

## 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.

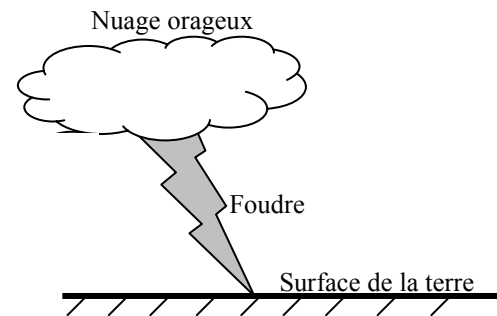


Figure 1

- 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.

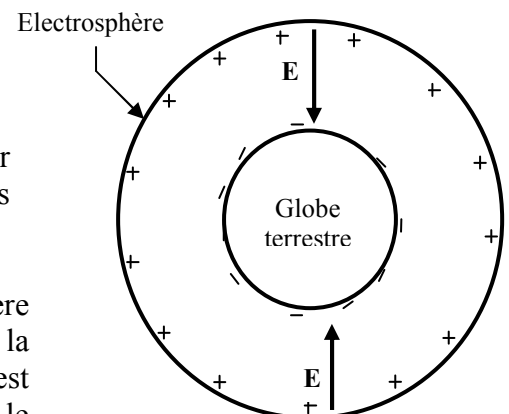


Figure 2 : Condensateur terrestre

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 :

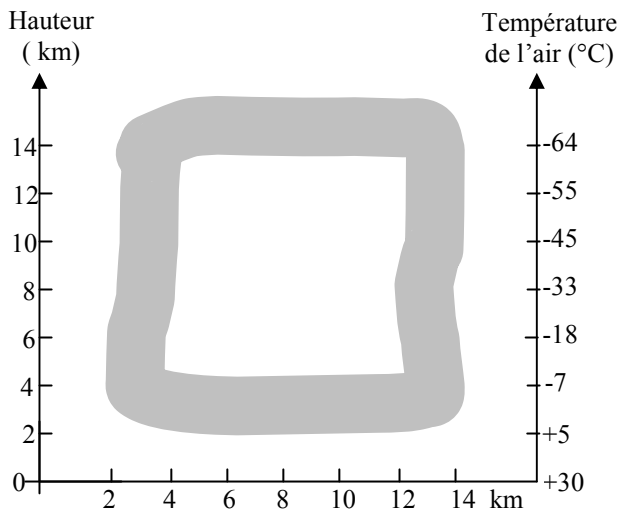


Figure 3 : Constitution du nuage

### 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.

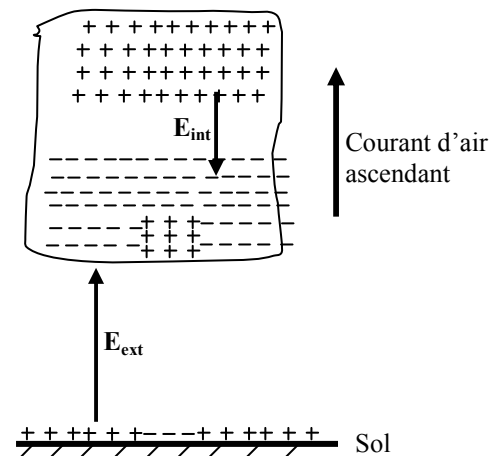


Figure 3

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 x 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) :

- a) une demi-sphère :  $E_p \approx k E_i$  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.

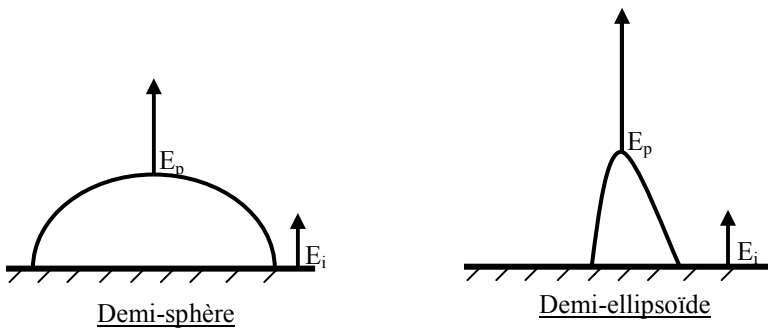
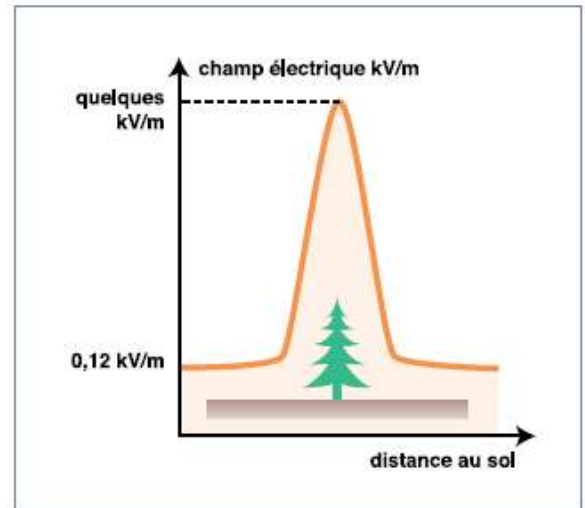


Figure 5



### 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.

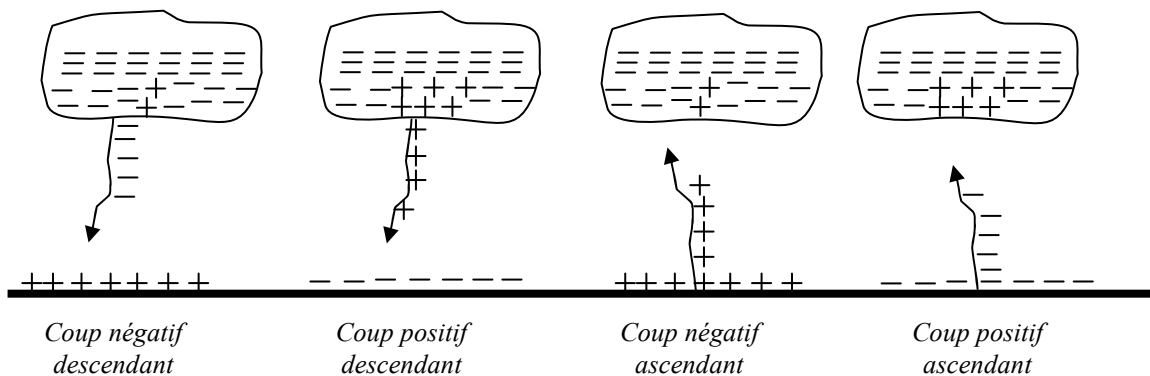


Figure 6

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.

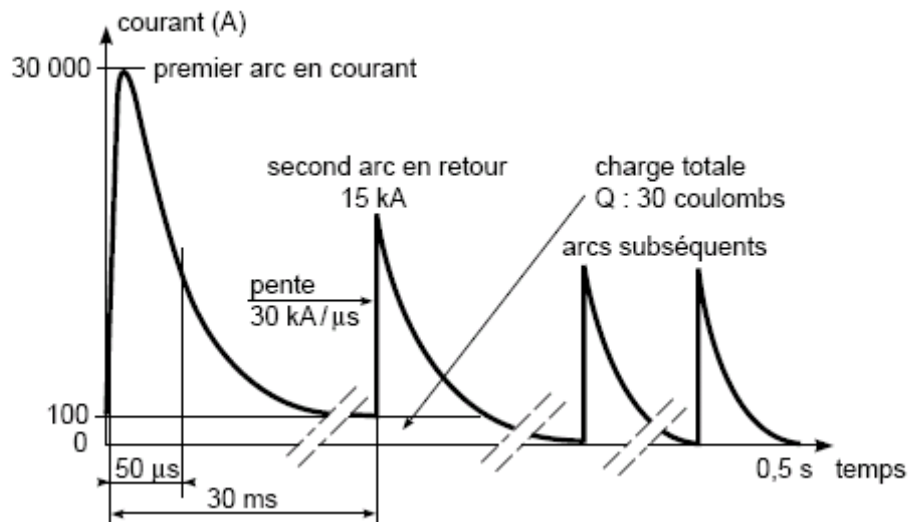


Figure 4 : forme du courant de la foudre

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.

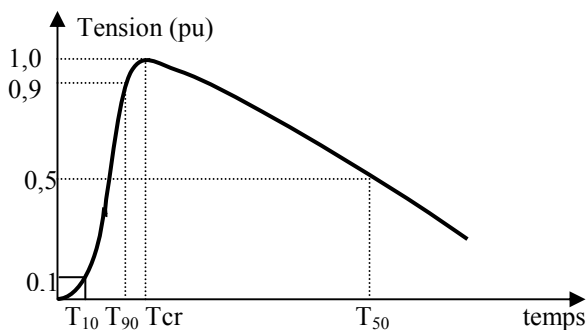


Figure 5 : Onde de choc conventionnelle

- Coup de Foudre négatif :

$T_{\text{front}} (90\%) = 1 \text{ à } 10 \text{ µs}$ ,

$T_{\text{queue}} (50\%) = 40 \text{ à } 200 \text{ µs}$ .

- Coup de Foudre positif :

$T_{\text{front}} (90\%) = 10 \text{ à } 100 \text{ µs}$ ,

$T_{\text{queue}} (50\%) = 500 \text{ à } 1000 \text{ µs}$ .

### 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

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

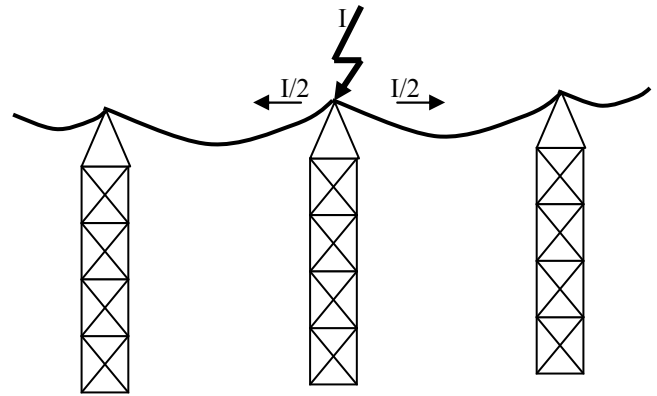
### V.2) Effets électrodynamiques

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.

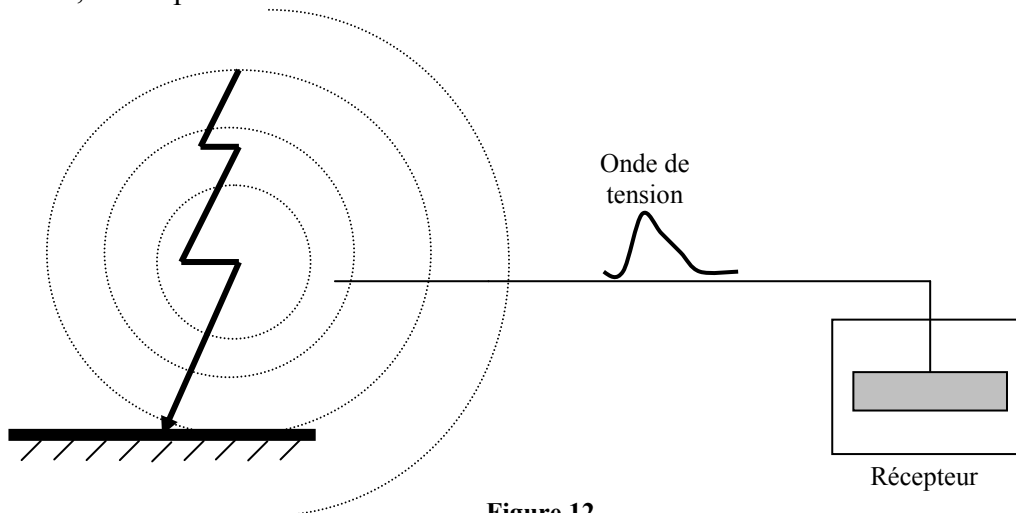
Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300Ω, l'onde de tension atteindra 1500 kV.



**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/μs). 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.

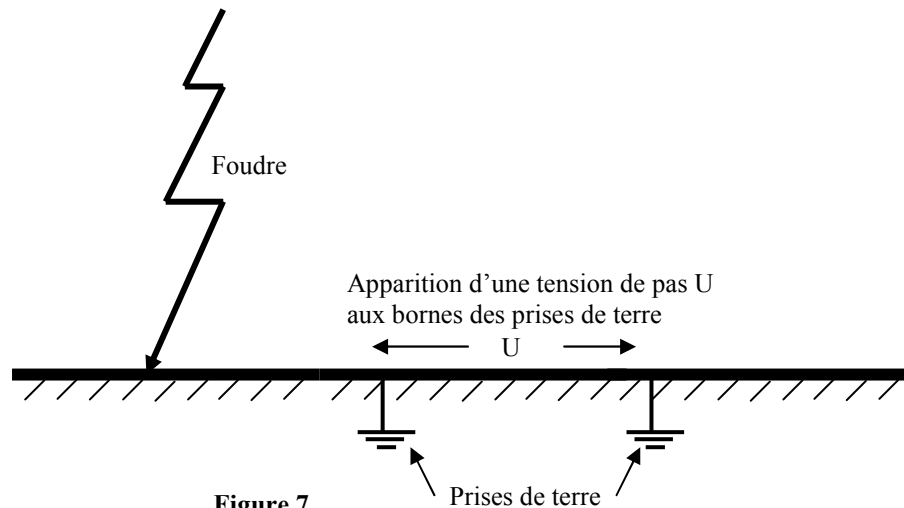
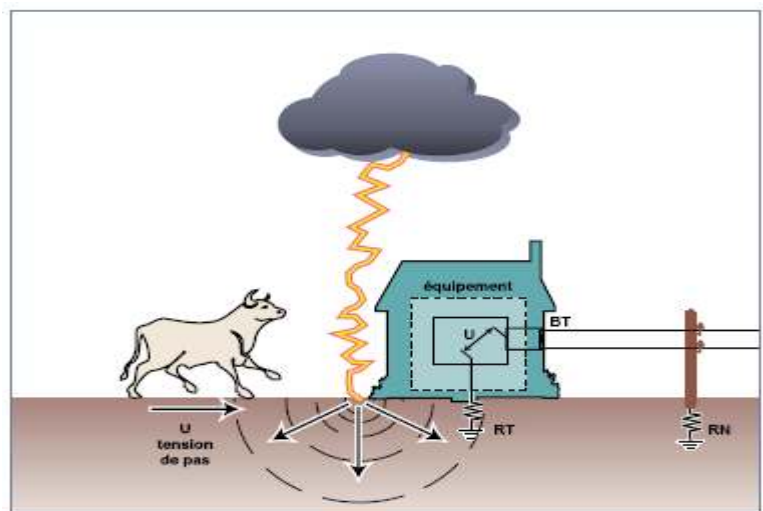


Figure 7

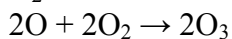
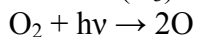
Tension de pas : la distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée *Tension de pas*. Les charpentes métalliques 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 amorçages d'arc.

Remarque : C'est ce phénomène qui explique souvent le foudrolement 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.

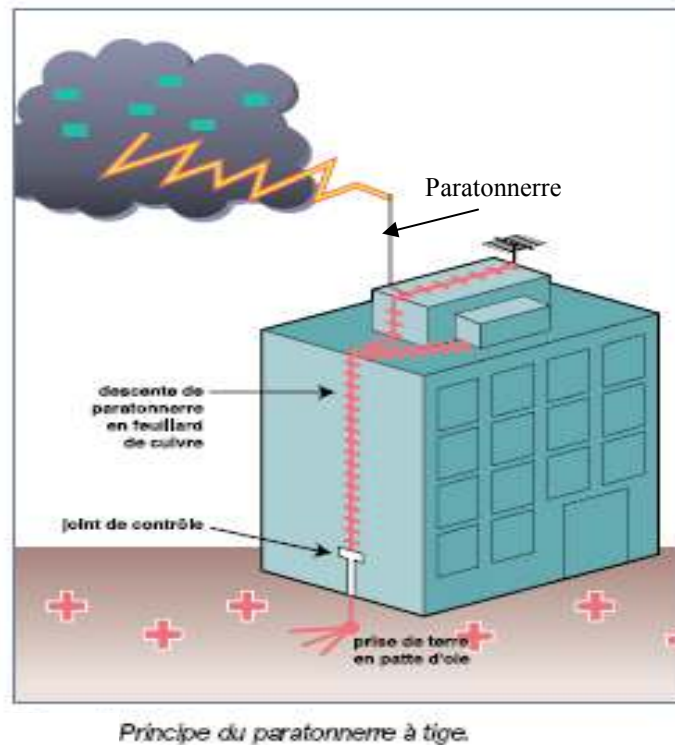
### VI.1) Paratonnerre

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 sûr 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 :

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

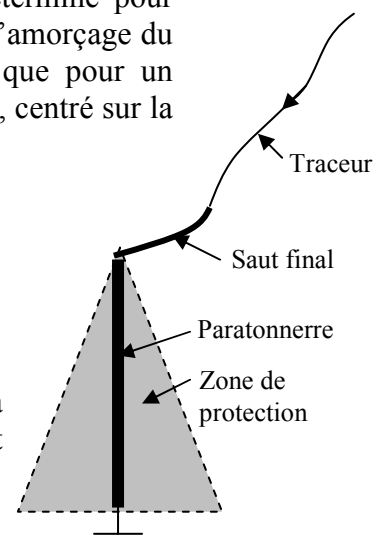
$I$  : courant de crête de la foudre.

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

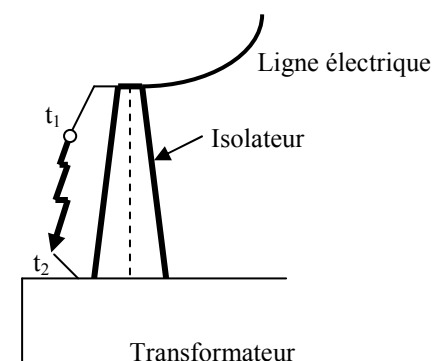


#### VI.2) Eclateur

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.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) :

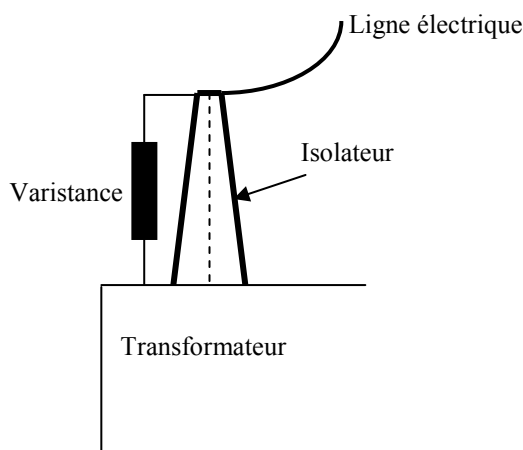
L'arc qui apparaît entre les cornes de l'isolateur coupe l'onde de tension en déviant le courant vers la terre à travers le pylône.

### VI.3) PARAFOUDRE (Varistance)

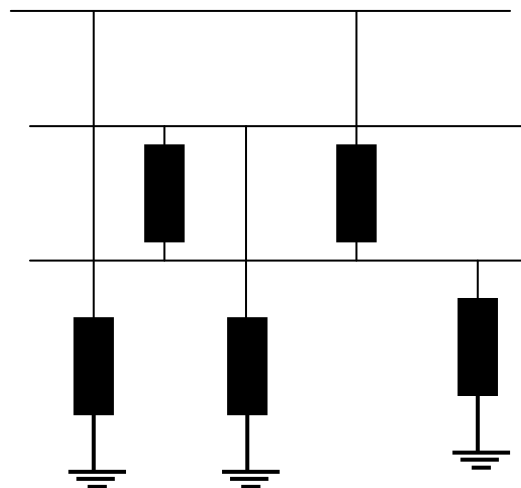
#### a) Principe de fonctionnement :

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

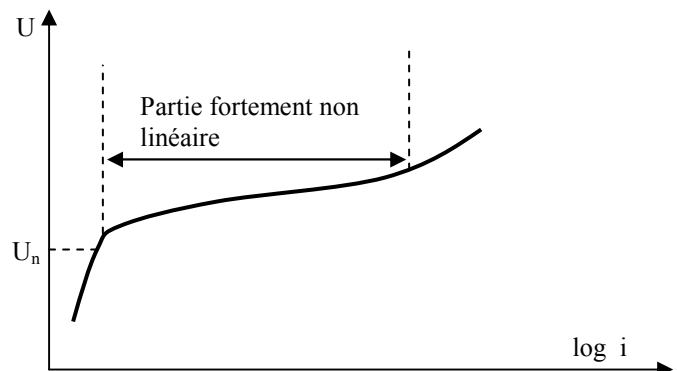


**Figure :** Protection du réseau par des varistances

#### 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 ( $< 0,1 \mu s$ ).



**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.

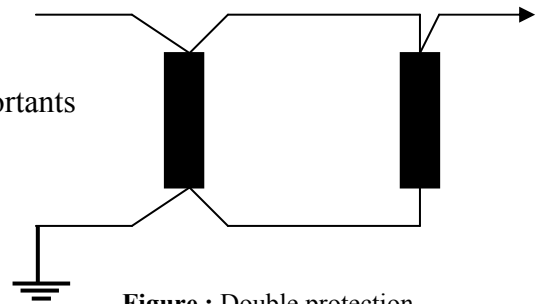
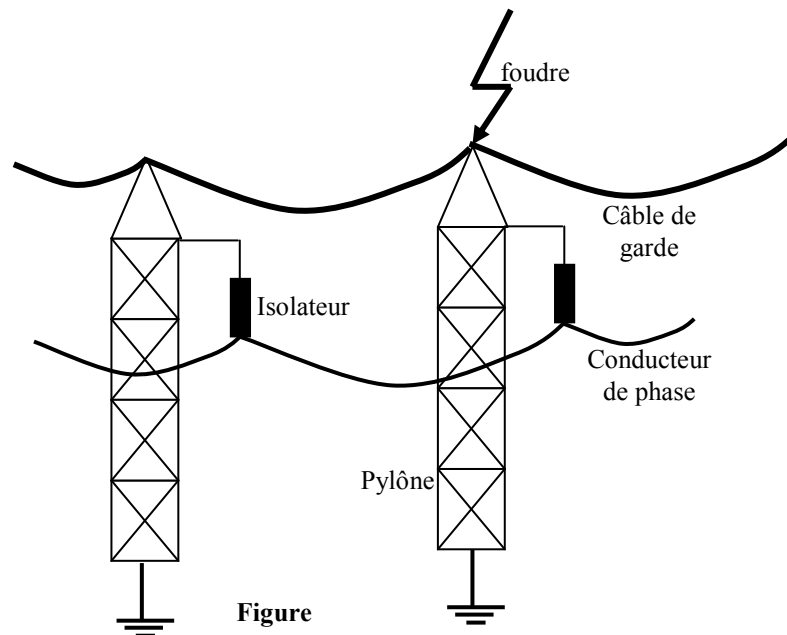


Figure : Double protection

**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 sûr 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.



Figure

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.

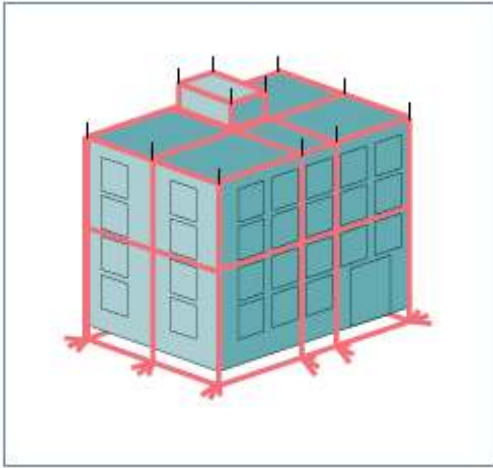
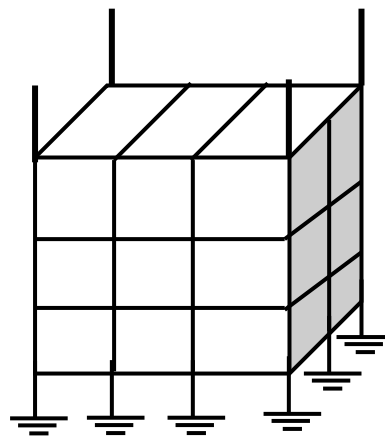


Figure 8. Principe d'une cage maillée (cage de Faraday).



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 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.

### 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 matériels

- a) Tenue aux chocs très élevée (compteurs, télémesure...) : 6 kV
- b) Tenue aux chocs élevée (disjoncteur, contacteur...) : 4 kV
- c) Tenue aux chocs moyenne (appareillage électrodomestique...) : 2,5 kV
- d) 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<sup>2</sup> 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.