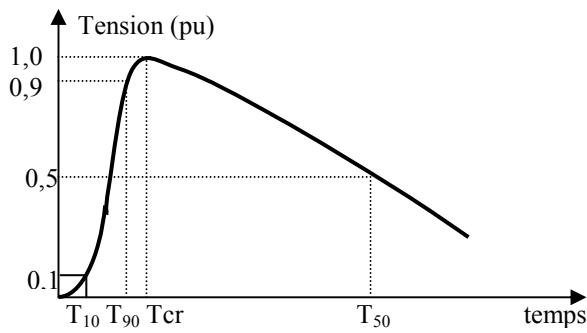


Figure 5 : Onde de choc conventionnelle

Caractéristiques des coups de foudre :

PROBABILITE DE DEPASSEMENT (%)	VALEUR CRETE DU COURANT (kA)	CHARGE (C)	PENTE (kA/μs)	DUREE TOTALE (s)	NOMBRE DE DECHARGES
50	26	14	48	0,09	2
10	73	70	74	0,56	5
1	180	330	97	2,7	12

V) EFFETS DE LA FOUDRE

V.1) Effets thermiques

- a) Fusion d'éléments au point d'impact ($\approx 30000^{\circ}\text{C}$).
- b) Risque d'incendie du à la circulation d'un courant important.

V.2) Effets électrodynamiques

Lorsque les courants de la foudre circulent dans des conducteurs parallèles, la force magnétique qui en résulte (attraction et répulsion) peut entraîner des déformations mécaniques et même des ruptures.

V.3) Surtensions directes

L'impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui se propage. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l'isolateur à cornes soit par les moyens de protection au poste.

Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300Ω , l'onde de tension atteindra 1500 kV.

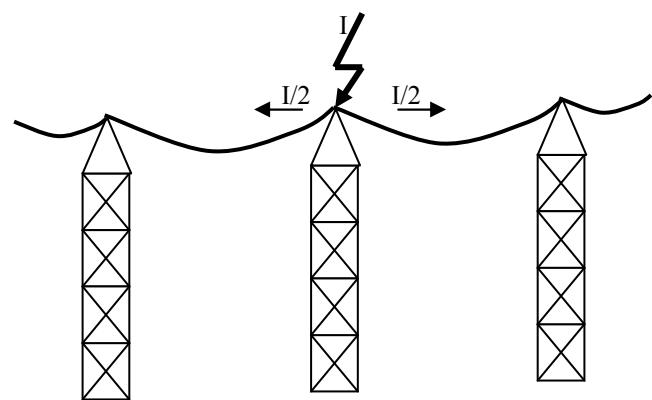


Figure 6

V.4) Surtensions induites (indirectes)

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

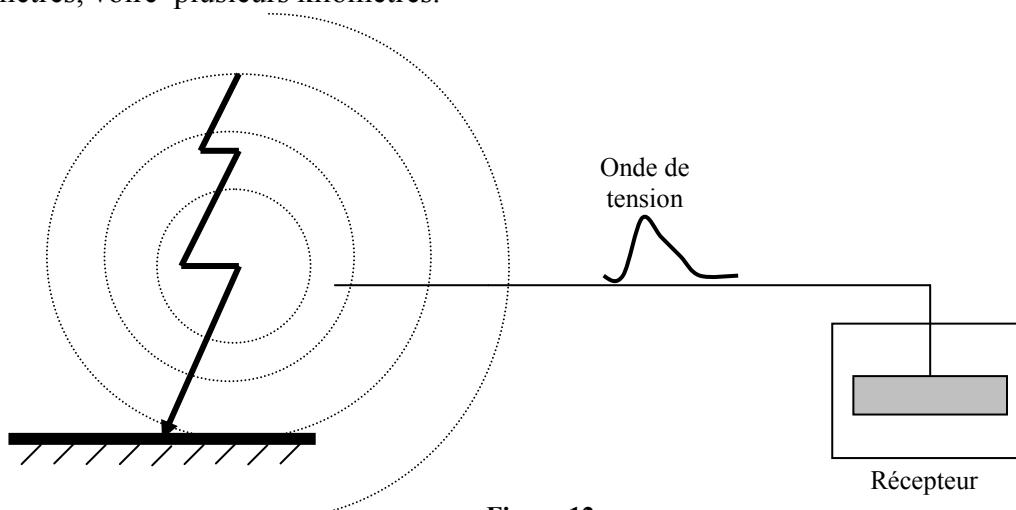


Figure 12

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 à 100 kA/ μ s). Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivante :

$$U_{\text{ind}} = Z_0 I h / d$$

Avec

$$Z_0 = (0,25/\pi) (\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}) \approx 30 \Omega$$

h : hauteur du conducteur

d : distance entre la ligne et le point d'impact de la foudre.

I : courant de la foudre.

V.5) Montée en potentiel de la prise de terre

Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises de terre.

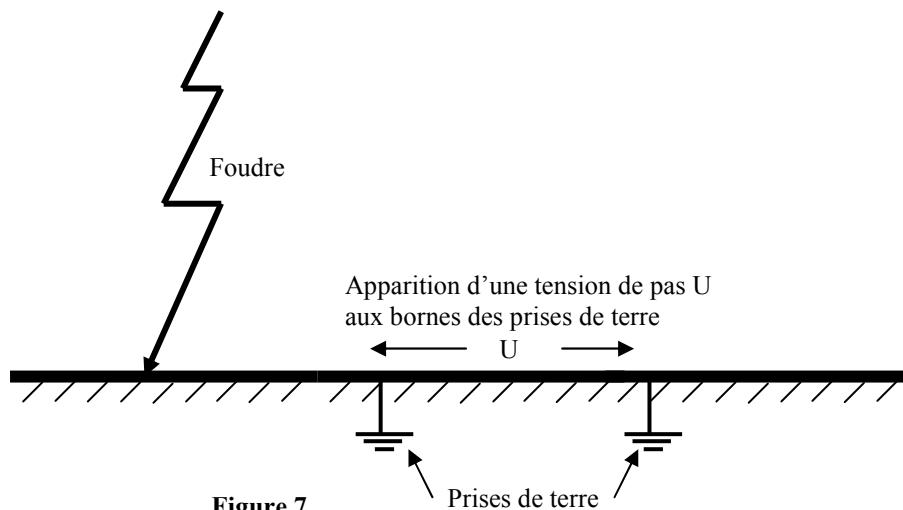
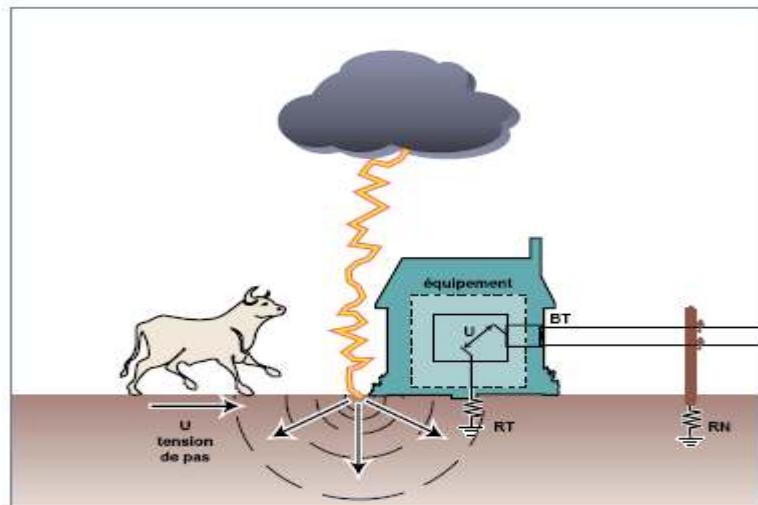


Figure 7

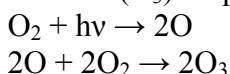
Tension de pas : la distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée *Tension de pas*. Les charpentes métalliques des bâtiments et les prises de terre doivent être toutes reliées entre elles afin d'éviter des tensions dangereuses pour l'homme, ainsi que pour les risques d'incendie et d'explosions dus aux amorcages d'arc.

Remarque : C'est ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à 100 m du point d'impact, un cheval dans un pré peut subir entre ses pattes arrières et ses pattes avant, une différence de potentiel de 500 V.



V.6) Effet électrochimique

L'action de la foudre contribue à la création d'ozone (O_3) d'après la réaction chimique suivante :



VI) PROTECTION CONTRE LA FOUDRE

Toutes les protections utilisées contre la foudre consistent à dévier le courant vers la terre. Notons que les perturbations dues aux coups de foudre directs (déclenchement et réenclenchement des disjoncteurs) sont beaucoup plus fréquentes que les dégâts eux-mêmes dont on a appris à se prémunir.

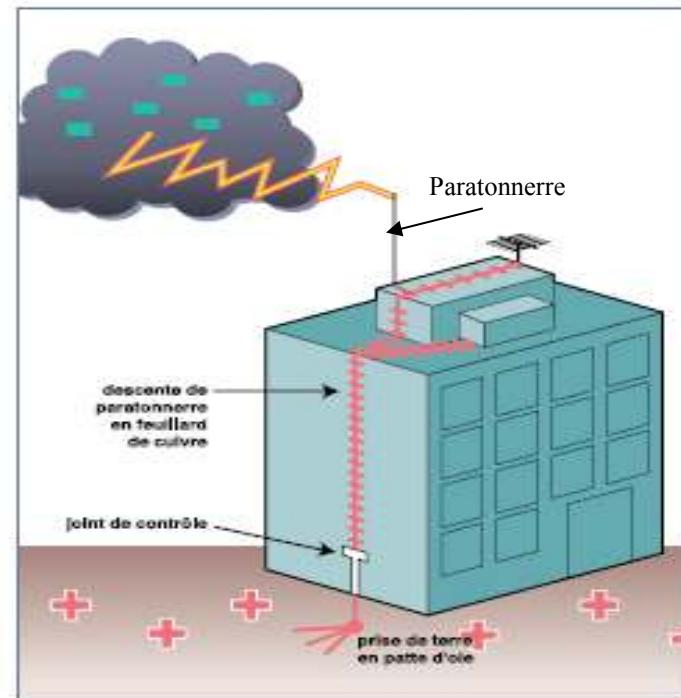
VI.1) Paratonnerre

Le Paratonnerre est un conducteur relié à la terre qui présente au sommet une forme pointue. Il est placé sur ou près de l'installation à protéger.

a) Principe de fonctionnement :

Grâce au pouvoir de pointe, une décharge créée au sommet du paratonnerre progresse à la rencontre et la capture du traceur de la foudre pour dévier le courant vers la terre (revoir fig.7, page4).

Remarque : Lorsque le traceur s'approche du sol, le champ électrique à la verticale de la pointe du traceur s'accroît et atteint en certains endroits des valeurs pouvant atteindre 300 à 400 kV/m.



b) Zones de protection contre la foudre :

La zone de capture est définie comme un volume bien déterminé pour lequel l'entrée en contact d'un canal ionisé, provoquera à coup sur l'amorçage du coup de foudre sur le sommet de la tige. L'expérience montre que pour un paratonnerre en forme de mat (tige), l'intérieur d'un cône ($\alpha = 45^\circ$), centré sur la tige, présente une bonne probabilité de protection (voir figure).

c) Distance critique d'amorçage d_c :

Elle représente la distance de capture (saut final) entre le traceur et le sommet de la tige. Elle est donnée par la formule empirique :

$$d_c = 6,7 I^{0,8}$$

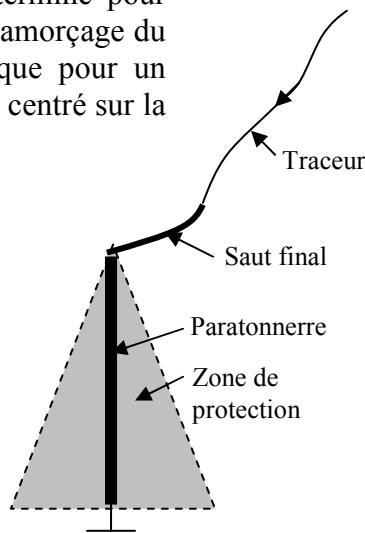
I : courant de crête de la foudre.

On constate que la zone de capture est d'autant plus grande que la foudre est intense. Par contre, si la foudre est faible la protection est moins sûre.

Il est donc clair que pour des courants de foudre :

- élevés et moyens, la protection est très bonne ;
- faibles, la protection est moins bonne car le dernier trajet du traceur principal est très court.

Exemple : Si $I = 10 \text{ kA}$, $d_c = 42 \text{ m}$; $I = 100 \text{ kA}$, $d_c = 270 \text{ m}$



VI.2) Éclateur

L'éclateur est généralement placé en parallèle avec l'isolateur, il est formé de deux électrodes-pointes, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à l'installation à protéger (fig.16).

a) Principe de fonctionnement :

Quand l'onde de tension frappe l'installation, la grande surtension qui apparaît aux bornes de l'éclateur produit un arc électrique qui dévie le courant vers la terre, car le courant choisit le chemin le moins résistant.

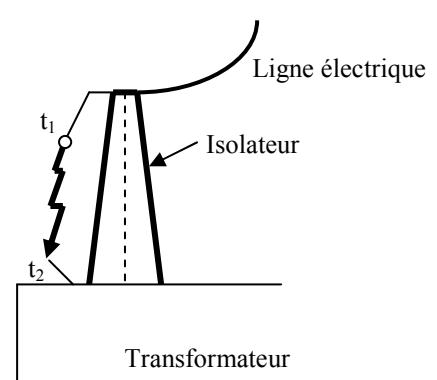


Figure : Exemple de protection d'un Transformateur par éclateur à tiges

Remarques :

- Bon marché et facilement réalisable, l'éclateur présente un grave inconvénient : l'arc amorcé par la surtension crée un milieu ionisé qui fait que le courant de suite est pratiquement égal au courant de court-circuit. Il s'en suivra une interruption de service provoquée par les protections contre les surintensités, ce qu'il faut naturellement éviter.

- Les éclateurs n'ont pratiquement aucun pouvoir de coupure. Ils sont destinés en dernier ressort à écrêter les surtensions dans le cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné. On préfère donc l'usage des varistances pour assurer une bonne coordination de l'isolement, avec plus de sécurité.

Isolateur à cornes (voir cours Isolateurs des lignes aériennes) :

L'arc qui apparaît entre les cornes de l'isolateur coupe l'onde de tension en déviant le courant vers la terre à travers le pylône.

VI.3) PARAFOUDRE (Varistance)a) Principe de fonctionnement :

La varistance est une résistance non linéaire qui chute considérablement lorsque la tension augmente. En fonctionnement normal en l'absence de surtension, la résistance de la varistance est très élevée et empêche le passage du courant de la ligne vers la terre. Par contre, en régime de surtension la résistance chute subitement pour dévier le courant, et donc la surtension, vers la terre.

Quand l'onde de tension arrive par la ligne électrique, le courant de la foudre choisit le chemin le moins résistant, celui de la varistance, et dévie ainsi vers la terre. C'est pratiquement le même principe de fonctionnement que l'éclateur, car dans les deux cas c'est la résistance de l'équipement de protection qui chute : pour l'éclateur grâce au claquage, pour la varistance grâce à la résistance non linéaire.

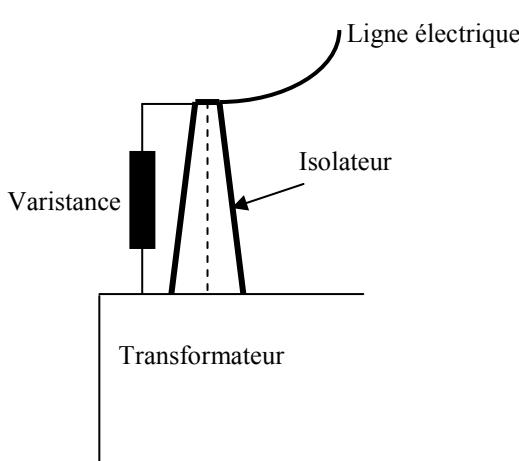


Figure : exemple de protection d'un Transformateur par varistance

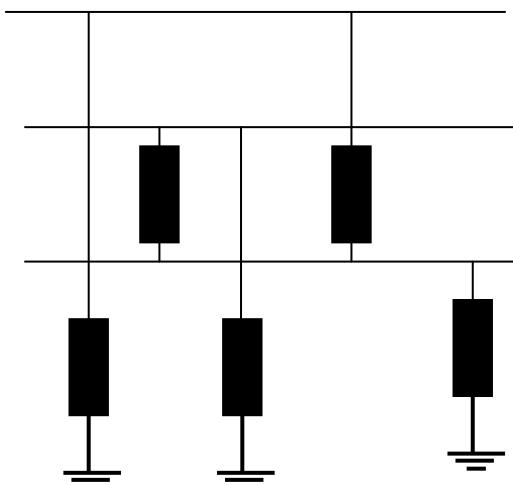


Figure : Protection du réseau par des varistances

b) Courbe caractéristique « courant-tension » d'une varistance :

Généralement c'est une varistance en céramique, composée pour la plus grande partie, d'oxyde de zinc (ZnO). La figure 20 illustre schématiquement la courbe caractéristique courant-tension du parafoudre. On a choisi pour les abscisses une échelle logarithmique : par exemple, quand le courant est multiplié par 10^7 , la tension aux bornes de la varistance n'est multiplié que par 2 environ. La résistance est non linéaire et la chute de tension très faible, ce sont là les deux propriétés principales de la varistance.

A l'apparition d'une surtension, le parafoudre doit s'amorcer rapidement ($< 0,1 \mu\text{s}$).

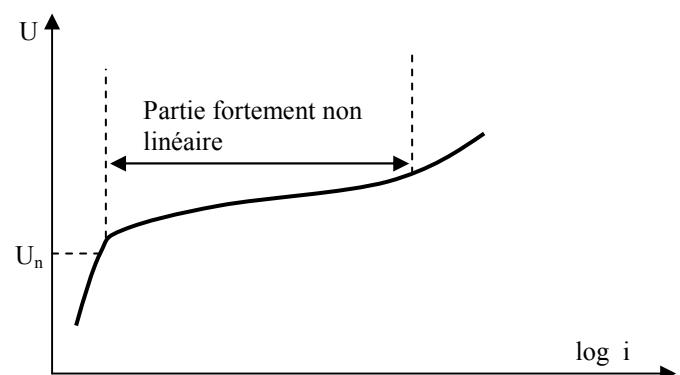


Figure : Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance à oxydes métalliques

d) Double protection :

Protection en série utilisée pour protéger les équipements importants (chers) et sensibles.

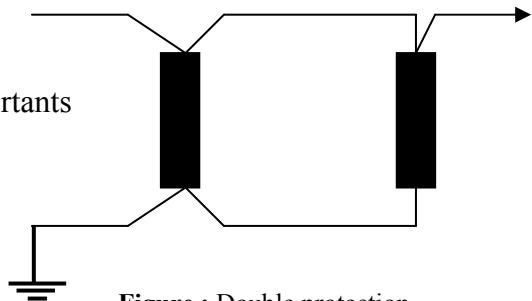
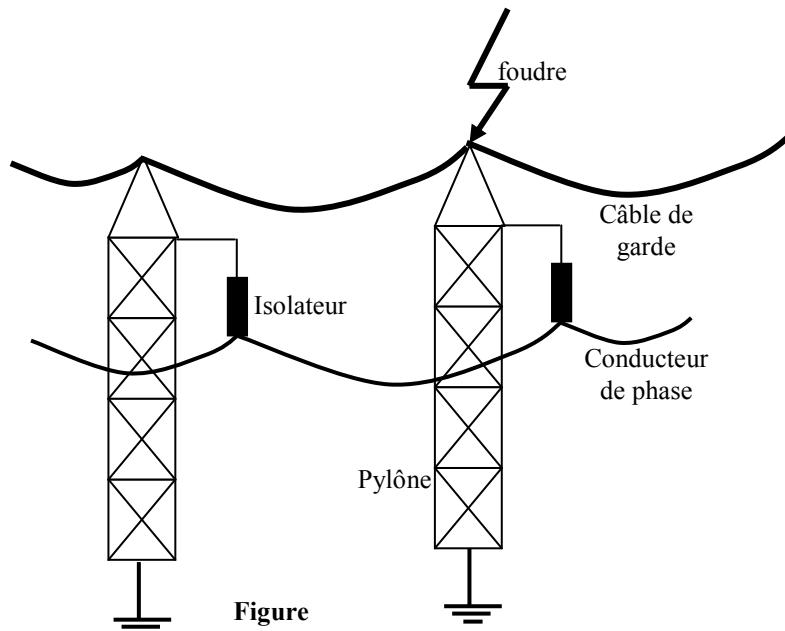


Figure : Double protection

VI.4) Câbles de garde

Le câble de garde protège contre la foudre car il est placé juste au dessus des conducteurs, en cas de coup de foudre c'est lui qui est touché en premier. Après l'impact de la foudre il transfère le courant vers la terre à travers le pylône. La présence des câbles de garde n'empêche pas à coup sur d'éviter les coups de foudre, ils sont néanmoins utiles dans la mesure où leur présence fait diminuer leur probabilité dans un rapport de 1,5 à 5 environ, selon l'activité orageuse de la région.

**Remarques :**

- Il y a une dizaine d'années, pour des raisons économiques, les câbles de garde sont placés généralement à l'entrée et la sortie des postes. Mais actuellement, comme il est utilisé pour les communications HF par SONELGAZ, le câble de garde tend à relier tout le réseau national.
- Le câble de garde a un diamètre inférieur ou égal au conducteur de phase. En plus du rôle de protection, il contribue à l'amortissement des ondes de surtension de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase ainsi que le blindage possible des lignes des télécommunications.
- Signalons que la majorité des coups de foudre sur conducteur provoque un amorçage pour les réseaux de tensions inférieures à 400 kV. L'amorçage de la ligne lors d'un coup direct étant certain, on cherche à s'en protéger en plaçant les câbles de garde.

VI.5) Cage maillée

Protection utilisée dans les bâtiments (nouveaux) sensibles et importants (Electronique, informatique, militaire...). Le blindage externe protège contre les ondes de la foudre.

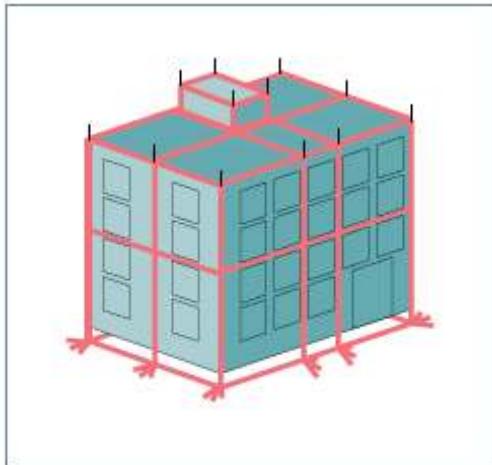
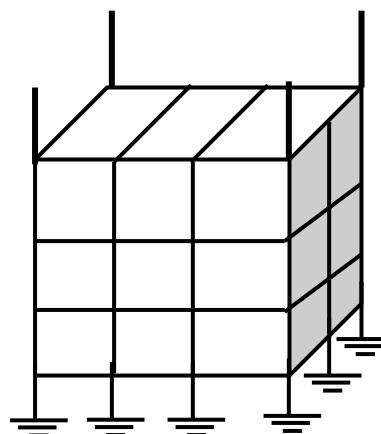


Figure 8. Principe d'une cage maillée (cage de Faraday).



Figure

Ce principe est utilisé pour les bâtiments très sensibles et importants (militaire, tours de contrôle...), abritant du matériel informatique ou des circuits intégrés. Il consiste à multiplier les feuillards de descente à l'extérieur du bâtiment de façon symétrique. On ajoute des liaisons horizontales si le bâtiment est haut ; par exemple tous les deux étages (figure). Les conducteurs de descente sont reliés à la terre par des pâtes d'oies. L'effet résulte en une meilleure équipotentialité du bâtiment et la division des courants de foudre, réduisant ainsi fortement les champs et inductions électromagnétiques.

VII) TENSION DE TENUE NORMALISEE (basse tension)

Les règles énoncées sont destinées à décrire les moyens permettant de limiter les surtensions transitoires à des niveaux compatibles avec les tensions nominales de tenue aux chocs des matériels électriques.

C'est la tension maximale à ne pas dépasser pour la tenue des matériaux

- Tenue aux chocs très élevée (compteurs, télémétrie...) : 6 kV
- Tenue aux chocs élevée (disjoncteur, contacteur...) : 4 kV
- Tenue aux chocs moyenne (appareillage électrodomestique...) : 2,5 kV
- Tenue aux chocs faible (électronique...) : 1,5 kV.

Remarque : 90% des surtensions chez un abonné B.T ne dépassent pas 4 kV.

VIII) QUELQUES CHIFFRES

- Entre 2000 et 5000 orages se produisent en permanence autour de la terre ;
- La terre reçoit en moyenne un coup de foudre par seconde ;
- Un million de coups de foudre frappent la France chaque année ;
- Nombre record d'impacts en une journée en France : 74000 le 28 juillet 1994 et 70000 le 5 août 1997.
- 80000 impacts sur les réseaux EDF chaque année.
- Un orage produit une centaine de décharges par seconde.
- La densité moyenne de foudroiement en France est de 2 coups de foudre par km^2 et par an.
- I_{\max} va jusqu'à 200 000 Ampères ;
- La température de l'arc électrique de la foudre est d'environ 30 000°C.
- Le risque moyen de foudroiement en France est de :
 - *1 tous les 100 ans pour un grand bâtiment ;
 - *1 tous les 100 ans pour un arbre ;
 - *1 tous les 100 ans pour un homme.
- Une soixantaine de personnes sont foudroyées chaque année en France, dont une quinzaine mortellement foudroyées.
- Courant très fort mais l'énergie insuffisante pour être utilisée, car le coup de foudre est très bref.

Question : est-il intéressant de capter l'énergie apportée par la foudre lors de son impact. Non : car malgré que la puissance instantanée de la foudre soit considérable, elle est de durée très brève. L'énergie apportée est donc faible.

En France deux millions de coups de foudre causent chaque année la mort de :

- 40 personnes et de 20 000 animaux ;
- 15 000 incendies ;
- 50 000 coupures sur les réseaux électriques et téléphoniques,
- destruction de nombreux transformateurs et de milliers d'appareils électroménagers.

CHAPITRE VI

ISOLATEURS DES LIGNES AERIENNES HAUTE TENSION

INTRODUCTION

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir.

L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la réparation du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

I. L'ISOLATEUR

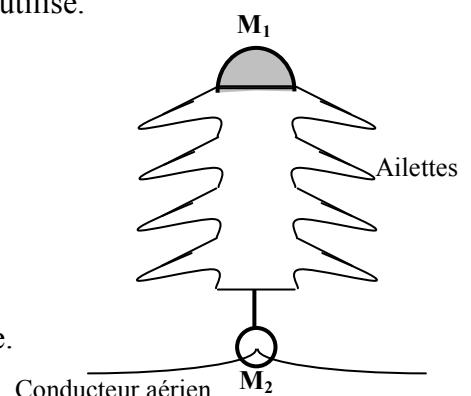
L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M_1 et M_2 .

Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques.

M_1 se fixe au pylône ; M_2 porte le conducteur.

Rôle : l'isolateur possède un double rôle

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.



Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre.

- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancre) ;
- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

II. CONTOURNEMENT

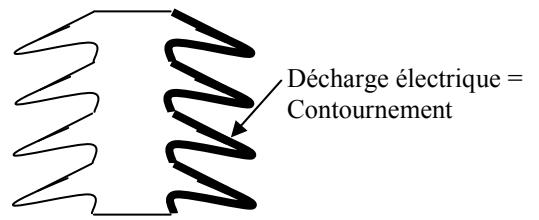
Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose

sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves.

1) Définition

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur.

Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un cour-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre).



Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicules...) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à dénormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus. Par exemple, aux USA une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut provoquer des pertes de 100 000 dollars.

2) Déroulement du contournement

Phase 1 : dépôt de pollution

Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Fig.a).

Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur

A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel I_f circulant sur la surface de l'isolateur (Fig.b).

Phase 3 : formation d'une bande sèche

Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Fig.c).

Phase 4 : contournement

Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche :

- Soit la décharge s'éteint \Rightarrow pas de contournement (Fig.d).
- Soit la décharge progresse sur la surface \Rightarrow contournement de l'isolateur (Fig.e).

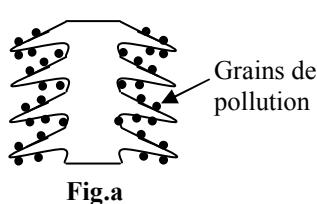


Fig.a

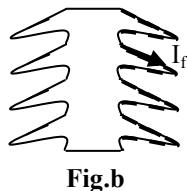
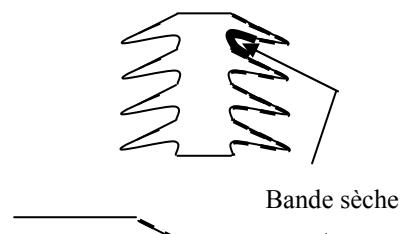


Fig.b



Bande sèche

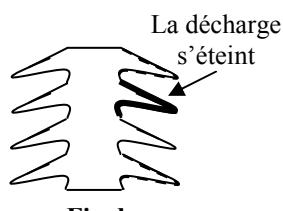


Fig.d

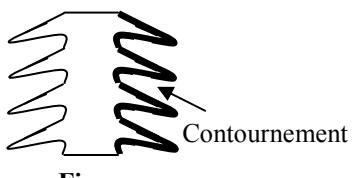


Fig.e

III. APPROCHE MATHEMATIQUE

1. Modèle expérimental

Comme la décharge et la couche de pollution sur la surface de l'isolateur sont en série, le modèle expérimental utilisé pour l'étude du contournement en laboratoire comprend :

1- Electrode HT

2- Electrode BT (reliée à la terre)

3-Canal d'épaisseur de quelques mm, rempli par un électrolyte (mélange eau distillée + grains de sels NaCl).

4- Décharge électrique.

avec

x : longueur de la décharge ; L : longueur de l'électrolyte.

2. Circuit électrique équivalent

L'équation électrique du circuit s'écrit :

$$U = U_d + U_p + U_e$$

U_d : tension de la décharge ;

U_p : chute de tension dans la couche de pollution ;

U_e : chute de tension dans les électrodes.

$$U_d = AxI^{-n}$$

$$U_p = RI = r(L-x)I$$

$$U_e = Cte \approx 850V$$

avec

A, n constantes qui dépendent des conditions expérimentales

R ($k\Omega$) : résistance de la couche de pollution

r ($k\Omega/cm$) résistance par unité de longueur de la couche de pollution ($R_{total} = rL$)

L'équation du circuit devient :

$$U = AxI^{-n} + r(L-x)I + U_e \quad (*)$$

3. Caractéristique « tension-courant »

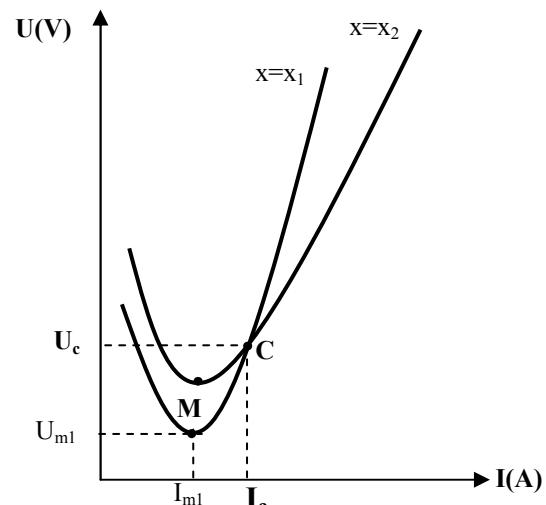
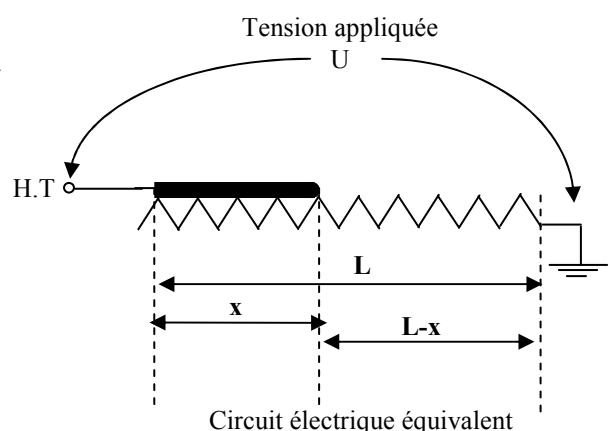
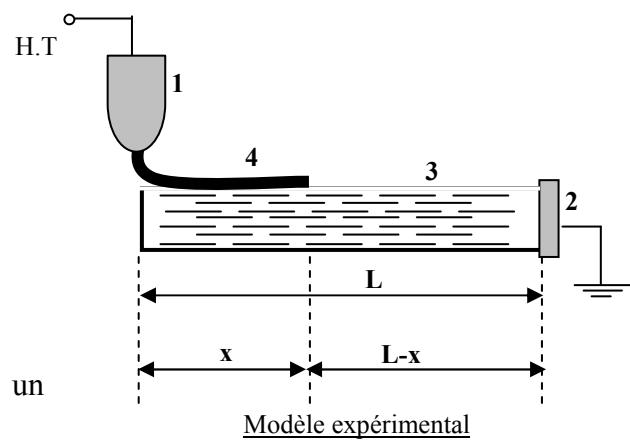
Cette courbe est tracée selon l'équation (*), pour deux valeurs différentes du paramètre x .

U_{m1}, I_{m1} : valeurs minimales de U et I (pour $x = x_1$).

$C(U_c, I_c)$ est le point critique de contournement : quand $U \geq U_c$ se produit le contournement.)

U_c : tension critique de contournement

I_c : courant critique de contournement



IV. CONTOURNEMENT SOUS TENSION ALTERNATIVE

L'étude mathématique ci-dessous suppose une tension continue. Pour une tension alternative, au passage par zéro la décharge s'éteint. A la demi-alternance qui suit, la décharge doit obligatoirement réamorcer et ne dispose tout au plus que de 10 ms pour produire le

contournement. Pour ces conditions, le contournement est plus difficile en tension alternative qu'en tension continue.

$$\text{Condition de réamorçage (empirique): } U \geq \frac{800x}{\sqrt{I}}$$

I : courant de fuite maximal au cours de la demi-alternance précédente.

X : longueur de la décharge à réamorcer.

V. SOURCES DE POLLUTION

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

1. 1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

1. 2. Pollution désertique

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

2. Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution ; les gaz d'échappement des véhicules et les engrains utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

3. Pollution mixte

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

VI. CHOIX DES ISOLATEURS

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto – nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles.

VII) REMEDES

1. Allongement de la ligne de fuite

Utiliser de longs isolateurs avec des lignes de fuite plus longues possibles (jusqu'à 10m pour les réseaux THT). Cette solution est très efficace et présente seulement des problèmes dans les régions à forte pollution.

2. Graissage

Une graisse chimique spéciale, imperméable et possédant une grande résistance superficielle, est appliquée sur la surface de l'isolateur. Son rôle est d'absorber les grains de pollution qui se déposent sur l'isolateur pour garder la surface propre. Le traitement par la graisse permet de rendre l'eau accumulée à la surface dispersée en gouttes, par conséquent le courant de fuite diminue sensiblement.

Le grand inconvénient des enduits de graisse est le temps court de l'intervalle d'application (en général moins de 1 à 2 ans) entre deux applications successives pour empêcher toute panne d'électricité par contournement. En outre, l'enlèvement de la graisse saturée est un travail long et fatigant comportant l'utilisation d'agents de nettoyage à sec et suivie par le lavage à l'eau. Si on laisse trop longtemps la graisse à la surface de l'isolateur elle se sature et peut mener à une rupture qui peut causer la détérioration de l'isolateur de porcelaine. En outre, dans certains pays comme les Etats-Unis, l'utilisation de la graisse devient de plus en plus difficile à accepter pour la préservation de l'environnement.

Remarque : Dans des conditions de décharge à long terme (sur une période longue), la surface de l'isolateur enduit de graisse peut perdre son hydrophobie dans ces régions soumises aux décharges. Cette perte hydrophobe est habituellement provisoire, et l'isolateur récupérera son hydrophobie si la surface est sèche pour quelques heures. Cela est dû à la nature dynamique du polymère silicone qui permet à des chaînes de polymère d'émigrer vers les parties vides et enduire de nouveau la surface.

3) Lavage périodique

Les isolateurs placés dans des sites à grande pollution sont régulièrement lavés avec de l'eau distillée. Le lavage s'effectue avec un fusil à jet d'eau puissant, généralement au mois de juin à cause de l'humidité. Actuellement les travaux de maintenance comme le lavage, s'effectuent sous tension (TST).

Cependant, certains types de contaminants (par exemple, ciment, dépôts graisseux, certains engrais) qui adhèrent fortement à la surface de l'isolateur ne peuvent pas être facilement enlevés par un jet d'eau à haute pression. Dans ces cas-ci, le nettoyage est effectué en employant des agents abrasifs secs.

La limitation principale de cette méthode est qu'elle nécessite un travail long et cher. En outre, il n'y a aucune méthode fiable autre que l'expérience humaine de service pour déterminer quand le nettoyage de l'isolateur est nécessaire. Une attention particulière devrait être exercée pour le lavage des isolateurs composites parce que tous les matériaux ne peuvent être lavés à haute pression d'eau.

4) Anneaux de garde :

L'utilisation des anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs à leur extrémité est un moyen communément pratiqué pour réduire l'effet couronne. Quand les isolateurs composites sont employés, l'utilisation des anneaux de garde aux extrémités des isolateurs est une pratique courante pour des tensions au dessus de 230 kV.

MATERIAUX DIELECTRIQUES

1. DEFINITION

Les **isolants** ou **diélectriques** sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega \cdot \text{m}$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

2. CARACTERISTIQUES DIELECTRIQUES DES ISOLANTS

2.1 Permittivité relative :

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

$$\text{Sa capacité est : } C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

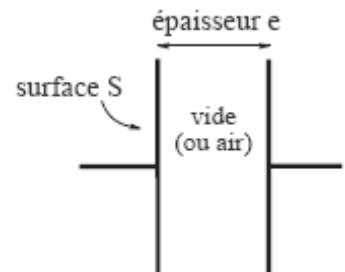
où $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C_0 = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

La **permittivité relative** est définie par le rapport : $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$

La **permittivité absolue** est : $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$



Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc, $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.

2.2. Rigidité diélectrique :

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au-delà d'une certaine valeur appelée **tension de claquage**, il apparaît un **arc électrique** dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a **rupture diélectrique** ou **claquage** □ destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être **transversale** ou **longitudinale**.

La rigidité diélectrique dépend de :

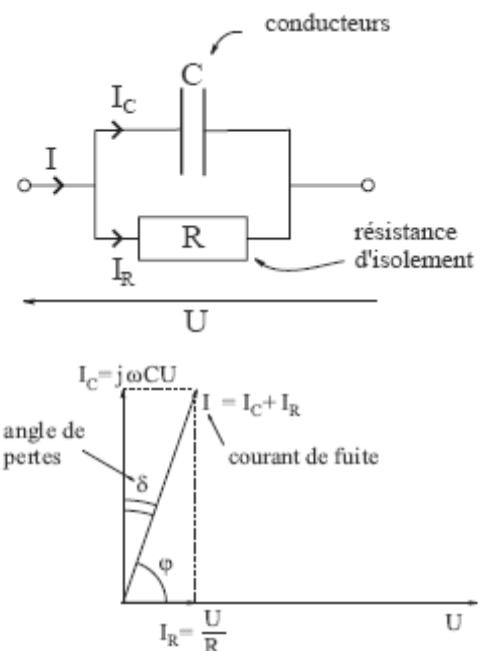
- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;

- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

3. Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant :

C représente la capacité entre les deux conducteurs et la résistance R est la **résistance d'isolement** de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$.



CALCUL DE L'ANGLE DE PERTES DIELECTRIQUES :

L'**angle de pertes** δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le **courant de fuite** / traversant l'isolant :

On a :

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega$$

$$\Rightarrow \tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

La valeur $\tan \delta$ est appelée **facteur de dissipation diélectrique**.

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée \square δ faible ;
- mauvais isolant \rightarrow R faible \square δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} .

4. Influence de la température sur les isolants :

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;
- oxydation ;
- ramollissement pouvant atteindre la fusion.

LOI EXPERIMENTALE DE VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS

Une augmentation de $10^\circ C$ de la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement. L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs. La chaleur est difficilement évacuée par les isolants car ceux-ci ont une conductivité thermique très faible.

CLASSIFICATION THERMIQUE DES ISOLANTS

Les isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années.

classe	température max. (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

5. Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique

Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

Isolants synthétiques :

- matières plastiques
- élastomères ;
- composites.

Les isolants sont classés en trois types :

- solides ;
- liquides ;
- gazeux.

5.1. Isolants solides :

5.1.1. Isolants naturels :

a) Minéraux :

- **Verres** : sable siliceux + chaux + soude. Utilisés pour les isolateurs. Résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Propriétés : $T_{max} = 400 \text{ à } 500 \text{ °C}$; $G \approx 7 \text{ kV/mm}$; $\tan\delta = 0,02 \text{ à } 0,04$; $\epsilon_r = 7$.

- **Céramiques** : argile + quartz + fondants + oxydes métalliques. Utilisées dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes, les supports d'inductances HF et UHF, les condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés : $T_{max} = 200 \text{ à } 500 \text{ °C}$; $G \approx 10 \text{ à } 20 \text{ kV/mm}$; $\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ à } 1,2 \cdot 10^{-2}$; $\epsilon_r = 10 \text{ à } 3000$.

- **Mica et produits micacés** : silicates hydratés de métaux alcalins. Utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance (feuilles de mica).

Propriétés : $T_{max} = 500 \text{ à } 1000 \text{ °C}$; $G \approx 210 \text{ à } 240 \text{ kV/mm}$; $\tan\delta = 3 \cdot 10^{-4} \text{ à } 26 \cdot 10^{-4}$; $\epsilon_r = 6 \text{ à } 7$.

b) Organiques :

- **Papiers** : cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

Propriétés :

$T_{max} = 105 \text{ °C}$; $G \approx 50 \text{ à } 80 \text{ kV/mm}$ (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile)

$\tan\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ à } 4 \cdot 10^{-3}$; $\epsilon_r = 4 \text{ à } 6$.

- **Textiles** : coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines.

Propriétés : $T_{max} = 90 \text{ à } 120 \text{ °C}$; $G \approx 5 \text{ à } 10 \text{ kV/mm}$; $\epsilon_r = 3$.

- **Caoutchouc** : résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés : $T_{max} = 60 \text{ °C}$; $G \approx 20 \text{ à } 30 \text{ kV/mm}$; $\epsilon_r = 3$.

5.1.2. Isolants synthétiques : matières plastiques

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- une résine de base ou **polymère**, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base :

- dérivés du pétrole ou du charbon ;

- calcaires, sable, fluorures, sels marins ;

- bois.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

a) Caractéristiques des matières plastiques :

- très bonne rigidité diélectrique : toujours $\geq 10 \text{ kV/mm}$;

- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \Omega \cdot \text{m}$;

- faibles pertes diélectriques ;

- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

b) Matières plastiques utilisées en électrotechnique

Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

5.2. Isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides.

5.2.1. Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles.

Propriétés :

- rigidité diélectrique : $G \approx 9$ à 10 kV/mm
- facteur de dissipation : $\tan\delta = 4 \cdot 10^{-4}$
- permittivité relative : $\epsilon_r = 4$ à 6 .

5.2.2. Huiles synthétiques

Huiles chlorées : ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

Huiles silicones : résistent à des températures élevées, prix élevés.

Huiles végétales (ricin) : plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

5.2.3. Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif. Utilisés pour l'imprégnation des bobinages.

6. POLARISATION DIELECTRIQUE

6.1. Moment électrique d'un dipôle :

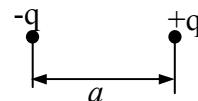
Un dipôle est formé de deux charges égales et de signes opposés.

La valeur du moment électrique d'un dipôle est $p_0 = q a$.

où q est la charge positive (ou la valeur absolue de la charge négative)

et a la longueur du dipôle. Il va de soi que pour les molécules où $a = 0$, le moment dipolaire est nul.

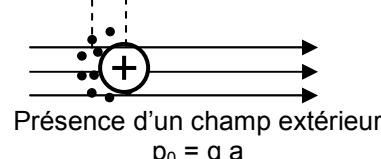
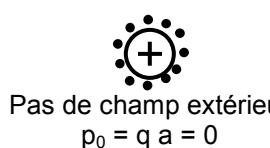
Remarque : jusqu'à présent, les scientifiques ne se sont pas mis d'accord quant au sens à donner au dipôle électrique, de la charge positive vers la charge négative ou vice versa.



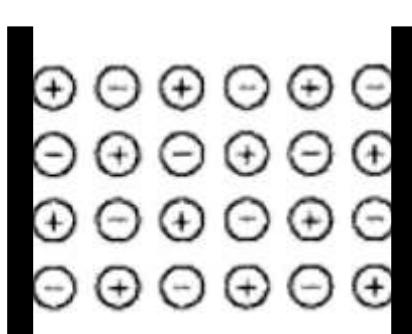
6.2. Description de la polarisation :

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe.

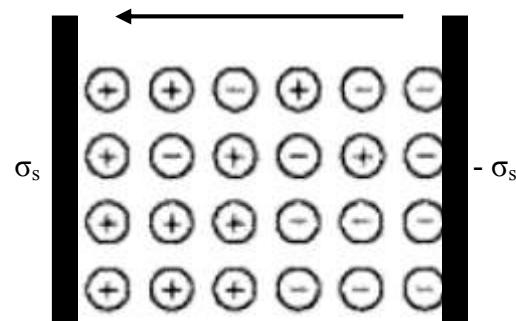
A l'échelle atomique : en l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident. Lors de l'application d'un champ électrique, les centres de gravité ne coïncident plus et les particules (atomes et molécules) sont alignées suivant la direction de E et acquièrent un moment p_0 (voir figure).



POLARISATION ELECTRONIQUE



Pas de polarisation, car pas de champ électrique



Polarisation en présence du champ électrique

POLARISATION MACROSCOPIQUE

A l'échelle macroscopique : le diélectrique aura un moment diélectrique P .

La polarisation est souvent proportionnelle au champ électrique qui l'a créée (ce cas est dit *linéaire*) :

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E}$$

χ : susceptibilité diélectrique

Considérons simplement un condensateur plan de surface S et d'épaisseur a (figure ci-dessus). Posons que la charge de polarisation apparaissant à chaque surface du condensateur est σ_s [C/m²].

Comme la charge totale à l'intérieur est compensée et donc nulle, le moment diélectrique total est : $\sigma_s S.a$

En divisant par le volume $V = Sa$, nous obtenons la polarisation P :

$$\mathbf{P} = \sigma_s$$

Conclusion : la polarisation P est égale à la densité de charge apparaissant à la surface.

6.3. Diélectriques polaires et non polaires :

Tous les diélectriques peuvent être divisés en deux catégories :

Diélectriques polaires et diélectriques non polaires

La somme totale des charges dans une molécule est nulle, mais l'arrangement (la structure) de ces charges peut être différente d'une matière à une autre.

Les centres de gravité peuvent coïncider ou ne pas coïncider :

- Dans le 1^{er} cas : la molécule est non polaire.
- Dans le 2^{ème} cas : la molécule (et donc la matière en question) est dite polaire. Même en l'absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire.

Il est clair que les molécules arrangeées de façon symétrique (qui possèdent un centre de symétrie) sont non polaires du moment que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie. Par contre, les molécules asymétriques sont polaires.

Les molécules monoatomiques (He, Ne, Ar, Kr, Xe) et les molécules formées de deux atomes identiques (H₂, N₂, Cl₂, etc...) sont non polaires. Par contre, les molécules à composition ionique telles que l'iode de potassium KI ont un moment dipolaire élevé.

Exemple :

Les molécules CH₄ et CCl₄ sont symétriques et donc non polaires. Les autres molécules sont asymétriques et donc polaires.

Déférence entre la polarisation et la conduction :

1. Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules.
2. La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances.
3. la polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.
4. Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative.

6.4. Types de polarisation :

6.4.1. polarisation électronique : est due au déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau positif, sous l'action d'un champ E. dans ce cas, la polarisation se produit rapidement durant un bref moment (de l'ordre de 10⁻¹⁵ s). Elle se produit dans les atomes et les ions.



Sans champ électrique

Avec champ électrique

Le processus de la polarisation électronique peut être compris en considérant l'atome le plus simple, à savoir l'atome d'hydrogène (1 électron en orbite d'un noyau contenant un proton).

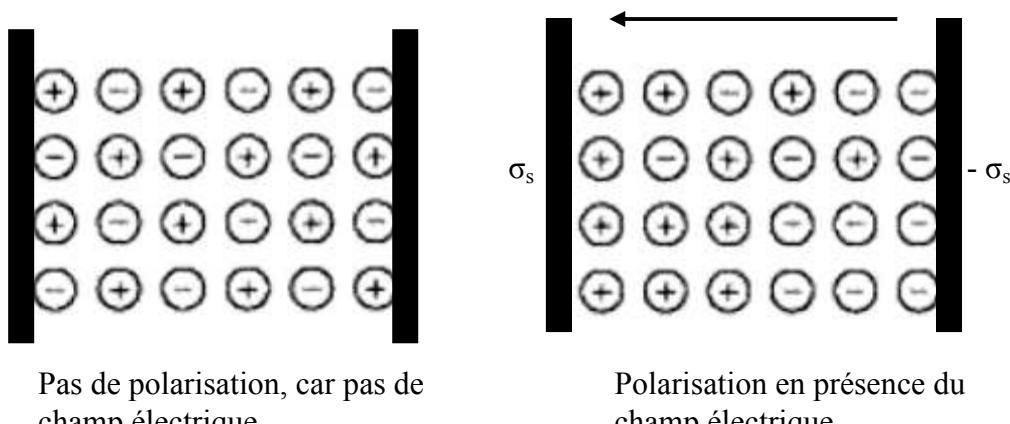
L'orbite à gauche est celle qui existe avant l'application d'un champ électrique (pas de polarisation), tandis que celle de droite est obtenue après polarisation, et donc un déplacement d'orbite d'une distance a . durant la polarisation, l'atome acquiert un dipôle $p = e a$.

6.4.2. Polarisation ionique : est due au déplacement mutuel des ions formant ainsi une molécule asymétrique. Le temps requis pour ce déplacement, afin d'assurer la polarisation est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} s.

Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges (et non pas rotation) dans la direction du champ électrique.



6.4.3. Polarisation macroscopique : est due à des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau.



Pas de polarisation, car pas de champ électrique

Polarisation en présence du champ électrique

6.4.4. Polarisation dipolaire (d'orientation) :

Elle est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué (voir figure). En l'absence de champ, les dipôles sont orientés de façon désordonnée, de telle façon que la polarisation globale est pratiquement nulle. Pour cette raison, la polarisation d'orientation est influencée et liée avec l'agitation thermique des molécules, la température exerce un effet appréciable sur ce type de polarisation.

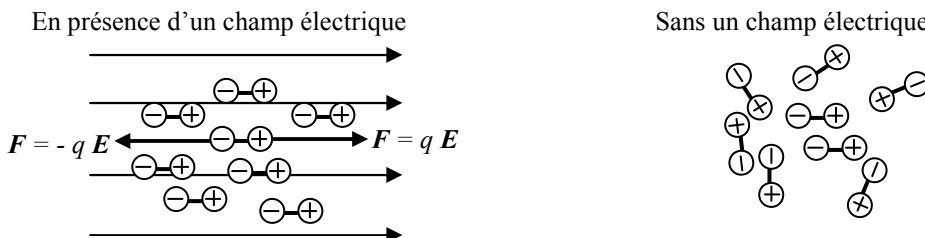
La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont « figés » et ne peuvent être orientés.



Sans champ électrique

Avec champ électrique

Un dipôle placé dans un champ électrique est soumis à un couple qui tend à l'aligner suivant la ligne de ce champ.



Remarque :

La polarisation d'orientation met plus de temps à s'établir (ou à disparaître) lors de l'application de la tension (ou la mise hors tension) par rapport aux autres types de polarisation. Il est clair en effet, que plus de temps est requis pour le mouvement des molécules, surtout les grandes molécules et la viscosité dynamique (coefficient de frottement interne) élevé. Ce temps peut être de l'ordre d'une demi-période de la tension alternative.

Tous les types de polarisation provoquent des pertes diélectriques sous forme de chaleur suite aux frottements. En tension alternative les pertes sont beaucoup plus grandes qu'en tension continue. Par conséquent, la tension thermique de claquage est généralement plus faible pour les champs alternatifs, et elle diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée.

6.5. Diélectriques non linéaires

Les diélectriques linéaires sont caractérisés par une relation linéaire entre la polarisation et le déplacement avec le champ électrique.

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \chi \epsilon_0 \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \end{aligned}$$

Pour certains matériaux « non linéaires » ces relations ne sont plus linéaires, la permittivité dépend alors du champ E . Ce type de diélectrique est utilisé dans certaines applications spécifiques.

Il y a plusieurs types de diélectriques non linéaires :

6.5.1. Diélectriques ferroélectriques : est le diélectrique non linéaire le plus typique, en dehors de la dépendance de la permittivité en fonction du champ, il y a :

- phénomène d'hystérésis sous l'action d'une tension alternative entre \mathbf{D} et \mathbf{E} identique à l'hystérésis magnétique entre \mathbf{B} et \mathbf{H}
- de très grandes valeurs de la permittivité ;
- variation, de ses paramètres en fonction de la température ;
- présence d'une polarisation spontanée sans l'application d'un champ externe.

6.5.2. Diélectriques piézo-électriques : La piézo-électricité est découverte en 1800 par les chercheurs français Pierre et Paul-Jean Curie. C'est du à l'apparition de charges électriques sur les surfaces de quelques cristaux quand ils sont soumis à des forces mécaniques de compression ou de tension par exemple.

Il existe l'effet inverse, à savoir la déformation sous l'action d'une tension électrique.

Pratiquement, tous les diélectriques ferroélectriques sont piézo-électriques.

6.5.3. Electrets : Un électret est un composé diélectrique, qui préserve sa polarisation pendant longtemps après que le champ électrique externe qui a produit cette polarisation est enlevé, et qui a installé un champ électrostatique dans l'espace environnant.

L'électret crée un champ électrique de la même manière qu'un barreau aimanté crée un champ magnétique.

7. CLAQUAGE DES ISOLANTS SOLIDES

Dans les isolants solides : le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûler ou perfore le diélectrique et les électrodes. Après un claquage, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le

canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite leur remplacement.

Dans les isolants liquides et gazeux : Si le claquage survient dans les isolants liquides ou gazeux, la grande mobilité des particules permet à la trace de disparaître et l'isolant est ainsi régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant).

Chaque type de matériau possède une résistance au claquage (rigidité diélectrique) différente des autres. La rigidité diélectrique dépend considérablement de :

- la fréquence du réseau : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la fréquence ;
- température : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la température ;
- durée d'application de la tension.

7.1. Différents mécanismes de claquage :

Bien que de nombreux investigateurs ont étudié le claquage des isolants solides pendant presque un siècle maintenant, et qu'un certain nombre de chercheurs ont proposé des théories qui ont visé à expliquer quantitativement les processus de claquage, l'état de la connaissance actuelle dans ce domaine est toujours limité.

En pratique, le mécanisme de claquage et la rigidité diélectrique changent avec la durée d'application de la tension. Il est d'usage de classer les mécanismes de claquage suivant la durée d'application de la tension comme montré à la figure ci-dessous.

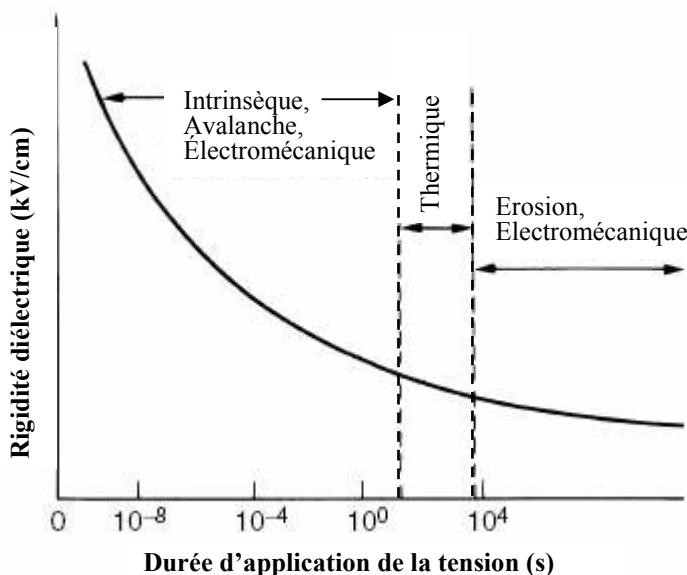


Figure : Différents types de claquage des isolants solides

7.1.1. Claquage intrinsèque

Ce type de claquage, appelé quelquefois « claquage électrique pur » pour le distinguer des autres types de claquage où le champ E intervient, n'est autre que la destruction de l'isolant sous l'action des forces électriques. Les processus secondaires (échauffement, réactions chimiques, etc...) qui peuvent intervenir et faciliter le claquage ne sont pas considérés dans le « claquage électrique pur ». Le « claquage électrique pur » se produit sous l'action des collisions des électrons et ions accélérés par le champ électrique avec les particules de l'isolant.

Le claquage intrinsèque est accompli en une durée de formation de l'ordre de 10^{-8} s et on admet que le claquage est de nature électronique. Les valeurs de champ électrique nécessaires pour provoquer un claquage intrinsèque pur dépassent 10^6 V/cm . On admet généralement que la valeur critique de claquage est atteinte lorsque les électrons de l'isolant acquièrent une énergie suffisante de la part du champ appliqué pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Le claquage peut se distinguer par :

- a. un temps de développement du claquage court (de l'ordre de la μs et moins). Si le diélectrique n'est pas perforé (dans le cas d'un claquage purement électrique) peu après que la tension soit

appliquée, il n'y a alors aucune raison pour présumer qu'un claquage purement électrique n'aura jamais lieu.

- Une petite dépendance de la tension U_c en fonction de la fréquence.
- Une petite dépendance de la tension U_c en fonction de la température.

Remarque : Expérimentalement la tension critique de claquage intrinsèque est rarement atteinte, mais de nombreuses tentatives ont été faites de la mesurer pour différents matériaux. Jusqu'à nos jours il n'y a eu aucune preuve expérimentale franche pour affirmer si le claquage observé est intrinsèque ou pas, excepté les matières plastiques comme le polyéthylène. Ce mécanisme est tellement conceptuel, reste un mécanisme idéal identifié comme la valeur la plus élevée qui peut être obtenue si on élimine tous les effets secondaires.

7.1.2. Claquage par avalanche

Dans certaines conditions contrôlées dans les champs uniformes seulement avec les électrodes incorporées dans l'isolant, le claquage peut être accompli après le passage d'une avalanche simple, semblable à l'avalanche dans les gaz.

Quelquefois le libre parcours moyen peut être assez long pour que l'énergie cinétique acquise excède l'énergie d'ionisation qui se termine par la libération d'un électron. Le processus se répète et peut mener à la formation d'une avalanche électronique semblable aux gaz. Le claquage se produit si l'avalanche dépasse une certaine taille critique. Le concept est semblable à la théorie de claquage "streamer" développée par Raether, Meek et Loeb pour les gaz.

AVALANCHE ELECTRONIQUE

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

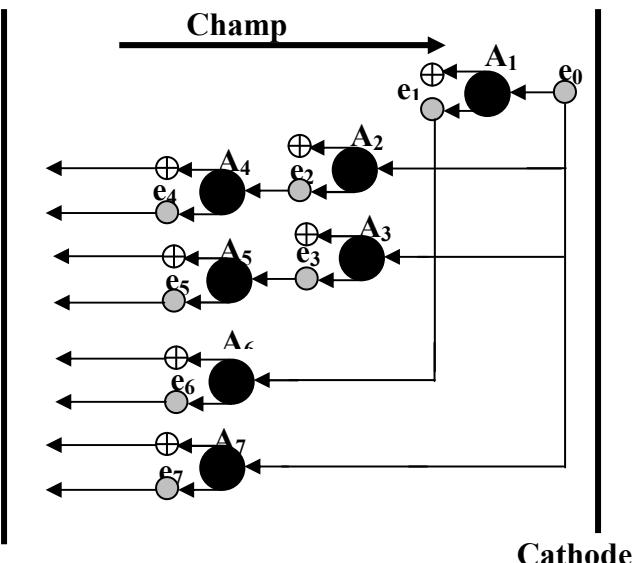
Electron primaire : créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre.

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.



7.1.3. Claquage électrothermique

Le claquage électrothermique se développe comme suit : un diélectrique soumis à une HT libère de la chaleur, la température du diélectrique augmente et les pertes croissent encore plus. Le processus s'intensifie jusqu'à ce que l'échauffement est tel que l'isolant est endommagé. (fondu, brûlé, percé avec des fissures...) dépendant de la nature de l'isolant et des conditions environnantes, et le claquage se produit à des valeurs très faibles.

Si le facteur de pertes tgδ (en CA) et la conductivité (en DC) sont faibles et leur augmentation en fonction de la température également faible, tandis que la conductivité thermique est élevée (qui aide à dégager la chaleur et à installer un équilibre stable entre l'échauffement et le dégagement de la chaleur), le claquage thermique devient difficile et l'isolant peut fonctionner pendant longtemps.

Remarques :

- Généralement le claquage thermique se produit dans la région au centre des électrodes là où le refroidissement est difficile, tandis que le claquage électrique se produit dans les parties pointues des électrodes dans les régions à champ E condensé (rebords, défauts de fabrication du diélectrique...). Il

est également possible d'assister à une transition claquage électrique- claquage thermique et vice-versa.

- 2) En règle générale, l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique ne se traduit pas proportionnellement par l'accroissement de la tension U_c . Dans le cas d'un claquage thermique, cela est expliqué par la difficulté d'évacuation de la chaleur pour les grandes épaisseurs.
- 3) Quand un isolant est chauffé, dans un premier temps la résistance augmente suite à l'élimination de toute trace d'humidité. Après que l'isolant soit tout à fait sec, la résistivité commence alors à chuter.
- 4) Il n'est pas nécessaire que la totalité du volume soit chauffé, il suffit qu'une petite partie soit altérée où l'échauffement est intense.

7.1.4. Claquage électromécanique

Les substances qui peuvent sensiblement se déformer sans rupture peuvent éclater quand les forces électrostatiques de compression appliquées sur l'isolant en essai excèdent sa résistance mécanique à la pression. Les forces de compression résultent de l'attraction électrostatique entre les charges externes qui apparaissent quand la tension est appliquée.

La pression exercée quand le champ atteint environ 10^6 V/cm peut être plusieurs de kN/m².

Si d_0 est l'épaisseur initiale de l'isolant, de module de Young Y , diminue à une épaisseur d (m) sous une tension appliquée V , la force de compression développée électriquement est en équilibre avec la résistance à la pression mécanique si :

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) \text{ Ou bien } V^2 = d^2 \frac{2Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \ln\left(\frac{d_0}{d}\right)$$

avec

ε_0 et ε_r sont la constante diélectrique de l'air et la constante diélectrique relative du diélectrique.

En dérivant par rapport à d nous constatons que l'expression possède un maximum quand $d/d_0 = \exp[-1/2] = 0,6$. Par conséquent, aucune valeur réelle de V ne peut produire une valeur stable de d/d_0 en dessous de 0,6. Si le claquage ne se produit pas à cette valeur, un accroissement supplémentaire de V rend l'épaisseur instable et provoque l'éclatement de l'isolant. La plus grande valeur de la rigidité apparente est alors donnée par :

$$E_c = \frac{V}{d_0} = 0,6 \left[\frac{Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right]^{1/2}$$

7.1.5. Claquage en extrémité (point triple)

En pratique, dans les systèmes d'isolation, l'isolant solide est soumis à la conjonction d'un ou plusieurs autres matériaux. Si un des matériaux est, par exemple, un gaz ou un liquide, alors la tension de claquage mesurée sera plus influencée par le milieu à faible rigidité diélectrique que par le solide lui-même.

Une section transversale d'un exemple simple est montrée à la fig. ci-dessous, qui représente l'essai d'une galette diélectrique entre des électrodes sphère-plan. Ignorant la distribution de champ, c.-à-d. assumant un champ électrique homogène, si nous considérons un volume cylindrique élémentaire de secteur dS traversant les électrodes à la distance X comme montré à la figure, une fraction V_1 de la tension apparaît dans l'air, donnée par :

$$V_1 = \frac{Vd_1}{d_1 + (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)d_2}$$

Où d_1 et d_2 représentent les épaisseurs des milieux 1 et 2 dans la figure et ε_1 et ε_2 sont leurs constantes diélectriques respectives.

Comme le montre la figure, l'intensité du champ dans la partie gazeuse augmente plus lorsque x diminue, et atteint des valeurs très élevées quand d_1 devient très petite (point B). En conséquence le gaz claque à une tension appliquée relativement faible. La concentration de la charge électrique estimée à l'extrémité d'un canal de la décharge locale est suffisante pour obtenir un champ local de l'ordre de 10 MV/cm, qui est plus élevé que la valeur de claquage intrinsèque. Le claquage se développe et le claquage complet est le résultat d'une succession de nombreux petits claquages produits dans l'isolant et en avançant pas à pas à travers toute l'épaisseur de l'isolant.

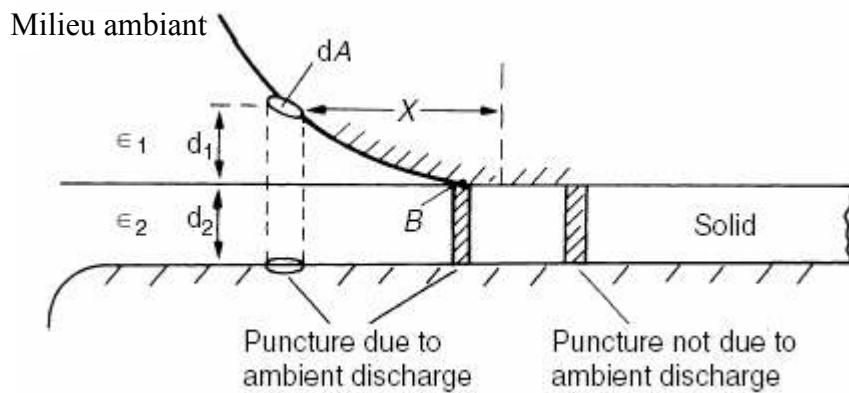


Figure : Représentation schématique d'un claquage au point triple

Décharge arborescente :

En général, le claquage des isolants solides n'est pas accompli par la formation d'un seul canal de décharge, mais prend une forme à arbre comme montré à la figure suivante, ce qui peut être aisément démontré dans un laboratoire en appliquant une tension d'impulsion entre les électrodes pointe-plan avec la pointe introduite dans un isolant transparent, par exemple le plexiglas.

Le temps requis pour ce type de décharge sous une tension alternative varie de quelques secondes à quelques minutes.

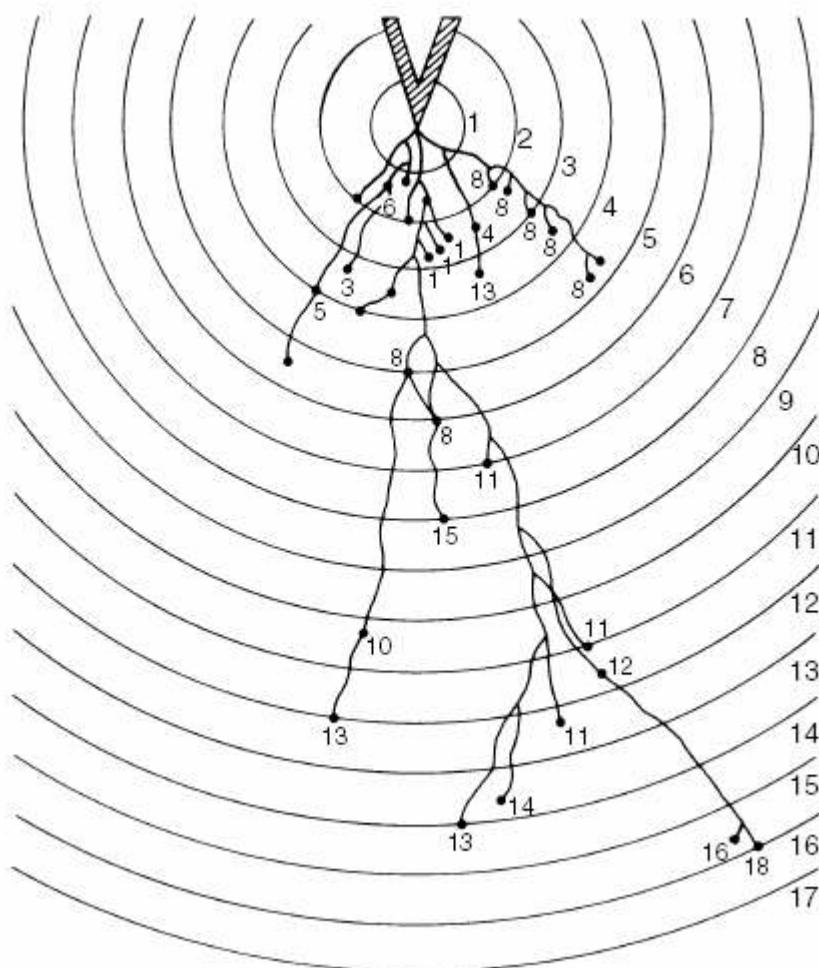
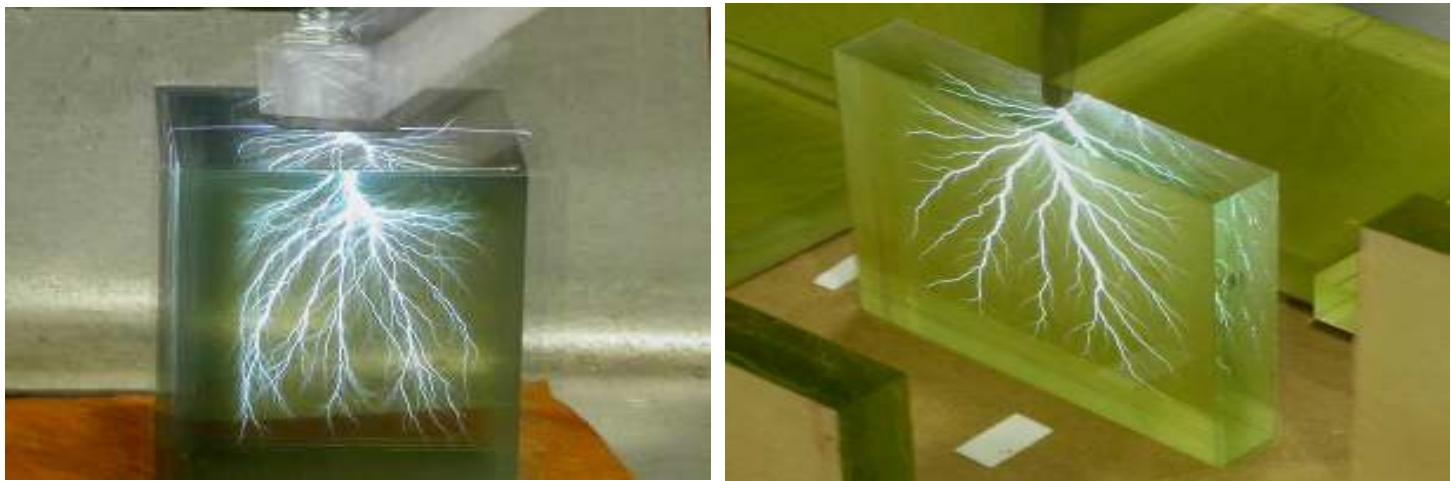


Figure : Claquage d'un isolant au point triple « claquage dans le plexiglas entre deux électrodes pointe-plan . Le nombre de canaux produits $n=16$.



7.1.6. Claquage par décharge partielle

Les isolants habituellement utilisés en haute tension ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses. **Elles sont la cause principale de vieillissement et de destruction des isolations solides à moyen et à long terme.** La mesure des décharges partielles est considérée comme un outil très important pour perfectionner la fiabilité des systèmes d'isolation à HT. L'interprétation et l'analyse des grandeurs mesurées constituent la clé pour estimer le risque de défaillance de cette isolation.

Quel que soit le mécanisme de détérioration, il en résulte une érosion lente de l'isolant et une réduction considérable de la tension critique de claquage.

On considère un isolant solide dans lequel existe une inclusion gazeuse. Cela peut être modélisé par le circuit de la figure.

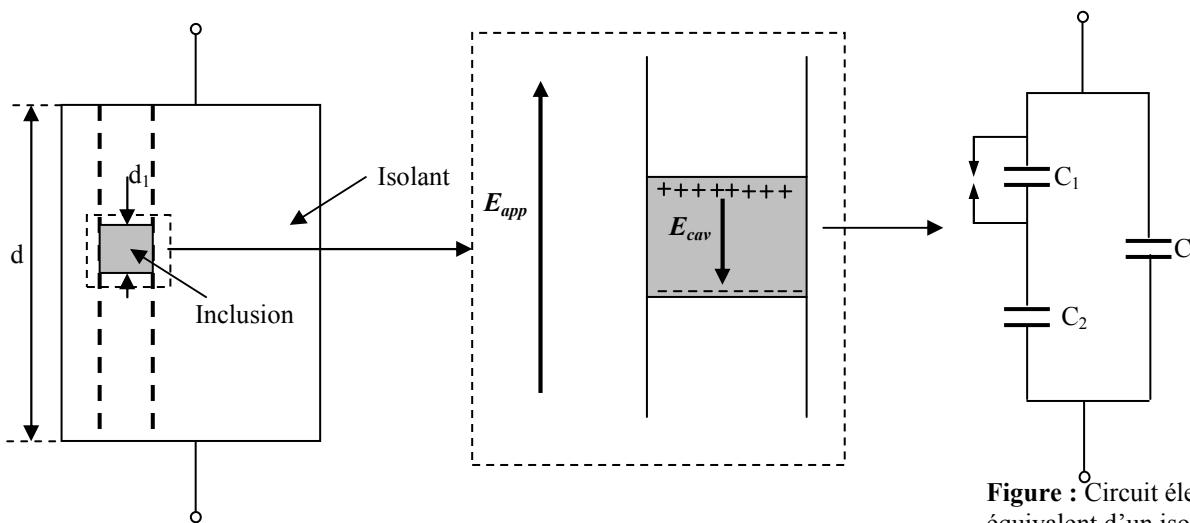


Figure : Schéma équivalent d'un isolant solide contenant une cavité gazeuse

Figure : Circuit électrique équivalent d'un isolant solide contenant une cavité gazeuse

C₁ : capacité de l'inclusion, source de DP ;
 C₂ : capacité de l'isolant en série avec C ;
 C : capacité du reste de l'isolant hors décharge.

Considérons une plaque diélectrique d'épaisseur d , à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité en forme de disque plat de hauteur d_1 et de surface S .

La capacité de la cavité est :

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S}{d_1}$$

Avec $\epsilon_{r1} = 1$, permittivité relative de la cavité gazeuse.

La capacité du diélectrique voisin (supposé sans pertes), de surface S et de hauteur $d - d_1$ est :

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{S}{d - d_1}$$

Avec ϵ_{r2} permittivité relative du diélectrique

La tension U_{c1} aux bornes de la cavité vaut donc :

$$U_{c1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U$$

Avec U : tension totale appliquée.

En remplaçant les capacités par leurs expressions, on trouve :

$$U_{c1} = \frac{U}{1 + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)}$$

Exemple :

Application numérique

$d = 10 \text{ mm}$

$\epsilon_{r2} = 4$

$d_1 = 0,1 \text{ mm}$

$U = 20 \text{ kV, 50 Hz}$

Par conséquent:

$$U_{c1} = \frac{20}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{10}{0,1} - 1 \right)} = \frac{20}{25,8} = 0,78 \text{ kV}$$

Le champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité vaut :

$$E_c = U_c / d_1 = 0,78 / 0,01 \approx 78 \text{ kV/cm.}$$

Or nous savons que, dans l'air à la pression atmosphérique, le champ critique de claquage est de l'ordre de 21 kV/cm en valeur efficace et 30 kV/cm en valeur crête. Nous aurons donc un claquage ou DP dans la cavité.

RESUME :

Les causes du claquage des solides sont diverses :

- Causes d'origine électrique : des charges électriques sont injectées par les électrodes ou proviennent par dissociation de particules dans le volume du matériau.
- Claquage d'origine thermique : à l'origine il existe un phénomène électrique conduisant à un échauffement du matériau.
- Claquage du à des effets parasites : des défauts dans le matériau sous forme d'inclusions solides ou gazeuses, qui provoquent une distorsion du champ électrique.
- Claquage électromécanique : sous l'action d'un champ électrique E, un matériau de permittivité ϵ est soumis à une pression qui a tendance à rapprocher les électrodes et donc d'exercer une contrainte de compression, sur le matériau.

8. CONTOURNEMENT

Ci-dessous, des valeurs de la rigidité diélectrique de certains diélectriques, en tension alternative à 50 Hz :

Diélectrique	Rigidité diélectrique (kV/cm)
Mica	1000-3000
Caoutchouc	300-500
Huile de transformateur	150-250
Air	20-50

Il est évident que la rigidité diélectrique des isolants solides est beaucoup plus grande que celle des isolants liquides et gazeux. Par conséquent, il peut se produire une décharge glissante plutôt qu'un claquage.

Le contournement est la formation d'un chemin de conduite (fuite) permanent sur la surface d'un isolant qui dans la plupart des cas provoquent la dégradation de l'isolation. Lorsque l'isolant se trouve à l'extérieur, il subit les conditions ambiantes de l'environnement et devient couvert de pollution qui peut être d'origine industrielle ou côtière. En présence de l'humidité la couche de contamination provoque un courant de fuite qui chauffe évapore par échauffement l'humidité à la surface et provoque une interruption dans le film d'humidité; de petites étincelles apparaissent alors aux bornes des bandes sèches.

Humidité : la présence de l'humidité fait diminuer la résistivité de l'isolant. Cela peut être expliqué par le fait que les impuretés présentes dans l'eau dissocient les molécules en ions et que l'eau elle-même peut aider à la dissociation des molécules de la matière elle-même. L'humidité peut également former à la surface un film conducteur d'une électrode à l'autre.

Afin de protéger les isolants contre l'effet de l'humidité, ils sont imprégnés et couverts avec une couche de produit non hygroscopique qui retarde sensiblement l'humidification de la surface isolante.

Conséquence du contournement :

La chaleur résultant des petites étincelles cause la carbonisation et la volatilisation de l'isolation et mène à la formation d'une « voie carbonique » permanente sur la surface. Le phénomène du cheminement limite sévèrement l'utilisation de l'isolation organique dans l'environnement extérieur. Le taux et la sévérité du cheminement dépendent de la structure des polymères et peuvent être considérablement atténusés en y ajoutant des produits chimiques appropriés au polymère qui empêchent la carbonisation.

- *Résistance superficielle R_s* : due à l'humidité et des contaminants qui se forment à la surface de l'isolant (cas de la pollution qui se dépose sur la surface des isolateurs).
- *Résistance volumique R_v* : résistance de la matière isolante.
En général : $R_v \gg R_s$.
- *Résistance équivalente R* : R_v et R_s en parallèle.
Bien entendu, nous avons : $I_s = U / R_s \gg I_v = U / R_v$.

Remarque : Les diélectriques poreux contenant de nombreuses vacuoles d'air ont une rigidité plus faible que le diélectrique lui-même. Quand ces diélectriques poreux sont associés avec des isolants liquides ou des isolants solidifiants, leur rigidité augmente largement.

Exemple : papier $E_c = 3-5 \text{ MV/m}$ (comme l'air)

Papier imprégné d'huile $E_c = 40 - 80 \text{ MV/m}$ qui est utilisé pour l'isolation des câbles de puissance.

CHAPITRE VII

GENERATEURS DE HAUTE TENSION

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

- a) les laboratoires de recherche scientifique ;
- b) les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...) ;
- remarque: par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.
- c) de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- Tension alternative
- Tension continue
- Tension de choc

I) GENERATEURS DE TENSION ALTERNATIVE

I.1) Transformateur élévateur

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et la plus utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs qui sont destinés principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests.

La forme de la HT délivrée par un transformateur HT est généralement différente de la forme sinusoïdale, sans toutefois dépasser les tolérances permises. Ces transformateurs possèdent généralement une borne de l'enroulement qui est reliée à la terre.

De nombreux transformateurs sont des transformateurs à point milieu (voir figure).

Pour des tensions supérieures à 750 kV, le coût, le transport et l'encombrement deviennent très gênants; On préfère alors recourir aux transformateurs montés en cascade.

I.2) Circuit résonnant

Dans les essais réalisés en haute tension, quelques fois il se produit une explosion de l'équipement testé, suite à l'apparition d'une forte surtension générée par résonance électrique.

Exemple : considérons un isolant de capacité C alimenté par une Haute Tension délivrée par un transformateur (Figure 2).

$r_1 + jL_1\omega$: impédance de l'enroulement primaire du transformateur

$r_2 + jL_2\omega$: impédance de l'enroulement secondaire du transformateur

$L\omega$: impédance shunt du transformateur, généralement négligée devant $L_1\omega$ et $L_2\omega$.

C : charge capacitive d'impédance $1/\omega C$.

$$U = (r_1 + r_2)I + j \left(L_1\omega + L_2\omega - \frac{1}{\omega C} \right) I$$

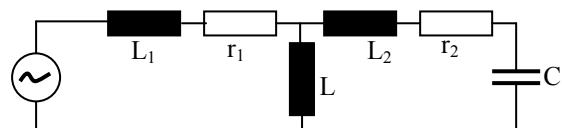


Figure 2 : Circuit électrique équivalent du transformateur et de l'isolant testé

Si par hasard $\omega(L+L_2) \approx \frac{1}{\omega C}$, une résonance accidentelle se produit, le courant devient tellement grand que la surtension aux bornes de la charge atteint jusqu'à 20 à 50 la tension appliquée et peut provoquer une explosion de la charge.

Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions (figure 3) ; une impédance de réglage variable insérée en série avec la circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension à des valeurs très grandes (jusqu'à 600 kV).

Le régulateur, alimenté par une source BT alternative, règle la tension en ajustant la valeur totale de l'impédance réactive.

Les circuits oscillants sont utilisés surtout dans les essais d'équipement à grande capacité, comme les câbles HT par exemple.

Remarque : si l'on a besoin d'une tension plus grande, on utilise plusieurs circuits résonants en série.

Ce type de générateur est spécialement avantageux lorsque la capacité de l'objet en essai est élevée, tel que les câbles HT par exemple. L'avantage spécifique est que la tension délivrée est pratiquement sinusoïdale et qu'une compensation de l'énergie réactive s'en suit (résonance série).

II) GENERATEURS DE TENSION CONTINUE

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current)
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique...).
- Dans les applications où les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

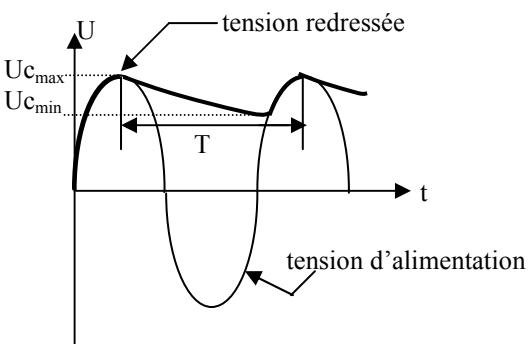
II.1) Redresseur de tension alternative

a) Redresseur à simple alternance :

avec :

C : capacité de lissage du redresseur + capacité de l'objet en essai + capacités parasites.

R : résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.



2

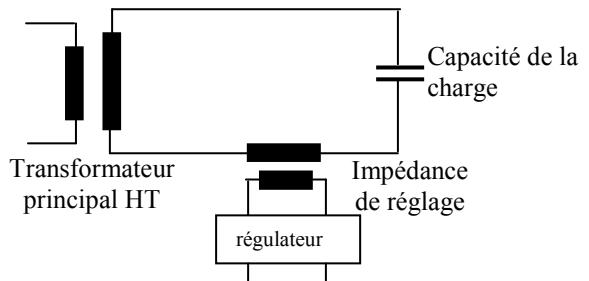


Figure 4 : redresseur à simple alternance en charge

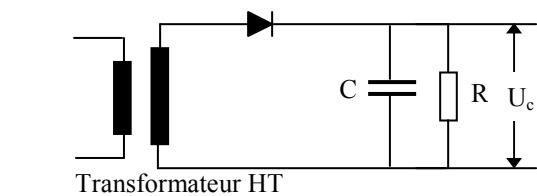
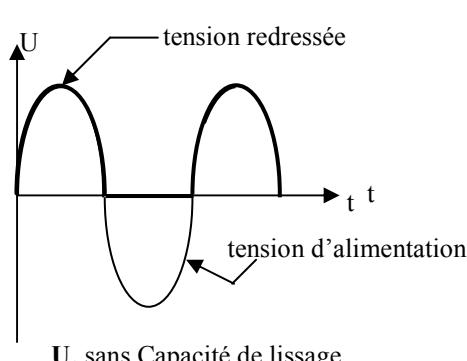


Figure 4 : redresseur à simple alternance en charge



U_c sans Capacité de lissage

Diode haute tension :

Elle est équivalente à la mise en série de n diodes conventionnelles. Le nombre de diodes n est déterminé suivant la tension inverse à supporter par l'ensemble. Par exemple, pour redresser une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 kV.

b) Redresseur double alternance :

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée. Il n'y a pas de très grande différence entre les montages redresseurs à simple et à double alternance, en présence d'une capacité de lissage (figure 7).

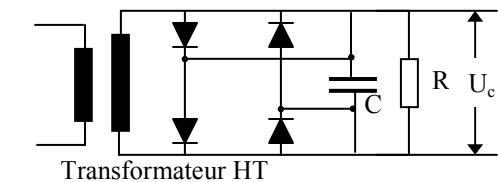
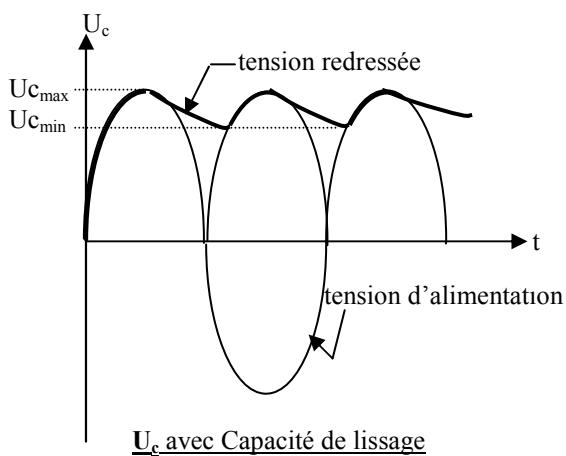


Figure 6 : Redresseur à double alternance en charge (Pont de Graëtz)

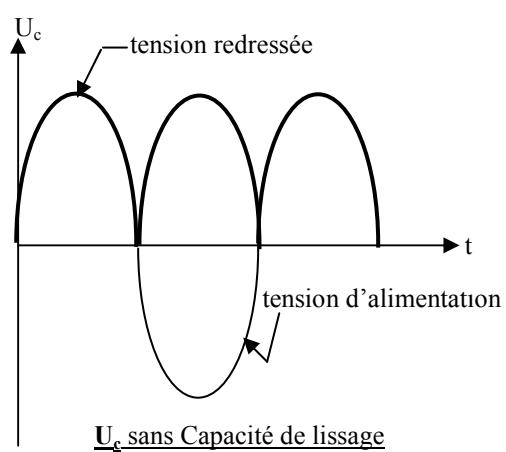


Figure 7 : courbes des tensions redressées délivrées par un pont de Graëtz.

c) Doubleur de tension :

Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même; Le plus répandu est le doubleur de Schenkel.

Doubleur de Schenkel :

Pendant l'alternance négative le condensateur C_1 se charge à la tension V_{max} , à l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de C égale à $2 V_{max}$. La tension à vide obtenue à la sortie est donc $U_c = 2 V_{max}$ (figure 8 et 9).

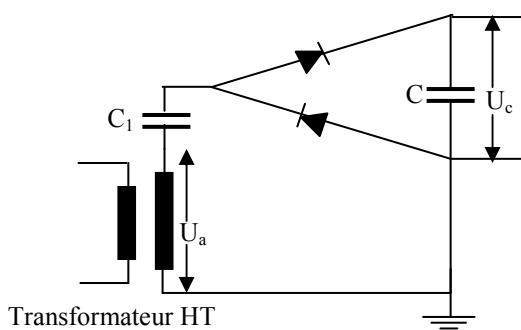


Figure 8 : Doubleur de Schenkel

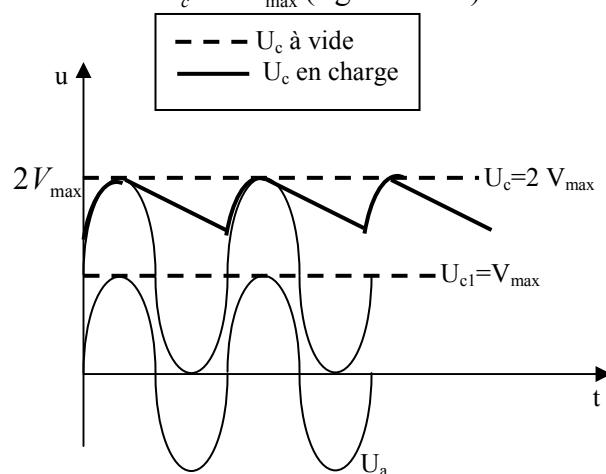


Figure 9 : Courbes des tensions redressées délivrées par le doubleur de Schenkel

Remarque : l'avantage du doubleur de Schenkel est qu'il constitue l'élément de base du redresseur en cascade.

d) Redresseur en cascade :

La cascade, appelée cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton, est constituée par une piles de doubleurs de type Schenkel.

Comme chaque étage délivre une tension à vide égale à $2V_{\max}$, la tension obtenue (à vide) est $U_c = 2nV_{\max}$. avec n : nombre d'étages.

En charge : $U_c = 2nV_{\max} - \Delta U$

$$\text{avec } \Delta U = \frac{I_R}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right) \text{ où } I_R = \frac{U_c}{R}$$

Chaque diode doit supporter une tension inverse égale à $2 V_{\max}$.

Remarque : le nombre optimal d'étages ne dépasse pas généralement 10, car au delà la chute de tension devient trop importante. Ce type de générateur délivre une tension qui peut atteindre 5 MV ; mais l'ordre de grandeur du courant délivré qui est de 10 mA reste faible.

II.2) Multiplicateur de tension

La première phase consiste à fermer les interrupteurs S_1 pour charger en parallèle les condensateurs C_i . Après, on ouvre les interrupteurs S_1 et on ferme S_2 : les tensions des condensateurs C_i qui sont maintenant en série, s'ajoutent pour donner aux bornes de C une tension de sortie $U_c = nU_0$.

avec n : nombre de condensateurs C_i .

Remarque : ce générateur qui ne peut être utilisé qu'une fois les condensateurs chargés, a une durée d'application bien déterminée (qui dépend de l'énergie emmagasinée dans le condensateur et de la constante de décharge) car quand les condensateurs se déchargent, la tension tombe à zéro.

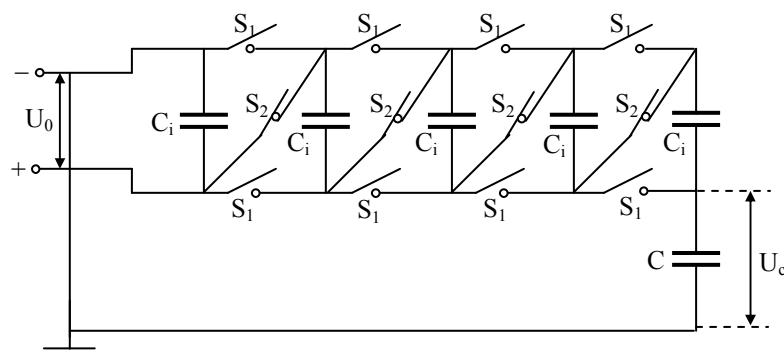


Figure 11 : Multiplicateur de tension

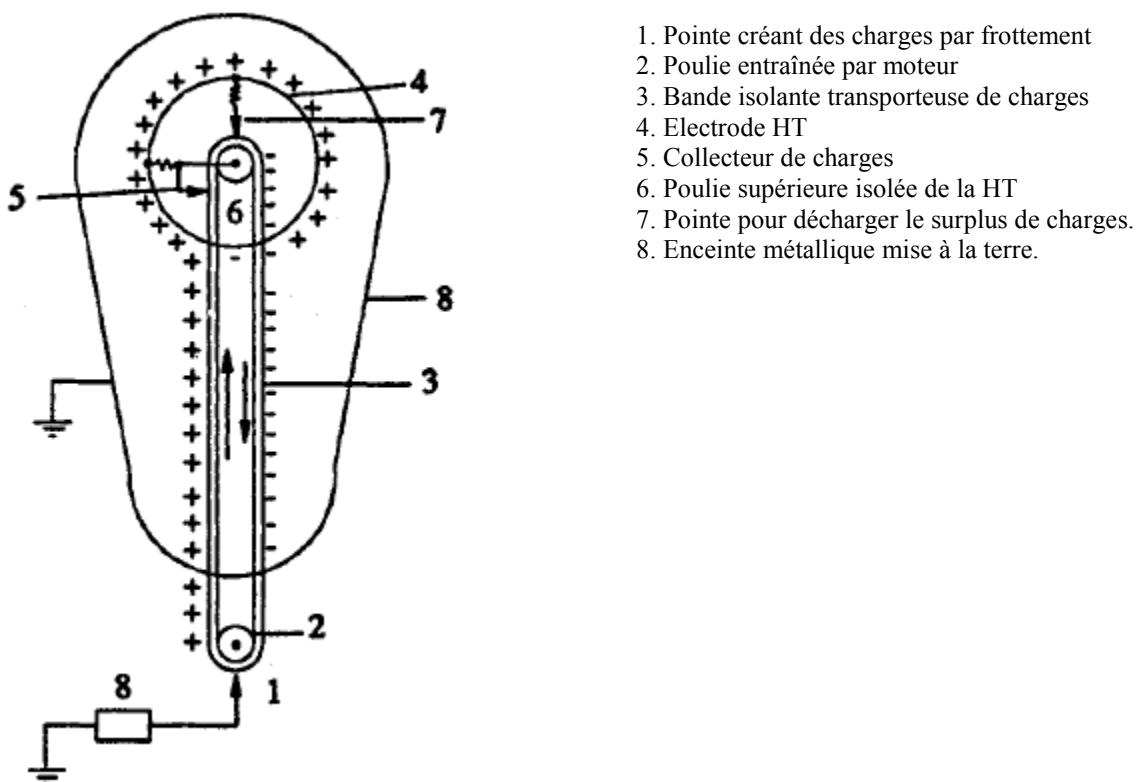
II.3) Générateurs électrostatiques : (Van de Graff)

Utilisé entre autres dans les laboratoire de recherche de physique nucléaire.

Principe de fonctionnement :

Un ensemble d'électrode-pointes ou une lame très fine (électrode couronne) charge par effet couronne une courroie isolante. Celle-ci qui tourne avec une vitesse réglable, introduit les charges dans la partie supérieure du générateur (sphère) où elles sont prélevées par le collecteur. Les quelques charges qui « échappent » au collecteur sont neutralisées par effet couronne grâce à des aiguilles fixées sur la paroi interne de l'électrode haute tension. En arrivant en bas, ces charges négatives sont neutralisées par l'électrode couronne.

L'électrode sphérique continue de stocker les charges jusqu'à atteindre des tensions, sphère-terre, considérables. Le générateur Van de Graff n'est pas très utilisé car le courant délivré est faible (de l'ordre du μA), mais la tension de sortie peut atteindre jusqu'à une centaine de MV.



III) GENERATEURS DE TENSIONS DE CHOC

Définition : La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques μs . C'est un courant ou une tension qui croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît jusqu'à zéro.

Les générateurs de choc sont nécessaires pour :

- Simuler les surtensions des lignes comme l'onde de la foudre par exemple, pour l'étude et la recherche.
- réaliser des tests d'essais sur les appareillages haute tension destinés à fonctionner lors des surtensions, tels que les appareils de protection contre les surtensions.

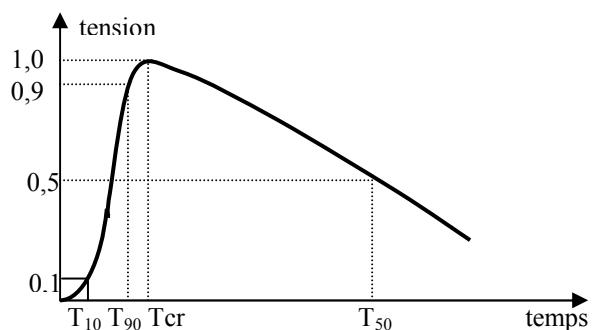
Remarque : l'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

Tous les générateurs de choc sont identifiés par les deux constantes de temps t_1 et t_2 :

$$t_1 = 1,67(T_{90} - T_{30}) \text{ et } t_2 = T_{50}.$$

L'onde de choc standard normalisée pour l'étude de :

- la foudre est l'onde $1,2/50 \mu\text{s}$
($t_1 = 1,2 \mu\text{s}$ et $t_2 = 50 \mu\text{s}$).
- la surtension de manœuvre : l'onde $250/2500 \mu\text{s}$ ($t_1 = 250 \mu\text{s}$ et $t_2 = 2500 \mu\text{s}$).



Remarque : le temps T_{cr} de montée à la valeur crête n'est pas utile car la crête est souvent plate et on distingue mal le maximum.

Le temps de montée à la valeur crête T_{cr} est appelé **temps de front**, et le temps de diminution T_{50} est appelé **temps de queue**.

III.1) Générateur de choc à un étage

La tension continue V charge le condensateur C_1 jusqu'à produire le claquage de l'éclateur E ; une tension brusque (choc) est ainsi appliquée aux extrémités de la charge capacitive C_2 .

C_1 : capacité de choc (réservoir d'énergie)

C_2 : capacité de l'objet en essai ;

$$C_1 = (10 \dots 20) C_2$$

R_1 : résistance de front d'onde (série) ;

R_2 : résistance de queue d'onde (parallèle) ;

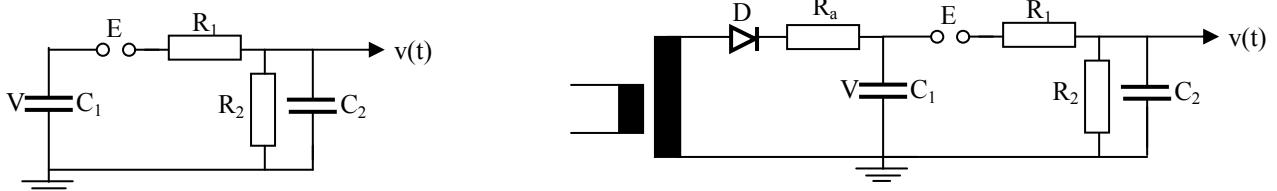


Figure 13 : Générateur de choc à un étage

En général, le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire d'un transformateur HT associé à une diode D . La résistance d'amortissement R_a empêche une charge trop rapide. La constante de temps lors du processus de charge $\tau = R_a C_1$ est de l'ordre de 10 à 20 s.

Lorsque la tension disruptive U_0 de l'éclateur E est atteinte, C_1 se décharge brusquement dans C_2 à travers la résistance de front R_1 , la résistance de queue d'onde R_2 étant beaucoup plus grande que R_1 , les capacités C_1 et C_2 vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance R_2 .

Les résistances R_1 et R_2 servent à contrôler les constantes de temps respectivement de front et de queue de l'onde. Ainsi, un temps de front bref requiert une charge rapide du condensateur C_2 , et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente ; ceci est réalisé en choisissant une résistance R_2 très grande par rapport à R_1 .

Quand $R_2 \gg R_1$, au moment de l'amorçage de l'éclateur, toute la tension U est pratiquement appliquée à R_1 et C_2 en série. La charge du condensateur C_2 est d'autant plus rapide que le produit $R_1 C_2$ est petit.

Calcul de la tension de choc : (EXERCICE)

Tension transitoire :

La conception et la réalisation des équipements utilisés dans les réseaux haute tension tiennent compte surtout à se prémunir contre les *surtensions transitoires de manœuvre* qui sont les plus fréquentes. Le réglage des résistances R_1 et R_2 de chaque étage permet de contrôler les temps de front et de queue de l'onde, et offre la possibilité de disposer à la sortie soit d'une tension de choc (pour simuler la foudre par exemple) soit d'une surtension transitoire.

III.2) Générateur de choc à plusieurs étages (Générateur de Marx)

Des tensions continues plus élevées sont obtenues avec le générateur de Marx, c'est un ensemble de générateurs de choc à un étage, montés en cascade. Les tensions obtenues sont de l'ordre du MV (maximum réalisé env. 6 MV).

Dans une première phase, le sectionneur I fermé permet la charge en parallèle des n condensateurs C à travers de grandes résistances de charge R_{ch} ; l'alimentation étant assurée par une source continue de tension U_0 (généralement comprise entre 50 et 200 kV).

Ensuite, dans une deuxième phase, le sectionneur est ouvert et l'amorçage de tous les éclateurs E_i est commandé presque simultanément (la tension de claquage des éclateurs à sphères étant ajustée légèrement au-dessus de U_0); à ce moment précis les condensateurs C se trouvent en série et constituent une source de tension égale à nU_0 .

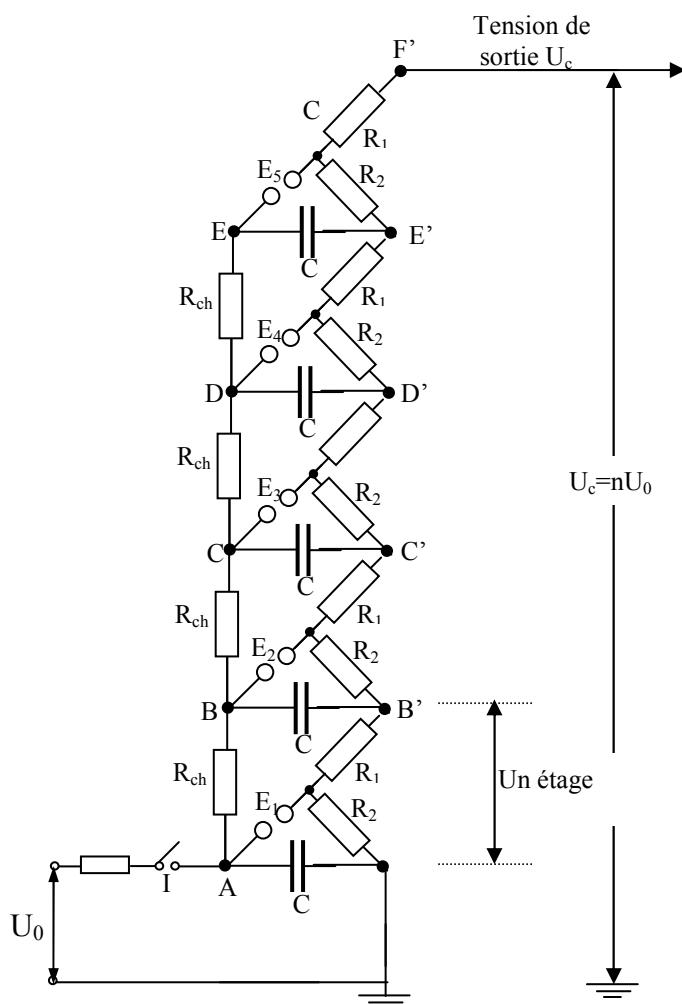


Figure 16 : Générateur de Marx à 5 étages

III.3) Générateur de Ruhmkorff

La haute tension est produite par l'interruption du courant dans un circuit inductif.

Les vibrations du rupteur ferment et ouvrent brusquement le circuit.

L'équation du circuit est :

$$u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt}$$

où R_p et L_p sont la résistance et l'inductance de l'enroulement primaire ;

i_p et i_s courants primaire et secondaire ;

M l'inductance mutuelle entre les circuits primaire et secondaire.

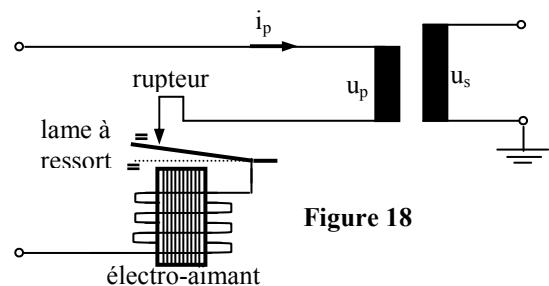


Figure 18

Comme l'interruption du courant est très brève ($dt \approx 0$), les termes $\frac{di_p}{dt}$ et $\frac{di_s}{dt}$ sont tellement élevés qu'ils produisent, pendant un bref moment, de la haute tension.

Ces générateurs sont utilisés, lorsqu'on a besoin d'une haute tension pendant une durée très brève, comme l'allumage par exemple. On les trouve pour l'allumage des lampes à décharge et l'allumage des moteurs à explosion (bobine HT des voitures).

III.4. Générateur de Tesla

Il fournit une haute tension oscillante.

Le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire du transformateur HT associé à la diode D.

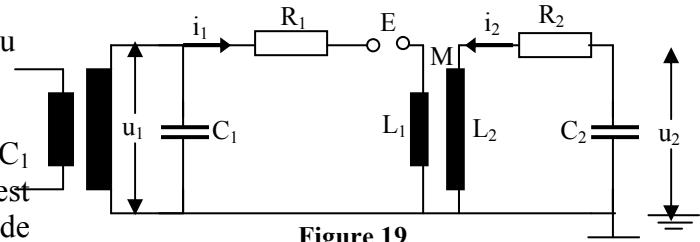


Figure 19

- Le transformateur charge le condensateur C_1 à une tension U_1 . Quand la tension est suffisamment grande, le claquage de l'éclateur E provoque la décharge de l'énergie emmagasinée dans C_1 dans un système de deux circuits RLC couplés, générant une tension de sortie U_2 qui croît de façon oscillante.

Les résistances R_1 et R_2 servent à amortir l'oscillation. L'arrêt de la tension oscillante s'effectue par l'extinction de l'arc aux bornes de l'éclateur par soufflage d'air. Des tensions à HF fréquence 10^4 à 10^5 Hz sont obtenues et qui peuvent atteindre des valeurs de 1 MV.

CHAPITRE IX

TECHNIQUES DE MESURE EN HAUTE TENSION

I) VOLTMETRE ELECTROSTATIQUE

Il fonctionne suivant le principe de la force d'attraction électrique F_e entre deux charges.

Le disque mobile M relié au potentiel HT à mesurer, et situé au centre de l'anneau de garde G, est attiré par le disque fixe F, l'attraction est d'autant plus forte que le potentiel est élevé. Une aiguille d'indication de mesure est reliée à l'électrode M, la force de rappel du disque M étant assurée par un contre-poids P qui permet aussi de régler le calibre de mesure.

L'anneau de garde G, de même diamètre que l'électrode fixe F, assure l'uniformité du champ électrostatique suivant l'axe vertical entre les électrodes fixe et mobile.

Calcul de la force électrostatique : (EXERCICE)

L'énergie électrostatique accumulée est :

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

La capacité vaut

$$C = \epsilon_0 S/x$$

Etant donné qu'il s'agit d'un champ uniforme, la tension U est égale à $U = E x$

Soit

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 (S/x) E^2 x^2$$

Comme $dW = F dx$

$$F = dW/dx = \frac{1}{2} \epsilon_0 S E^2$$

Soit donc:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S V^2 / x^2$$

La force appliquée sur M est $F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S V^2 / x^2$;

avec

$S (\text{cm}^2)$: Surface du disque mobile M ;

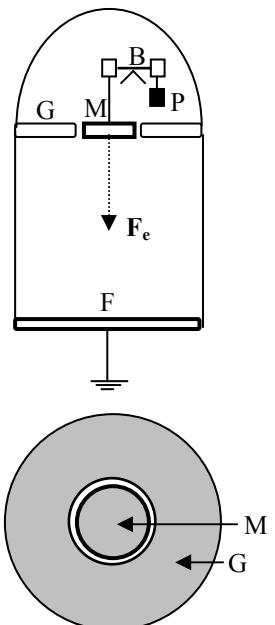
$x(\text{cm})$: longueur inter-électrodes ;

$V(\text{kV})$: ddP entre les électrodes.

Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance d entre les électrodes.

La précision augmente,

- *en augmentant d* : au-delà d'une certaine valeur, le voltmètre devient volumineux et encombrant.



Le disque mobile et l'anneau de garde (vus de dessus)

Figure 1

- en diminuant l : en descendant en dessous d'une certaine valeur, ceci empêche le mesure des tensions plus grandes car le champ qui augmente ($E = V/l$) finit par provoquer le claquage entre les électrodes M et F.

La précision de mesure de ces appareils égale à environ 0,1, est bonne. De plus, le voltmètre electrostatique permet de mesurer des tensions allant jusqu'à 270 kV.

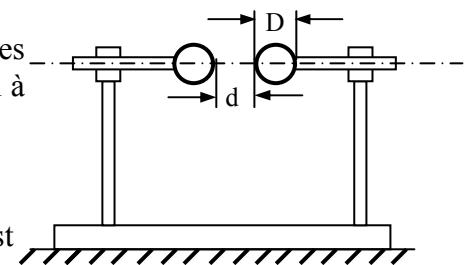
Des voltmètres spéciaux peuvent mesurer des tensions de 600 kV et plus ; dans ce cas, le voltmètre est placé dans une enceinte étanche où l'espace inter électrodes est rempli par un gaz électronégatif comme le SF₆ ou le nitrogène, et porté à une haute pression de 15 atmosphères. Quelques fois, le gaz pressurisé est remplacé tout simplement par du vide.

Il n'y a pratiquement pas d'énergie perdue par ce voltmètre car le seul courant qui puisse circuler est un courant de fuite entre les électrodes qui est négligeable. Les pertes sont donc négligeables lors de la mesure des tensions continues et alternatives. Néanmoins, comme ces pertes sont proportionnelles à la fréquence de la tension elles deviennent considérables lors de la mesure des hautes tensions HF (Haute Fréquence de l'ordre du MHz).

C'est le meilleur moyen recommandé pour la mesure des tensions continues et alternatives.

II) MESURE PAR ECLATEUR

L'éclateur est constitué de deux électrodes sphériques identiques, dont l'une est reliée à la terre et l'autre reliée au potentiel à mesurer, où la distance inter-électrodes d est réglable.



Il peut être conçu pour être utilisé soit:

- dans une position horizontale (voir la figure ci-devant) qui est la disposition la plus fréquemment utilisée ;
- dans une position verticale, utilisée pour les sphères de grand diamètre D ($D \geq 50\text{cm}$).

Figure 3

Principe de fonctionnement :

Chaque éclateur possède une abaque, qui est une courbe d'étalonnage entre la tension critique de claquage U_c et la longueur inter-électrodes d (voir figure ci-dessous).

La tension à mesurer est appliquée aux deux électrodes, puis on augmente la distance d jusqu'à une valeur critique d_c qui provoque le claquage. Comme chaque éclateur possède une abaque tracée $U_c = f(d_c)$ qui fait correspondre à chaque distance critique la tension critique U_c , cette abaque donne la mesure de la tension appliquée qui correspond à la valeur d_c .

Exemple :

Par exemple, la tension à mesurer provoque un claquage de l'éclateur pour une distance critique $d_c = 9\text{ cm}$. Si on suppose que la figure ci-devant représente l'abaque de cet éclateur, la tension mesurée est donc 200 kV.

Si par exemple, l'éclateur claque à $d_c = 50\text{ cm}$, l'abaque montre que la tension appliquée dans ce cas est de 1000 kV.

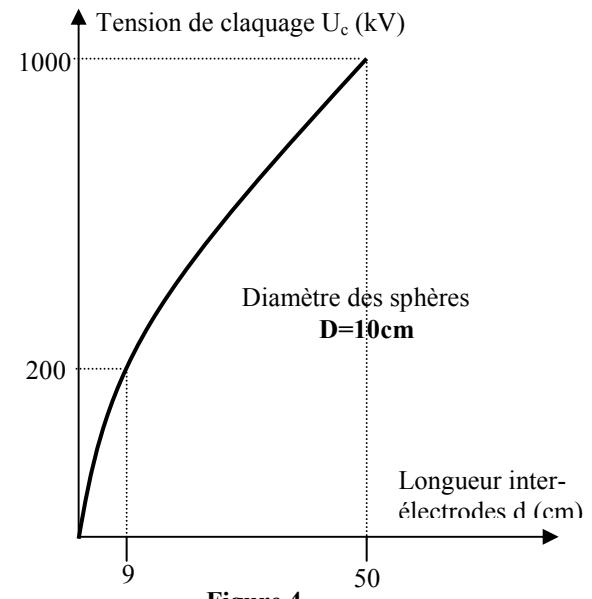


Figure 4

L'éclateur peut être utilisé pour la mesure des trois types de tension : alternative et onde de choc (valeur crête), ainsi que la tension continue. Il compte parmi les tous premiers appareils utilisés pour la mesure des HT. Il constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à haute tension.

La précision de mesure dépend entre autres de l'uniformité du champ entre les sphères ; celle-ci pourrait être améliorée avec une forme géométrique des électrodes moins arrondie et plus plate (voir figure).

Remarque : L'éclateur constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à HT.

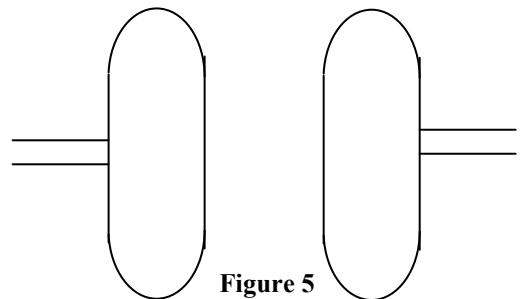


Figure 5

III) MESURE GALVANOMETRIQUE

La mesure de la tension est effectuée par la dérivation d'un courant I à travers une grande résistance de mesure R ($R \geq 1 M\Omega$).

La mesure du courant I donne la valeur de la tension $U = RI$.

Vu la grande valeur de R , le courant I doit être très petit (de l'ordre du milliampère) pour minimiser l'échauffement par effet Joule. D'autre part, la mesure d'un courant faible pourrait éventuellement être faussée par des courants parasites, tels que les courants de fuite ou ceux produits par effet couronne.

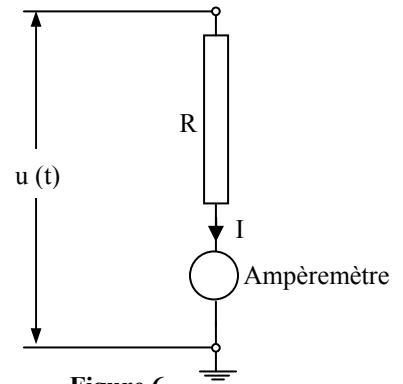


Figure 6

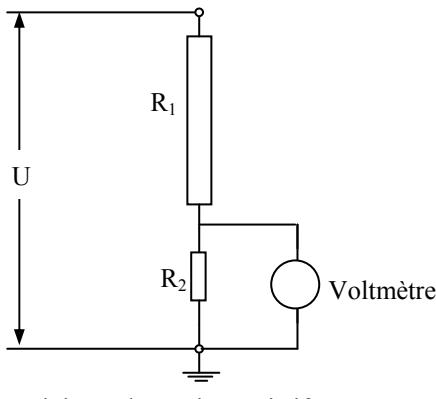
La précision de mesure dépend de la qualité de la résistance qui ne doit pas varier énormément avec la température et avoir un faible coefficient de température ; la précision est généralement très bonne, de l'ordre de 0,01 %.

La précision de mesure est difficile à garantir étant donné que la valeur de la résistance est fonction de la température, de l'humidité, du vieillissement, etc...

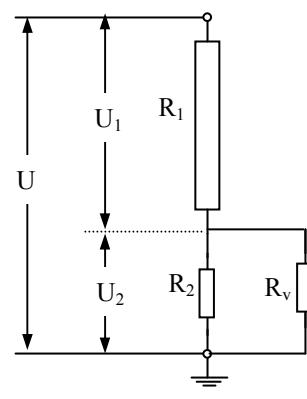
IV) DIVISEURS DE TENSION

IV.1. Diviseur résistif :

Un diviseur de tension est formé d'une grande résistance R_1 et d'une petite résistance R_2 placées en série.



Diviseur de tension résistif



Circuit électrique équivalent

Figure 8

Rapport de division g:

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R'_2}{R'_2}$$

avec $\frac{1}{R'_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_v}$ où R_v résistance du voltmètre.

$$\text{or } R_v \gg R_2 \Rightarrow R'_2 \approx R_2 \Rightarrow g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\text{comme aussi } R_1 \gg R_2 ; g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow U = \frac{R_1}{R_2} U_2$$

La mesure de la ddP U_2 aux bornes de R_2 nous donne la valeur de la tension globale U .

Comme il s'agit d'un rapport (R_1 / R_2), les variations de température, d'humidité et de vieillissement ayant lieu en général dans le même sens, la précision de mesure est peu affectée (généralement inférieure à 1 %).

IV.2. Diviseur capacitif :

En tension alternative, on recourt au diviseur capacitif pour minimiser les pertes d'énergie.

La capacité C_1 est un condensateur à haute tension dont la valeur de capacité est beaucoup plus faible que celle du condensateur C_2 de la branche basse tension. D'autre part, on néglige la grande impédance du voltmètre devant celle de C_2 .

Rapport de division :

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{\left(\frac{1}{C_1 \omega} + \frac{1}{C_2 \omega} \right) I}{\frac{1}{C_2 \omega} I} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2}} = \frac{C_2 + C_1}{C_1}$$

Comme $U = \frac{C_2 + C_1}{C_1} U_2$, la mesure de U_2 nous donne la tension globale U .

Notons que puisque $C_2 \gg C_1 \Rightarrow \frac{U}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$.

V) TRANSFORMATEUR DE MESURE

On utilise aussi tout simplement un transformateur de tension abaisseur de petite puissance; afin de connaître la tension à mesurer il suffit de multiplier la tension mesurée au secondaire par le rapport de transformation.

Il donne des mesures très précises, mais il est surtout utilisé pour la mesure des tensions des réseaux de puissance et rarement utilisé dans les laboratoires.

VI) OSCILLOSCOPE A MEMOIRE

L'oscilloscope n'est pas un appareil destiné pour la mesure en HT, mais il permet d'enregistrer en mémoire les tensions très brèves comme les ondes de choc. Ils sont généralement utilisés dans les expériences brusques et brèves, telles que le contournement ou le claquage. Ils offrent l'avantage de visualiser l'allure de la tension et ne donnent que la

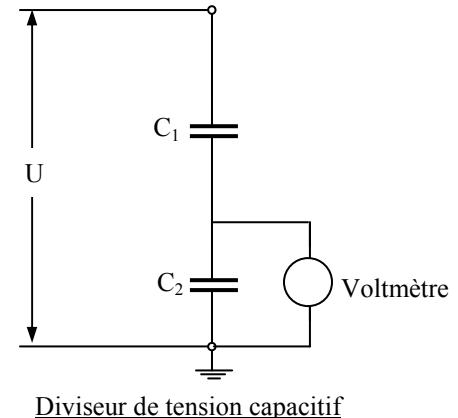


Figure 9

valeur crête de la tension. La tension visualisée sur l'oscilloscope est prélevée à l'aide d'une sonde spéciale HT.

Oscilloscope de choc :

Les phénomènes de choc enregistrés étant de l'ordre de la μ s, on utilise des oscilloscopes spéciaux, appelés *oscilloscopes de choc*.

VII) RESUME

TENSION CONTINUE	TENSION ALTERNATIVE	TENSION DE CHOC
-Voltmètre électrostatique -Mesure par éclateur -Diviseur résistif -Mesure galvanométrique à l'aide d'une résistance	-Voltmètre électrostatique -Mesure par éclateur -Mesure galvanométrique à l'aide d'une capacité -Diviseur capacitif -Transformateur de tension	-Mesure par éclateur -Diviseur capacitif avec adaptation -Diviseur résistif avec adaptation