



Frédéric Elie on
ResearchGate

Foudre et tension de pas

Frédéric Elie

novembre 2005

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : La foudre est dangereuse non seulement parce qu'elle risque de tomber directement sur un individu ou une installation, mais aussi parce que, lorsqu'elle tombe au voisinage d'une personne celle-ci peut être électrisée par la tension de pas que la foudre engendre. La tension de pas existe aussi lorsqu'un conducteur sous tension est tombé à terre. Elle est liée au fait qu'une source de courant créée en un point d'impact est responsable d'un champ électrique au sol, donc d'une tension, qui varie en fonction de la distance à la source : entre deux points différents en contact avec le sol, séparés d'une distance appelée pas, existe donc une différence de potentiel, ou tension de pas, d'autant plus élevée que le pas est important. Lors d'un foudroiement la tension de pas peut atteindre plusieurs milliers de volts et donc être dangereuse pour le corps humain par suite du courant électrique dont il devient le siège. Dans cet article, je présente succinctement le phénomène de la foudre, ses effets et les protections requises, ainsi qu'une expérience pour mettre en évidence la tension de pas, dont le principe est très simple mais la mise en œuvre délicate...

SOMMAIRE

- 1 – La foudre
 - 1-1 – Configuration orageuse
 - 1-2 – Mécanisme de la foudre
 - 2 – Tension de pas
 - 2-1 – Origine et valeur de la tension de pas
 - 2-2 – Tentative d'une expérience
 - 3 – Application de la tension de pas à la prospection électrique des sols
 - 4 – Recommandations en présence d'orage et de foudre
 - 4-1 - Si l'on se trouve à terrain découvert, dans un champ
 - 4-2 - Dans les maisons
 - 4-3 - En montagne
 - 4-4 - En mer ou sur un lac
 - 5 – Effets de la foudre sur les installations électriques
 - 5-1 – Effets de surtension conduite (coup de foudre direct)
 - 5.2 – Effets de surtension induite (coup de foudre indirect)
 - Annexe 1 : loi de Child-Langmuir
 - Annexe 2 : distance d'amorçage
 - Annexe 3 : calcul de la tension de pas
 - Annexe 4 – modèle simplifié de propagation d'une surtension dans une ligne électrique
- NOTES
- Bibliographie

1 – La foudre

1-1 – Configuration orageuse

La Terre est le siège de phénomènes électriques générés par l'électrosphère, la couche de l'atmosphère, située à 50 km d'altitude, chargée en permanence d'électricité. L'origine de cette charge électrique est dans le rayonnement cosmique provenant du soleil et ionisant les atomes constitutifs du gaz de l'atmosphère.

Plus exactement l'**électrosphère** est la première couche de l'ionosphère (ou couche D) ; elle est suffisamment conductrice pour être portée à un même potentiel (qui est positif). La densité surfacique de charge de l'électrosphère ayant pour valeur $\sigma = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ C/m}^2$, il est facile d'en déduire le champ électrique moyen qu'elle crée entre elle et le sol par la formule :

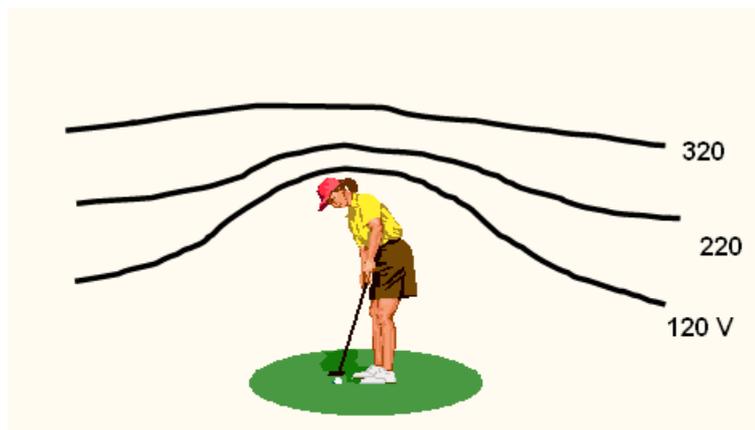
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = 130 \text{ V/m}$$

où $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ est la permittivité du vide. Le sol est également une surface équipotentielle (le potentiel étant négatif). Pour un homme debout de 1,80m de taille il existe donc entre le sommet de sa tête et ses pieds une différence de potentiel de 230V. A cette tension, la résistance du corps humain, à sec, est d'environ 1500 Ω , donc le corps humain est assez bon conducteur, suffisamment en tous cas pour que chacun de ses points soit au même potentiel électrique (celui de la terre): en conséquence, le corps humain déforme les lignes équipotentiels du champ électrique atmosphérique et ne peut donc pas être le siège d'électrisation.

Ainsi, heureusement, les 230V de différence de potentiel d'origine atmosphérique sont sans danger pour l'homme. Attention ! ceci ne veut pas dire que lorsque le corps humain est au contact d'une source de 230V cela est sans danger pour lui : la situation est différente parce que, dans ce cas, la source et le corps humain sont à des potentiels différents. Un courant d'intensité égale à $230/1500 = 153 \text{ mA}$ traverse le corps humain et cette valeur est du même ordre que celle provoquant la fibrillation cardiaque ! (cf ; mon article sur la sécurité électrique, référence A).

Remarquons qu'un individu qui descend du sommet de la Tour Eiffel jusqu'au rez-de-chaussée connaît une variation de potentiel électrique valant $130 \times 300 = 39 \text{ kV}$. Comme il est relativement conducteur il reste au potentiel du sol tout au long de sa descente et ne ressent donc rien à l'arrivée. Sauf s'il est vêtu de façon à être un isolant (chaussures, vêtements synthétiques) : dans ce cas il peut ressentir une petite secousse électrique, surtout s'il est descendu rapidement par un ascenseur.

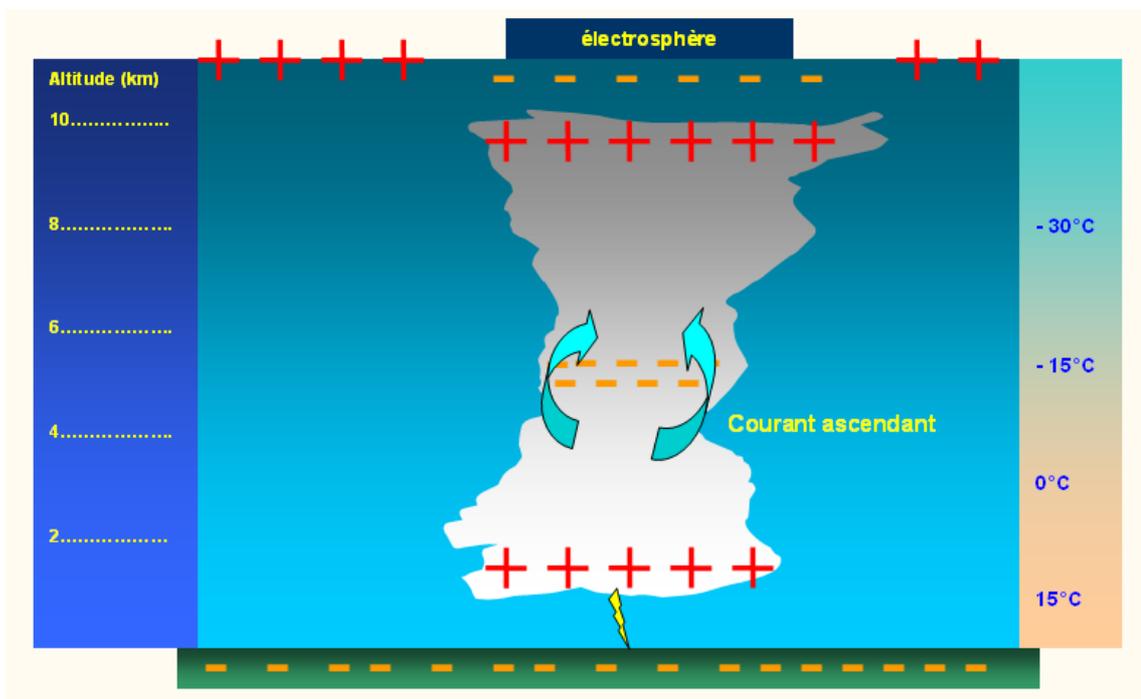
S'il s'agit d'un parachutiste relativement conducteur, il sera à chaque instant de sa descente au potentiel correspondant à l'altitude où il se trouve, et il atteindra le sol sans secousses électriques.



La couche électrosphère et le sol forment les électrodes (respectivement positives et négatives) d'un énorme condensateur dont le diélectrique est la couche d'atmosphère comprise entre elles. Sous conditions normales l'air est isolant, mais il cesse de l'être s'il est soumis à un champ électrique supérieur à la valeur critique $E_c = 30 \text{ kV/cm}$ (champ de rupture diélectrique de l'air). Dans ce cas il y a décharge du condensateur : un transfert de charge s'effectue entre les deux électrodes au travers du diélectrique.

Par temps orageux la configuration électrique de l'atmosphère comprise entre le sol et l'électrosphère est modifiée. Les nuages, généralement des cumulonimbus, deviennent des éléments électriques tripolaires, c'est-à-dire constitués de trois zones différentes de charges (voir figure) :

- la zone située à la base du nuage chargée positivement de quelques coulombs ;
- la zone centrale du nuage, vers 6 km d'altitude, chargée négativement, épaisse de 100 m environ ;
- le sommet du nuage, située à une altitude pouvant atteindre 10 km, chargée positivement.



Cette distribution résulte d'un mécanisme que décrit assez bien le **modèle de Wilson** :

- Dans un nuage les gouttes d'eau coexistent avec les ions libres (particules chargées, y compris des électrons). Le déplacement des gouttes est plus lent que celui des ions. Les ions forment des noyaux de condensation pour la vapeur d'eau du fait de la polarité des molécules d'eau : ils vont donc devenir plus lourds car associés à ces molécules d'eau, formant ainsi des gouttelettes. Au final, ces gouttelettes, formées à partir des ions et des molécules d'eau, sont plus lentes que les gouttes d'eau ordinaires.
- Par influence électrique, les gouttes d'eau se chargent positivement sur leurs faces inférieures, dirigées vers la terre de charge négative, et par suite, négativement sur leurs faces supérieures.
- Comme elles tombent plus vite que les gouttelettes formées des ions associées aux molécules d'eau, les gouttes d'eau vont repousser par leurs faces inférieures les gouttelettes de charge positive et attirer celles de charge négative.
- Il en résulte que les gouttes d'eau se chargent négativement de plus en plus au cours de leur descente vers la terre. A la partie inférieure du nuage on trouve alors une grande concentration de gouttes négatives, tandis que les ions positifs restent dans la zone située au-dessus.

- Par influence, le sol situé au-dessous du nuage se charge positivement. Cependant, il est très fréquent que le bas du nuage, au lieu d'être négatif, devienne positif. Ceci arrive lorsque les parties chargées différemment de la goutte d'eau se séparent et lorsque, simultanément, un courant ascendant (vitesse 25 m/s !), véhiculant un air chargé négativement, éloigne les gouttes négatives vers le centre du nuage, laissant les gouttes positives dans la zone inférieure. Le nuage devient alors positif.

- Dans le nuage l'eau est non seulement à l'état liquide mais aussi à l'état solide (glaçons, grêlons). Les particules d'eau à l'état solide tombent plus vite que les gouttes et modifient leurs charges électriques au cours de leurs rencontres avec les gouttes et les ions. La température est déterminante pour ces modifications : pour $T < -15^{\circ}\text{C}$ l'eau à l'état solide se charge négativement, et pour $T > -15^{\circ}\text{C}$ elle se charge positivement. Donc les particules solides d'eau qui tombent depuis le sommet du nuage (10 km) transitent d'une zone où $T < -15^{\circ}\text{C}$ à une zone, située au bas du nuage, où $T > -15^{\circ}\text{C}$, donc se chargent positivement. Dans la zone de -15°C , d'altitude approximative 6 km, les particules solides d'eau de charge négative s'accumulent et ne descendent pas plus bas : c'est ce qui explique l'existence de cette tranche de nuage de charge négative.

- Que le bas du nuage soit chargé positivement ou négativement, l'accumulation des charges y est telle que, entre le nuage et le sol s'installe une différence de potentiel très élevée : 20 à 100 MV. Si le nuage est à 2 ou 3 km du sol cela représente un champ électrique de l'ordre de 10 à 50 kV/m. Cette valeur est bien en-dessous de la tension de rupture diélectrique de l'air. Cependant le champ électrique peut devenir beaucoup plus intense à cause des aspérités du terrain (arbres, sommets montagneux, constructions, etc) qui sont le siège d'effets de pointe ou de couronne : le champ peut devenir plusieurs centaines de fois supérieur au champ électrique normal et donc dépasser la tension critique de rupture diélectrique. La décharge se produit alors : c'est le coup de foudre, selon un mécanisme assez complexe.

Remarque : pouvoir des pointes et effet de couronne. Le potentiel électrique V d'un conducteur de charge Q et de rayon de courbure R et le champ électrique en son voisinage E sont donnés par la loi de Coulomb :

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} \quad , \quad E = \frac{V}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$$

Ainsi, si deux conducteurs sont au même potentiel V c'est celui possédant le rayon de courbure le plus petit (donc plus pointu) qui développera un champ électrique plus intense. Entre un objet de rayon $R = 10$ cm et un autre de rayon $R' = 1$ mm soumis au même potentiel, il existera un rapport 100 entre les champs électriques développés en leurs voisinages ! C'est le pouvoir des pointes : il explique que la foudre tombe préférentiellement sur les objets pointus (clochers, arbres, mâts...) puisqu'en leur voisinage le champ électrique dépasse largement le champ de rupture diélectrique de l'air. Si de plus les pointes sont portées à un potentiel important, le champ électrique peut entraîner l'ionisation de l'air environnant, accompagné de crépitements et d'effluves lumineuses bleutées : c'est l'effet de couronne. Un exemple typique est le feu de Saint-Elme au sommet des mâts de navires.

1-2 – Mécanisme de la foudre

Il se déroule en plusieurs étapes. On suppose que la base du nuage est de charge négative et que la terre est chargée positivement (80 à 90% des éclairs sont négatifs, cf référence B).

1 - Le processus commence par une première décharge, appelée **précurseur**, par laquelle les charges de mobilité élevée (comme les électrons) s'écoulent. Avec l'hypothèse adoptée ci-dessus (nuage chargé négativement), les charges négatives libres proviennent du nuage et s'écoulent dans la direction de la terre dans ce premier précurseur : le processus est descendant. Le précurseur a la forme d'un canal d'air ionisé par le passage des électrons qui avance à la vitesse d'environ $c/5$ (c est la vitesse de la lumière). Sa progression s'arrête au bout

de 30 m parcourus car dans ce premier temps les charges libres négatives n'alimentent plus le canal.

2 – Comme le canal du précurseur contient de l'air fortement ionisé, celui-ci est un excellent conducteur qui permet à de nouvelles charges libres issues du nuage de circuler. Le précurseur progresse alors de nouveau et atteint 50 m en tendant vers des points situés au sol où le champ électrique est le plus intense.

3 – Le canal du précurseur restant fortement ionisé donc bon conducteur, de nouvelles charges issues du nuage y circulent, la précurseur progressant vers le sol encore un peu plus. Lorsque le précurseur est assez proche du sol, le champ électrique qu'il crée est suffisamment intense pour faire apparaître, par l'effet du pouvoir des pointes, des étincelles partant du sol (effluves). Et ainsi de suite jusqu'à ce que la distance entre le précurseur et le sol permette la rencontre entre les effluves issues de la terre et le précurseur issu du nuage. Cette distance est appelée distance d'amorçage, on montre qu'elle est liée à l'intensité du courant parcourant le précurseur selon la formule :

$$D=10 I^{2/3} , \text{ où } D \text{ est en m et } I \text{ en kA}$$

(voir [annexe 2](#)). Par exemple : pour $I = 30 \text{ kA}$, on a $D = 94\text{m}$. Entre le nuage et la terre un canal continu et conducteur est alors formé.

4 – La décharge entre la terre et le nuage s'effectue alors par le dernier précurseur qui les relie (ou traceur continu). Les charges du nuage et celles du sol situé sous lui se rencontrent et se neutralisent. La décharge s'arrête quelques millisecondes (plus de charges) puis reprend parce que la base du nuage et le sol se sont rechargées par apport de charges des zones avoisinantes. La décharge recommence, et cette succession d'échanges se réalise plusieurs fois jusqu'à décharge complète du nuage (la terre est alors devenue chargée négativement). On compte jusqu'à 8 décharges par 100 ms pour les coups de foudres les plus intenses.

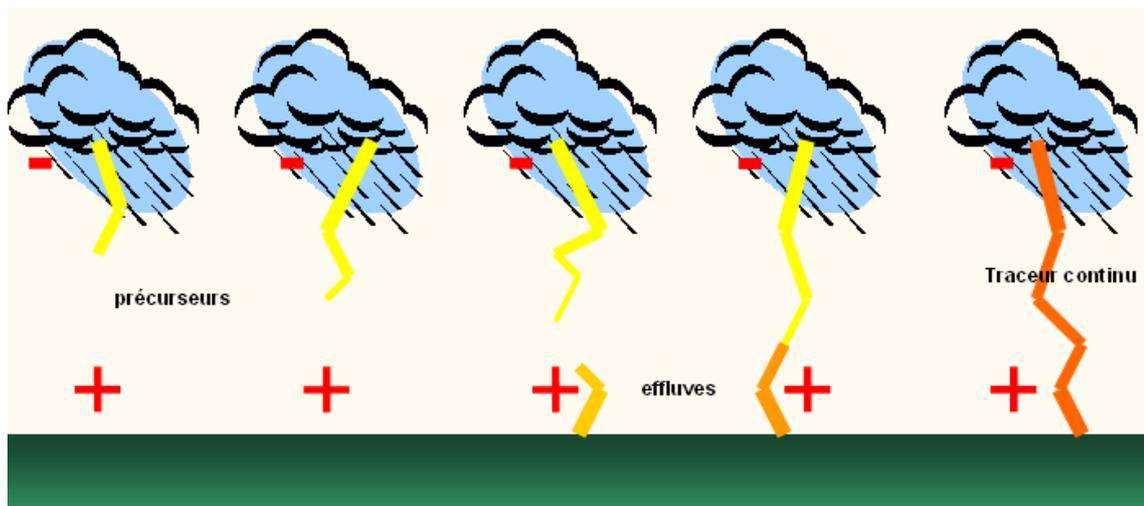
5 – Quelques valeurs moyennes caractérisant la foudre :

- courant du traceur : 25000 à 75000 A
- durée moyenne d'un arc : 30 ms
- durée moyenne d'un éclair (décharge totale) : 100 à 600 ms
- nombre moyen de décharges lors d'un éclair : 2 à 5
- différence de potentiel nuage-terre moyenne : 20 MV à 100 MV
- énergie libérée moyenne lors de la décharge totale : 300 kWh, entraînant l'échauffement du traceur (température moyenne de l'éclair : 15000°C), la dilatation très rapide de l'air responsable d'ondes de choc, source du tonnerre.
- un coup de foudre correspond en moyenne à un transfert de charge de 15 à 70 C entre la terre et le nuage.
- le canal ionisé n'obéit pas à la loi d'Ohm : la relation entre l'intensité du courant qui le traverse I et la différence de potentiel V dont il est le siège suit une loi du type :

$$I = a V^{3/2}$$

où a est une constante. Cette loi est de la même forme que celle de Child-Langmuir obtenue pour les décharges électroniques dans un tube à vide (voir une démonstration en [annexe 1](#) pour un tube de décharge à vide).

On trouvera en référence B une description plus détaillée de la connexion de l'éclair au sol, et en référence C un excellent article de l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) traitant du risque de la foudre et des moyens pour s'en prémunir.



6 – nombre moyen de coups de foudre par seconde sur la Terre :

La couche de l'atmosphère comprise entre l'électrosphère, située à 50 km d'altitude, et le sol forment les armatures d'un condensateur sphérique dont le diélectrique (l'air atmosphérique) est soumis à un champ électrique moyen $E = 130\text{V/m}$. On peut alors calculer la charge développée sur chacune des armatures par la relation :

$$Q = \epsilon_0 E S = 4 \pi R^2 \epsilon_0 E$$

où $S = 4\pi R^2$ est la surface de la Terre de rayon $R = 6400 \text{ km}$. On obtient $Q = 592000 \text{ C}$. Sur tout le pourtour de la Terre des décharges électriques (foudres) se produisent avec une intensité moyenne I . Celle-ci est égale au taux de variation de charges par unité de temps (1 seconde) : $I = dQ/dt$. Or on connaît la densité surfacique du courant de décharge moyen au niveau du sol : $J = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ A/m}^2$. Celle-ci est définie par :

$$I = \int J dS = 3,5 \cdot 10^{-12} \times 4\pi \times (6400000)^2 = 1801,5 \text{ A}$$

Sachant qu'un coup de foudre en moyenne véhicule une charge de 20 C on en déduit que, par seconde il y a un nombre de coups de foudre égal à $1801,5/20 = 90$.

Conclusion : chaque seconde, dans le monde, il y a 90 coups de foudre en moyenne. Ils contribuent à équilibrer les charges entre la terre et l'électrosphère. En leur absence le potentiel électrique entre ces deux armatures augmenterait indéfiniment (sous l'action du rayonnement cosmique) et la vie finirait par être impossible à la surface de la Terre.

2 – Tension de pas

2-1 – Origine et valeur de la tension de pas

Lors de l'impact de la foudre sur un objet c'est l'intensité du courant I qui est imposée, et la tension U qui se développe à ses bornes dépend de sa résistance R selon $U = RI$. L'énergie reçue par l'objet lors du coup de foudre est $W = RI^2t$: elle est d'autant plus élevée (donc destructrice) que la résistance est élevée et la durée allongée. Un objet bon conducteur de l'électricité (R faible) ne subira donc pas de dégâts importants lors du coup de foudre. C'est le cas des paratonnerres, des plantes riches en sève, habitats et installations bien mis à la terre ou construits sur un sol de faible résistivité (fondations non empierrées), etc. Pour des résistances élevées le coup de foudre peut provoquer des incendies et des brisures par électrostriction (l'électrostriction est l'apparition de contraintes mécaniques élevées sous l'action d'un champ électrique intense : pour un isolant la contraction relative en volume $\Delta V/V$ est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique $\sim \epsilon E^2$).

A l'inverse, lorsque c'est la tension qui est imposée aux bornes d'un objet, l'intensité qui le

traverse dépend de sa résistance selon $I = U/R$. L'énergie reçue est cette fois inversement proportionnelle à la résistance : $W = U^2 t / R$; elle est d'autant plus dangereuse que la résistance est faible. Cette situation se présente par exemple avec la tension de pas : la tension imposée est celle qui se développe entre les points de contact au sol (pieds d'une personne ou pattes d'un animal) au voisinage d'un coup de foudre.

En effet, au voisinage d'un point frappé par la foudre se développe dans le sol un champ électrique dont les équipotentielles sont des sphères concentriques centrées sur le point d'impact. C'est du moins une approximation sous l'hypothèse que le sol délimite un demi-espace de résistivité homogène (en réalité c'est plus compliqué si la terre est constituée de couches ou d'inclusions rocheuses de natures différentes : voir référence D).

On montre (voir [annexe 3](#)) que la différence de potentiel U_p (en volts) entre les pieds d'une personne distants d'un pas p (en m), et située à la distance r (en m) du point d'impact de la foudre, est :

$$U_p(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \frac{p}{r+p}$$

où ρ est la résistivité de la terre (50 Ωm pour terres arables, 500 Ωm pour terrains maigres, graviers, 3000 Ωm pour sols pierreux, sablonneux, roches perméables), et I l'intensité du courant de foudre (10 kA à 75 kA).

Exemple numérique : un homme situé à $r = 20$ m du point d'impact de la foudre d'intensité $I = 20\,000$ A, avec $\rho = 100$ Ωm , faisant un pas $p = 0,80$ m, s'expose à une tension de pas égale à 760 V. L'homme étant mouillé sa résistance corporelle n'est que $R = 650$ Ω , il est donc traversé par un courant $I_R = 760/650 = 1,2$ A. Or le courant électrique, supposé ici continu, est dangereux à partir de 130 mA (fibrillation cardiaque) : l'homme est donc en danger mortel sous cette tension de pas.

Remarque sur la constance du courant de foudre :

On a dit que l'intensité du courant de foudre est constante, ce qui signifie qu'elle est imposée. Or on pourrait penser que l'intensité qui traverse le sol dépende de sa résistance. En fait, le point d'impact de la foudre agit comme une source de courant et non de tension. Cela signifie que le point d'impact est un générateur électrique dont la tension est V (égale à la tension de foudre), de résistance interne R_i (la résistance du sol au niveau de l'impact) délivrant un courant au travers d'une résistance R_s (le sol environnant) ou résistance de charge : si $R_i \gg R_s$ l'intensité est pratiquement $I = V / (R_i + R_s) \approx V / R_i = \text{constante}$.

La présence de tensions de pas incite alors, en cas d'orage, d'éviter de faire des pas importants (ne pas courir, se déplacer par petits pas) et ne pas rester au voisinage d'objets susceptibles d'attirer la foudre par pouvoir des pointes (s'éloigner des arbres, clochers, pitons rocheux, poteaux, antennes...) Il est également recommandé de ne pas rester debout dans un endroit dégagé : en effet un homme isolé de 1,80m représente une pointe qui pourrait attirer le précurseur lors de ses bonds successifs (en moyenne un précurseur croît par bonds successifs de 50m). Il faut chercher à offrir le moins de surface au sol et à l'atmosphère, tout en étant éloigné des protubérances : la meilleure méthode est de se réfugier dans un espace creux.

2-2 – Tentative d'une expérience

J'ai essayé par une expérience de mettre en évidence la tension de pas et son évolution en fonction de la distance à un point de décharge électrique, et du pas. Le principe est fort simple mais délicat à mettre en œuvre :

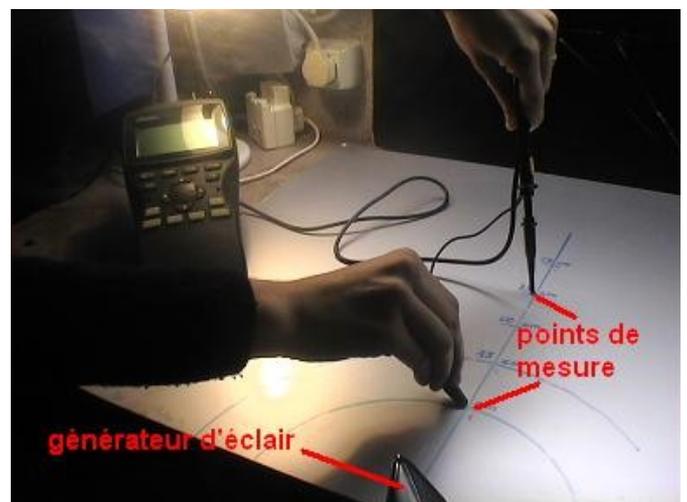
- J'ai utilisé une plaque assez isolante pour ne pas déformer les équipotentielles générées par

un champ électrique dans l'air, mais suffisamment conductrice pour qu'un courant même extrêmement faible puisse y circuler. Ainsi la géométrie sphérique des équipotentielles pouvait-elle être applicable, comme si la plaque n'existait pas dans l'air. Il fallait aussi que la plaque soit suffisamment isolante pour obtenir un déplacement des charges électriques uniquement à la surface.

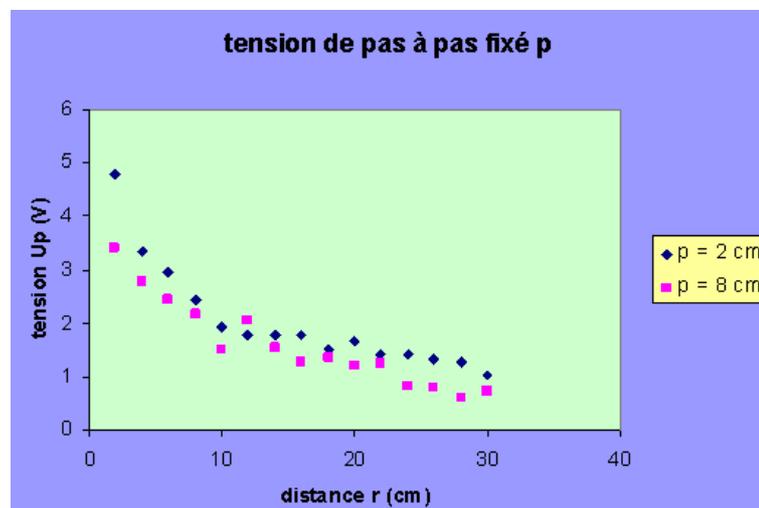
- J'ai disposé des points de mesure (petits clous) équidistants sur la plaque, alignés entre eux et avec la source, et je relevais la différence de potentiel entre eux au moyen d'un voltmètre oscilloscope.

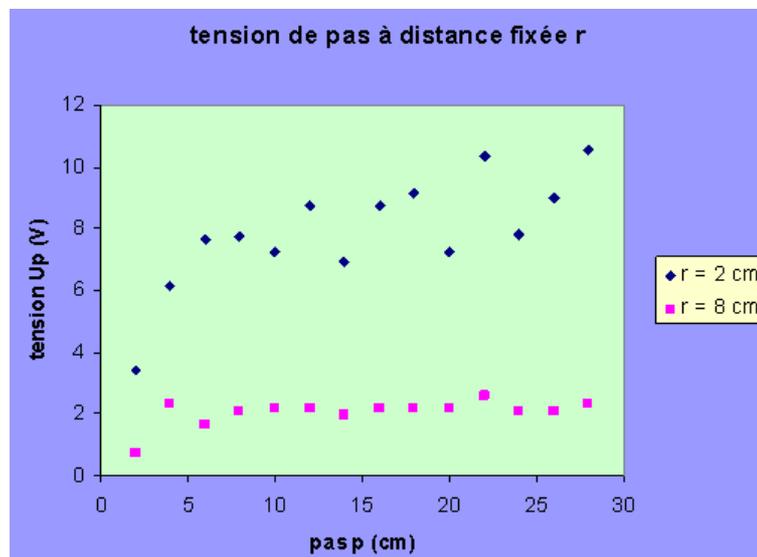
- La source était fournie par un générateur d'étincelle, moyennant la décharge d'un condensateur dont l'une des armatures était reliée à la plaque par une pointe placée point d'impact et l'autre à une autre pointe placée 5 cm au-dessus ; la tension aux bornes était d'environ 150 000 V (soit un champ $150000/5 = 30000\text{V/cm}$ correspondant au champ de rupture diélectrique de l'air). L'étincelle simulait un petit éclair.

- A chaque décharge du condensateur une étincelle jaillissait et frappait la plaque. Une des difficultés majeures de la mesure résidait dans le fait que le courant obtenu n'était pas toujours le même pour chaque décharge (voir photos)



Deux séries de « mesures » ont été effectuées : l'une en faisant varier le pas p à distance r constante (pour deux valeurs $r = 2\text{ cm}$ et $r = 8\text{ cm}$), l'autre en faisant varier la distance r à pas constant p (pour deux valeurs du pas $p = 2\text{ cm}$ et $p = 8\text{ cm}$). Après des manipulations très laborieuses j'ai obtenu les courbes suivantes (c'est le plaisir mais aussi l'inconvénient de faire des expériences sur « un coin de table », avec les moyens du bord !):





Les constats suivants peuvent être effectués :

- à pas fixé, lorsque la distance augmente, la tension de pas décroît comme prévu par la théorie.
- A distance fixée, la tension de pas augmente avec le pas et semble converger vers une valeur asymptotique. Pour deux distances fixées différentes r et r' la théorie prévoit que les asymptotes sont dans un rapport $U_p(r)/U_p(r') = r'/r$. Pour $r = 2$ cm l'asymptote est environ 8,5 V, et pour $r' = 8$ cm, elle est environ 2 V, soit un rapport mesuré de $8,5/2 = 4,25$ alors que le rapport théorique est de $8/2 = 4$, ce qui est assez satisfaisant compte tenu des difficultés pratiques.
- Les valeurs obtenues par mon montage semblent donc montrer que la tension de pas suit une loi radiale sphérique
- Les fluctuations des valeurs de tension sont probablement imputables au fait que le courant de décharge n'était pas rigoureusement le même d'une décharge à l'autre (paramètre difficile à maîtriser).. Mais les tendances d'évolution en fonction de p ou de r vont dans le sens de la théorie.

Remarque :

Puisque la loi qui donne la tension de pas semble vérifiée par mes valeurs, on peut admettre que les asymptotes obtenues à distance r fixée sont données par :

$$U_{p\infty}(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Leur connaissance fournit donc la valeur du courant de décharge de l'étincelle si la résistivité est connue. La résistivité de l'air est environ $10^{12} \Omega\text{m}$, et pour $r = 8$ cm, l'asymptote vaut $U_p = 2$ V, ce qui donne une intensité $I = 2\pi \times 0,08 \times 2 / 10^{12} = 10^{-12}$ A. Pour mémoire, la loi de Child-Langmuir donnerait une intensité, pour des électrodes larges de 1 mm ($S = \pi \times 0,001^2/4$) et une longueur du diélectrique $h = 5$ cm : $I = 7,4 \cdot 10^{-10}$ A (d'un facteur 100 supérieure à l'intensité obtenue par l'asymptote). Mais comme déjà signalé, la décharge ne s'effectue pas dans un tube à vide et on n'a pas un condensateur plan indéfini entre les électrodes ! De toutes façons on a à faire à des courants extrêmement faibles dans la configuration du montage.

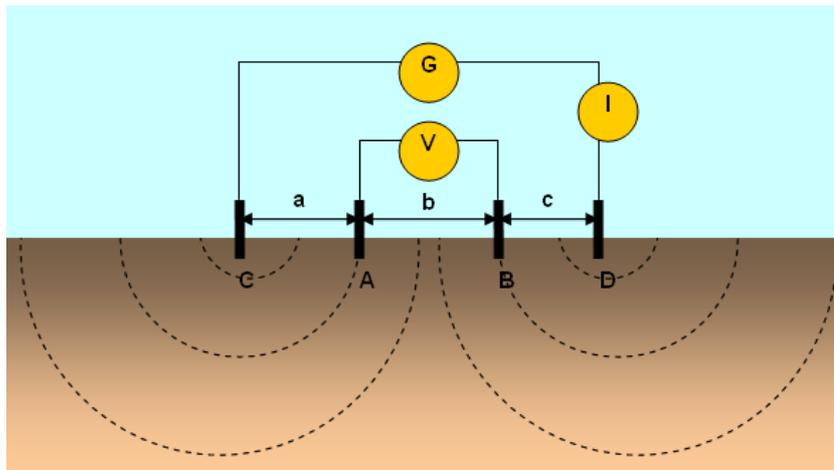
3 – Application de la tension de pas à la prospection électrique des sols

L'existence d'une tension de pas qui apparaît suite à une source de courant au sol peut être exploitée pour déterminer expérimentalement la résistivité des sols. Une des méthodes, la **méthode de Wenner**, est présentée ci-après (voir aussi références D et E).

Le principe est très simple : déterminer la résistance électrique d'un sol à partir de la mesure d'une différence de potentiel résultant du passage d'un courant d'intensité connue entre deux points A et B. Il faut donc disposer d'un générateur de courant, lequel sera choisi alternatif basse fréquence pour s'affranchir du phénomène des tensions de contact.

Si l'on se contente de ficher en A et B les électrodes reliées au générateur de courant G, le résultat obtenu ne sera pas représentatif de la résistance du sol. En effet, chacun de ces points serait le centre d'équipotentiels hémisphériques et, en vertu de la décroissance de la résistance en $1/r$, seule interviendrait la résistance au voisinage immédiat de ces centres : la résistance de la zone médiane de AB ne serait pas prise en compte.

Il est donc nécessaire de faire circuler le courant non pas entre les points de mesure A et B, mais entre des électrodes C et D disposées et alignées de part et d'autre de AB (voir figure). Par ce dispositif la zone délimitée par AB est pratiquement constituée d'équipotentiels planes et parallèles, et on s'affranchit ainsi de l'évolution rapide et géométrique des résistances due au voisinage des points de contact (phénomène de résistances de contact).



Supposons que les propriétés électriques du sol soient homogènes et isotropes. En présence des deux sources (points de contact) C et D, le potentiel mesuré en A est la somme algébrique des potentiels issus de C à la distance $r = a$ et de D à la distance $r = b + c$. Si, au cours d'une alternance du courant, les charges arrivent par C, elles sortent par D : ainsi l'intensité sera comptée positivement pour le potentiel issu de C, et négativement pour le potentiel issu de D, on aura donc en A :

$$V_A = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b+c} \right)$$

De la même manière, pour B :

$$V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a+b} - \frac{1}{c} \right)$$

La différence de potentiel V entre A et B est donc $V_A - V_B$ mesurée par le voltmètre. Si on choisit $a = b = c$ (électrodes équidistantes) on obtient :

$$V = V_A - V_B = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

d'où l'on déduit la résistivité du sol r cherchée.

Quelques valeurs de résistivité de sols :

Nature du sol	Résistivité (en Ωm)
Terrain marécageux	1 - 30
limon	20 - 100
humus	10 - 150
Tourbe humide	5 - 100
Argile plastique	50
Marnes, argiles compacts	100 - 200
Marnes du jurassique	30 - 40
Sable argileux	50 - 100
Sable siliceux	200 - 3000
Sol pierreux nu	1500 - 3000
Sol pierreux avec surface recouverte d'herbe	300 - 500
Calcaires tendres	100 - 300
Calcaires compacts	1000 - 5000
Calcaires fissurés	500 - 1000
schistes	50 - 300
micaschistes	800
Granits et grès altérés	500 - 100000
Granits et grès très altérés	100 - 600

Remarque : **mise à la terre des installations**

Lorsqu'une personne est au contact direct avec une pièce nue sous tension U , de résistance R , elle est traversée par un courant dit de défaut I_d qui dépend de la résistance du corps R_h :

$$I_d = \frac{U}{R + R_h}$$

Le corps est alors soumis à une différence de potentiel entre le conducteur et le sol appelée **tension de contact** :

$$U_c = \frac{R_h U}{R + R_h}$$

pratiquement égale à la tension d'origine (R étant faible). Si, au lieu d'être direct, le contact a lieu via les masses de l'appareil mises sous tension accidentellement parce qu'elles touchent des conducteurs (défaut d'isolement), la personne s'exposera au même danger que si elle touchait les conducteurs eux-mêmes. Pour protéger les personnes des défauts d'isolement il faut que le courant puisse s'évacuer par un chemin dont la résistance est beaucoup plus faible que celle du corps humain.

C'est la **mise à la terre** : les masses métalliques des appareils électriques doivent être reliées à un **conducteur de protection électrique (PE)** dont la résistance R_t (résistance de terre) est la plus faible possible. La résistance de terre est la résistance du conducteur compris entre la prise de terre à laquelle est branché l'appareil et un point du sol T suffisamment éloigné pour être à un potentiel indépendant des courants de défaut.

Les qualités requises d'un conducteur PE sont :

- avoir une résistance très faible. Elle tient compte de la résistivité du sous-sol. Elle dépend du calibre du disjoncteur installé et de la tension de contact de sécurité U_L à ne pas dépasser aux

bornes du corps humain ; si $U_L = 25V$ (tension de sécurité avec peau humide, en alternatif) on a pour R_t :

- avec un disjoncteur différentiel de calibre 500 mA, $R_t = 25/0,500 = 50 \Omega$
- avec un disjoncteur différentiel de calibre 300 mA, $R_t = 25/0,300 = 83 \Omega$
- avec un disjoncteur différentiel de calibre 100 mA, $R_t = 25/0,100 = 250 \Omega$

- la résistance doit rester stable dans le temps (ne pas évoluer suite à divers effets : corrosion, etc.)
- supporter sans détérioration les courants de défaut
- ne pas présenter de risque de contact avec d'autres installations avoisinantes.

L'importance de la résistivité du sol intervient dans l'écoulement du courant de défaut. Par exemple, si la mise à la terre est faite par un piquet conducteur planté dans le sol, et si ce piquet est parcouru par un courant de défaut il va constituer une source de courant. La propagation de ce courant dans le sol au voisinage du piquet suit la loi en $1/r$, comme établie pour la tension de pas lors de la foudre. A partir d'une certaine distance la résistance du sol est nulle et il n'y a plus de différence de potentiel entre deux points du sol (tension de pas) : ils sont alors au même potentiel. Cette distance définit la zone de référence à partir de laquelle la mise à la terre est réelle. La distance de référence sera d'autant plus grande (donc la mise à la terre réelle d'autant plus lointaine) que la résistivité du sol est élevée : d'où la nécessité de bien connaître celle-ci pour réaliser une bonne mise à la terre.

Si le sol a une grande résistivité (compacité, absence d'humidité) le conducteur PE devra être placé jusqu'aux couches profondes présentant une humidité constante.

Différentes **réalisations d'une prise de terre** :

- par boucle à fond de fouille : le conducteur qui fait le pourtour de l'habitat est noyé dans les fondations en béton, enfoui à 1 m de profondeur minimale. Si L est la longueur totale du conducteur, et ρ la résistivité du sol, la résistance de terre est donnée par $R = 2\rho/L$.
- par conducteur en tranchée : le conducteur est noyé dans une tranchée à 1 m minimal de profondeur et doit être éloigné d'au moins 20 cm de toute canalisation. La résistance de terre est donnée par : $R = 2\rho/L$, avec ρ résistivité du sol et L longueur du conducteur.
- Par piquet de terre : le piquet conducteur (acier, cuivre...) est enfoncé d'une hauteur H minimale de 2 m dans le sol. Résistance de terre : $R = \rho/H$, avec ρ résistivité du sol.
- Par plaque verticale : une plaque rectangulaire de 1 m² de surface, ou une grille en métal déployé, épaisses de 3mm minimal (pour l'acier), est enfouie dans le sol à une profondeur minimale de 1 m. Si le terrain est très peu conducteur (par gel ou sécheresse), cette profondeur doit être de 2m. Résistance de terre : $R = 0,8 \rho/L$, avec ρ résistivité du sol et L périmètre de la plaque.

Ces différentes solutions ont des avantages et des inconvénients :

- la résistance la plus faible est obtenue avec la boucle de fond, et la plus élevée avec le piquet
- la stabilité dans le temps est excellente avec la boucle de fond, mauvaise avec le piquet en terre
- la transmission du courant de défaut est la mieux assurée avec la boucle de fond, et mauvaise avec le piquet en terre
- mais la zone perturbée est la plus grande avec la boucle de fond et la plus réduite avec le piquet.

4 – Recommandations en présence d'orage et de foudre

4-1 - Si l'on se trouve à terrain découvert, dans un champ

- Ne pas se mettre à l'abri sous un arbre, de manière générale sous aucun objet ou édifice présentant un risque d'attirer la foudre par pouvoir des pointes. Sinon, la probabilité d'être foudroyé est 50 fois plus élevée que si l'on reste à terrain découvert et debout !
- Ne pas porter d'objet pointu dont la pointe dépasse la hauteur de la personne (parapluie, outil, canne, etc). Il est démontré que la probabilité d'être atteint par la foudre est proportionnelle à H^2 , où H est la hauteur d'un objet. Ainsi entre un enfant de 1,40 m et un adulte de 1,80 m le risque de foudroiement augmente de 65% !
- Rester à l'écart (plusieurs mètres) des objets, animaux et personnes, afin que, s'ils sont foudroyés, l'on ne risque pas soi-même d'être dans la zone d'amorçage d'un éclair se propageant sur le côté. Pour cette raison, il ne faut pas rester groupé lors d'un orage violent.
- Ne pas téléphoner par temps d'orage si la liaison passe par des lignes téléphoniques aériennes : si la foudre tombe sur celles-ci elle génère une surtension qui se propage sur la ligne jusqu'au poste téléphonique.
- Tenir compte de la tension de pas : ne pas courir, marcher par petits pas.
- Rester dans une automobile si sa carcasse est métallique : elle protège par effet de **cage de Faraday** (les lois de l'électrostatique montrent qu'à l'intérieur d'une surface conductrice creuse il n'y a ni charge ni champ électrique).
- Ne pas s'abriter dans un édifice dont le toit est conducteur et les murs isolants (hangar par exemple) : on serait à l'intérieur d'un champ électrique intense entre le sol et le toit si celui-ci était atteint par la foudre. Le champ peut être suffisamment puissant pour dépasser la limite de rupture diélectrique de l'air (30 kV/cm) et donc provoquer l'apparition d'un traceur électrique. Par contre si le toit est relié au sol via des conducteurs ceux-ci permettent l'écoulement du courant : il n'y a pas de danger.

4-2 - Dans les maisons

- Si la mise à la terre ou la protection contre la foudre sont douteuses, s'abstenir de tout contact avec les conducteurs de la maison (conduites, canalisations, robinetterie...) et ne pas utiliser l'eau.
- Débrancher la prise d'antenne du téléviseur si elle est reliée à un arial : un coup de foudre sur celui-ci créerait une surtension jusqu'au téléviseur qui alors imploserait (s'il s'agit d'une TV à tubes cathodiques). Pour la raison citée plus haut débrancher aussi les prises téléphoniques si elles sont reliées à des lignes aériennes.
- Fermer les courants d'air dans la maison : les variations de pression, si faibles soient-elles, sont des facteurs favorables aux traceurs. On montre aussi que le champ critique dépend de la température ambiante (voir [Note 1](#)).

4-3 - En montagne

- Éviter de se déplacer avec le piolet proéminent : comme indiqué plus haut il attire la foudre par pouvoir des pointes et peut être le siège d'effet couronne (feu de Saint-Elme).
- Rester situé à au moins 50 mètres au-dessous d'un sommet pointu. Lorsque l'orage s'annonce et que le champ électrique atmosphérique s'intensifie, le sommet est le siège de l'effet couronne caractérisé par un ronronnement annonciateur.
- On a déjà vu qu'il faut se protéger dans un creux, celui-ci pouvant être dominé par une corniche. La corniche doit être toutefois à une hauteur suffisante (au moins 20 m). Si l'on se réfugie dans une grotte, éviter de rester debout à l'entrée (amorçage possible entre la voûte et le sol) et contre les parois : mieux vaut se tenir abaissé au milieu.
- Pour les mêmes raisons que plus haut, ne pas se plaquer aux parois : entre la tête et les pieds elles peuvent représenter une différence de potentiel élevée, surtout si l'on est près du sommet.

4-4 - En mer ou sur un lac

- Le mât de l'embarcation peut faire paratonnerre et l'eau est la « masse » par laquelle le courant s'évacue, si une liaison conductrice existe entre le mât et l'eau. En l'absence de mât le danger est important.
- Dans tous les cas les mêmes recommandations citées plus haut en (a) s'appliquent.

5 – Effets de la foudre sur les installations électriques

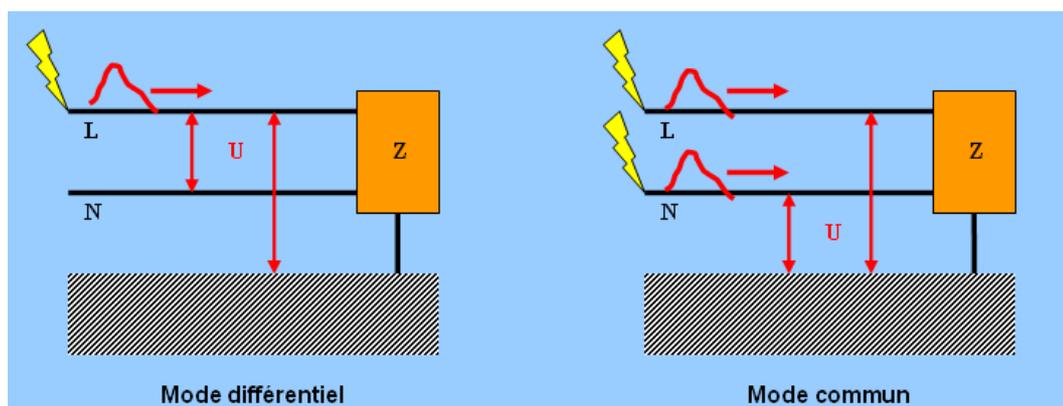
Un coup de foudre engendre des surtensions de manière directe ou indirecte :

- De manière directe (surtension conduite), lorsque la foudre tombe sur une ligne conductrice ou une installation électrique,
- De manière indirecte (surtension induite) lorsque la foudre tombe au voisinage d'une ligne conductrice ou d'une installation électrique.

Les surtensions sont de deux types (voir schéma ci-après):

- En **mode commun** si elles affectent toutes les parties conductrices de l'installation (par exemple la phase et le neutre d'une ligne): ces parties présentent alors un potentiel très élevé (surtension) par rapport à la terre. Les éléments dont les masses sont reliées à la terre risquent un claquage diélectrique de leurs composants isolants.
- En **mode différentiel** si elles affectent seulement quelques parties conductrices de l'installation (par exemple la phase ou bien le neutre d'une ligne): dans ce cas celles-ci présentent un potentiel élevé (surtension) par rapport aux autres éléments conducteurs non affectés.

Si la longueur d'onde de la perturbation est grande devant les dimensions du circuit on peut admettre que sa propagation est instantanée, dans ce cas la ligne peut être modélisée avec des composantes ponctuelles. A l'inverse, si la longueur d'onde est très courte devant les dimensions du circuit (cas des hautes fréquences), la propagation de la perturbation se fait par propagation progressive (à vitesse finie), et la ligne doit être modélisée à composants répartis. A ces effets s'ajoutent ceux dus aux rayonnements (induction électromagnétique, ou choc en retour) et ceux dus aux inductions électrostatiques.



5-1 – Effets de surtension conduite (coup de foudre direct)

Lorsque le foudre, d'intensité I , frappe une ligne électrique, celle-ci propage une surtension dans les deux directions de part et d'autre du point d'impact et véhicule un courant d'intensité $I/2$ dans chacune de ses deux branches. Si la ligne est reliée au primaire d'un transformateur, la surtension va affecter le secondaire par couplage mais avec un courant d'intensité nettement

inférieure à celle du primaire (4% environ du niveau initial).

La propagation de l'onde et ses effets destructeurs dépendent des discontinuités rencontrées dans le circuit (par exemple les impédances de charge du circuit, ou les interconnexions comme celles rencontrées dans un transformateur situé sur le circuit). Plus exactement, selon les caractéristiques des zones de transition du circuit, les conditions de réflexion ou de transmission de l'onde électrique vont provoquer plus ou moins les ruptures diélectriques dans les composants du circuit (voir [annexe 4](#)).

Comme mentionné en annexe 4, si l'impédance de charge est très grande devant l'impédance caractéristique de la ligne, la surtension transmise augmentera au niveau du circuit d'utilisation (ou des parties relativement isolantes au contact de la ligne) et créera des champs électriques dans les isolants qui dépasseront la limite de rupture diélectrique, avec pour conséquences des phénomènes de décharge électrique ou d'effets couronne (très consommateurs d'énergie), voire leurs destructions (éclatements, volatilisation, perforations). Le gradient de montée du front d'onde joue également un rôle important dans les effets de la surtension : plus il est raide plus les effets sont destructeurs.

Exemple : foudre d'intensité 20 kA, ligne d'impédance 100 Ω, montée du front d'onde 10 μs. Comme le courant se coupe en deux dans des sens opposés sur la ligne, l'intensité parcourant celle-ci est 10 kA. La tension vaut donc $U = 100 \times 10 = 1 \text{ MV}$, avec un gradient de montée $1 \text{ MV}/10 \text{ μs} = 100 \text{ kV}/\text{μs}$.

Protections contre les coups de foudre directs

Elles ont deux objectifs :

- Provoquer le coup de foudre sur un endroit choisi, et le faire évacuer par la terre, de manière à le détourner des installations, lignes ou constructions que l'on veut protéger : c'est le rôle des protections primaires telles que le paratonnerre, les fils tendus (ou fils de garde) et la cage de Faraday (ou cage maillée).
- Limiter ou supprimer les contraintes de surtension dans les installations : c'est le rôle du parafoudre (à éclateur ou à varistances).

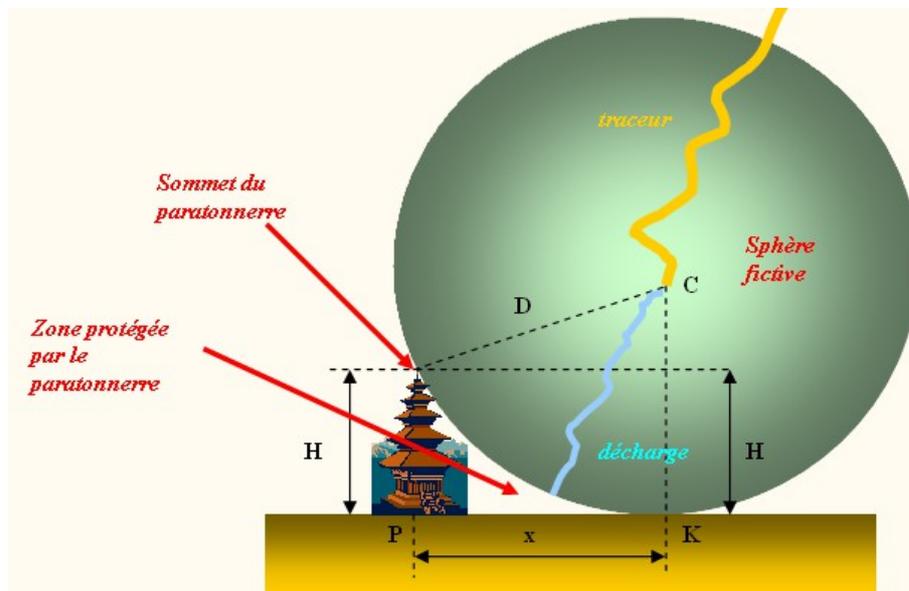
a) Paratonnerre :

Le fonctionnement du paratonnerre exploite la distance d'amorçage D (voir § 1.2), par la méthode de la sphère fictive. Pour un traceur qui se déplace, le point d'impact au sol fait partie des points du sol situés à la distance D, et se trouve donc sur une sphère de rayon D centrée sur l'extrémité du traceur qui se déplace en même temps que lui. Par conséquent la pointe du paratonnerre, qui est un point de la sphère fictive, doit être à une hauteur H telle que les zones les plus proches à protéger au sol soient situées hors de cette sphère (voir figure suivante).

Le diamètre x de la zone circulaire protégée au sol autour du pied du paratonnerre P est donnée, après un calcul très simple (exercice !) par :

$$x = PK = H \sqrt{2 \frac{D}{H} - 1}$$

où la distance d'amorçage D dépend du courant du traceur I.



L'installation d'un paratonnerre, avec sa mise à la terre, doit respecter la norme NF C 17-100. La mise à la terre doit être réalisée en patte d'oie, le paratonnerre et celle-ci étant reliés par une série de feuillards bons conducteurs (cuivre).

b) *Cage de Faraday*

On réalise sur le bâtiment un maillage fermé de conducteurs horizontaux et verticaux reliés à la terre (mise à la terre par pattes d'oie), et prolongé par des tiges verticales, au droit des nœuds, qui forment des paratonnerres. Ce système permet une bonne équipotentialité du bâtiment, donc quasi absence de champ électromagnétique à l'intérieur.

c) *Fils de garde* :

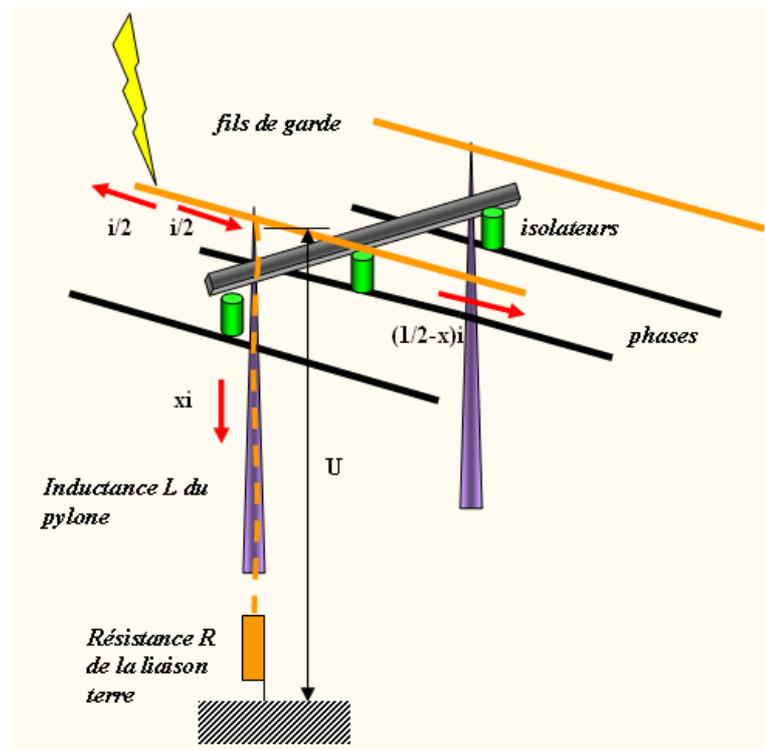
Montés sur les lignes HT, ce sont des fils conducteurs tendus au-dessus des lignes de phase. Ils sont reliés à la terre par l'intermédiaire des pylônes. Ils forment un écran protecteur des lignes de phase en recevant à leur place la foudre au-dessus (voir figure).

Lorsque la foudre d'intensité i frappe une ligne de garde celle-ci va véhiculer dans une des directions l'intensité $i/2$. Le fil de garde est relié à la terre via un câble d'inductance L traversant le pylône et une résistance en série R de valeur très faible ($R < 50 \Omega$ environ). Une fraction x du courant traverse cette liaison pour s'écouler à la terre, tandis que l'autre partie $(1/2 - x)i$ continue de se propager dans le fil de garde. La traversée du courant par la liaison à la terre va créer à ses bornes (entre la tête du pylône et la terre) une différence de potentiel U telle que :

$$U = x \left(Ri + L \frac{di}{dt} \right)$$

Cette tension peut être très élevée, par effet inductif, au point de créer aux bornes des isolateurs un champ électrique supérieur à la valeur critique de rupture diélectrique. Quand cela arrive une décharge peut s'effectuer entre le fil de garde et les lignes de phase, avec transmission d'une surtension dans celles-ci. On montre que la valeur de cette surtension est supérieure à celle d'une surtension due à un coup de foudre direct sur les phases. C'est le phénomène d'amorçage en retour.

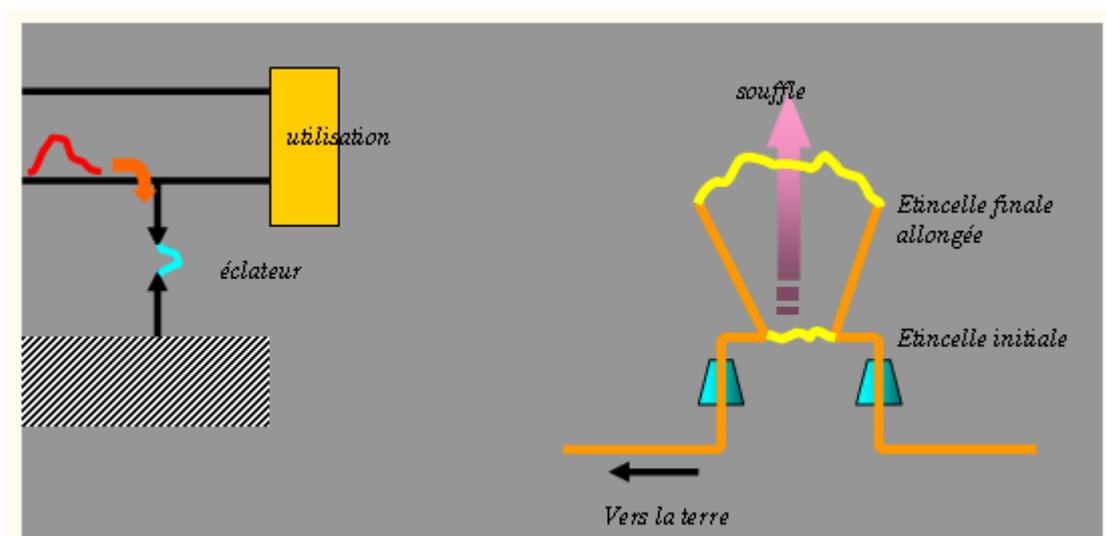
Le remède semblerait pire que le mal. Heureusement il n'en est rien en haute tension ($> 90 \text{ kV}$) où les isolateurs ont des champs d'amorçage très élevés.



d) Parafoudre :

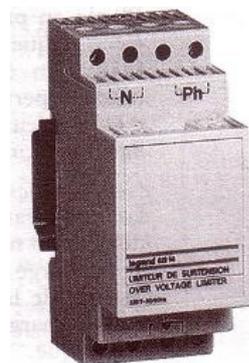
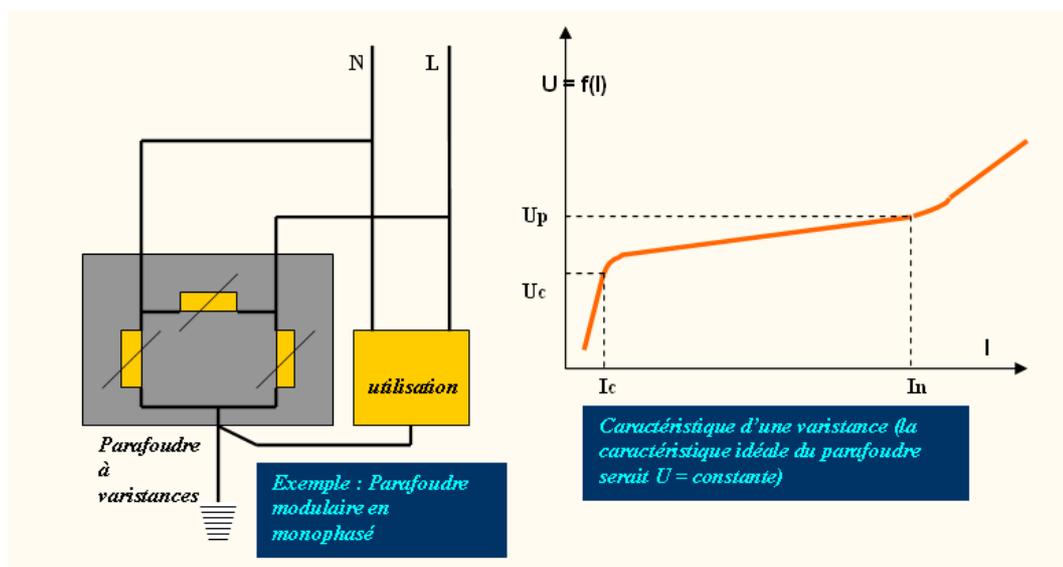
Le parafoudre sert à écouler les surtensions transitoires à travers une liaison à la terre capable de supporter des courants d'intensité élevée pendant des durées très courtes. Cette dérivation à la terre se fait de deux façons : par amorçage à l'aide d'un parafoudre à éclateur (presque abandonné aujourd'hui) ou par conduction à l'aide d'un parafoudre à varistance.

- Les **éclateurs**, montés en dérivation vers la terre du circuit principal, utilisent la surtension pour générer entre leurs électrodes une étincelle de décharge dont la longueur du trajet augmente jusqu'à ce que la décharge ne soit plus possible. Les deux électrodes à la base de l'éclateur sont espacées de manière à ce que le champ de rupture diélectrique de l'air soit obtenu. Lorsque l'étincelle apparaît l'air compris entre elles s'échauffe et crée un courant d'air chaud ascendant qui déforme et allonge l'étincelle en arc de cercle. Lorsque le chemin est trop long pour que le champ disruptif existe, la décharge n'est plus possible et l'étincelle s'éteint. La durée totale de décharge est en général suffisante pour permettre l'évacuation complète de la surtension vers la terre. Dans le cas contraire, une nouvelle étincelle jaillit à la base de l'éclateur et le processus recommence.



L'éclateur présente les inconvénients suivants : dispersion de la tension d'amorçage, sensibilité aux conditions atmosphériques, retard à l'amorçage qui dépend de la surtension, création d'une onde très raide.

● **Parafoudre à varistances** : il est constitué de varistances à oxyde de zinc (ZnO) (résistances non-linéaires) contenues dans une enveloppe isolante (porcelaine). Le rôle des varistances est de permettre la transmission rapide du courant dès que la tension atteint un seuil très bien maîtrisé, U_p , cette tension étant supérieure à celle du réseau et correspondant à la surtension à évacuer. La stabilité de la tension maximale par rapport à l'intensité du courant est une qualité déterminante du parafoudre : idéalement, elle doit en être indépendante. En pratique la caractéristique $U_p = f(I)$ montre une partie linéaire pour une intensité inférieure au courant de fuite I_c et pour une intensité supérieure au courant de pouvoir d'écoulement I_n (limite d'utilisation). Entre ces deux valeurs la caractéristique doit garantir une tension relativement constant et donc une zone fortement non linéaire (voir figure). En l'absence de surtension une tension permanente est appliquée aux bornes du parafoudre, notée U_c ou MCOV (maximum continuous operating voltage), et doit être supérieure à la tension d'utilisation du réseau à protéger. Sous cette tension le courant de fuite (< 1 mA) circule par seul effet capacitif (puisque'il n'y a pas de conduction). Lorsqu'une surtension survient les varistances deviennent très rapidement conductrices et le restent jusqu'à son évacuation par la terre : le courant circule par conduction. Puis elles retournent à l'état isolant sans courant de suite (c'est le courant qui continuerait à circuler entre le moment où le parafoudre est conducteur et celui où il devient isolant : ici il est nul).



parafoudre modulaire à varistances (source : M. Vial, *électricité professionnelle*, ed. Nathan 1996)

Pour les installations domestiques le parafoudre doit être situé en aval du disjoncteur différentiel (500 mA type S). Pour être efficace le parafoudre doit être le plus proche possible des appareils (50 cm maxi) avec des conducteurs de liaison de 4 mm². La mise à la terre doit avoir une résistance maximale de 33 Ω et toutes les liaisons à la terre doivent être équipotentielles. Les parafoudres s'usent et se détruisent avec les surtensions : il importe qu'ils soient équipés d'un témoin lumineux.

Signalons pour la protection des installations électroniques les parafoudres à diodes transil écrétrices de tension ou les diodes trisil proches des thyristors.

Pour les détails sur les distances à respecter entre les parafoudres et les installations, notamment les transformateurs, consulter par exemple la référence F.

Consulter les normes suivantes pour le choix et l'installation des parafoudres :

- NF C 15-100 sur les installations
- NF C 61-740 sur les parafoudres sur réseau BT
- Guide UTE 15-443 sur le choix des parafoudres

5.2 – Effets de surtension induite (coup de foudre indirect)

Ce sont principalement des effets électromagnétiques. Le canal de la foudre (traceur continu véhiculant le courant de forte intensité) ainsi que tout conducteur parcouru par un courant intense généré par un coup de foudre direct, génèrent des champs électromagnétiques comme toute antenne émettrice puissante. Ces champs induisent des tensions et des courants dans les conducteurs avoisinants, pouvant être suffisamment importants pour provoquer des phénomènes de claquage, ou des interférences radioélectriques en télécommunication.

Les effets de surtension induite résultent principalement de la raideur de l'onde produite donc du gradient de montée et de descente du courant de foudre di/dt , ainsi que de la valeur crête du courant ou de la tension :

- les impulsions rapides (di/dt élevée) bien que de niveau faible peuvent détériorer certains semi-conducteurs
- les valeurs crêtes de la tension peuvent provoquer le claquage des composants par dépassement du champ de rupture diélectrique
- les impulsions à descente lente conservent une énergie élevée qui peut détériorer les composants par **effet Joule**.

Tous ces effets élémentaires peuvent entraîner au niveau d'un ensemble complexe des signaux parasites, des perturbations de mémoire, des transmissions erronées ou des commutations inattendues.

Il n'est pas possible ici de développer la problématique et les techniques traitant de l'influence des ondes électromagnétiques sur les dispositifs électriques, électromécaniques ou électroniques, issues d'une source de perturbation extérieure (telle la foudre) ou entre elles. Ce domaine est celui de la **compatibilité électromagnétique** (CEM) qui peut être définie comme suit (définition normalisée) : la compatibilité électromagnétique est « l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil, ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques de nature à créer des troubles graves dans le fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement ».

Une perturbation électromagnétique peut se transmettre à un circuit ou un appareil par différents modes de couplage :

- couplage par impédance commune
- couplage capacitif

- couplage inductif
- couplage par rayonnement électromagnétique

dont les définitions sont les suivantes, sans entrer dans les détails :

Couplage par impédance commune :

Lorsque deux circuits sont mis à la même terre mais par une résistance commune non nulle (ce qui correspond toujours à la réalité), un courant circulant dans le premier va créer un courant dans le deuxième. Soit r la résistance commune, R celle du second circuit et I le courant traversant le premier. Le courant traversant R est :

$$I' = I \frac{r}{R}$$

Solution : pour éviter l'apparition d'un courant non désiré dans le deuxième circuit on cherche à diminuer la résistance commune r , en augmentant sa section par exemple.

Couplage capacitif :

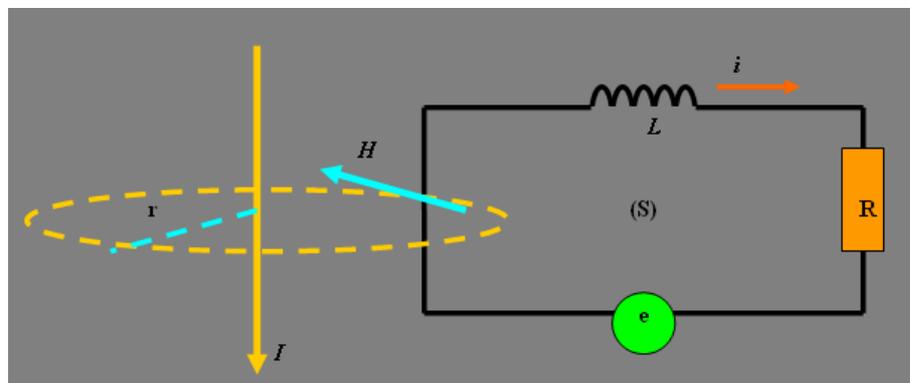
Il apparaît lorsque deux conducteurs proches (comme l'âme centrale d'un câble et son conducteur périphérique) sont proches et séparés par un isolant, formant ainsi un condensateur. Comme un condensateur laisse passer facilement les signaux de fréquences f élevées (impédance $1/C2\pi f$ faible) le couplage capacitif sera important aux signaux hautes fréquences (variations très rapides de la tension). Il sera également important si l'impédance qu'alimente la ligne est élevée : en effet, on a vu que, dans ce cas, l'onde de tension réfléchie vers la ligne est importante.

Solution : mise en place d'un écran électrostatique entre les conducteurs (conducteur interposé relié à la masse) ou d'une tresse, ce qui a pour effet de diminuer la permittivité relative du diélectrique, donc la capacité.

Couplage inductif :

L'écoulement d'un courant électrique variable $I(t)$ est la source d'un champ magnétique H qui, à une distance r de la source, vaut (**loi d'Ampère**):

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{en A/m})$$



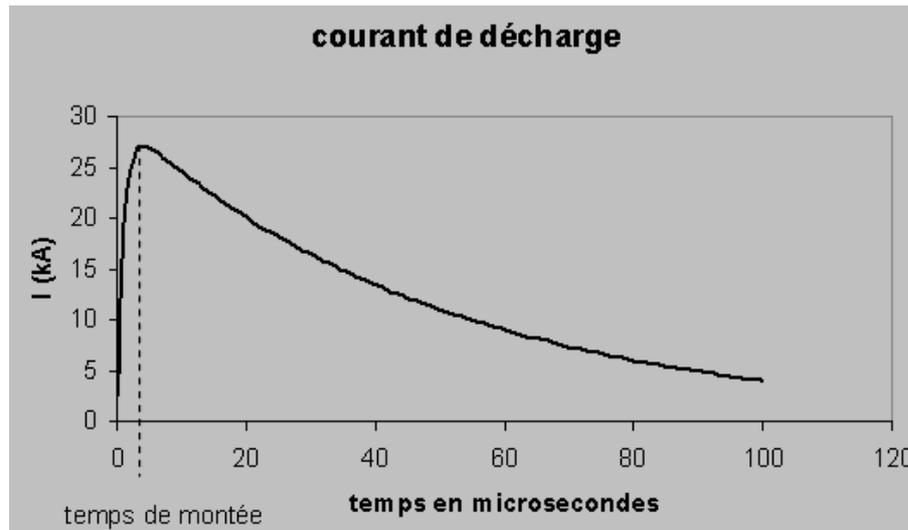
Lorsque ce champ coupe un circuit conducteur fermé il crée à ses bornes une tension induite e égale au taux de variation dans le temps du flux Φ du champ H à travers la surface du circuit S (**loi de Faraday**) : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ (Φ flux en Weber) avec $\Phi = \mu H S$, où μ est la perméabilité

magnétique du conducteur du circuit. Il vient donc :

$$e = - \frac{\mu S}{2\pi r} \frac{dI}{dt}$$

La tension induite dans le circuit dépend donc du courant perturbateur par l'intermédiaire de dI/dt . Ceci correspond à ce qui fut dit plus haut : les décharges atmosphériques aux fronts très raides sont les plus dangereuses. D'où l'importance de connaître la forme du courant de décharge dans le temps. La théorie montre, et l'expérience vérifie, que le courant de décharge a une évolution temporelle de la forme :

$$I(t) = I_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$



Ordre de grandeur des paramètres du courant de décharge :

$\alpha = 20000 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 1000000 \text{ s}^{-1}$, $I_0 = 30 \text{ kA}$. L'intensité est maximale au bout du temps de montée tel que $t_{\text{montée}} = 1/(\beta - \alpha) \cdot \ln(\beta/\alpha)$, d'ordre de grandeur $2 \mu\text{s}$.

Avec cette loi d'évolution du courant source, l'équation de Faraday permet de calculer la tension induite dans le circuit :

$$e(t) = - \frac{\mu I_0 S}{2\pi r} (\beta \exp(-\beta t) - \alpha \exp(-\alpha t))$$

Exemple : un circuit fermé de surface $S = 1 \text{ m}^2$ situé à une distance $r = 100 \text{ m}$ du point d'impact de la foudre ($I = 30 \text{ kA}$) est le siège d'une tension induite de 60 V .

A son tour le circuit va véhiculer un courant $i(t)$ sous l'effet de la tension induite $e(t)$. Si on assimile le conducteur à une composante selfique L en série avec une composante ohmique de résistance équivalente R , le courant induit est celui créé par une source de tension $e(t)$ aux bornes du circuit (voir schéma plus haut) :

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = e(t) = - \frac{\mu I_0 S}{2\pi r} (\beta \exp(-\beta t) - \alpha \exp(-\alpha t))$$

par un calcul similaire à celui de l'annexe 4 (exercice !), cette équation s'intègre en :

$$i(t) = \frac{\mu I_0 S}{2\pi r} \left[\left(\frac{\beta}{R - \beta L} - \frac{\alpha}{R - \alpha L} \right) \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) + \frac{\alpha}{R - \alpha L} \exp(-\alpha t) - \frac{\beta}{R - \beta L} \exp(-\beta t) \right]$$

Remarque : si le circuit est constitué d'une ligne conductrice avec retour par la terre, la hauteur de la ligne h intervient par l'intermédiaire de la surface définie par la longueur a de la ligne et sa hauteur : $S = ah$. Les lignes les plus hautes sont les plus exposées à des tensions induites élevées.

Solutions pour le couplage inductif : elles consistent principalement à réduire le flux du champ magnétique inducteur (donc minimiser la surface exposée du circuit fermé, ou « boucle ») ou à créer un champ magnétique compensateur du premier. Pour cela :

- limitation des boucles et de leurs dimensions dans les circuits susceptibles d'être perturbés ;
- présentation au champ incident une boucle suivie d'une boucle identique mais orientée en sens inverse : ainsi les flux qui les traversent sont opposés et s'annulent. Pratiquement cela consiste à donner une structure torsadée aux lignes (**câblage en paires torsadées**)
- blindage des parties du circuit à protéger. Les **blindages** sont de deux types : magnétiques et amagnétiques. Le blindage magnétique consiste à disposer au voisinage du dispositif à protéger un matériau qui va modifier le champ magnétique induit par diminution de ses lignes de champ et donc de son intensité (effet de réluctance). Le blindage amagnétique consiste à entourer l'élément à protéger d'une cage qui servira non seulement de cage de Faraday (contre les champs électriques) mais aussi et surtout qui devient le siège d'un champ magnétique opposé à celui inducteur qui le crée.

Couplage électromagnétique :

Il concerne le cas d'émissions d'ondes électromagnétiques (par des antennes, des radars, ou toute source électromagnétique) et leurs effets dans les circuits. Le champ est ondulatoire et non pas impulsionnel comme pour la foudre. Il ne sera donc pas abordé ici, et relève du problème de la CEM à proprement parler.

Annexe 1 : loi de Child-Langmuir

On considère un tube à vide que l'on suppose assimilable à un condensateur plan dont le diélectrique est l'espace vide et les armatures parallèles sont les électrodes entre lesquelles circule un courant d'électrons. Le courant I est supposé constant et uniforme. L'application du théorème de l'énergie cinétique à un électron de vitesse v , de masse m et de charge élémentaire e , se déplaçant du nuage vers la terre sous l'action d'une ddp V , conduit à :

$$v = \left(\frac{2eV}{m} \right)^{1/2}$$

On calcule V à l'aide du **théorème de Gauss** appliqué à la surface formée des deux armatures et de celle s'appuyant sur leurs pourtours, et en admettant que V dépende seulement de l'altitude z , ce qui donne pour l'expression locale de ce théorème (**équation de Poisson**) :

$$\nabla^2 V = -\frac{ne}{\epsilon_0} \rightarrow \frac{d^2 V}{dz^2} = -\frac{ne}{\epsilon_0}$$

or la densité volumique de charge ne (n nombre de charges élémentaires par unité de volume) est reliée à l'intensité du courant I par :

$$j = nev = -\frac{I}{S}$$

qui est une constante puisque I est constant (S est la surface des armatures). L'équation de

Poisson ci-dessus s'écrit donc aussi :

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -\frac{b}{\sqrt{V}}, \quad b = \frac{I}{\epsilon_0 S} \sqrt{\frac{m}{2e}}$$

Avec les conditions aux limites $V = 0$ et $dV/dz = 0$ en $z = 0$, cette équation s'intègre en :

$$\frac{4}{3} V^{3/4} = 2h\sqrt{b}$$

(h : distance entre les deux armatures), soit :

$$I = a V^{3/2}$$

avec

$$a = \frac{4\epsilon_0 S}{9h^2} \sqrt{\frac{2e}{m}}$$

(relation de Child-Langmuir).

Remarque : les conditions géométriques et physiques de ce modèle ne sont évidemment pas représentatives de celles d'une décharge atmosphérique. Les électrons ne sont pas les seules charges circulant dans le précurseur (présence d'ions lourds), le précurseur n'est pas un tube cylindrique, il n'est pas vide mais constitué d'air ionisé et fortement chauffé, la propagation des charges n'est pas suivant une seule direction, l'intensité du courant n'est pas uniforme ni constante dans le temps (décharge fréquentielle), etc.

Pour une décharge atmosphérique la configuration est très différente de celle d'une décharge dans un tube à vide, et la constante a n'a aucune raison d'être égale à la valeur calculée précédemment. Il est cependant intéressant de souligner la similitude des lois de décharge dans un tube à vide et celles pour une décharge atmosphérique établies expérimentalement. Cette similitude suggère que, suivant la direction moyenne privilégiée de la décharge (z), la loi d'évolution résulte de l'application combinée du théorème de l'énergie cinétique pour des particules chargées et de l'équation de Poisson, qui conduit à des équations du type :

$$v = A\sqrt{V} \quad \text{pour la vitesse}$$

$$\rho = B\frac{I}{V} \quad \text{pour la densité des charges}$$

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -C\rho \quad \text{pour l'équation de Poisson,}$$

$$\text{et donc : } \frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{BC}{A} \frac{I}{\sqrt{V}} \quad \text{qui s'intègre en :}$$

$$I = a V^{3/2}$$

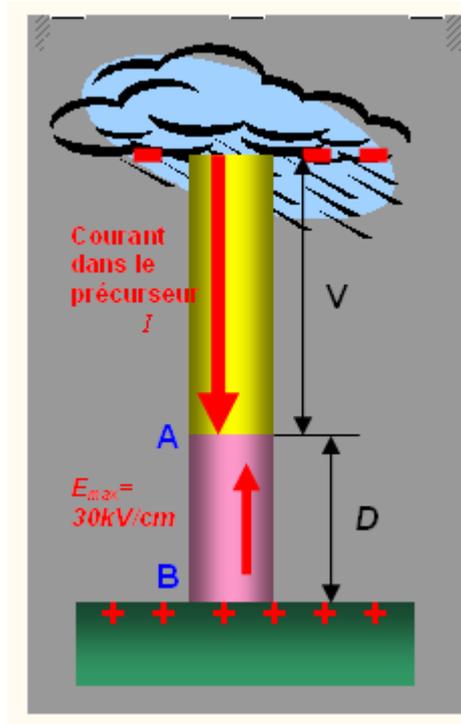
les constantes A , B , C , a étant liées à la physique et à la géométrie de la décharge.

Annexe 2 : distance d'amorçage

La valeur de la distance d'amorçage entre l'extrémité du précurseur et un point de la terre peut être vue comme une conséquence de l'expression reliant l'intensité du courant du précurseur à la tension qui règne à ses bornes, et dont on a estimé qu'elle était du type loi de Child-Langmuir

établie pour les tubes à décharges. Utilisons cette loi pour établir le lien entre la distance d'amorçage D et l'intensité du courant du précurseur I . Pour cela nous considérons la portion d'espace située entre l'extrémité du précurseur A et un point du sol B situé juste au-dessous à une distance z (voir figure). A l'intérieur du précurseur intensité I et tension V sont supposées reliées par la loi analogue à celle de Child-Langmuir : par conséquent à l'altitude z du point A la tension a pour valeur :

$$V = \left(\frac{I}{a} \right)^{2/3}$$



Dans l'espace compris entre A et B, par contre, le champ électrique E n'évolue pas comme dans le précurseur et est supposé être celui compris dans le diélectrique d'un condensateur plan dont les armatures sont situées en A et B : il vaut donc

$$E = \frac{V}{z}$$

Il atteint la valeur de rupture diélectrique $E_{max} = 30\text{kV/cm}$ pour une distance D limite entre le précurseur et le sol telle que : $V = DE$, ce qui donne, compte tenu de la relation plus haut, la condition cherchée :

$$D = E_{max} \left(\frac{I}{a} \right)^{2/3}$$

Annexe 3 : calcul de la tension de pas

On suppose qu'au point d'impact de la foudre la source de courant est ponctuelle et qu'à partir d'elle les charges électriques s'écoulent au sol, avec une intensité supposée constante I , dans toutes les directions, donc selon une symétrie sphérique. Entre un point distant de r de l'impact et un point distant de $r + dr$, la différence de potentiel $dU = U(r+dr) - U(r)$ est liée à l'intensité par la **loi d'Ohm** :

$$dU = I dR$$

dR étant la résistance élémentaire du sol rencontrée sur le parcours dr . Elle vaut :

$$dR = \rho \frac{dr}{S}$$

ρ est la résistivité du sol (en Ωm), S est la section de la résistance à la distance r , par symétrie sphérique et compte tenu que les équipotentielles sont des demi-sphères centrées sur l'impact, cette surface est $S = 2\pi r^2$. Il vient donc :

$$dU = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{dr}{r^2}$$

qui s'intègre entre le point r et un point $r + p$ distant du pas p du précédent, par :

$$U_p(r) = U(r+p) - U(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^{r+p} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r} \frac{p}{r+p}$$

$U_p(r)$ est la tension de pas à la distance r du point le moins éloigné de la source.

Remarques :

- Pour un pas fixé p plus on s'éloigne de la source plus la tension de pas diminue et tend vers 0 quand tend vers l'infini. On n'a plus rien à craindre à partir d'une distance où la tension de pas devient inférieure à 30V (tension de sécurité avec peau mouillée).

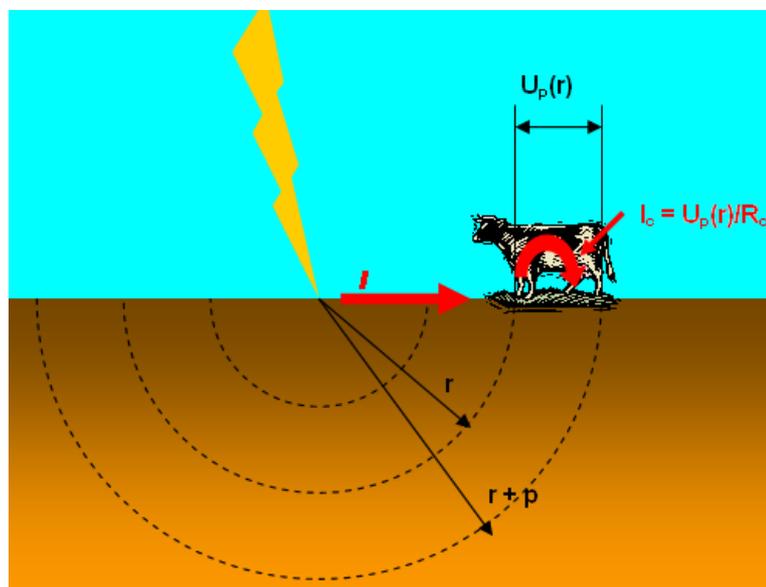
- Pour une distance r fixée, lorsque le pas augmente, la tension de pas augmente : lorsque le pas tend vers l'infini, elle tend vers une valeur asymptotique qui est le potentiel du champ en r :

$$\lim_{p \rightarrow \infty} U_p(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Si R_c est la résistance électrique du corps, celui-ci est traversé par un courant corporel I_c dû à la tension de pas, d'autant plus élevé que le corps est conducteur :

$$I_c = \frac{U_p(r)}{R_c}$$

ce courant ne doit pas dépasser 60 mA pour être en sécurité.



Autre démonstration :

On part de la définition de la densité de courant par unité de surface de section du milieu traversé :

$$j = n e v = - \frac{I}{S}$$

où v est la vitesse moyenne des charges, n leur densité numérique par unité de volume. La loi d'Ohm énonce que la vitesse de déplacement des charges est proportionnelle au champ électrique E :

$$v = \mu E$$

où μ est la mobilité des charges et

$$E = - \frac{dU}{dr}$$

On a donc :

$$\mu \frac{dU}{dr} = \frac{I}{n e S}$$

or les charges se déplaçant de manière radiale depuis la source, la section S est l'aire de la demi-sphère de rayon r , soit $S = 2\pi r^2$. D'autre part, la résistivité du milieu est liée à la mobilité et à la densité de charge par : $\rho = 1/\mu n e$. L'équation précédente se réécrit donc :

$$dU = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{dr}{r^2}$$

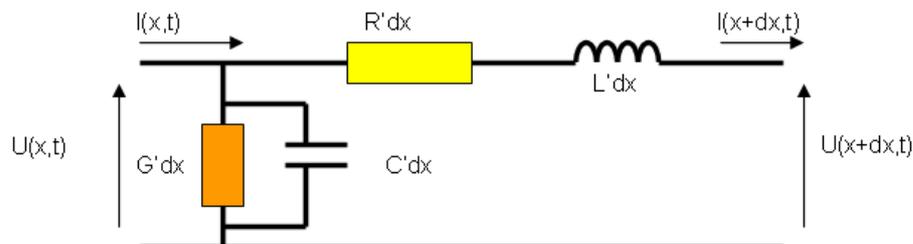
dont l'intégration entre deux points distants d'un pas p donne la tension de pas.

Annexe 4 – modèle simplifié de propagation d'une surtension dans une ligne électrique

On suppose que la surtension est une onde haute fréquence. La modélisation de sa propagation doit donc utiliser une description de la ligne par constantes réparties.

Cela signifie que les composants résistifs, selfiques et capacitifs du circuit ont des caractéristiques par unité de longueur. Soient R' , L' et C' ces grandeurs.

La ligne est supposée coaxiale. Elle est constituée d'un conducteur linéaire (âme) entourée d'un deuxième conducteur cylindrique coaxial, les deux conducteurs étant séparés par un isolant (diélectrique). Pour chaque élément de longueur élémentaire dx , la ligne est caractérisée par une résistance élémentaire $R'dx$ en série avec une self élémentaire $L'dx$, et en parallèle, par une conductance élémentaire $G'dx$ en parallèle avec une capacité élémentaire $C'dx$. Les quantités R' et G' représentent les pertes de la ligne dues au fait que le diélectrique n'est pas complètement isolant ainsi qu'à l'effet Joule du conducteur.



Appliquons à l'élément de circuit dx la loi des mailles et des nœuds, il vient :

$$i(x+dx, t) = i(x, t) - G' dx u(x, t) - C' dx \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$u(x+dx, t) = u(x, t) - R' dx i(x, t) - L' dx \frac{\partial i}{\partial t}$$

ce qui donne après développement de $u(x+dx, t) - u(x, t)$ et $i(x+dx, t) - i(x, t)$:

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = G' u(x, t) + C' \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial u}{\partial t} = R' i(x, t) + L' \frac{\partial i}{\partial t}$$

que l'on peut rassembler en l'une ou l'autre expression de l'**équation dite des télégraphistes** :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (R' C' + L' G') \frac{\partial u}{\partial t} - R' G' u = 0$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - L' C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - (R' C' + L' G') \frac{\partial i}{\partial t} - R' G' i = 0$$

Cherchons à résoudre l'équation en $u(x, t)$ en supposant que l'onde est quasi stationnaire, c'est-à-dire ses parties spatiale et temporelle sont séparées et le comportement temporel suit une loi sinusoïdale de fréquence $f = \omega/2\pi$ (le même raisonnement s'applique aussi au courant $i(x, t)$) :

$$u(x, t) = U(x) \exp j \omega t$$

dont l'injection dans l'équation différentielle ci-dessus donne l'équation de l'amplitude complexe de la tension $U(x)$:

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} + [L' C' \omega^2 - j \omega (R' C' + L' G') - R' G'] U(x) = 0$$

On cherche des solutions de la forme : $U(x) = U_0 \exp sx$, où s est un nombre complexe. D'où l'équation caractéristique en s :

$$s^2 = (R' + j L' \omega)(G' + j C' \omega)$$

On pose alors : $s = \pm jK$ avec $K = k - jk'$ telle que

$$jK = \sqrt{(R' + j L' \omega)(G' + j C' \omega)}$$

(c'est une forme de relation de dispersion $F(K, \omega) = 0$ entre le terme de propagation spatiale et la fréquence du signal). En utilisant les parties réelle et imaginaire de K , la solution générale s'écrit donc :

$$u(x, t) = U_0^+ \exp(-k' x) \exp(j \omega t - j k x) + U_0^- \exp(k' x) \exp(j \omega t + j k x)$$

Cette expression montre que l'onde est la superposition :

- d'une onde progressive qui se propage dans le sens des x croissants avec amortissement (terme en $\exp(-k' x)$) :

$$u^+(x, t) = U_0^+ \exp(-\alpha x) \exp j(\omega t - k x)$$

où l'on a posé $\alpha = k'$ **coefficient d'amortissement linéique** de l'onde dans la ligne, exprimé en

m^{-1} , qui dépend des caractéristiques physiques des matériaux de la ligne et de la fréquence ([Note 2](#)).

- d'une onde rétrograde qui se propage dans le sens inverse :

$$u^-(x, t) = U_0^- \exp(\alpha x) \exp j(\omega t + k x)$$

Le même type de résultat est obtenu pour le courant avec les notations correspondantes. Des expressions de $u(x,t)$ et $i(x,t)$ on déduit l'impédance caractéristique de la ligne qui est le rapport des composantes progressives de la tension $u^+(x,t)$ et du courant $i^+(x,t)$:

$$Z_c = \frac{u^+(x, t)}{i^+(x, t)}$$

Compte tenu des expressions générales de la tension et du courant et de l'équation reliant $\partial u/\partial x$ et $\partial i/\partial t$ ([Note 3](#)), on voit que l'impédance caractéristique est une constante :

$$Z_c = \frac{R' + jL'\omega}{j\bar{k}} = \sqrt{\frac{R' + jL'\omega}{G' + jC'\omega}}$$

où $\bar{k} = k - j\alpha$ est le nombre d'onde complexe.

Remarque : pour une ligne sans perte $R' = 0$ et $G' = 0$ et l'impédance caractéristique est réelle et indépendante de la fréquence :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

et la relation de dispersion se simplifie en :

$$k = \omega \sqrt{L' C'}$$

l'onde se propage alors dans une ligne sans perte avec la célérité :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$$

Les amplitudes U_0^+ et U_0^- sont obtenues par les conditions aux limites $x = 0$ et $x = L$ (extrémité de la ligne où se trouve l'impédance de charge Z_L) sur $u(x,t)$ et $i(x,t)$. Une fois connues elles permettent de calculer l'impédance de ligne en un point quelconque x :

$$Z(x) = \frac{u}{i} = \frac{R' + jL'\omega}{\alpha + jk} \frac{1+r}{1-r} = Z_c \frac{1+r}{1-r}$$

où $r(x)$ est le **coefficient de réflexion** en amplitude de la ligne :

$$r(x) = \frac{U_0^- \exp(\alpha + jk)x}{U_0^+ \exp(-(\alpha + jk)x)} = \frac{U_0^-}{U_0^+} \exp 2(\alpha + jk)x = \frac{U_0^-}{U_0^+} \exp 2j\bar{k}x$$

Le coefficient de réflexion en un point x est le rapport de l'onde rétrograde (réfléchie) sur l'onde progressive : $r(x) = u^-(x)/u_+(x)$.

On définit également le **coefficient de transmission** en chaque point comme le rapport de l'onde totale sur sa composante progressive : $\tau(x) = u(x)/u^+(x) = 1 + r(x)$. Il vaut 1 s'il n'y a pas d'onde réfléchie (toute l'onde est transmise), 0 si les ondes progressive et rétrograde sont en

opposition de phase ($u^+(x) = -u^-(x)$ donc $u(x) = 0$) ([Note 4](#)).

Les **impédances d'entrée** Z_0 et **de charge** Z_L sont définies respectivement pour $x = 0$ et $x = L$.

On montre facilement que :

$$Z(0) = Z_c \frac{1+r(0)}{1-r(0)} = Z_c \frac{Z_L + j Z_c \tan \bar{k} L}{Z_c + j Z_L \tan \bar{k} L}, \quad Z_L = Z(L) = Z_c \frac{1+r(L)}{1-r(L)}$$

$$r(0) = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \exp(-2 j \bar{k} L), \quad r(L) = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c}$$

et l'on pose :

$$\tau(0) = 1+r(0), \quad \tau(L) = \frac{2 Z_L}{Z_L + Z_c}$$

Ces relations montrent que l'impédance de charge sur laquelle se ferme le circuit impose l'impédance d'entrée. Ainsi par exemple :

- Pour une **ligne ouverte** ($Z_L = \infty$), l'impédance d'entrée est :

$$Z_0 = \frac{Z_c}{j \tan \bar{k} L}$$

le coefficient de réflexion en $x = L$ vaut $r(L) = 1$: l'onde réfléchiée conserve la phase et l'amplitude de l'onde incidente (avec $u^-(L) = u^+(L)$). Comme Z_L est infinie alors le courant est nul en $x = L$: $i(L) = u(L)/Z_L$. Le coefficient de transmission est $\tau(L) = 2$, la tension transmise au point $x = L$ est le double de la tension de l'onde incidente : $u(L) = u^+(L) + u^-(L) = 2u^+(L)$ puisque $u^-(L) = u^+(L)$.

- Pour une **ligne en court-circuit** ($Z_L = 0$), l'impédance d'entrée est :

$$Z_0 = j Z_c \tan \bar{k} L$$

on a en $x = L$: $r(L) = -1$ (l'onde est réfléchiée avec même amplitude mais en opposition de phase), $\tau(L) = 0$ (aucune onde transmise), $u_L = Z_L i(L) = 0$ (tension nulle en bout de ligne), mais $i(L) = 2i^+(L)$ (l'intensité du courant est le double du courant incident puisqu'en $x = L$ il arrive et repart avec la même amplitude).

La puissance transmise par la ligne est maximale lorsque circule uniquement l'onde progressive, donc lorsque $r(x) = 0$ en tous points. Lorsque cette condition est réalisée on dit qu'il y a adaptation d'impédance : l'impédance de ligne est constante en tous points et est égale à l'impédance caractéristique : $Z(x) = Z_c$. Le **taux d'onde stationnaire** (TOS) permet d'évaluer l'écart à l'adaptation d'impédance et l'aptitude de la ligne à transmettre la puissance maximale :

$$TOS = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1+|r(L)|}{1-|r(L)|}$$

Dans le cas de l'**adaptation d'impédance** : $Z_L = Z_c$: $r(L) = 0$ (pas d'onde réfléchiée), $\tau(L) = 1$ (toute l'onde est transmise), il n'y a donc pas de perte en puissance sur la ligne.

De façon générale si dans le circuit il y a des impédances de charge dans les zones de

transition ou de raccords, plus grandes que l'impédance caractéristique de la ligne, $Z_L > Z_c$, alors le coefficient de transmission sera plus grand que 1 : $\tau(L) > 1$, on aura donc une augmentation de la tension (mais l'intensité diminuera). Aussi, en présence de surtension dans la ligne, c'est dans ces zones de raccord aux impédances de charge que risque de se produire une augmentation de la surtension, avec pour conséquence le franchissement des tensions critiques de rupture diélectrique des différents isolants du circuit, et donc risques d'incendie, de contacts de conducteurs, de courts-circuits, etc.

NOTES :

(¹) - Le champ critique aux conditions de pression P et de température T se déduit du champ critique aux conditions standard par un coefficient correcteur $b(T,P,m)$:

$$E_c(T, P, m) = b(T, P, m) E_{c0}$$

avec :

$$b = 0,386 \frac{P}{T} m$$

où P pression de l'air en mm Hg, T sa température absolue (en K), et m un facteur compris entre 0,7 et 1 caractérisant l'état de surface de l'objet. Ainsi, le champ de rupture diélectrique augmente avec la pression et diminue avec la température de l'atmosphère.

(²) - La puissance moyenne véhiculée par la ligne subit donc une atténuation

$$\bar{P} = \frac{U_0^2}{2Z_c} \exp(-\mu x)$$

où $\mu = 2\alpha$ est le coefficient d'atténuation linéique de la puissance depuis la source de tension (ou de courant) jusqu'à l'impédance de charge.

L'application de la définition de K plus haut conduit aux relations suivantes entre k, α , et les caractéristiques de la ligne :

$$\begin{aligned} \alpha^2 - k^2 &= R'G' - L'C'\omega^2 \\ 2\alpha k &= (L'G' + R'C')\omega \end{aligned}$$

(³) - En utilisant $-\partial u / \partial z = R'i + L'\partial i / \partial t$, on obtient immédiatement l'expression du courant à partir de celle de la tension $u(x,t)$:

$$i(x, t) = -\frac{1}{R' + jL'\omega} \frac{dU}{dx} = \frac{\alpha + jk}{R' + jL'\omega} \left[U_0^+ \exp(-(\alpha + jk)x) - U_0^- \exp(\alpha + jk)x \right] \exp j\omega t$$

(⁴) - On remarquera que, contrairement à l'intuition, on n'a pas $r + \tau = 1$. L'amplitude de l'onde incidente n'est pas la somme de celle de l'onde réfléchi et de celle de l'onde transmise. Par contre la puissance se conserve de part et d'autre du point considéré (si la ligne est supposée sans perte). En effet la puissance s'écrit $P = ui^*$ et on a vu, en note de bas de page 4, que l'intensité est reliée à la tension par :

$$i(x) = \frac{1}{Z} (u^+(x) - u^-(x))$$

où Z est l'impédance caractéristique au point considéré : elle est $Z = Z_c$ en amont de la zone d'impédance de charge, et $Z = Z_L$ côté impédance de charge. En appliquant la définition précédente de la puissance de part et d'autre de $x = L$, on a donc :

- côté onde incidente, en $x = L$:

$$P = \frac{1}{Z_c} u(L)(u^+(L) - u^-(L)) = \frac{|u^+(L)|^2}{Z_c} (1 - r^2)$$

compte tenu de la définition de r ;

- côté onde transmise (côté impédance de charge), en $x = L$:

$$P = \frac{|u(L)|^2}{Z_L}$$

La puissance P étant la même de part et d'autre de $x = L$, et comme $|u^+(L)|^2 = |u(L)|^2/\tau^2$, il vient :

$$\tau^2 = \zeta(1 - r^2) \quad \text{avec} \quad \zeta = \frac{Z_L}{Z_c}$$

cette relation est immédiatement obtenue à partir des définitions de r et de τ .

Bibliographie

- (A) Frédéric Élie : article « [sécurité électrique](#) », site fred.elie.free.fr, septembre 2004
- (B) Pierre Laroche : *Phénoménologie de la connexion d'un éclair* – Revue Scientifique et Technique de la Défense, 1996-1, p.77.
- (C) P. Druet : *Le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)* – INERIS-DRA, septembre 2001.
- (D) D. Chapellier : *Prospection électrique de surface* – cours on-line de géophysique, Université de lausanne – Institut Français du Pétrole, 2000.
- (E) B. F. Howell : *Introduction à la géophysique*, avec le concours de Haroun Tazieff – Masson éd., Paris, 1969.
- (F) Benoit De Metz-Noblat : *La foudre et les installations électriques HT* – cahier technique Merlin-Gerin n° 168, juillet 1993