

Le document qui suit est une adaptation d'une conférence que donna le professeur Bernard Béland aux étudiants de l'Université de Sherbrooke durant l'année académique 1993-1994.

Table des matières

Introduction	1
Nature de la foudre.....	2
Bruit et distance de l'éclair	4
Intensité du courant.....	6
Énergie	6
Dangers de la foudre.....	7
Protection	7
Boule de feu	10
Mesures.....	10
Références	11

Introduction

La foudre est une décharge électrique (un arc) entre deux nuages ou entre un nuage et le sol. Les parties ayant été chargées électriquement, il y a éclatement de l'air (qui est un isolant), ce qui produit un parcours ionisé pour rétablir l'équilibre électrique entre les deux parties chargées.

- Ces décharges peuvent initier des incendies de forêts ou d'édifices.
- Les coups de foudre peuvent produire des dommages de nature mécanique sans qu'il en résulte un incendie.
- Il y a aussi des blessures et des décès suite à ces coups de foudre.
- Ces décharges peuvent perturber ou endommager les réseaux électriques.
- De nombreuses pannes électriques sont dues à ces incidents.
- Les coups de foudre sont très fréquents.
- Dans certaines régions, aux États-Unis, où il y a une grande activité atmosphérique, il y a environ un coup de foudre par année et par kilomètre de longueur pour les lignes à haute tension.
- En moyenne, un avion de ligne est soumis à environ un coup de foudre par année.
- Beaucoup de régions sont soumises à plusieurs coups de foudre par année et par kilomètre carré.

Avec six antennes installées dans le sud du Québec pour détecter les coups de foudre, l'IREQ (Institut de Recherches de l'Hydro-Québec), détecta 8 292 coups de foudre inoffensifs lors de la tempête du 23 octobre 1992. La foudre, bien que présentant un danger réel, ne produit pas des effets destructeurs à tout coup. On a déjà dit en boutade, mais avec à-propos, que la foudre était un moyen très peu efficace pour l'électrocution ou pour causer des incendies.

Aux États-Unis, il y a environ 600 décès et 1 500 personnes blessées à chaque année par la foudre.

Au Canada, le nombre de décès annuels est de l'ordre de dix et environ 80% de ces incidents se produisent en milieu rural, car en milieu urbain, la protection est meilleure.

La population des États-Unis est dix fois plus grande que celle du Canada et le nombre d'accidents est 60 fois plus élevé car l'activité atmosphérique y est beaucoup plus grande qu'au Canada. On estime qu'il y a environ 6 000 décès par la foudre annuellement dans le monde, soit un décès par année pour un million de personnes. La probabilité de mourir par la foudre est donc relativement faible.

Nature de la foudre

La foudre, étudiée par Benjamin Franklin entre les années 1740 à 1750 a été identifiée comme un phénomène dû à des charges électrostatiques.

Le problème a ensuite été oublié jusque vers 1920, lorsqu'il y a eu un regain d'intérêt sur le phénomène. Bien qu'on sache beaucoup de choses sur la foudre, plusieurs problèmes sur le sujet ne sont pas encore résolus.

Même le processus conduisant à la formation des charges n'est pas totalement compris.

À cause du niveau des tensions et puissances mises en jeu dans un coup de foudre, on ne peut l'étudier en totalité dans un laboratoire.

Pour ces mêmes raisons et d'autres, telle la nature aléatoire du phénomène, l'étude dans la nature n'est pas facile non plus.

Les charges dans un nuage sont accumulées comme il est montré sur la Figure 1.

Le bas de celui-ci est chargé négativement alors que la partie supérieure est chargée positivement. Il arrive que certaines parties du bas aient aussi des charges positives.

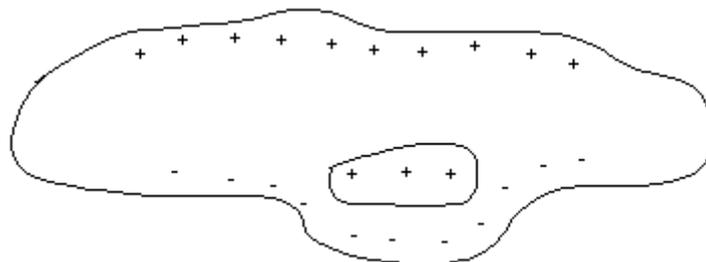


Figure 1 - Charges sur un nuage

Les charges s'accumulent jusqu'à ce que le potentiel entre le nuage et le sol atteigne $10E8$ à $10E9$ volts. Le champ électrique est alors suffisamment grand pour démarrer un chemin de conduction vers le sol. Cela ne se fait pas instantanément mais de façon progressive et très rapidement. Il se fait une décharge partielle sur une distance d'environ 50 mètres. Un peu plus tard, avec un délai de quelques dizaines de microsecondes, il y a une autre décharge partielle suivant le même chemin qui s'étend sur une distance supplémentaire d'environ encore 50 mètres. Le processus se répète jusqu'à ce qu'un chemin soit ainsi constitué jusqu'au sol. En fait, peu avant que ce chemin rejoigne le sol, le même type de chemin se crée aussi à partir du sol pour rejoindre le chemin créé à partir du nuage.

On a alors un chemin ionisé et il se produit l'éclair et le coup de foudre. Il y a décharge entre le nuage et le sol. Le phénomène est très rapide et l'œil humain ne peut le percevoir comme un processus discontinu. Il existe cependant des caméras qui permettent d'observer le phénomène. Il suffit de déplacer le film très rapidement derrière l'objectif et on peut alors observer la série de décharges partielles. La Figure 2 montre

une suite de dessins qui indique comment le processus se déroule. On notera que le chemin peut être multiple et comporte plusieurs embranchements partiels ou complets. La figure montre ce que "voit" successivement une caméra lorsque le temps croît.

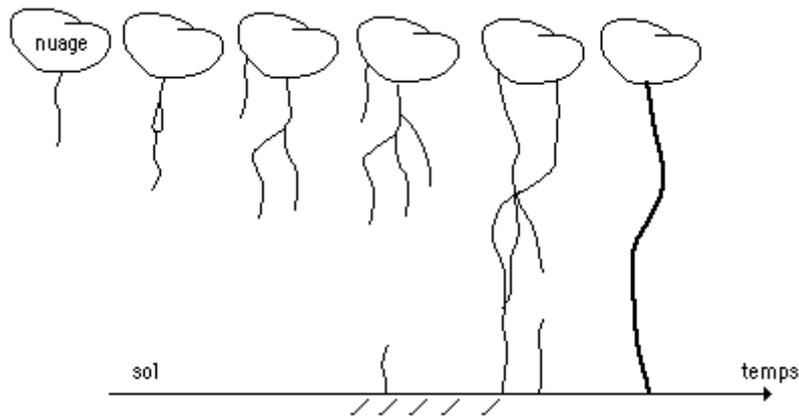


Figure 2 - Décharges partielles conduisant au coup de foudre

Le [Tableau I](#) donne les paramètres de ce processus. On donne les valeurs minimales, typiques et maximales qui ont été observées en pratique. La vitesse de propagation peut être comparée avec celle de la lumière qui est de 3×10^8 m/s.

Décharge partielle			
Caractéristiques	Minimale	Typique	Maximale
Longueur des chemins (m)	3	50	200
Temps entre les étapes (μ s)	30	50	125
Vitesse de propagation (m/s)	105	1.5×10^5	2.5×10^6
Charge transférée (C)	3	5	20

Tableau I

Une fois le chemin établi, il se produit l'éclair suivant un ou plusieurs chemins.

Le [Tableau II](#) donne la valeur minimale, typique et maximale pour les paramètres d'un éclair.

Éclair			
Caractéristiques	Minimale	Typique	Maximale
Vitesse de propagation (m/s)	2×10^7	5×10^7	1.4×10^8
Montée du courant (kA/ μ s)	1	10	80
Temps à la crête du courant (μ s)	< 1	2	30
Crête du courant (kA)	1	10-20	270
Temps pour que I décroisse jusqu'à la moitié de la crête (μ s)	10	40	250
Transfert de charge (C)	0.2	2.5	20
Longueur du chemin (km)	2	5	14

Tableau II

Les décharges peuvent se répéter en brèves successions dans un même chemin. On a alors un coup de foudre multiple.

Le [Tableau III](#) donne quelques paramètres de ce processus.

Éclairs multiples			
Caractéristiques	Minimale	Typique	Maximale
Nombre de coups	1-2	3-4	26
Intervalle entre les coups (ms)	3	40	100
Durée totale (s)	0.02	0.2	2
Charge totale transférée (C)	3	25	90

Tableau III

Ces quelques données expérimentales montrent qu'un coup de foudre est complexe et que ses paramètres peuvent varier dans de grandes proportions. De façon générale, les courants sont très élevés mais la durée est très courte. Ce coup de foudre qui vient d'être décrit entre un nuage et le sol peut aussi se produire entre deux nuages. Il arrive aussi souvent que des décharges partielles se fassent jusqu'à une certaine distance du point d'origine et s'arrêtent dans l'espace par la suite. Dans ce cas, il y a quand même décharge et transfert de charges vers un autre endroit ou un autre espace. Le coup de foudre implique presque toujours plusieurs décharges en rapides successions. Il arrive fréquemment que la décharge se fasse simultanément ou presque suivant plusieurs chemins en parallèle ; ces chemins pouvant se rejoindre et se séparer en un ou plusieurs endroits.

L'éclair que l'on voit vient de la lumière produite par le courant qui circule dans le chemin ionisé. Le phénomène est analogue à l'arc produit dans le cas de la soudure à l'arc électrique sauf que les puissances mises en jeu sont énormément plus élevées mais pour des durées très courtes. La température des gaz ionisés dans un arc dépend du courant et croît avec celui-ci.

Dans le cas d'un coup de foudre la température atteint environ 30 000 °C.

Le chemin de conduction est petit et, une fois que la décharge s'est faite, la déionisation se fait rapidement et l'air redevient isolant.

Bruit et distance de l'éclair

Suite à l'échauffement très rapide de la colonne de conduction, l'air chauffé s'expand rapidement et donne lieu au bruit caractéristique du tonnerre. C'est l'onde de choc que l'on entend qui correspond à l'expansion mécanique rapide autour de la colonne de conduction. Ce bruit peut être entendu jusqu'à quelques kilomètres de distance.

On peut évaluer la distance d'un éclair en comptant le temps qui s'écoule entre l'éclair et le bruit. La lumière produite se déplace à 3×10^8 m/s. Ainsi, il ne faut que 10^{-5} seconde pour parcourir une distance de 3 km. Le son se propage à 330 m/s. Donc, pour parcourir 3 km, il faudra environ 9 secondes. Le son sera donc entendu après ce délai par rapport au temps d'observation de l'éclair.

Presque tous les coups de foudre ont un courant de crête compris entre 5 000 et 40 000 A. Les intensités supérieures à 100 000 A ne se rencontrent que dans un cas sur dix milles. À l'occasion, la pointe de courant peut dépasser 200 000 A.

On estime à environ 30 000 V la tension nécessaire pour sauter une distance d'un centimètre dans l'air à la pression atmosphérique normale. Cette relation est approximativement vraie pour des distances du millimètre à quelques centimètres. Elle ne tient plus pour les distances très faibles ou très grandes. On appelle E le champ électrique ou la tension par unité de distance. Ainsi, le champ disruptif ou d'éclatement de l'air est de 30 000 V/cm. Pour des espacements très courts, ce champ peut être considérablement augmenté. En fait, pour une tension inférieure à 340 V, la tension de Paschen, l'air n'éclatera pas, peu importe la distance même si le champ électrique est d'un million de volts par centimètre. Cette relation peu connue est bien établie théoriquement et aussi de façon expérimentale.

De façon opposée, pour les distances grandes, le champ électrique doit être réduit, sinon il y aura éclatement. Si on applique la règle de 30 000 V/cm, soit 3 MV/m, un nuage typique qui est à 2 km de haut, exigerait une tension de 6×10^9 V pour que se produise la foudre. La foudre se produit en fait à des potentiels environ cent fois plus faibles. À ces hautes tensions, il se produit un phénomène localisé où l'isolant se brise graduellement suivant des chemins plus ou moins complexes comme nous l'avons vu plus haut. Cela est vrai pour la foudre dans l'air. Il y a un phénomène de bris un peu analogue pour le bris des isolants solides à très hautes tensions qu'on appelle l'arborification. Le petit chemin de conduction qui s'est développé, crée un champ électrique élevé à sa pointe., Cela brise l'isolant et étend le chemin jusqu'à ce que, éventuellement, il y ait éclatement.

Les structures élevées, telle une tour, sont frappées plus souvent par la foudre que les autres structures plus basses à proximité. On est aussi porté à croire que ces structures élevées attirent la foudre. Il n'en est rien. En effet, initialement le chemin du coup de foudre se développe à partir du nuage chargé. Ce n'est que plus tard qu'il se crée un chemin à partir du sol. Ce dernier chemin aura cependant tendance à se créer à partir d'une structure élevée. Dans ce sens, la foudre qui était pour atteindre le sol dans la région de cette structure frappera cette structure de préférence aux objets environnants. On considère généralement qu'une structure de hauteur " h " protégera les autres objets au sol qui s'étendent jusqu'à une distance horizontale égale à " h ". Un édifice ou une tour de hauteur " h " protégera les objets autour de celui-ci jusqu'à une distance " h ".

Cette hauteur et cette distance de protection sont un peu arbitraires. La protection n'est pas absolue et il est possible que la foudre frappe à l'intérieur de ce périmètre sauf que cela est moins probable que si la protection était absente. De même, la protection s'étend à une distance plus grande que la hauteur " h " sauf que la protection est de moins en moins efficace lorsque la distance augmente. Certains auteurs considèrent que la protection s'étend jusqu'à une distance $2h$ et ils ont également raison sauf que la probabilité de protection diminue avec la distance.

On définit une journée où il y a eu un orage électrique en un endroit donné comme une journée où on a entendu au moins un coup de foudre. Avec cette définition, on a tracé des courbes isocérauniques pour différentes régions du globe. Ce sont des courbes donnent le nombre de jours par année où il y a eu des orages électriques.

Le nombre de jours varie de quelques-uns à plus d'une centaine par année. Le Canada et le Québec sont soumis à une activité relativement faible. La foudre est généralement très élevée dans les régions autour de l'équateur et très faible près des pôles. Cette grande activité autour de l'équateur vient des courants d'air chaud. Elle est également très variable en fonction de la période de l'année.

Intensité du courant

Le courant dans un coup de foudre varie beaucoup d'une fois à l'autre, et en intensité et en fonction du temps. On l'a vu, les coups de foudre se répètent souvent en succession rapide. La Figure 3 montre une courbe représentative du courant en fonction du temps. La Figure 4 donne le pourcentage des coups de foudre dont le courant crête dépasse une certaine valeur. Cette courbe est donnée par Marshall dans le livre "Lightning Protection" et provient de 4 410 observations dont 2 721 aux États-Unis et 1 689 en Europe.

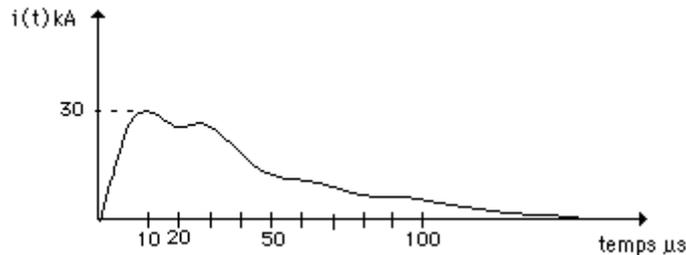


Figure 3 - Enregistrement du courant de la foudre

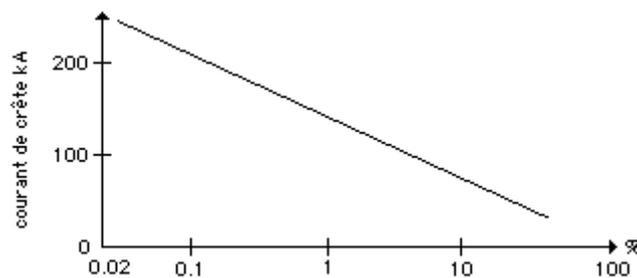


Figure 4 - Pourcentage des coups de foudre dont le courant excède la valeur donnée

Les coups de foudre transfèrent des charges négatives vers la terre. Cela est l'équivalent d'avoir un courant vers le haut. Cependant, on ne peut pas accumuler des charges indéfiniment sur un objet quelconque, incluant la terre. En moyenne, le courant dans une direction doit être compensé par un courant dans l'autre direction. On estime que la surface du sol est chargée négativement avec environ $10E-9$ C/m². Cela donne un champ électrique à la surface du sol d'environ 100 V/m. Ce champ est très variable en fonction du temps et d'un endroit à l'autre. En particulier, il est influencé par la présence d'un nuage et peut être considérablement plus élevé. À l'occasion, lors d'une tempête ou encore à haute altitude, il peut être suffisant pour faire redresser les cheveux sur la tête. Ce champ donne lieu à un courant de charge négative vers le haut qui est estimé à $3 \times 10E-12$ A/m², soit environ 2 000 A sur toute la surface de la planète. La terre est un système actif en interaction continue avec l'atmosphère. Il y a toujours des déplacements de charge.

Énergie

L'énergie accumulée dans le champ électrique entre un nuage et le sol peut être calculée par :

$$É = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (1)$$

Soit $Q = 20$ C et $V = 108$ V. On a alors une énergie de $E = 1/2 \times 20 \times 10E8 = 10E9$ joules ou watt-seconde. Cela correspond à 280 kWh soit environ 15 \$ d'électricité au coût de 1993. Notons qu'on retrouve la même

énergie si on calcule le produit $V \times I \times \text{temps}$. La puissance instantanée est énorme mais le phénomène est de courte durée. Cette puissance instantanée est donnée par le produit $V \times I$. On a alors $10E8 \times 20\,000 = 2 \times 10E12$ watts, mais la durée est très courte (quelques centaines de microsecondes). Cette énergie est dissipée sous forme de bruit, de chaleur et d'ionisation de l'air. Il faut bien se rendre compte que cette énergie est distribuée sur un très long parcours de quelques kilomètres et non pas concentrée en un point au sol.

Dangers de la foudre

La foudre qui frappe un objet métallique bien mis à la terre ne cause généralement pas de dommages. Bien que le courant soit élevé, le temps est court de sorte que l'échauffement du conducteur qui est donné par RI^2t est faible. Il est très rare que le courant soit d'intensité et de durée suffisantes pour fondre un conducteur de cuivre No 14 bien que la chose ne soit pas impossible. En général, on recommande un conducteur No 8 pour cette fonction et un coup de foudre ne peut l'échauffer suffisamment pour constituer un danger. Il y a cependant d'autres dangers.

Lorsque la foudre frappe un matériau isolant, comme du bois, il y a un arc très intense qui se forme à la surface ou à travers le matériau. Dans le cas d'un arc en surface, il y a carbonisation superficielle. Dans le cas d'un arc à travers le matériau, il y a échauffement rapide du matériau suivant un chemin étroit. Il y a volatilisation d'une partie du matériau ou encore génération de vapeur à l'intérieur si le matériau est humide. La pression mécanique ainsi créée est suffisante dans bien des cas pour éclater le matériau et fendre le bois. Des poteaux électriques et des arbres sont ainsi fendus et cassés. La foudre prend éventuellement le chemin du sol à travers les racines qui, elles aussi, peuvent éclater. C'est effectivement une explosion mécanique due à la pression de la vapeur d'eau qui s'y est créée. À l'occasion, le sol est levé suivant le chemin des racines comme si on avait labouré un chemin au-dessus des racines.

Étant donné les puissances et les courants mis en jeu dans un coup de foudre, il est assez surprenant de constater qu'il est très rare qu'un coup de foudre résulte en un incendie dans une pièce de bois. Cela vient de la très courte durée du phénomène. D'ailleurs, c'est une constatation expérimentale que les coups de foudre les plus dangereux pour initier un incendie ne sont pas nécessairement ceux qui ont un courant de crête élevé mais bien ceux dont la durée est longue.

Il est évident qu'il est très rare qu'un coup de foudre résulte en un incendie. Au Québec, il y a quelques coups de foudre par kilomètre carré et par an. La superficie du Québec étant d'environ $2.5 \times 10E6 \text{ km}^2$, il y a quelques millions de coups de foudre par an. Si un pour cent de ces coups de foudre résultait en un incendie, il y aurait une centaine de milliers d'incendies par an dus à cette cause uniquement. On sait que ce n'est pas le cas.

Protection

Il est illusoire de se protéger de la foudre par une enveloppe isolante. Les tensions sont tellement élevées que tout isolant serait percé comme s'il n'existait pas. Pour se protéger, il faut utiliser un objet métallique élevé qui protège approximativement suivant un cône dont le rayon de la base est égal à la hauteur de l'objet. C'est ce qu'on appelle un parafoudre. Cet objet n'a pas à être pointu comme on le croit souvent. La meilleure protection est de placer l'objet à protéger dans une enceinte métallique mais ce n'est pas toujours pratique de le faire.

Une personne dans une automobile est placée dans une enceinte équipotentielle et est très bien protégée. Si un éclair frappe le véhicule, celui-ci monte à un potentiel de plusieurs dizaines de milliers de volts par rapport au sol environnant. Ce potentiel est celui qui permet l'éclatement électrique entre le véhicule et le sol et dépend des pneus. La personne et le véhicule seront ainsi soumis à une tension de 20 000 V par exemple.

La personne à l'intérieur du véhicule n'a aucune façon de le percevoir puisqu'alors elle est au même potentiel que l'enceinte. Elle se trouve dans une situation analogue à celle de l'oiseau perché sur une ligne à haute tension. Pour l'électrocution, il faut une différence de potentiel entre deux parties du corps. Évidemment, si la personne a un pied sur le sol alors qu'une autre partie de son corps touche au véhicule, elle sera soumise à une tension élevée en cas de coup de foudre et l'électrocution mortelle est très probable.

Le parafoudre devra être relié au sol par une prise de terre par le chemin le plus court et droit possible. Le cas échéant, on utilisera une conduite métallique de distribution d'eau. Sinon, on utilisera une électrode plantée dans le sol. La résistance de la prise de terre d'une distribution d'eau est de l'ordre de quelques ohms. Une prise de terre avec une électrode a en général plusieurs dizaines ou centaines d'ohms. Soit une résistance de prise de terre de 10Ω . Suite à un coup de foudre dont la crête atteint $20\ 000\text{ A}$, la prise de terre montera à $200\ 000\text{ V}$ pendant la durée du coup de foudre. Autour de la prise de terre, le potentiel diminuera graduellement avec la distance pour être nul à grande distance. Ceci est illustré sur la Figure 5.

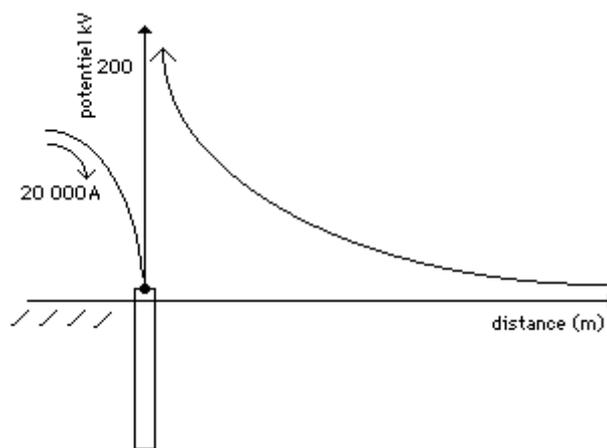


Figure 5 - Potentiel autour d'une prise de terre pendant un coup de foudre

Une personne pourrait se faire électrocuter en touchant la prise de terre et un autre objet à proximité. Elle pourrait aussi être électrocutée en marchant à proximité de la prise de terre. Le danger diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la prise de terre et augmente avec la longueur d'un pas. Les tensions en jeu sont suffisamment élevées pour que le courant électrique saute du conducteur allant à la prise de terre vers d'autres objets métalliques comme du déclin, un cadre de porte, une moustiquaire et bien d'autres objets.

Mentionnons que les dommages et le danger d'électrocution sont beaucoup moins élevés lorsque le temps d'exposition est court comme c'est le cas pour la foudre.

Lorsque la foudre frappe une ligne de transmission, le même phénomène se produit bien que le résultat soit moins dramatique. La surtension est plus faible puisque, en général, les prises de terre ont une résistance faible. De plus, il y a des éclateurs installés régulièrement sur la ligne. Ces dispositifs limitent la tension à environ 1,5 fois la tension du réseau primaire.

Suite à des coups de foudre et des manœuvres sur les circuits, il y a des surtensions qui peuvent survenir dans les résidences.

Ces surtensions peuvent rarement atteindre 6 kV .

Des surtensions de 3 kV sont assez courantes et peuvent se produire quelques fois par année.

La tension est limitée par la tension d'éclatement entre des parties tels une vis d'une prise de courant et son boîtier.

Le niveau énergétique est très faible et ces perturbations ne causent aucun problème.

Signalons que les isolants d'un câble électrique résistent facilement à 20 kV si la tension n'est pas appliquée de façon permanente.

Les surtensions produites par la foudre est un phénomène peu connu. Il n'est pas facile à observer. D'une part, il ne se produit que quelques fois par année. De plus, lorsqu'il se produit, l'effet transitoire ne dure

qu'une fraction d'une seconde. À cause du temps de réponse, la plupart des instruments ne peuvent l'indiquer. Il faut des instruments spéciaux pour reconnaître et enregistrer le phénomène. C'est peut-être mieux ainsi ; si c'était connu, on aurait une autre source hypothétique d'incendies électriques pour les investigateurs en incendie.

Ces hypothèses sont déjà suffisamment nombreuses pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en ajouter d'autres.

Considérons un conducteur en cuivre No 8 de mise à la terre. La résistance du conducteur est de 0,0021 Ω /m. Avec un courant de foudre de 20 kA, la chute de tension ohmique dans le fil est de 42 volts par mètre de longueur. Si le conducteur constitue une boucle, la tension sera encore plus élevée. Considérons la boucle illustrée sur la Figure 6.

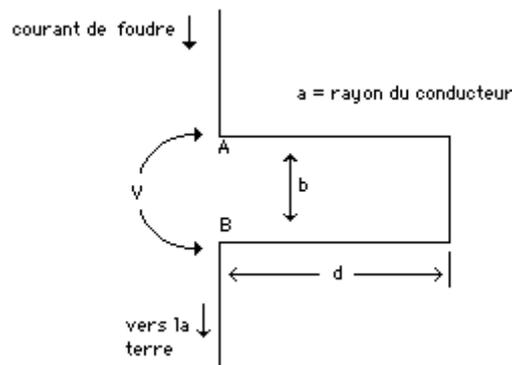


Figure 6 - Boucle dans le conducteur de mise à la terre

Cette boucle pourrait être faite pour contourner un obstacle tel un débord de toit. On va le voir, une telle installation doit être évitée dans l'installation du conducteur qui va d'un parafoudre vers le sol.

La tension que l'on observera entre A et B est donnée par :

$$v(t) = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

où L est l'inductance de la boucle en henry et di/dt est la variation du courant par unité de temps. L'inductance est donnée par :

$$L = 4 * 10^{-7} * d * \ln \left[\frac{b}{a} \right]$$

où a est le rayon du conducteur dans les mêmes unités que b et ce dernier terme est indiqué sur la figure. À titre d'exemple, on utilise un conducteur No 8 pour lequel a = 1,6 mm. Supposons que b soit de 100 mm et d = 1 m. On trouve : L = 1.6x10E-6 H

D'après le Tableau III, di/dt peut atteindre la valeur de 8 x 10E10 A/s (80 kA/ms). Ainsi, l'équation (2) donne : V = [1.6x10E-6 H][8 x 10E10] = 128 000volts

Même pour un coup de foudre typique, cette tension serait de l'ordre de 20 kV.

Cette tension est suffisamment élevée pour causer des problèmes. Par exemple, il peut se créer un arc entre les points A et B, à travers l'obstacle et ainsi percer ou faire exploser les matériaux. Même si la tension est insuffisante pour sauter la distance AB de la Figure 6, il peut y avoir éclatement à la surface ou le saut peut

se faire par l'intermédiaire d'un objet métallique entre A et B, tel un clou. Dans toutes ces installations, il faut éviter les changements brusques de direction et surtout de former des boucles, même partielles comme, par exemple, pour contourner une fenêtre ou une porte.

L'exemple qui précède semble indiquer que dans les installations électriques résidentielles, on devrait éviter de changer brusquement la direction des câbles. Il arrive souvent que des investigateurs en incendie mentionnent que le câble changeait de direction de façon brusque. On argumente que l'électricité se comporte comme l'eau dans un tuyau et que si la direction change brusquement il y aura de très fortes réactions. L'électricité cherchera à circuler en ligne droite. Cet argument et cette conclusion sont fallacieux. L'électricité ne se comporte pas comme l'eau. L'électricité pourra sauter entre les points A et B de la Figure 6, parce que l'impédance de la boucle, eu égard au courant et à sa variation rapide, est élevée. L'électricité saute l'espace AB, parce que le chemin AB est plus facile. Avec des variations de courant plus lentes, ce saut ne se produirait jamais comme ce serait le cas en courant continu ou même à 60 Hertz.

Boule de feu

Une manifestation assez étrange des coups de foudre est la boule de feu qui a déjà été vue par de nombreux observateurs atteignant cinq ou dix pour cent de la population dans certaines régions. La raison et le processus de formation ne sont pas connus de façon certaine, bien qu'il y ait quelques théories plausibles mais non établies. La boule de feu serait en fait une masse de gaz fortement ionisée.

Les principales caractéristiques de ces boules sont :

1. Généralement sphériques mais aussi sous forme d'anneau
2. De 10 à 100 cm de diamètre
3. De couleur rouge, orangée ou bleue.
4. Se déplacent et glissent sur des objets métalliques tels des fils, rails de chemin de fer et clôtures.
5. Vitesse de déplacement d'environ 2 m/s.
6. Peuvent fondre des fils de fer et faire évaporer quelques kilogrammes d'eau.
7. Durent de plusieurs secondes à plusieurs minutes.

Nous ne nous attarderons pas sur ce phénomène peu compris. Bien qu'il puisse en résulter un incendie et des brûlures, ces dommages sont rares. Il y a donc peu d'intérêt à tenter de se protéger de cet effet. D'ailleurs, on ne connaît aucune façon de le faire.

Mesures

Étant donné la nature aléatoire des coups de foudre et surtout de l'intensité du courant, de la tension et de la courte durée des phénomènes en jeu, il n'est pas facile de faire des mesures dans ces conditions. Cependant, beaucoup de dispositifs spéciaux ont été développés pour faire ces mesures. On a pu enregistrer le courant en fonction du temps sur des écrans cathodiques en ne déclenchant le faisceau qu'au moment où l'éclair se produit. On a fait de même avec la photographie avec, en plus, un film qui se déplace rapidement devant l'objectif pour déterminer le processus de formation du coup de foudre.

On a pu mesurer l'intégrale du courant au carré en utilisant un groupe de conducteurs de différentes grosseurs placés en série. En notant le plus gros des conducteurs qui a fondu lors d'un coup de foudre on trouve la valeur cherchée.

En plaçant une feuille de papier entre deux électrodes, l'arc y fait un trou dont la surface est proportionnelle à la valeur crête du courant et indépendante de la forme d'onde du courant. Cette règle a pu être vérifiée en laboratoire et ne vaut que pour des temps de décharge courts.

Si on place de petits aimants permanents à différentes distances d'un conducteur frappé par un coup de foudre, ceux-ci sont magnétisés. Le champ magnétique maximal est proportionnel à la valeur crête du courant et inversement proportionnel à la distance du fil. En notant jusqu'à quelle distance les aimants sont magnétisés, on a une indication de la valeur crête du courant.

Bien d'autres dispositifs ont été développés. Nous n'en avons donné que quelques-uns pour montrer à la fois la simplicité et l'ingéniosité de certaines méthodes.

Dans ce texte nous avons étudié superficiellement les coups de foudre. Nous rappelons au lecteur que ces phénomènes sont difficiles à étudier. Nous n'avons qu'effleuré la formation des charges dans les nuages et le phénomène d'éclatement du coup de foudre. Le lecteur intéressé pourra lire quelques-unes des références données ci-dessous.

Références

1. J.M. Marshall, "Lightning Protection", John Wiley & Sons, New-York, 1973.
2. C.F. Wagner and G.D. McCann, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Chapitre 16, pp. 542-577, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburg, 1950.
3. W.R. Newcott, "Lightning, Nature's High-Voltage Spectacle", National Geographic, Vol. 184, No.1, July 1993, pp. 83-103. L'article comprend plusieurs belles photographies de coups de foudre.