

Chapitre 2 : Étude approfondie des mécanismes de conduction dans les isolants (solides, liquide et gaz) application au dimensionnement des réseaux électriques

I. Rappel sur Matériaux Diélectriques

II. Décharges électriques

❖ Définitions

❖ Claquage des isolants gazeux

❖ Claquage des isolants liquides

❖ Claquage des isolants solides

❖ La foudre

I. Rappel sur les Matériaux Diélectriques

I. Définitions

- Les **isolants** ou **diélectriques** sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres.
- Un **isolant** est un matériau destiné à empêcher la conduction électrique entre des éléments conducteurs.
- 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. Caractéristiques diélectriques des isolants

2.1 Permittivité relative :

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

$$\text{Sa capacité est : } C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{e}$$

où $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

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

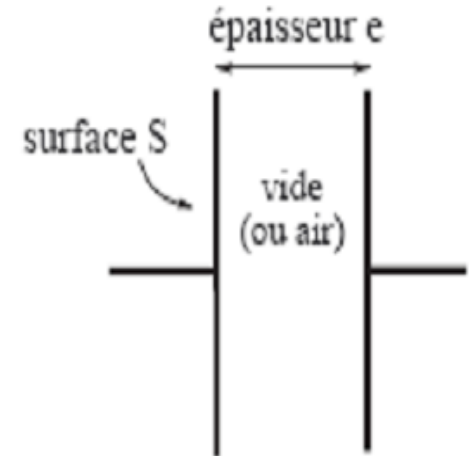
$$C_0 = \varepsilon_r C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e}$$

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

La **permittivité absolue** est : $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$

Pour l'air, les gaz et le vide, $\varepsilon_r = 1$. Donc, $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F / m .

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



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).

3. 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.

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

4. 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.

4.1. Isolants solides :

4.1.1. Isolants naturels :

a) Minéraux :

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

Propriétés : $T_{max} = 400$ à 500 °C ; $G \approx 7$ kV/mm ; $\tan\delta = 0,02$ 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 : $T_{max} = 200$ à 500 °C ; $G \approx 10$ à 20 kV/mm ; $\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ à $1,2 \cdot 10^{-2}$; $\epsilon_r = 10$ 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 : $T_{max} = 500$ à 1000 °C ; $G \approx 210$ à 240 kV/mm ; $\tan\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ à $26 \cdot 10^{-4}$; $\epsilon_r = 6$ 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 :

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

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

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

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

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

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

4.1.2. 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.

4.2. Isolants liquides

4.1.1. 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 .

4.2.2. 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.

4.3. Isolants gazeux

- Hexafluorure de soufre (SF₆)
- Aire

II. La décharge électrique

- ❖ **Définitions**
- ❖ **Claquage des isolants gazeux**
- ❖ **Claquage dans les liquides**
- ❖ **Claquage dans les solides**
- ❖ **La foudre**

Définitions

Une **décharge électrique** est un canal conducteur se formant, sous certaines conditions, entre deux électrodes, à travers un milieu normalement isolant.

☐ Une décharge est dite **non autonome** lorsque l'émission des électrons doit être provoquée par apport d'énergie thermique (cathode chauffée) ou par irradiation.

La décharge **non autonome** cesse en l'absence de **l'agent ionisant extérieur**.

☐ La décharge est dite **autonome** lorsqu'elle se maintient **sans agent ionisant extérieur**.



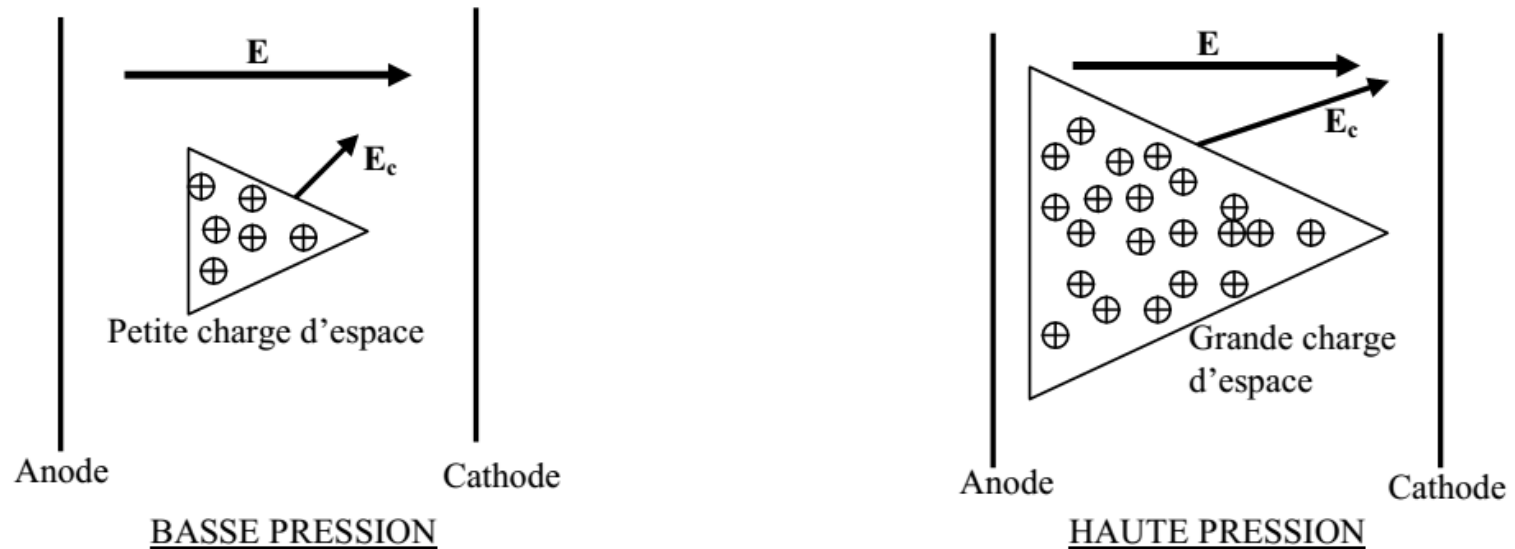
La décharge autonome est aussi appelée décharge indépendante.

Définitions

- ❖ ***La décharge luminescente*** est une décharge autonome dans laquelle la plupart des porteurs de charge sont des électrons produits par émission électronique secondaire.
- ❖ ***L'émission électronique primaire*** consiste en une émission thermoélectronique, une photoémission ou une émission par effet de champ.
- ❖ ***L'émission électronique secondaire*** consiste en une émission électronique due au bombardement de la surface émettrice par des ions.
- ❖ ***L'arc électrique*** est une décharge à fort courant.

I.1. Claquage des isolants gazeux

I.1.1. Influence de la pression



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 ⇒ **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 ⇒ **MECANISME DE STREAMER.**

I.1.2. Mécanisme de Townsend (basse pression)

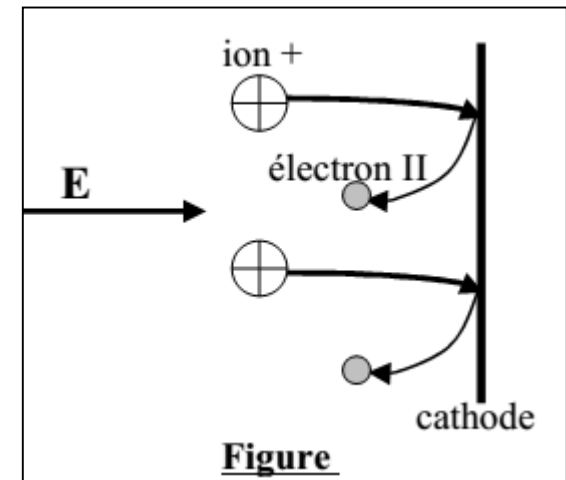
Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de charges créés par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant ultraviolet pour en extraire des électrons.

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.



I.1.3 Régimes de décharge dans un gaz

Un gaz soumis à une décharge de laboratoire, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement. Afin d'identifier ces régimes, nous considérons une décharge de type continu : nous connectons à une source de tension continue, deux électrodes (anode et cathode) séparées par le gaz (à basse pression) qui sera ionisé.

Les décharges obtenues dans le dispositif de Townsend peuvent être analysées en examinant la courbe caractéristique $V(I)$ qui lui est associée . *Quatre régimes de décharges peuvent être obtenus dans ce type de systèmes .*

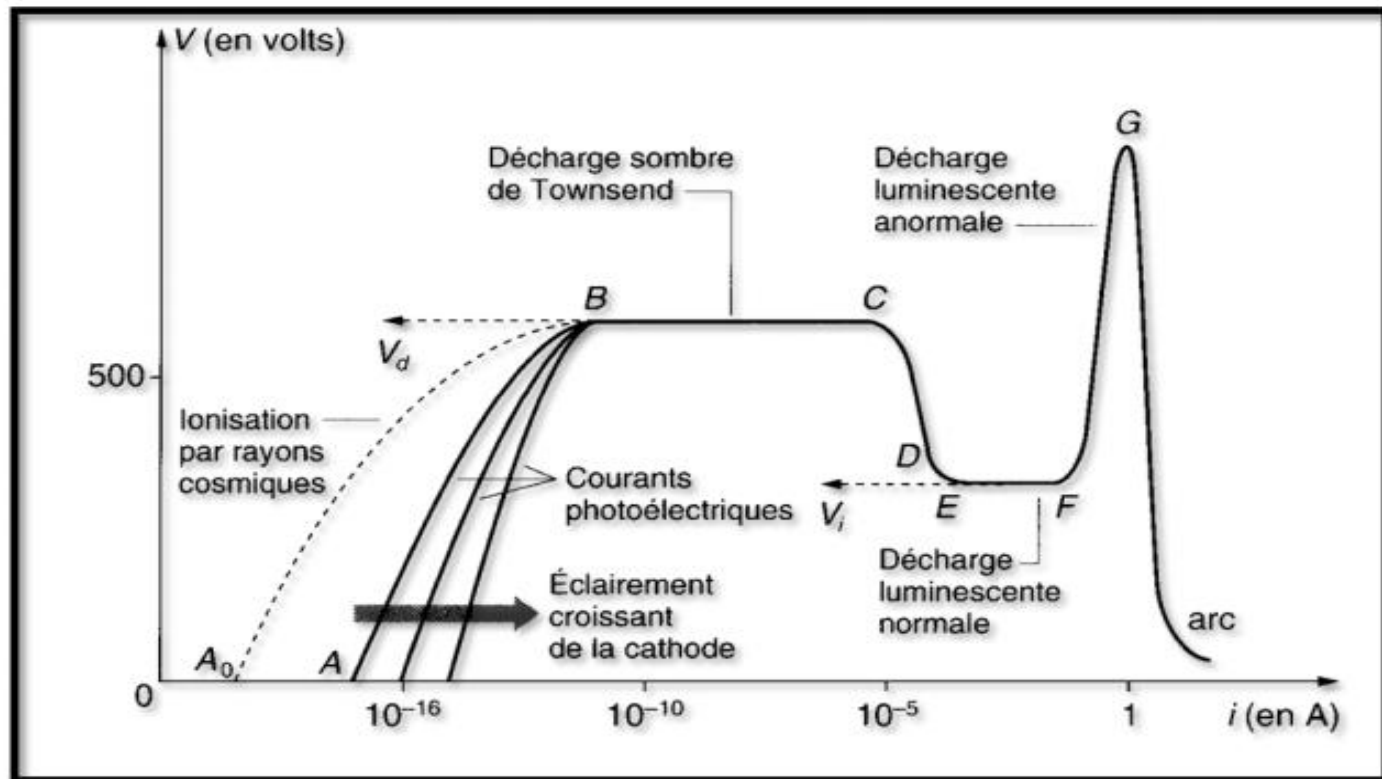
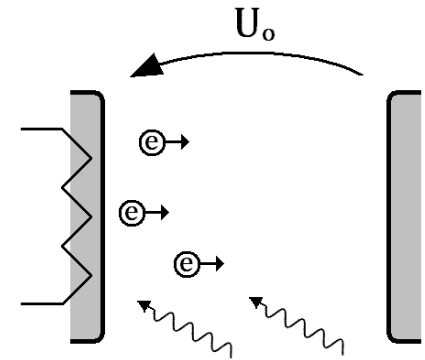


Figure : Régimes de décharge en courant continu

Le premier régime

Le courant augmente avec la tension puis se sature autour de la centaine de picoampères



correspond aux décharges non autonomes. La décharge ne peut exister qu'en présence d'un moyen extérieur, souvent une source lumineuse, assurant la production d'électrons primaires à la cathode par effet photoélectrique.

 **Ce type de décharge est invisible.**

Le second régime

correspond à ce que l'on appelle les *décharges de Townsend*. Il est caractérisé par une croissance quasi-verticale du courant pour une valeur de tension appelée **tension disruptive**. Dans le régime de **Townsend**, la charge d'espace générée par le plasma est faible et le champ électrique reste égal au champ Laplacien.

Le troisième régime

correspond aux *décharges lumineuses*. Dans le cas des basses pressions considérées, ces décharges sont également généralement entretenues par un mécanisme de type **Townsend**.

Le quatrième régime

correspond au régime d'**arc**. Celui-ci est caractérisé par une très **faible tension** de maintien (quelques dizaines de volts), de **fortes densités de courant** et un échauffement important de la décharge dont la température peut facilement atteindre plusieurs milliers de Kelvin.

I.1.4 Loi de Paschen

La loi de Paschen, loi empirique énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 18891, indique que la tension critique de claquage (dit champ disruptif), est une fonction généralement non linéaire du produit de la pression et de la distance inter-électrodes.

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

U_c : tension critique de claquage ;
 P : pression du gaz ;
 d : distance inter-électrodes.
 U_{cmin} : tension critique minimale ;
 Si $U < U_{cmin} \Rightarrow$ pas de claquage.
 La loi de Paschen est étudiée en champ homogène.

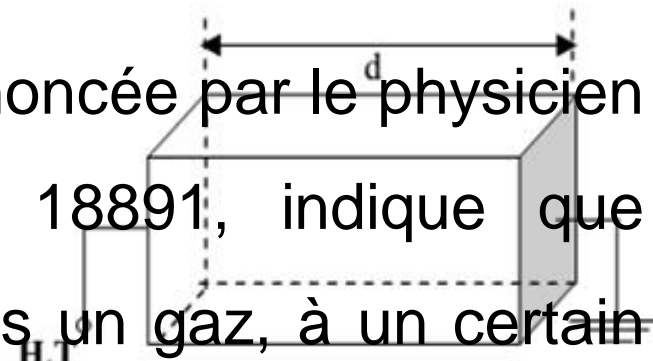
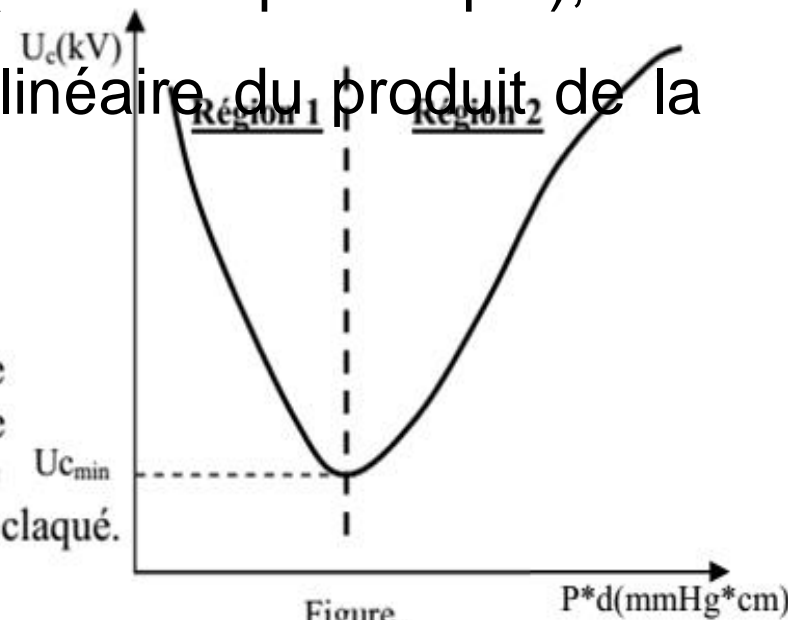


Figure : Enceinte remplie par un gaz



Figure

1) Minimum de Paschen

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

- Pour l'air : $U_{cmin} = 326 \text{ V}$
- Pour l'argon pur : $U_{cmin} = 195 \text{ V}$
- Pour l'argon avec des impuretés de sodium : $U_{cmin} = 95 \text{ V}$.

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

Région 1 : U_c diminue en fonction de la pression P

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

Région 2 : U_c augmente avec la pression P .

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

Déduction : Selon la loi de Paschen, il est plus recommandé d'utiliser les gaz à haute pression (et quelquefois à très basse pression) dans les appareillages HT, condensateurs, câbles... La validité expérimentale de la loi de Paschen est vérifiée aux faibles distances jusqu'à 0,1 mm et des pressions jusqu'à 10 atmosphères.

I.1.5. Mécanisme 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 .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 .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 .b). Le champ de la CE renforce le champ entre la tête de l'avalanche et la cathode et crée également une composante radiale.

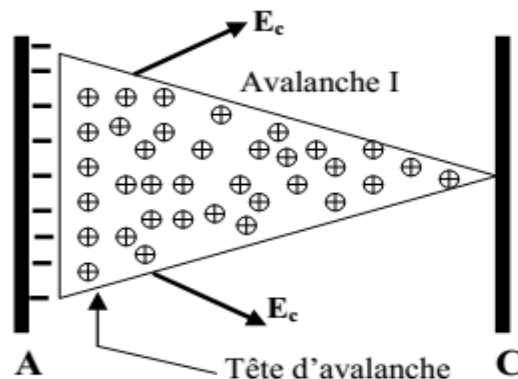


Figure .a

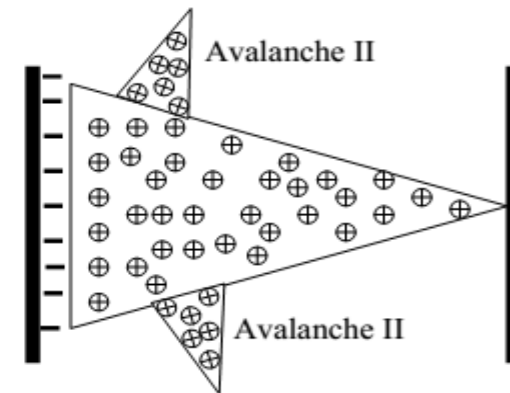
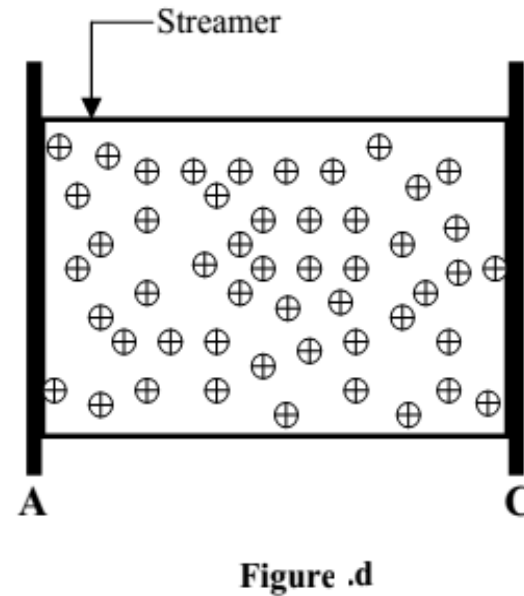
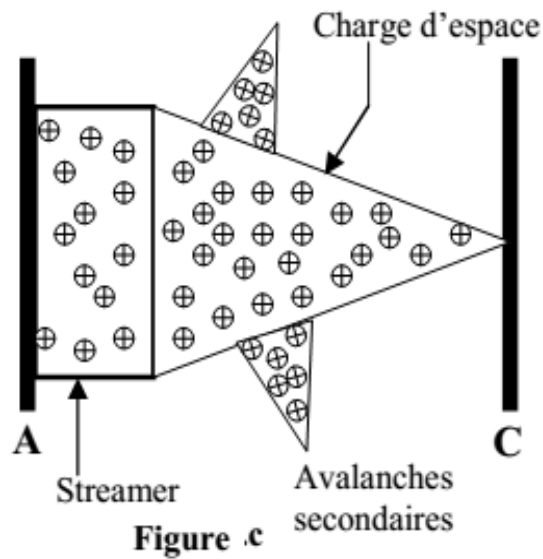


Figure .b

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 .c). Quand il touche la cathode, à ce moment se produit le claquage (Figure .d).



I.1.6. 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 créée 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.

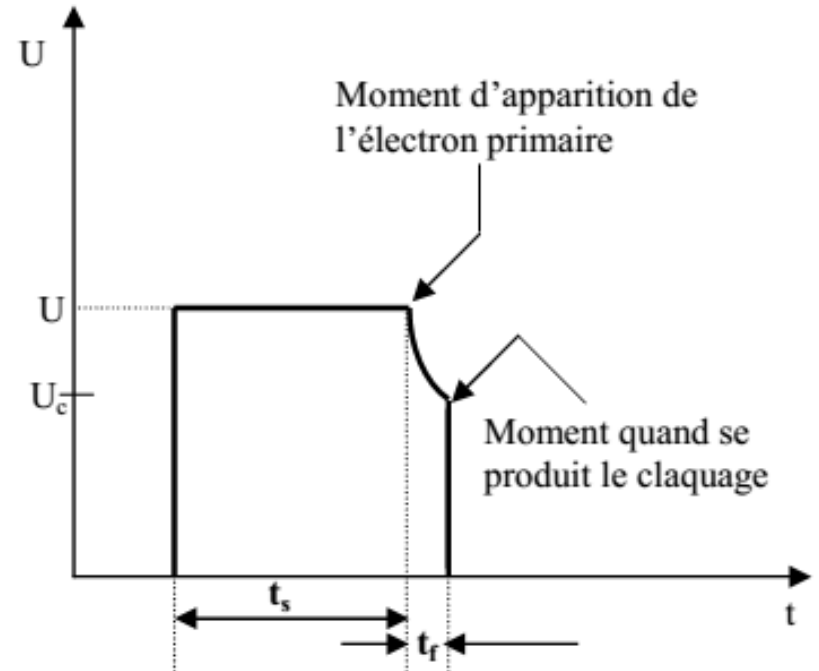
- **Tension de choc** : comme les impulsions sont très brèves (quelques μs), la probabilité qu'un électron se trouve dans le gaz durant la durée de l'impulsion est faible (Figure ci dessous). Le claquage ne se produit pas forcément même si on applique une tension supérieure à U_c .

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

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

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

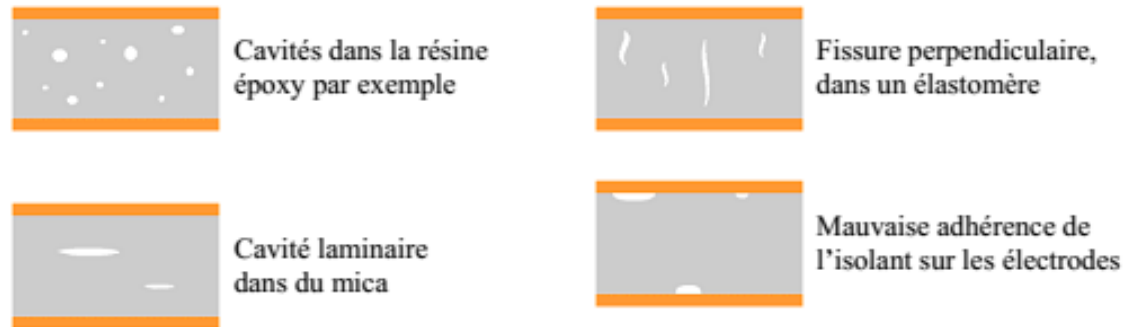
Lorsque l'isolant est soumis à une tension de choc (impulsion), la tension U_c est plus grande que dans le cas d'une tension DC ou CA.



I.1.7. Décharge partielle

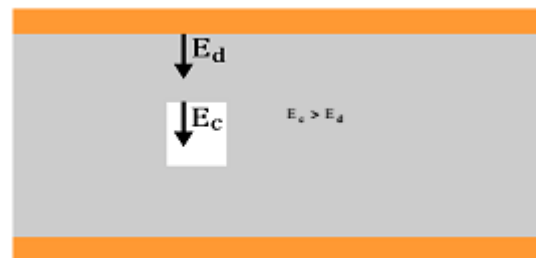
Une *décharge partielle* est une décharge électrique qui se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant soumis à la tension.

En pratique, une décharge partielle se produit dans les cavités ou les fissures qui existent à l'intérieur d'un isolant solide; ou dans les bulles d'un isolant liquide.



Deux raisons contribuent à provoquer des décharges partielles dans les isolants :

1. Le champ électrique dans les cavités E_c est plus élevé que le champ électrique E_d dans le diélectrique.
2. La rigidité diélectrique est plus faible dans les cavités que dans le diélectrique.



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 :

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

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

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

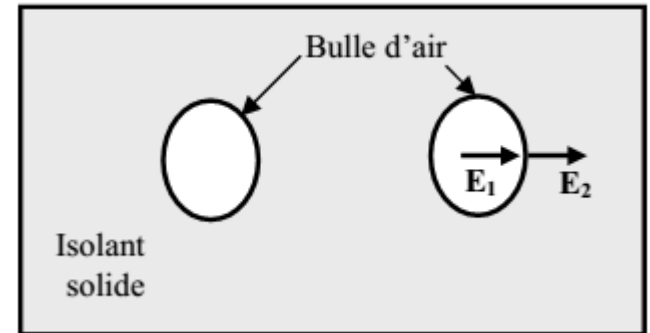
Comme en général la permittivité des isolants solides et liquides est supérieure :

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

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

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

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



I.1.8. Effet Penning

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

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

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

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

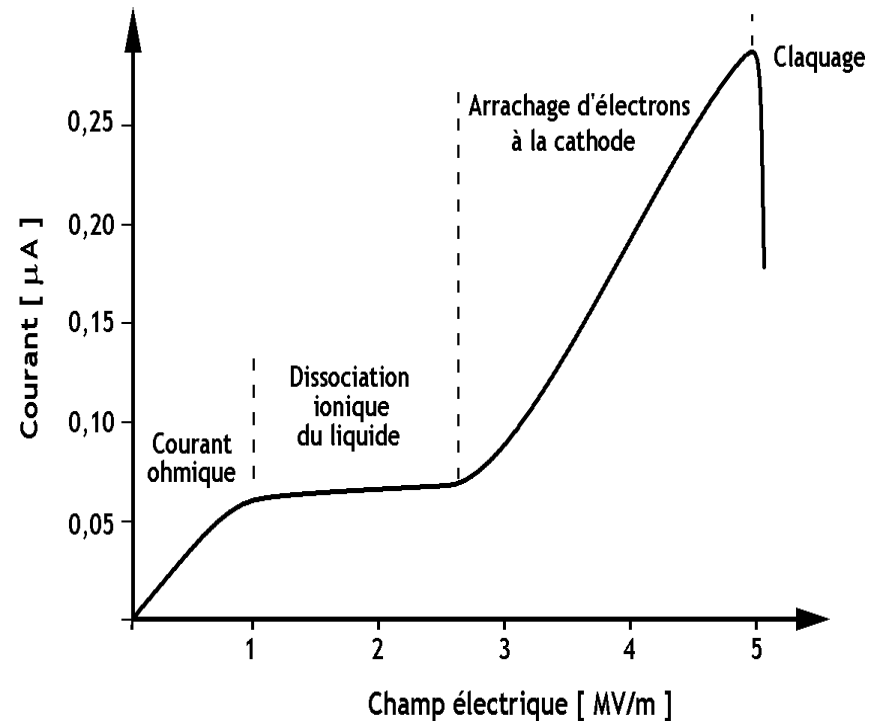
L'état métastable des atomes de néon est atteint avec une énergie de 16 eV, supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes d'argon (15,1 eV) ; les atomes d'argon sont facilement ionisés lors de la collision avec les atomes métastables du néon, ce qui fait diminuer considérablement la tension critique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

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

Décharge dans les liquides et les solides

Claquage dans les liquides

Le courant qui s'établit dans un liquide isolant, en fonction de la tension (ou du champ E) passe schématiquement par 3 étapes, avant le claquage.



- 👉 Le courant ohmique qui s'établit à faible champ est essentiellement tributaire des impuretés présentes dans le liquide.
- 👉 Il n'existe pas de « Loi de Paschen » dans les liquides.

Claquage dans les solides

Divers processus peuvent conduire au claquage dans un solide.

Le **claquage thermique** dû à l'élévation de la température par effet Joule (à basse fréquence) ou par résonance avec la polarisation par orientation (autour du MHz).

Le **claquage électromécanique** dû aux forces de compression provoquée par le champ électrique.

Le **claquage par streamer** dû au déclenchement d'une avalanche électronique.

Le **claquage par érosion** dû essentiellement à l'effet des décharges partielles sur le long terme.



Dans les isolants solides, la décharge disruptive est appelée :

◆ **perforation**, lorsqu'elle traverse le matériau en y produisant souvent des dégâts irréversibles.

◆ **contournement**, lorsque l'arc ne traverse pas l'isolant mais suit sa surface externe ou un chemin extérieur.

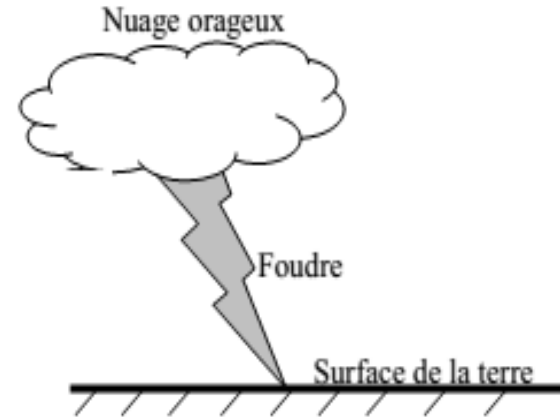
La foudre

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.



Figure

CHAMP ELECTRIQUE (par temps nuageux)

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 x 2000m= 40 MV.

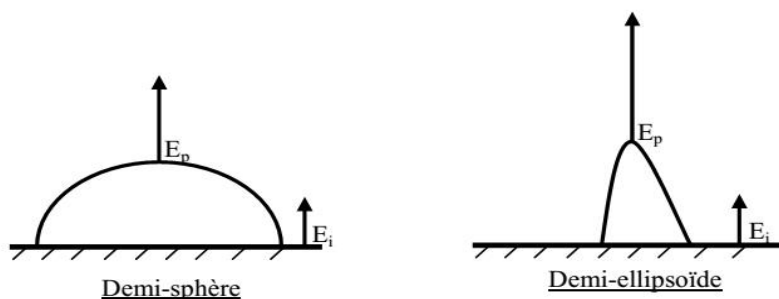
2) Pouvoir de pointe

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

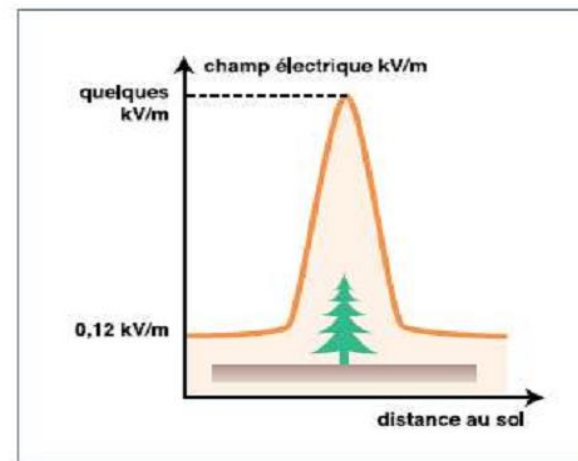
a) une demi-sphère : $E_p \approx kE_i$ où $k \approx 3$;

b) demi-ellipsoïde: $E_p \approx k E_i$ 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

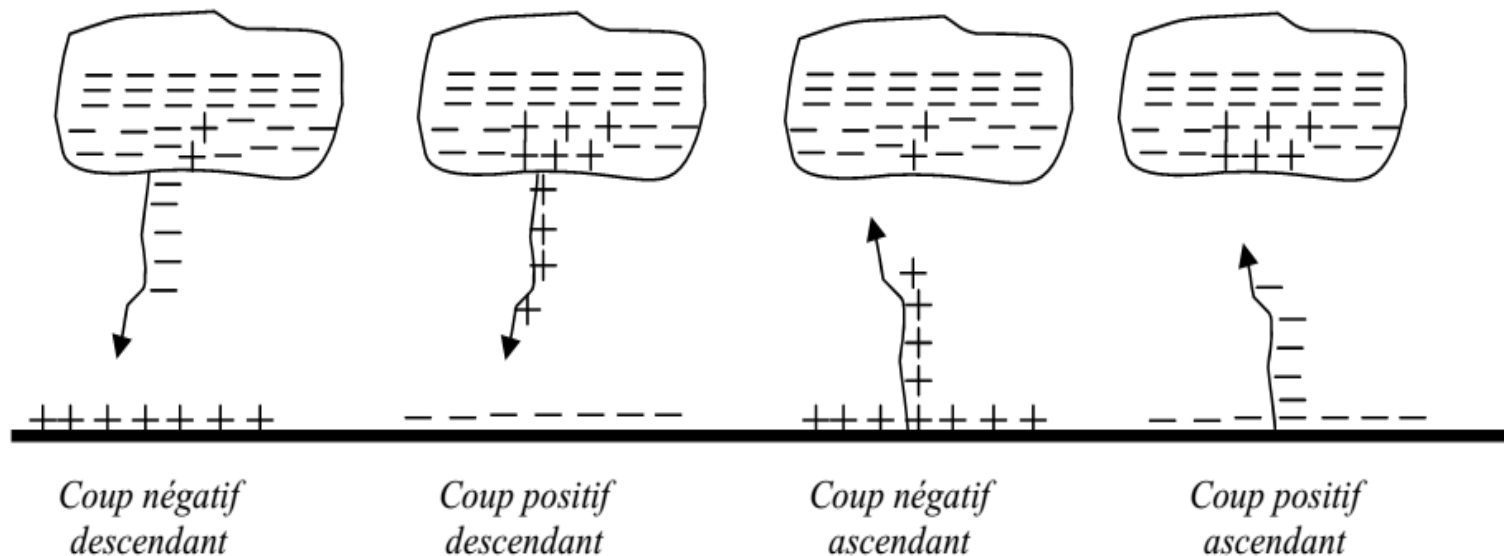


CLASSIFICATION DES COUPS DE FOUDRE

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

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.

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). 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.

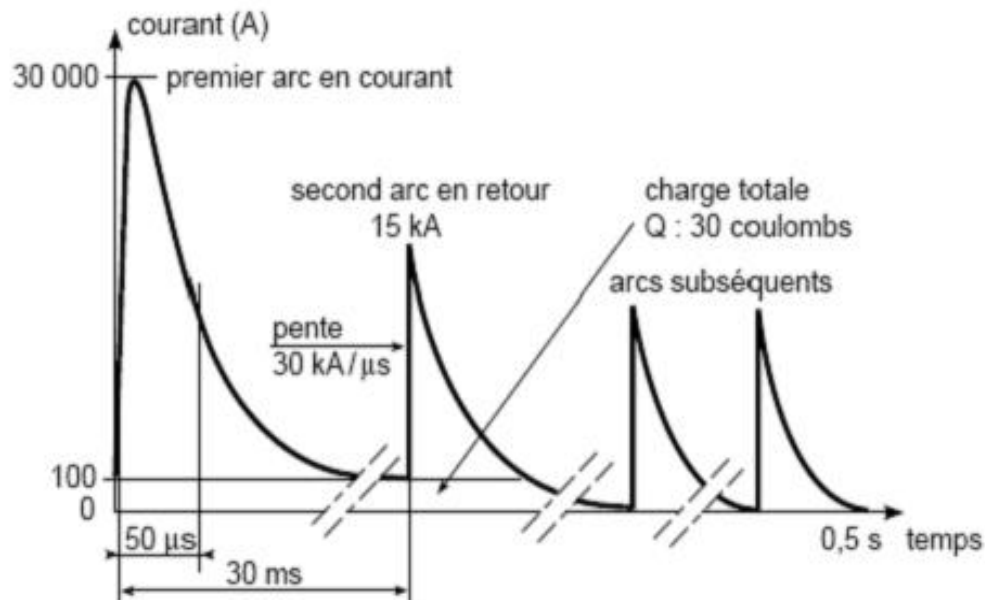


Figure : forme du courant de la foudre

EFFETS DE LA FOUDRE

1) Effets thermiques

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

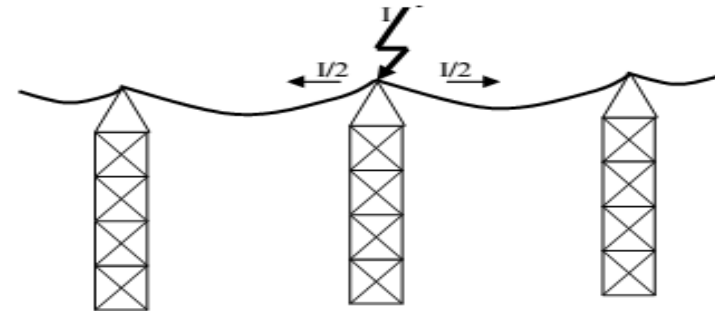
2) Effets électrodynamiques

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.

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.

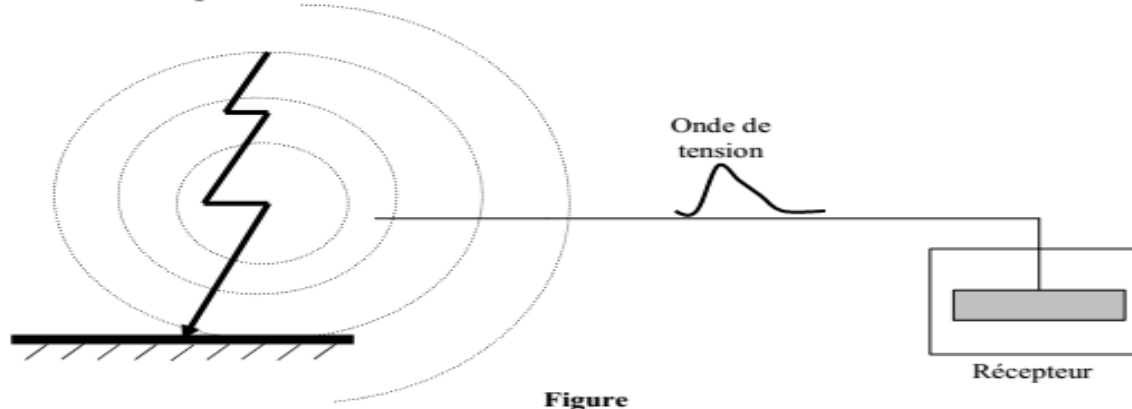
Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300Ω , l'onde de tension atteindra 1500 kV.



Figure

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

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 $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$). 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

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.

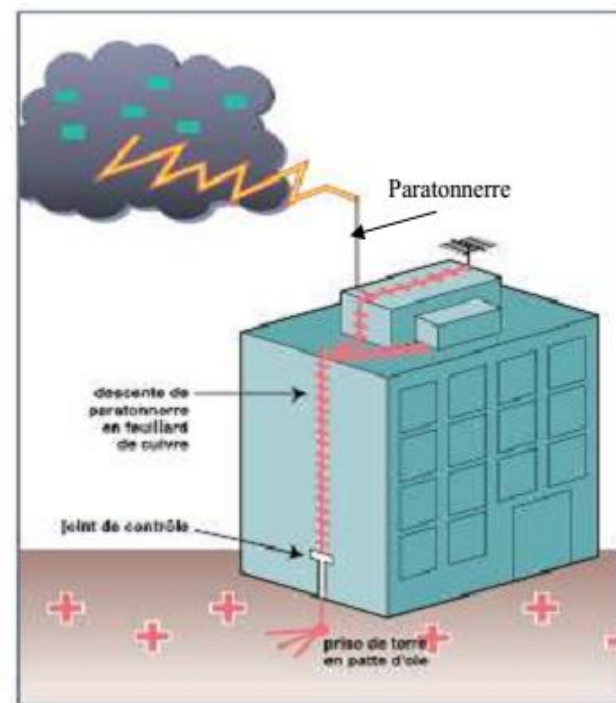
1) Paratonnerre

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 .

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.



Principe du paratonnerre à tige.

2) Eclateur

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.).

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.

Isolateur à cornes

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.

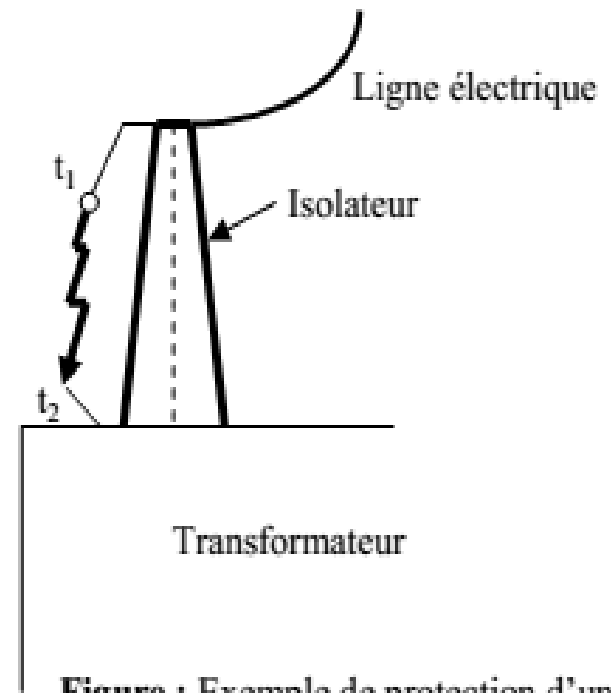


Figure : Exemple de protection d'un Transformateur par éclateur à tiges

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.

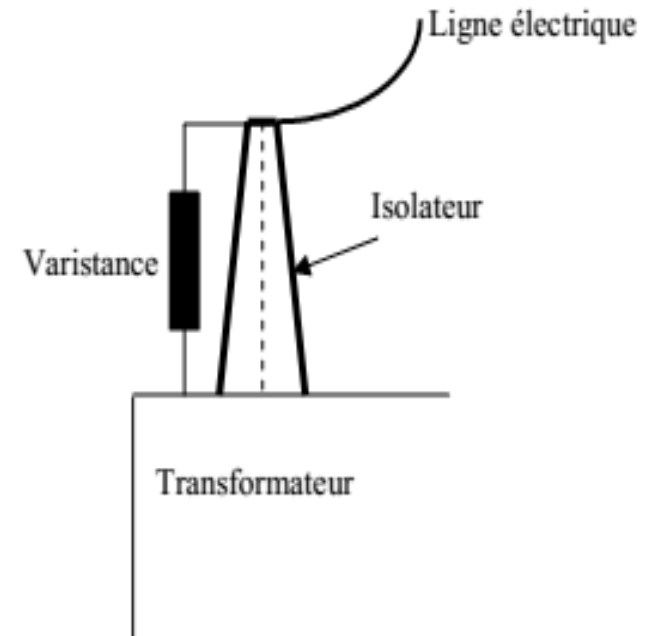
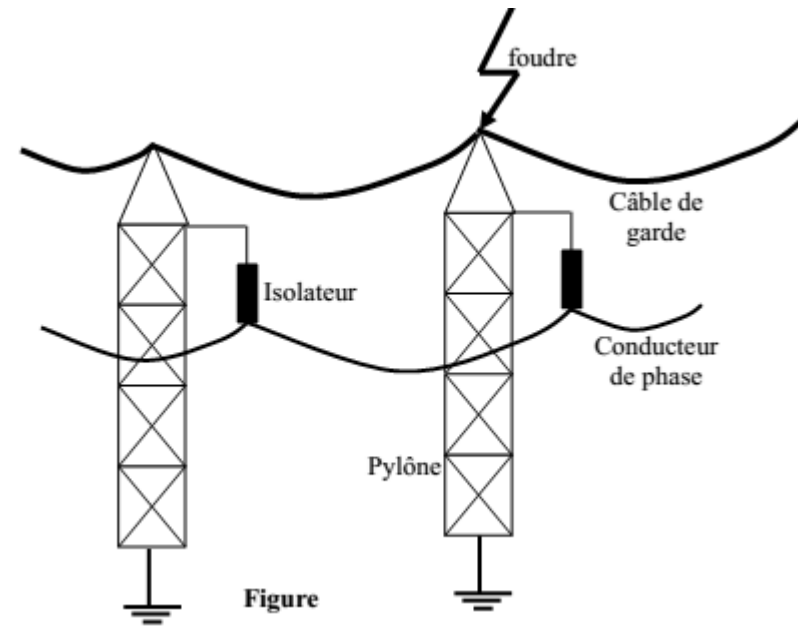


Figure : exemple de protection d'un Transformateur par varistance

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 cops 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.

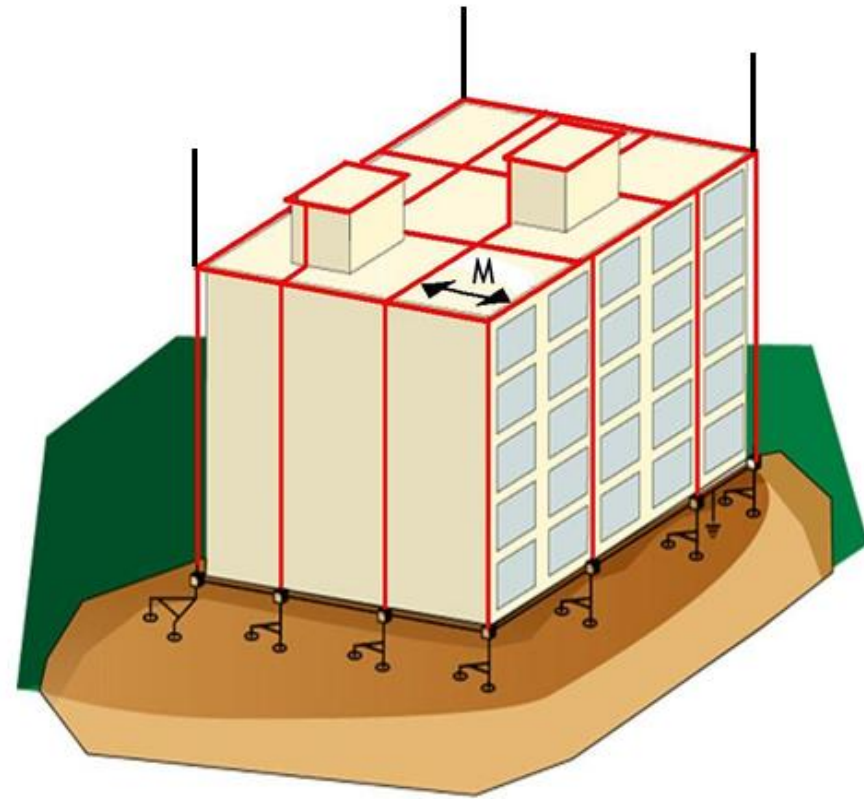


Remarques :

- 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.

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.



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 pattes 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

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.