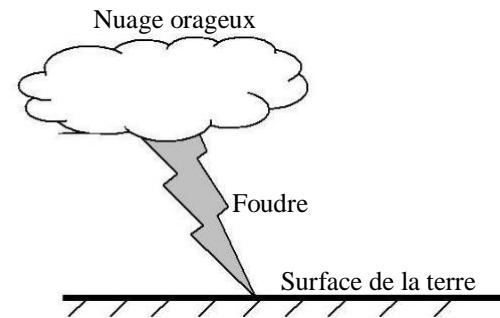


LA Foudre

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.

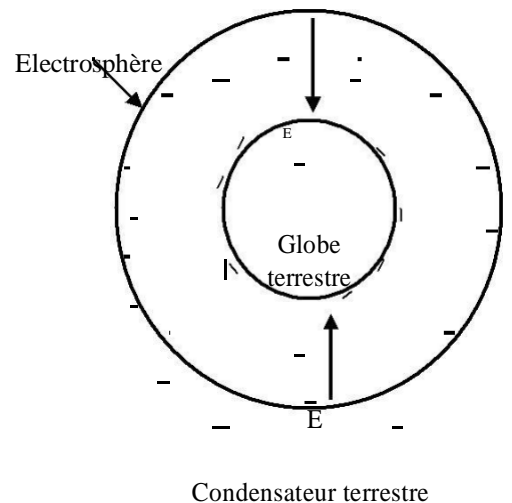
1. ÉLECTRICITÉ ATMOSPHERIQUE

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

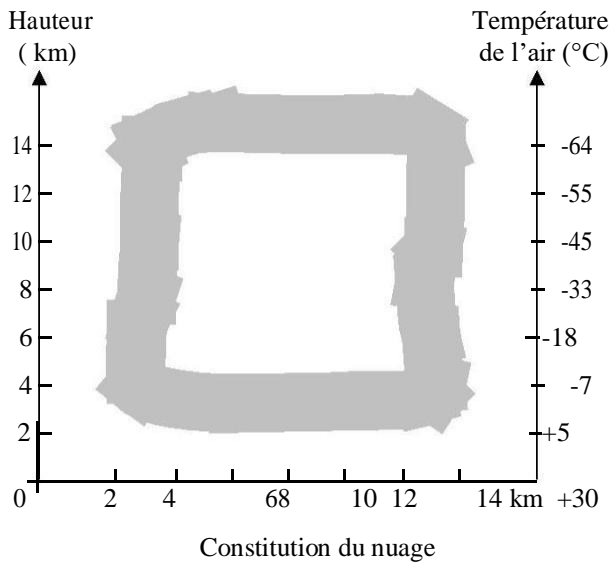
$R_t = 6367$ km rayon de la terre.

$R_e = (6367 + 100)$ km = 6467 km est le rayon de l'électrosphère. Dans ce cas, nous trouvons

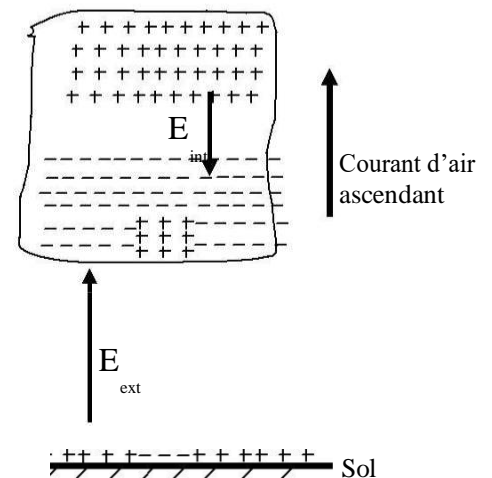
$C = 46$ mF.

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.

2) Par temps nuageux



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.



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 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.

2. Champ électrique (par temps nuageux)

1) Module et sens du champ

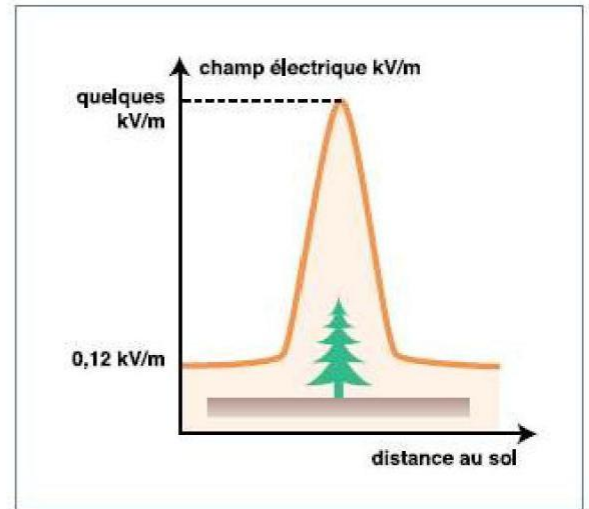
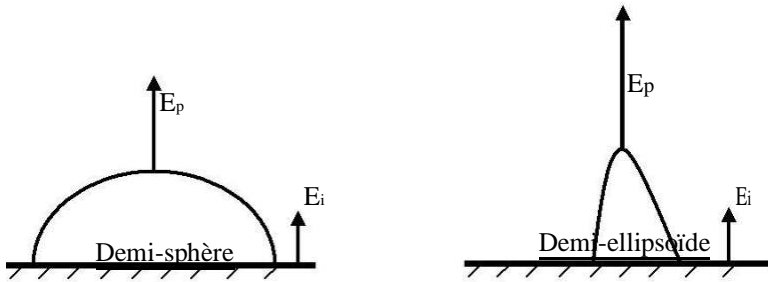
Le champ électrique au sol qui était par temps normal de 120 V/m et dirigé vers la terre, avec l'arrivée du nuage chargé électriquement, il s'inverse et peut atteindre 15 à 20 kV/m. Au droit du nuage (sous le nuage), le module du champ atteint la valeur maximale $E_{max}=20$ kV/m, faisant apparaître 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.5) :

- 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.



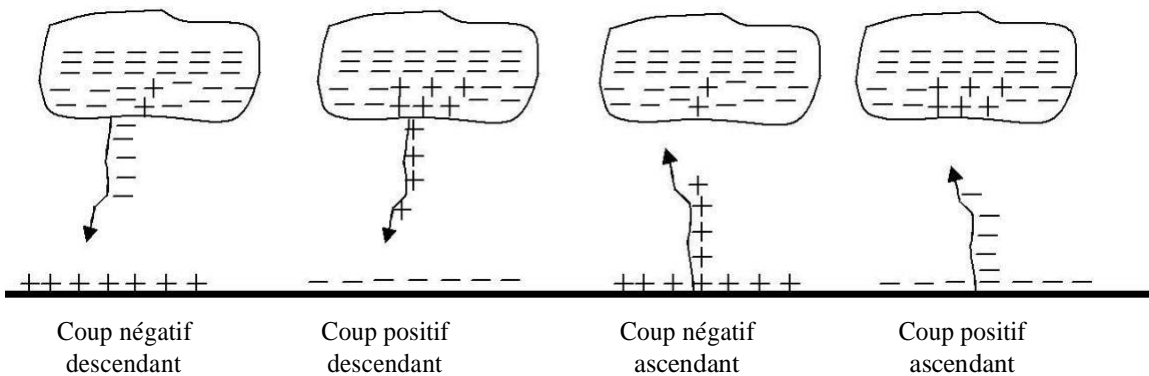
Classification Des Coups De Foudre

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.



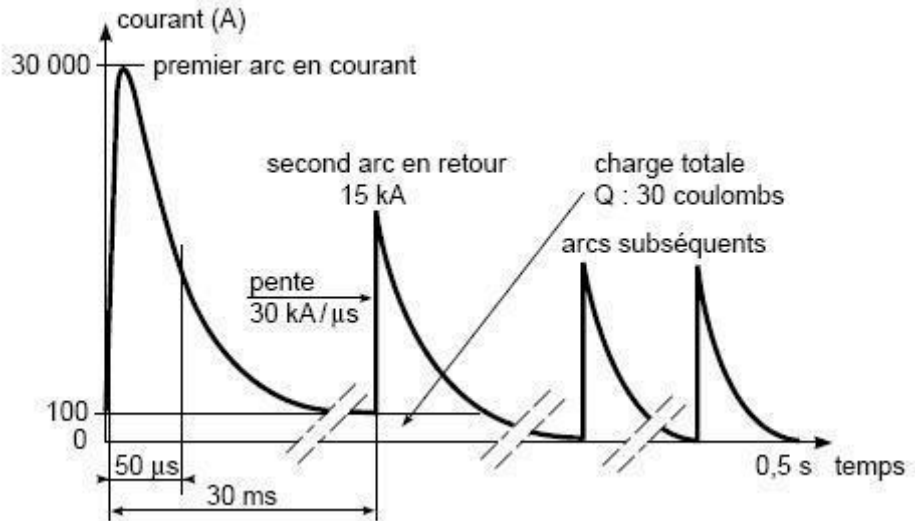
3. Courant De La Foudre

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.



Forme du courant de la foudre

4. Effets De La Foudre

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.

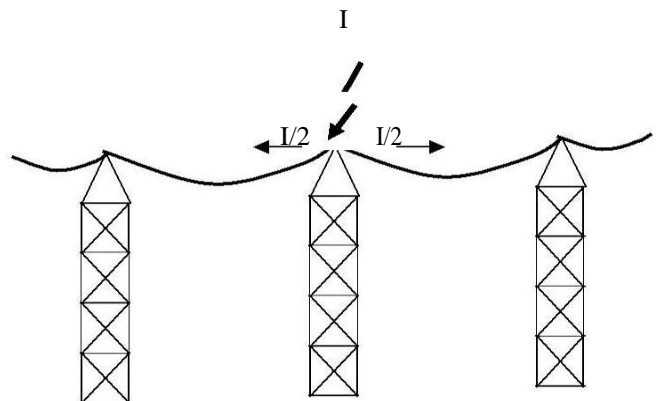
2) Effets électrodynamiques

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

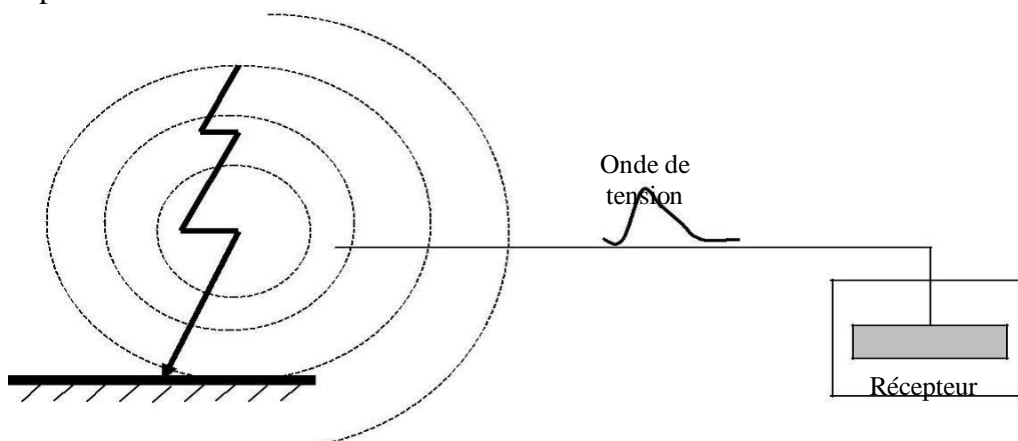
L’impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui se propage. Cette onde, qui est amortie par l’effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l’isolateur à cornes soit par les moyens de protection au poste.

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



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.



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/Qs). 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 :

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

Avec

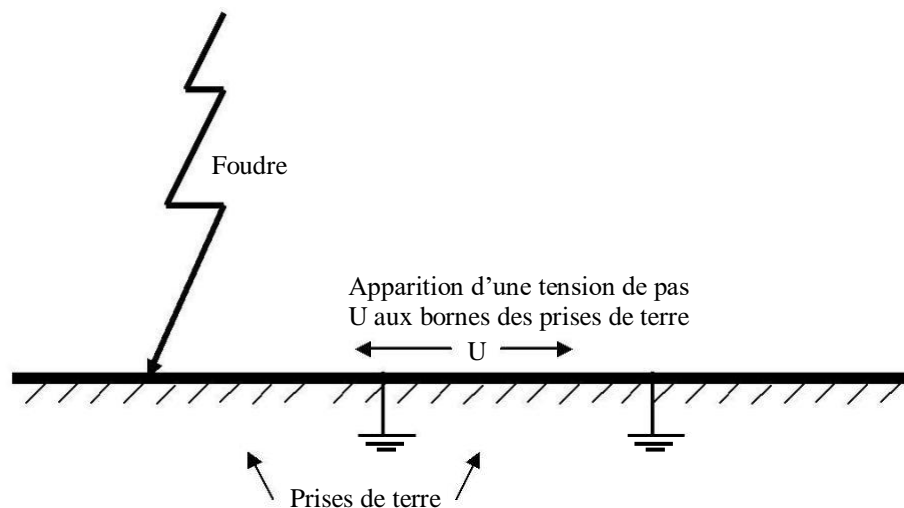
$$Z_0 = (0,25/\pi) (\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}) \approx 30$$

R h : hauteur du conducteur

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

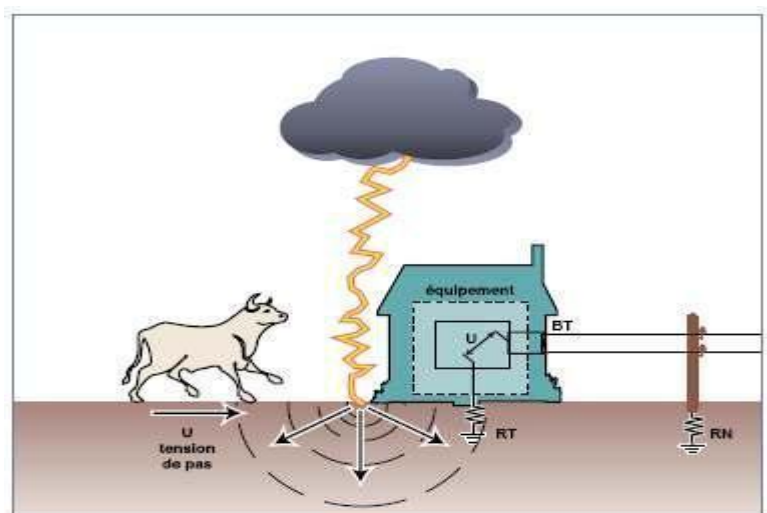
5) Montée en potentiel de la prise de terre

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.



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 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.



6) Effet électrochimique

L'action de la foudre contribue à la création d'ozone

(O₃) d'après la réaction chimique suivante :

