

La foudre et sa protection en général.

Lorsque j'ai entrepris ce travail sur l'électricité atmosphérique, la foudre, ses effets et sa protection (à la demande d'un membre du BTS), pour en faire une présentation lors d'une réunion de section, je n'imaginai pas l'ampleur de la tâche. J'ai promis d'en faire une synthèse et de le présenter dans le flash info, car le sujet est intéressant d'une part, et est susceptible de chasser des idées fausses ou préconçues d'autres part.

Même en présentant les choses de façon succinctes, il est impossible de le faire en un seul n° du flash info si on ne veut pas que le texte devienne une « vulgarisation un peu trop simplifiée », et que le lecteur reste sur sa faim, et cela, sans prétendre alimenter les grands appétits. Ce texte s'adresse quand même à un lecteur possédant quelques notions très élémentaires en électricité.

Il s'agit donc de présenter de façon simple l'essentiel des mesures de protection et de prévention.

Une première partie traite de la formation des orages et de la foudre qui représente donc la décharge électrique entre sol et nuage ou entre nuages.

Il y aura donc une suite dans le prochain flash info, tout en sachant que le problème n'aura encore été que « rapidement parcouru ! ».

Introduction

Les phénomènes électriques sont présents en permanence dans l'atmosphère terrestre.

Les couches de la haute atmosphère sont soumises aux rayonnements α , β , γ et ultraviolets, et ionisées sous leurs influences.

La conséquence est l'apparition d'une d.d.p. entre ces hautes couches situées entre 60 et 80 km, portées à un potentiel de +300 000 V par rapport à la terre.

La résistance de l'espace entre couches conductrices de l'atmosphère et le sol est environ 200 Ω , avec 95% de la résistance totale entre le sol et 10 km.

L'atmosphère est donc traversée par un courant de 1500 A réparti sur la surface du globe.

Les phénomènes orageux se développent au sein des nuages appelés « Cumulus Nimbus » en forme d'enclume, occupant une surface de plusieurs km², et ayant une épaisseur de plusieurs km, dont le sommet peut atteindre 15 000 m.

Leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Leur formation est due à l'apparition de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 m/s.

Le phénomène foudre.

Le phénomène foudre est sérieusement étudié depuis un peu plus d'un siècle. Il est désormais statistiquement bien connu. Il s'agit d'une spectaculaire décharge électrostatique disruptive entre un nuage et le sol. Ce n'est que de l'électricité dans l'air! Notre connaissance de la foudre est désormais satisfaisante.

Le nombre moyen de jours annuels durant lesquels le tonnerre est entendu est appelé le « niveau kéraunique ». Ce comptage fût longtemps le seul moyen d'évaluer l'occurrence de la foudre. Ce niveau varie selon les régions, et vaut en moyenne, sous nos latitudes, environ égal à 20.

Le tonnerre n'est que le bruit acoustique du canal ionisé que la température du canal ionisé de l'éclair dilate brutalement. Le tonnerre n'a jamais tué personne. La lumière se propageant environ un million de fois plus vite que le son, si l'on entend le tonnerre on peut être rassuré: on n'est pas foudroyé !

Des moyens de détection radioélectriques permettent de localiser les chocs de foudre. Il est possible de détecter les prédécharges dans un nuage de 10 à 20 minutes avant le premier coup au sol. Il constitue un système d'alerte précis et sûr.

L'éclair entre nuages est appelé "intranuage", celui entre un nuage et le sol est dit "coup au sol". Sous nos latitudes, entre 30 et 60°, il y a entre deux et trois fois plus d'éclairs intranuages qu'au sol. Des mesures radio indiquent que le nombre de prédécharges dans les nuages seraient bien plus nombreuses que les coups au sol, mais leurs amplitudes restent modestes. Les coups au sol ont évidemment des effets plus sévères sur les matériels que les décharges intranuage.

Des relations empiriques estiment le nombre moyen de chocs annuels au sol par kilomètre carré. Malgré quelques variations selon les méthodes de comptage, les estimations pour le territoire belge avoisinent 100 000 chocs annuels, soit en moyenne environ trois chocs par kilomètre carré. Des dispersions considérables sont observables à l'échelle locale. Elles sont provoquées par des instabilités atmosphériques dues au relief, à de grands rideaux d'arbres en plaine, au gradient de température du sol, à de grandes agglomérations ou des industries lourdes, etc.

Le cumulo-nimbus

Le nuage de la foudre est le cumulo-nimbus. Il est facile à reconnaître quand il est isolé: de loin il a une forme d'enclume ; de dessous il est tout noir! Il est provoqué par l'ascension d'un air humide et instable. Si le déclenchement des ascendances est provoqué par le relief ou toute autre cause locale, l'orage est dit "de convection". S'il est provoqué par la rencontre d'un front chaud et d'un front froid, l'orage alors très étendu est dit "de front". Au cœur du nuage, de furieuses ascendances, plusieurs dizaines de mètres par seconde, propulsent des particules en suspension appelées "hydrométéores" de tailles variables (eau, glace, etc.) jusqu'à une altitude de 10 à 15 kilomètres.

Le cumulo-nimbus se compose comme une énorme machine électrostatique dont la partie basse, jusqu'à une altitude de 5 km environ, se charge des panicules lourdes négatives et la partie haute des particules positives plus légères. La charge électrique totale dissociée est de l'ordre d'une centaine de coulombs. On peut diviser le nuage en trois parties :

la partie supérieure (ou enclume) constituée entièrement de glace et regroupant les charges positives supérieures.

la partie centrale composée de glace et d'eau en surfusion et regroupant les charges négatives principales.

la partie inférieure constituée de gouttes d'eau et/ou de neige et comportant des charges négatives et des petites poches de charges positives.

Sur terre, le champ électrique par beau temps entre le sol et l'ionosphère (couche conductrice à une altitude de 50 à 60 km) est de l'ordre de 200 V / m, la terre étant négative. Le courant continu total terrestre qui fuit à travers cet énorme condensateur est d'environ 1,5 kA. La foudre, par ses 300 éclairs par seconde répartis sur la surface du globe, est le phénomène qui permet aux charges négatives qui s'élèvent lentement par beau temps de revenir sur terre.

Le champ électrostatique en plaine, juste avant une décharge, est compris entre 10 et 20 kV / m.

La présence d'objet pointus au sol renforce localement ce champ électrique qui peut atteindre alors des valeurs de quelques centaines de kV/m. Cette intensification du champ électrique au voisinage des sommets s'appelle **l'effet de pointe**. On peut ainsi calculer qu'au sommet d'une demi sphère posée sur un plan, le champ est le triple du champ préexistant. Cet effet s'accroît encore dans le cas d'un demi ellipsoïde; ainsi pour un rapport entre le grand axe et le petit axe de l'ellipsoïde égal à 30, le champ est multiplié par un facteur 300 et pour un rapport de 100, il est multiplié par 2300.

Les effluves au bout de pointes conductrices nommées Feux de Saint Elme sont la conséquence visible d'un champ électrique intense. La hauteur d'un éclair étant d'environ 5 km, la d.d.p. entre le nuage et le sol est de l'ordre de 100 MV. Face à de telles valeurs, les d.d.p. que l'on peut insérer en série resteront négligeables. La foudre est un générateur de courant parfait.

La décharge atmosphérique

On distingue deux grandes familles d'éclairs :

les coups de foudre pour lesquels la décharge électrique s'effectue entre le nuage et le sol

les éclairs intra nuageux (à l'intérieur du nuage) et **inter nuageux** (entre différents nuages) beaucoup plus nombreux que les coups de foudre (de **60 à 70 %** des décharges totales).

La première phase d'un **coup de foudre** (donc entre la terre et le nuage) est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse, appelée **traceur**, qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible (environ 200 km/s). Un traceur (ou précurseur ou encore leader) est en fait un **canal ionisé**, d'une grandeur caractéristique importante à l'échelle macroscopique (typiquement 2 à 3 cm de diamètre), qui est la conséquence directe des phénomènes d'**avalanche électronique**.

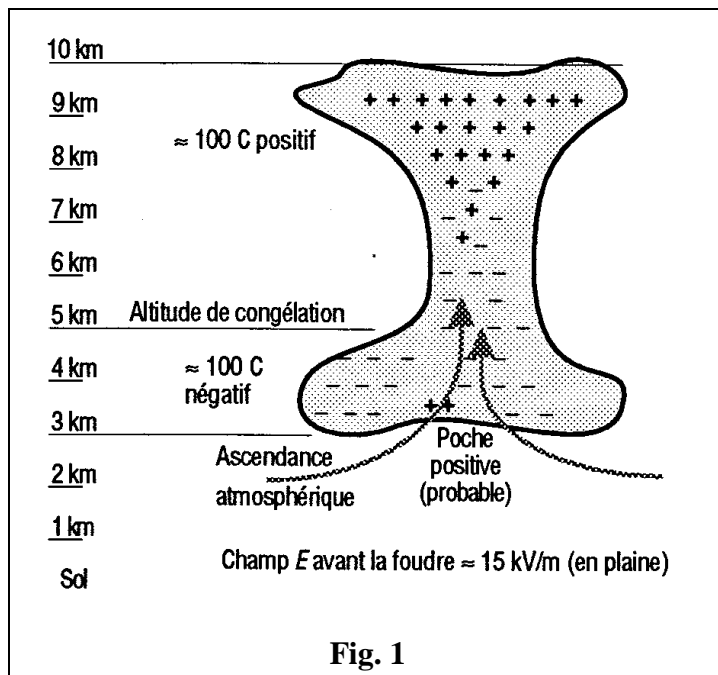


Fig. 1

En effet, l'air atmosphérique contient en permanence des ions négatifs et positifs, en quantité variant de 100 à 1000 ions par centimètre cube. Lorsqu'un de ces électrons se trouve dans une région de l'espace où règne un champ électrique important il va subir une accélération et acquérir **une énergie cinétique**. Très vite il va entrer en **collision** avec un atome neutre. Si à cet instant l'énergie acquise par l'électron est supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré, la collision va créer un nouvel **électron libre**. Ce processus est appelé "ionisation par choc" ou "ionisation collisionnelle". Ce nouvel électron se comporte comme le précédent et crée donc à son tour un autre électron libre et rapidement le phénomène prend une allure d'avalanche. L'intensité de champ électrique nécessaire pour qu'un électron puisse ioniser un atome est de l'ordre de **30 kV/cm** dans l'air et à pression normale.

Lorsqu'un traceur établit un canal ionisé entre le sol et le nuage, **une ou plusieurs décharges** se produisent. Ces décharges constituent la foudre proprement dite. Elles se déplacent à une vitesse de l'ordre de **40 000 km/s** et correspondent à une tension de l'ordre de **100 millions de Volts** et un ampérage de **30 000 A**. Le long du trajet de la décharge, l'air peut atteindre une température de **30 000°C**.

La plupart des décharges dans nos régions sont négatives, c'est à dire que la partie du nuage qui se décharge est négative par rapport au sol. Les décharges positives sont rares : environ 10% des éclairs sont positifs ou contiennent une impulsion positive. Ils ont un courant crête supérieur, écoulent plus de charges et sont bien plus énergétiques que les décharges négatives

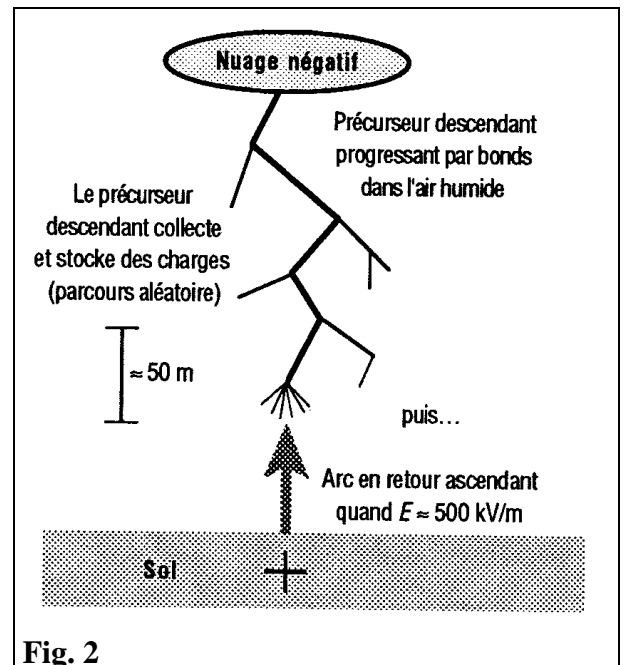


Fig. 2

Classification des coups de foudre

La classification des coups de foudre est réalisée en fonction des charges écoulées et de la nature du système de traceurs conduisant à la connexion de la foudre au sol.

Coups de foudre descendants négatifs, avec arc en retour positif : Ceux sont les plus fréquents (70 à 90 % des cas de foudroiement).

Dans ce type de décharge, il y a émission d'un précurseur négatif descendant du nuage (Fig.3 - étape a). Le champ électrique sur un objet au sol est alors suffisamment renforcé par l'approche du précurseur négatif pour provoquer la naissance d'un arc en retour positif (Fig.3 - étape b). Cet arc va aller à la rencontre du traceur provenant du nuage, donnant naissance, lorsqu'ils se rencontrent, à la décharge principale de foudre.

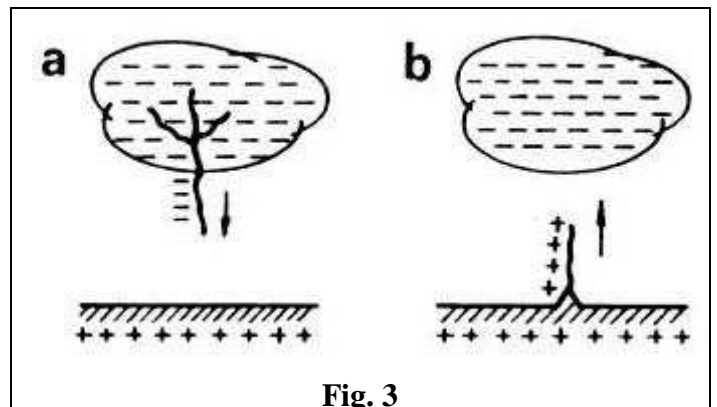


Fig. 3

Coups de foudre descendants négatifs, sans arc en retour positif : Ce type de décharge est identique à la précédente, mais les conditions de champ électrique au sol ne permettent pas le développement d'un arc en retour. Il y a alors connexion directe au sol.

Coups de foudre descendants positifs : Initié par un traceur positif se propageant depuis la charge positive supérieure du cumulonimbus vers le sol, ce type de décharge est rare mais est accompagné d'un transfert des charges nuage - sol important.

Coups de foudre ascendants positifs : Ce type de connexion correspond au cas où le champ électrique au sol créé par le nuage est suffisamment intense pour qu'un précurseur puisse se développer du sol vers le nuage. Ceci est généralement le cas dès lors qu'il existe au sol des structures de grande hauteur (plusieurs dizaines de mètres). Ce type de décharge est ainsi fréquent dans les régions montagneuses.

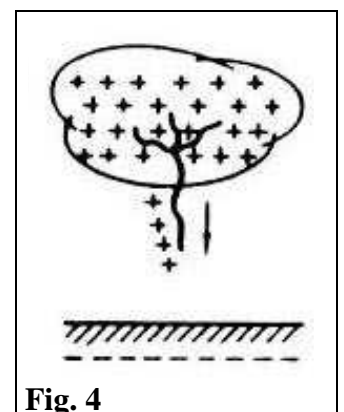


Fig. 4

Le tonnerre

Le **courant** circulant dans le **canal de l'éclair** entraîne un **échauffement brutal** et extrêmement élevé de l'air ambiant, qui subit une formidable **surpression**. La pression du canal étant considérablement plus élevée que celle de l'air environnant, il s'ensuit une **violente dilatation**, une explosion du canal qui se propage sous la forme d'une **onde de choc** puis d'une **onde acoustique** dont l'importance est proportionnelle à l'intensité du courant.

La foudre en valeurs numériques

Pour un choc négatif, après une première décharge qui dure en moyenne 50 μs à mi-hauteur, le courant chute selon les cas soit à 0, soit une centaine d'ampères. Ce courant "persistant" transfère plus de charges que le courant des impulsions bruyantes et lumineuses. Quelques dizaines de millisecondes plus tard une nouvelle impulsion apparaît. Elle est appelée arc en retour subséquent. Les courants des arcs en retour subséquents sont généralement d'amplitudes inférieures à celle du premier arc en retour. Cette succession d'une dizaine d'arcs en retour et d'extinctions (complètes ou à une centaine d'ampères selon les cas) dure au total de quelques dixièmes de seconde à une seconde environ. Elle confère à l'éclair négatif un aspect papillotant facile à identifier.

Dans nos régions tempérées, une décharge médiane, c'est-à-dire dépassée une fois sur deux, est de type nuage / sol négatif, haute de 4 km, elle dure 0,3 s, contient 5 impulsions, transfère au total 25 C (coulombs), a un courant de crête de 25 kA et un di/dt de 40 $\text{kA}/\mu\text{s}$ pour la plus rapide des impulsions subséquentes. Les arcs positifs ne sont pas suivis d'arcs subséquents.

Des chocs "anormaux" sont possibles. Ils peuvent se propager du sol vers le nuage. Ce cas n'est pas rare en montagne ou à partir d'un point haut. Pour certains chocs, l'amplitude crête n'est pas celle du premier arc en retour. Ceci s'explique par une autre poche de charges dans le nuage qui s'écoule par le même canal ionisé. Pour la même raison, il arrive qu'une impulsion positive, souvent avec une forte charge écoulee, se glisse au milieu des impulsions négatives. Enfin un choc de foudre peut apparaître (souvent en polarité positive) par ciel bleu à cause des charges d'espace laissées par un orage lointain ou passé.

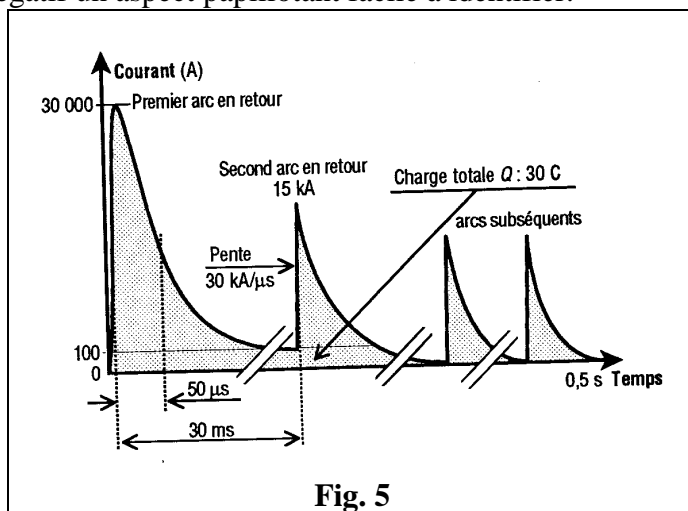
La donnée essentielle pour évaluer la sévérité d'un choc **indirect**, c'est à dire qui ne perturbe les équipements que par son seul champ magnétique et non par son courant, est la vitesse de montée du courant. Cette pente s'exprime en $\text{kA}/\mu\text{s}$. Contrairement au courant crête qui est souvent celui du premier arc en retour, la pente maximale est presque toujours celle d'un arc subséquent. Il est fréquent de mesurer des temps de montée (de 10 à 90%) d'arcs subséquents de l'ordre de 0,1 μs . Une équipe française enregistra en 1987 sur le site de la Nasa un choc subséquent de 60 kA dont la pente dépassa 400 $\text{kA}/\mu\text{s}$. Des mesures précises récentes donnent des di/dt supérieurs à ce que l'on croyait jusqu'aux années 1980.

Lorsque l'on protège un site, il importe de définir avec quelle probabilité la protection remplira son office. Il serait ridicule de chercher à se protéger avec une confiance inférieure à 50 %. Nous avons regroupé dans le tableau ci dessous les valeurs des paramètres clés d'un choc de foudre selon la probabilité que ces valeurs soient dépassées.

De légères variations pourront être constatées selon les sources et leur âge mais ces ordres de grandeur sont réalistes.

Probabilité du dépassement	50%	10%	3%	1%
Courant crête (kA)	25	80	140	200
Pente maximale ($\text{kA}/\mu\text{s}$)	40	120	200	300
Charge totale choc négatif (C)	7,5	28	55	80
Charge totale choc positif (C)	80	250	450	650
Intégrale i^2t négatif ($10^5 \text{A}^2\text{s}$)	0,6	4	9	16
Intégrale i^2t positif ($10^5 \text{A}^2\text{s}$)	6	80	300	700

Fig. 6



Dans nos régions, nous pouvons tabler à priori sur une moyenne de 10 % de chocs positifs: 20 % en hiver et guère plus de 5 % en été. La proportion de chocs positifs est supérieure en montagne à cause du "cisaillement des nuages", c'est à dire le décalage de la partie haute du nuage par rapport à sa partie basse causé par le vent ou par le relief.

Les aéronefs, les missiles et les fusées sont très exposés au foudroiement. Le risque est d'autant plus important que les gaz ionisés propulsés vers l'arrière (appelés "plume") allongent la longueur conductrice. Un avion moyen courrier est foudroyé en moyenne une fois par an. Un foudroiement d'aéronef est un choc déclenché d'amplitude moyenne plus faible qu'un choc au sol. Le courant crête est environ deux fois moindre car le canal ionisé avant le premier arc en retour stocke moins de charges que pour une décharge naturelle. Il en est de même des points hauts qui reçoivent (assez fréquemment) des chocs dont l'amplitude moyenne est un peu plus faible qu'au sol.

Échauffement d'un conducteur foudroyé

Les conducteurs de forte section subissent en général un échauffement négligeable. On peut considérer que, à cause de la brièveté du foudre, que les conducteurs subissent un échauffement adiabatique (sans échange de chaleur avec l'extérieur, c'est à dire le milieu ambiant). Leur échauffement peut être facilement calculé et le résultat est que moins de 0,5% des chocs échaufferont un conducteur de 35 mm² de cuivre de plus de 200 °C.

Hormis au point d'impact, la foudre ne peut faire fondre que des fils fins.

Énergie et puissance moyenne de la foudre.

Peut-on récupérer cette énergie ?

Avant de se poser cette question, il est judicieux de se poser une autre question : **quelle est réellement l'énergie de la foudre?**

Dans les calculs suivants, on ne prend en compte que les **coups de foudre** (éclairs nuage-sol) car ils sont d'une part plus énergétiques que les éclairs inter-nuageux et d'autre part ils sont par nature plus accessibles.

Puissance d'un coup de foudre?

Hypothèses : Le champ électrique atmosphérique sous nuage orageux est de l'ordre de **20 kV/m**. Donc la différence de potentiel nuage-sol avoisine **100 MV** (ce qui correspond à une altitude de 2,5 km). En moyenne, un éclair transporte **une charge de 20 C**. Un éclair dure en moyenne **25 ms** si on ne tient compte que d'un coup unique sans réilluminations.

L'énergie d'un coup de foudre est donc: $W = U \cdot C = 100 \text{ MV} \times 20 \text{ C} = 2 \text{ GJ}$ (**Giga joules = 10⁹ J**).

La puissance instantanée d'un coup de foudre : $P = W/t = 2 \text{ GJ} / 25 \text{ ms} = 80 \text{ GW}$ (**Giga watt = 10⁹ W**).

Quelle est la puissance moyenne des coups de foudre sur la Belgique durant un an?

En considérant environ **50 milles coups de foudre** par an sur la Belgique

L'énergie annuelle des coups de foudre : $W = 50\,000 \times 2 \text{ GJ} = 100 \text{ TJ}$ (**Téra joules = 10¹² J**).

Ramenée à une **puissance moyenne** (sur 365 jours), cela donne: $(100 \cdot 10^{12}) / (365 \times 24 \times 3600) = 3,17 \text{ MW}$ pour des coups de foudre moyens.

À titre de comparaison, les puissances délivrées par d'autres sources sont les suivantes :



Centrale nucléaire de Tihange : +/- 3000 MW (trois tranches de production ; une tranche équivaut à environ 1000 MW)



Champs éolien: par éolienne : de 2 à 5 MW pour les plus récentes

Admettons que l'on veuille quand même récupérer cette énergie infime, il faudrait installer des champs de paratonnerres sur tout le territoire, et en sachant que une tige de 10 m de haut capte la foudre dans un rayon de l'ordre de sa hauteur, soit une aire d'une surface de l'ordre de 300 m², on voit l'impossibilité d'une telle solution.

Enfin, comment pourrait-on stocker cette énergie ???

Même si l'on savait récupérer la totalité de cette puissance avec un rendement de 100% (entre nous, ce n'est pas après demain l'avant-veille), on obtiendrait moins du dixième de la puissance d'une tranche de centrale électrique. La foudre n'est pas une énergie d'avenir. Dans la foudre, il n'y a une énorme puissance instantanée, de l'ordre du million de MW, mais sa puissance moyenne est ridicule, ment faible par rapport à notre consommation électrique.

La foudre en boule

La foudre en boule est un phénomène naturel rare mais dont il est difficile de nier la réalité: plus de 0,1 % de la population en aurait été directement témoin et des milliers de témoignages écrits sont accessibles. Au 4^{ème} siècle avant J-C, Aristote décrivit une foudre à lente vitesse de déplacement. En 1838, Arago fut le premier scientifique à décrire de façon rationnelle les caractéristiques de la foudre en boule. Les photographies du phénomène sont rares mais les témoignages et l'analyse des traces laissées par son passage permettent de se faire une idée de ce phénomène étrange et paradoxal. Compte tenu de la dispersion des témoignages, certains spécialistes distinguent plusieurs types de foudre en boule.

Tout d'abord, il convient de citer les phénomènes qui ne sont pas apparentés à la foudre en boule. La tombée d'un météorite est un phénomène lumineux mais rapide et rectiligne. Après un choc de foudre poche, divers phénomènes lumineux persistants ont pu être assimilés à la foudre en boule.

Les témoignages sur la foudre en boule concordent souvent : une sphère lumineuse, vaporeuse, de la taille d'un pamplemousse à un ballon de basket, de couleur variant selon les témoignages, se déplace lentement au gré des courants d'air. La durée de l'apparition dure plusieurs secondes, parfois quelques dizaines, ce qui invalide a priori l'hypothèse d'une boule de gaz en combustion. Elle entre et sort habituellement des locaux par une ouverture, souvent fenêtre ou cheminée. De petits crépitements sont souvent entendus. L'odeur soufrée des témoignages anciens doit sans doute être comprise comme une odeur d'ozone.

Elle apparaît parfois dans une pièce fermée, sans le moindre dommage pour les murs. Les conducteurs proches, même de petite taille (bagues, bijoux, décors métalliques ...) chauffent, des fils électriques fins et des tuyaux sont endommagés, des fusibles fondent. Les conducteurs reliés à la terre sont particulièrement exposés. Du bois humide touché par la boule peut exploser en petits morceaux, comme des allumettes. Les personnes et les animaux touchés sont profondément brûlés.

95 % des boules apparaissent d'avril à septembre. Il est certain qu'un climat orageux est nécessaire à son apparition mais 50% des observations ne sont ni précédées ni suivies d'un choc de foudre. Malheureusement, malgré des efforts, jamais une foudre en boule ne fut produite par un éclair déclenché.

Environ une fois sur deux, la boule s'échappe de la vue sans laisser de traces. Dans le cas contraire elle finit en une bruyante explosion. Une illusion d'optique n'explode pas! L'explosion ne laisse aucune trace de radioactivité et généralement aucun dommage pour les témoins qui conservent tout de même un sentiment d'effroi. Des témoignages la décrivent aussi en déplacement lent le long d'un fil de ligne THF. Si la boule explose, le fil siffle comme s'il fouettait l'air.

Ce phénomène pourrait être un plasma non linéaire, avec un seuil de formation en énergie et en charge électrique. Mais un plasma ne peut pas se confiner tout seul. Une émission continue de charges électriques expliquerait les décollements de papiers peints, les décrochements de tableaux, les claquements de portes, la

répulsion des isolants et les feux de Saint Elme dans les prises secteur.

Un second paradoxe est que des boules sont apparues en environnements métalliques donc faradisés, ce qui semble violer la loi de conservation des charges statiques. La quantité de charges dans la boule est estimée à plusieurs coulombs. Elle ne pourrait être stockée sans décharge disruptive que dans une sphère d'un diamètre de plusieurs centaines de mètres (1 coulomb amorce dans l'air à 70 mètres).

L'énergie moyenne d'une foudre en boule est évaluée aux alentours de 1000 J, sans limite maximale (elle pourrait dépasser 10^8 J). Les modèles physiques avec source d'énergie interne sont réfutés par les formations spontanées. Ceux avec source externe expliquent mal les dommages subis par les matériaux isolants et les générations en cages de Faraday. Des essais de production de plasmas en labo par des faisceaux hyperfréquences sont séduisants mais rien ne permet de penser à ce jour que la foudre en boule naturelle puisse avoir une telle origine.

La foudre en boule reste une troublante énigme scientifique.

La montée de potentiel du sol

La menace électromagnétique d'un choc de foudre classique est de deux ordres :

- d'une part une agression en conduction : le point d'impact monte fortement en potentiel par rapport à un point éloigné.

- d'autre part une seconde menace, trop souvent négligée, est celle du champ magnétique rayonné.

Voyons tout d'abord l'aspect conduit, c'est à dire le problème du courant d'un "coup au but".

Montée en potentiel d'un bâtiment

Le premier problème posé par la foudre est celui de l'élévation de potentiel au voisinage du point d'impact et supposons qu'un bâtiment se fasse foudroyer.

Critiquons par un exemple l'intérêt d'une "bonne terre", c'est à dire avec une faible résistance par rapport aux terres lointaines.

Application: Montée en potentiel d'un bâtiment (Fig. 5)

Un bâtiment dispose d'une « excellente terre » : $R = 2 \Omega$ *non inductive*. On souhaite protéger ce bâtiment contre la foudre avec un risque ne dépassant pas 3 %. Est on obligé d'installer des écrêteurs sur les lignes énergie et télécommunication ?

Solution:

Il est admis que pour 3% des chocs: $I > 140$ kA. La bonne vieille loi d'Ohm s'écrit: $U = R \cdot I$

Pour une telle intensité, et une « si bonne prise de terre » ; $U = 2 \times 140\,000 = 280$ kV ... , vous avez bien lu le résultat, tout à fait logique, de 280 000 V !!

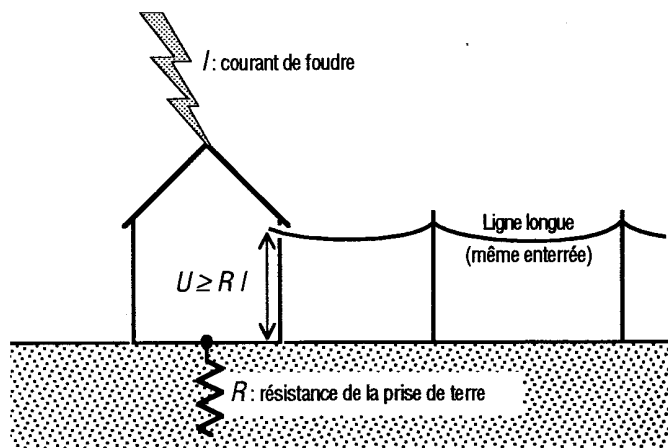


Fig. 5

Les lignes d'énergie et de télécommunication sans écrêteur seraient soumises à cette d.d.p. en mode commun. Hormis les fibres optiques, aucun isolement galvanique ne peut résister à une telle tension, pas même un transformateur isolé à l'huile. L'installation d'un écrêteur entre chaque conducteur externe et la masse est donc impérative. De plus, la vérité serait supérieure à cette valeur car tout conducteur est inductif (nous verrons plus loin l'effet de l'inductance). Répétons le : les limiteurs de surtensions sont nécessaires mais une "bonne terre" au sens commun du terme, c'est à dire de faible résistance, est indifférente. Elle est toujours insuffisante à elle seule.

Risques d'électrocution

La terre, malgré les conventions intellectuelles, n'est pas équipotentielle. La d.d.p. entre le voisinage d'un impact de foudre et un point éloigné est considérable. Une hémisphère conductrice de rayon r dans un sol de résistivité ρ a une résistance $R = \rho / 2\pi \cdot r$ par rapport à l'infini. Si l'on néglige l'effet pelliculaire, les lignes de courant d'un choc de foudre se diluent dans un sol de résistivité homogène selon les rayons d'une

hémisphère. Avec ces hypothèses quelque peu optimistes, la montée en potentiel du sol par rapport à l'infini suit une loi hyperbolique (Fig. 6).

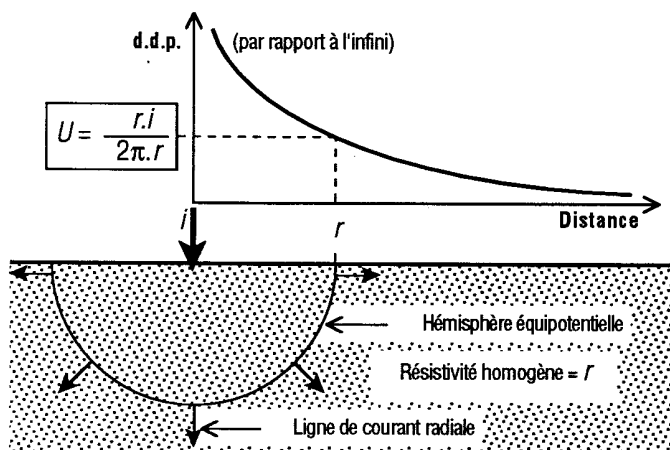


Fig. 6

Solution:

Ce n'est pas le potentiel "absolu" de la bête qui compte mais la d.d.p. entre les pattes avant et arrière ... Il manque donc une donnée qui est la distance entre les pattes de l'animal. Supposons qu'elle soit d'environ 1 m.

Les pattes distantes de 100 mètres "montent" à un potentiel de : $U_{100} = 0,2 \times 25000 \times 1000 / 100 = 50000$ volts

Les pattes distantes de 101 mètres montent à un potentiel de: $U_{101} = 0,2 \times 25000 \times 1000 / 101 = 49500$ volts

Le mouton va ainsi subir une d.d.p. : $U = U_{100} - U_{101}$ entre les pattes avant et arrière, soit 500 volts seulement (si l'on peut dire). Si la bête s'en remet, on comprend que les coups de tonnerres suivants la rende nerveuse.

Le foudroiement direct d'un humain est rarissime : même un paratonnerre ne reçoit qu'exceptionnellement la foudre alors qu'il est à priori conçu et installé pour cela. Les électrocutions par gradient de potentiel ont toujours été à peu près les seules causes d'électrocution. Depuis que les campagnards sont rares, ce sont les sportifs et les montagnards qui sont le plus exposés aux foudroiements. La foudre reste un moyen très incertain pour se suicider.

Recommandations.

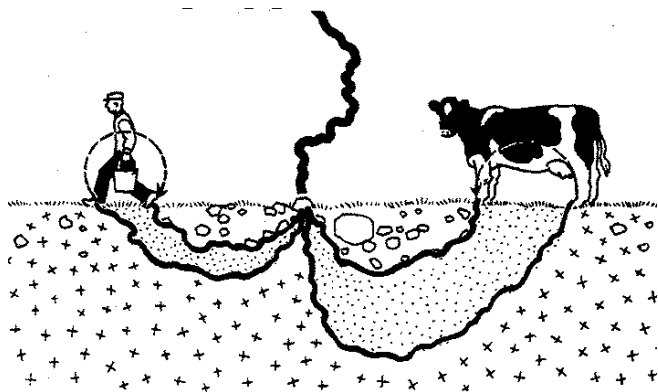


Fig. 7

Les potentiels déphasés sont surtout dangereux pour les animaux ; leur mécanisme est simple : lorsque la foudre touche un point du sol, la décharge s'écoule à travers le terrain. Une « tension de pas » s'établit de la façon vue plus haut. Entre deux points voisins du point de chute, il existe donc une différence de potentiel : un courant va circuler entre ces deux points s'ils sont reliés par les pattes d'un animal ou les pieds d'un promeneur. Le phénomène est très bref, la charge électrique se répartissant ensuite d'une manière uniforme.



Fig. 8

La décharge latérale, très fréquente, survient lorsqu'une personne se met à l'abri des plus d'orage, le plus souvent sous un arbre, mais aussi sous un surplomb, un auvent ou autre. Lorsque l'éclair frappe l'abri, le champ électrique alentour est modifié dans de telles proportions qu'une étincelle secondaire vient s'établir entre la personne et l'abri, dérivant ainsi une partie de la décharge. Cette dérivation est aussi dangereuse qu'un coup direct

Tension de pas : est définie comme étant la différence de potentiel entre deux points distants de 1 mètre. La d.d.p. est d'autant plus grande que l'on se trouve sur un même rayon d'un cercle qui à le point d'impact au centre, que la résistivité du sol grande et que l'intensité est importante.

Quelques conseils pour la protection des personnes contre les risques de foudroiement.

Un piéton qui souhaite se protéger contre la foudre devrait garder les pieds serrés (éviter de marcher ou de courir). Evitons de nous abriter en dessous du seul grand arbre de toute la plaine. Un "arc latéral" pourrait jaillir du tronc ou d'une branche basse (Fig. 7 et 8).

Les nageurs, même en piscine, ne sont pas à l'abri. Sauf en baignoire où il n'y a aucun risque, évitons les baignades sous l'orage. Le courant qui traverserait le corps pourrait déclencher une fibrillation cardiaque. Pour la même raison, le conseil de s'allonger à même le sol en cas d'orage "pour ne pas faire paratonnerre" est ridicule: c'est au contraire le moyen de jouer au bovin foudroyé! Si l'on est surpris sous un orage, le mieux est de s'asseoir sur son sac à dos, les pieds serrés, et d'attendre que ça passe.

Si l'on se trouve dans une automobile ou un avion foudroyé, hormis une belle frousse, un choc nerveux et acoustique, on ne risque rien. Tout véhicule métallique fait office de cage de Faraday. Tout au plus la tôle risque t'elle d'être localement perforée (Fig. 9 et 10).

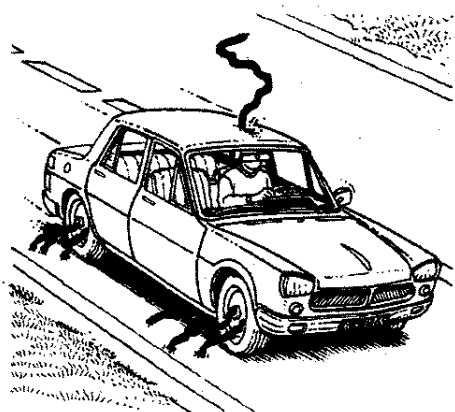


Fig. 9

La voiture protège très bien de la foudre, car sa coque métallique constitue une cage conductrice fermée qui isole des effets du champ électrique (cage de Faraday). Mais contrairement à une croyance répandue, les pneus n'empêchent nullement l'éclair de frapper la carrosserie : un arc, ou même plusieurs, s'établissent entre les jantes et le route, permettant à la décharge de l'éclair de s'écouler dans le sol.

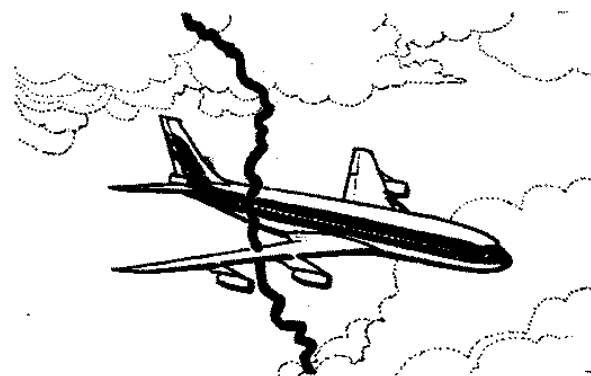


Fig.10

Un avion traversé par l'éclair ne subit en général que des dommages peu importants : perforation, fusion superficielles du métal, piqûres peu profondes. Les constructeurs en tiennent toutefois compte pour la protection des réservoirs. Par contre, si l'éclair atteint une partie isolante, en général le nez de l'appareil, les dégâts peuvent être plus sévères, car la décharge atteint des appareils de contrôle et de guidage.

En montagne, le sol est toujours résistif et les orages fréquents. Evitons les contacts simultanés aux parois d'une anfractuosités ou d'une fissure: de fortes d.d.p. sont à craindre (Fig. 11)

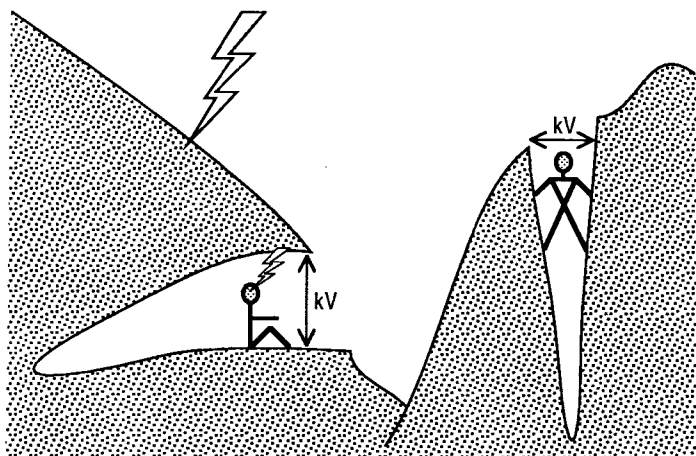


Fig. 11

Evitons de téléphoner lorsque l'orage gronde, ou alors utilisons un poste sans cordon. Si les prises secteur ne sont pas munies de parafoudres, il est sage de débrancher les appareils sensibles, le coaxial de la télévision entre autres. Les prises secteur font office de parafoudre : elles amorcent typiquement entre 5 et 15 kV. Il serait illusoire de chercher à s'isoler en ouvrant son disjoncteur: sa rigidité diélectrique est très insuffisante. En cas de foudroiement, un arc jaillirait entre amont et aval. Une protection foudre doit garantir l'équipotentialité, c'est-à-dire laisser passer le courant dans de faibles impédances, et non un isolement. Rappelons que la foudre est un générateur de courant parfait. Ce serait un contresens de lutter contre un courant direct par de grandes

impédances.

Pour chasser une idée préconçue : Il faut savoir que une pièce métallique, en tant que telle, n'attire pas la foudre. Seul compte la forme et la position.

Les d.d.p. entre masses

La montée en mode commun par rapport à l'infini n'est pas la seule menace que la foudre fait peser sur les systèmes: deux autres effets peuvent se produire : des amorçages internes entre masses peu ou mal maillées, et des d.d.p. induites par rayonnement dans les boucles de masse. Voyons d'abord le premier problème.

Application: risque d'amorçage à travers un mur (Fig. 12)

Un paratonnerre est raccordé à la terre par un conducteur de descente fixé au mur et isolé des masses. Quelle est la d.d.p. entre ce câble de descente et les masses voisines situées à 10 mètres de la barrette de terre où le câble de descente et les masses sont réunis en étoile ?

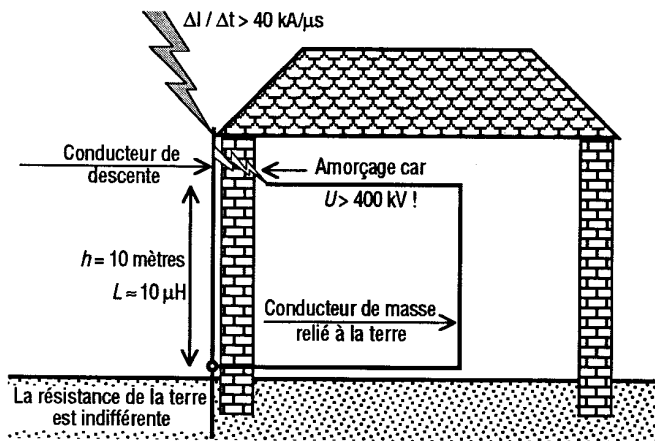


Fig. 12

Solution:

Il nous faut choisir un $\Delta i / \Delta t$. Nous prendrons simplement la pente qui est dépassée une fois sur deux, soit $40 \text{ kA}/\mu\text{S}$.

Tout câble, même plat, présente une inductance linéique d'environ $1 \mu\text{H}/\text{m}$. Le câble de descente de 10 m a une inductance $L \approx 10 \mu\text{H}$.

La d.d.p. entre conducteur de descente et masse vaut:

$$U = L \Delta i / \Delta t.$$

$$U = 10 \times 10^{-6} \times 40\,000 / 10^{-6} = 400 \text{ kV}$$

Est il utile de préciser qu'un amorçage à travers le mur est probable?

A cela s'ajoute l'élévation de tension provoquée par « la bonne terre » !! (voir plus haut).

Je crois que cela se passe de commentaires, mais surprendra certainement.

Cet exemple montre qu'il est impossible d'écouler au sol un courant de foudre direct par un conducteur unique plaqué contre une paroi, sauf si aucune masse n'est proche, une cheminée d'usine par exemple. La bonne solution est de diviser le courant sur plusieurs conducteurs de descente et de les relier en traversée de mur aux masses internes. Il y a deux risques à un arc à travers un mur. Tout d'abord l'arc peut sévèrement fracturer la paroi et/ou enflammer un isolant. Ensuite, le courant de l'arc a un temps de montée plus court que celui de la foudre, donc son effet perturbateur est encore supérieur.

Il est souhaitable de diviser le courant de foudre par de nombreux conducteurs. Ces dilutions successives n'affectent pas le temps de montée des courants dans les masses mais elles en réduisent rapidement l'amplitude. Après cinq divisions du courant par deux, il ne reste que 3 % du courant initial. Un courant impulsif dans une masse avec un $\Delta i / \Delta t$ inférieur à $1 \text{ kA}/\mu\text{S}$ est peu perturbateur pour les électroniques. Une décharge électrostatique a une pente de l'ordre de $10 \text{ kA} / \mu\text{S}$ et pourtant elle est bien supportée par les équipements bien conçus.

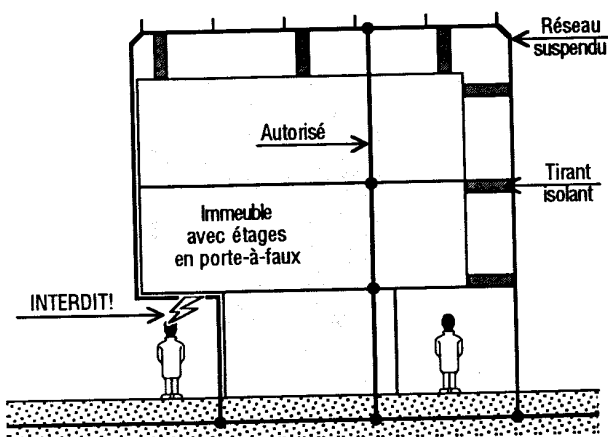


Fig. 13

Un conducteur de descente doit rester aussi rectiligne que possible. Il serait dangereux de contourner une moulure, ou d'une quelconque partie de l'immeuble qui casserait l'aspect rectiligne de la descente: un amorçage direct à travers la paroi serait à craindre (Fig. 13).

Du rond de cuivre de diamètre 8 mm ou du plat de $30 \times 2 \text{ mm}$ suffisent. Les structures métalliques verticales (poutres, IPN ...) mises à la terre conviennent parfaitement. Les règles de sécurité admettent de tirer les conducteurs de terre en colonne sèche, au cœur du bâtiment. Nous préférons, pour diviser le courant et pour réduire le champ H dans le bâtiment, plusieurs conducteurs de descente installés symétriquement contre la paroi

extérieure du bâtiment. La fixation des câbles de descente se fait traditionnellement sur la base de trois fixations par mètre. Chaque câble de descente est à protéger des chocs mécaniques par un fourreau sur une hauteur de 2 m à partir du sol.

Les liaisons électriques entre conducteurs de descente et masses internes peuvent être effectuées par sertissage, soudure ou brasure. Éviter les rivets qui fragilisent les rubans. Un conducteur de descente devrait tout jours être relié au plus court au réseau de terre. Pour éviter les amorçages secondaires, il devrait aussi être relié systématiquement à toutes les structures conductrices proches.

Les protections en conduction

La protection foudre d'un bâtiment peut se décomposer en cinq parties:

- o La structure de collecte, aussi appelée "dispositifs de capture".
- o Les conducteurs de descente pour écouler le courant de foudre au sol.
- o Le réseau de terre pour dissiper le courant de foudre dans la terre.
- o La protection des conducteurs externes (câbles et les tuyaux métalliques).
- o La réduction des surfaces des boucles de masse (contre le rayonnement).

Structure de collecte de la foudre

Dès que l'on parle de dispositif de capture de foudre, on pense au paratonnerre. Les paratonnerres n'empêchent pas le tonnerre, mais ils sont réputés protéger des effets de la foudre. Voyons ce que l'on peut en penser.

Choix du paratonnerre

Depuis Benjamin Franklin, les paratonnerres ont surtout évolué par leurs arguments commerciaux. De la pointe en platine iridié à la piézoélectricité en passant par la radioactivité et autres principes plus ou moins écologiques, on constate que le paratonnerre suit la mode scientifique du moment.

Les arguments de la plupart des vendeurs de paratonnerres méritent le détour. L'argument classique est que l'objet miraculeux est si efficace qu'un seul en remplace plusieurs normaux ... bref, il est économique ! Par chance les paratonnerres radioactifs ont été interdits de vente en Europe dès 1986. A leur sortie, leurs sources radioactives (sels de radium) étaient sensées "attirer la foudre" : l'ionisation "préparait le chemin" et "déclenchait l'arc en retour". Un beau jour, leur fonctionnement s'inversa du tout au tout. Les mêmes dispositifs se mirent à "repousser la foudre" parce que l'ionisation réduisait l'effet de pointe et même déchargeait les nuages à partir de la pointe ! Dans cette affaire, une observation est incontestable : sur nos toits, des pastilles radioactives resteront dangereuses durant quelques millénaires.

Il est inutile d'investir dans un paratonnerre "ionisant" (à sources radioactives, piézoélectriques ou autres ...). En effet, avant que la foudre ne tombe, le champ statique au sol dépasse toujours 10 kV/m, même en plaine. Ce champ suffit à ioniser par effet de pointe tout conducteur installé à plusieurs mètres de hauteur et mis au potentiel de la terre. Les feux de Saint, Elme bien connus des marins et des montagnards prouvent cette ionisation. Le type de pointe n'est pas critique: des tiges en rond de diamètre de 18 mm en cuivre étamé ou en acier inox conviennent. Les essais d'éclairs déclenchés mais non guidés jusqu'au sol prouvent que l'efficacité des paratonnerres est pour le moins douteux.

Des conducteurs de ceinture en partie haute et de descente déclencheront probablement l'arc en retour si leur maillage est suffisamment serré. Une alternative plus discrète que les vilains paratonnerres est la "planche de fakir" composée de nombreuses petites pointes de 20 à 50 cm de hauteur réparties à quelques mètres les unes des autres le long d'une grille conductrice en partie haute (de 10 mètres de côté par exemple). Un bâtiment "protégé" ne reçoit ni plus ni moins fréquemment la foudre qu'un autre, c'est à dire rarement.

Le modèle électrogéométrique

Le modèle électrogéométrique est une loi empirique qui prédit la zone exposée à la foudre. Ce modèle a le mérite de montrer que la foudre peut tomber à peu près partout, y compris pour un petit coup entre les pieds de la tour Eiffel. Il définit pour un choc négatif une "distance d'amorçage" indépendante de la nature des roches du sous sol, de la qualité de la prise de terre, de la hauteur du bâtiment, de la nature et de la hauteur des pointes installés et de tous les autres paramètres plus ou moins paranormaux, paradoxaux ou paradisiaques des paratonnerres!

La distance d'amorçage correspond à la longueur présumée de l'arc en retour. Elle ne dépend que de la charge électrique stockée dans le canal ionisé, donc du courant crête du premier choc. Cette distance, pour un courant crête I , vaut sensiblement 9,4 fois I exprimé en kA élevé à la puissance deux tiers (Fig. 14). Cette distance a été obtenue par l'analyse statistique de nombreux chocs mais elle reste affectée d'une incertitude. Des

relations un peu différentes ont aussi été proposées.

Ce rayon d'amorçage définit une sphère virtuelle que l'on roule contre les obstacles. La zone protégée est celle sous la sphère, tout point pouvant venir au contact de la sphère étant exposé à un foudroiement direct.

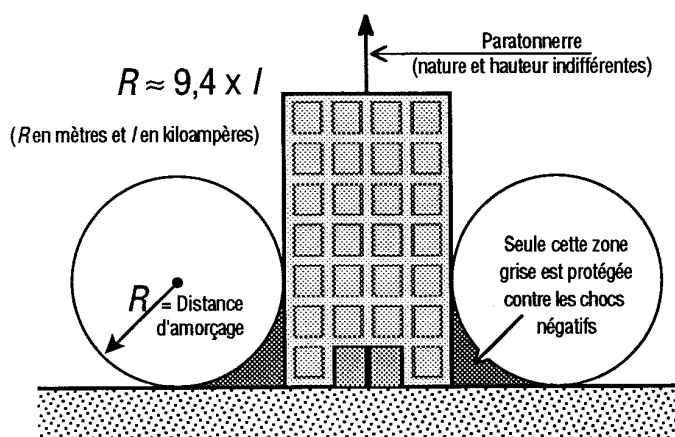


Fig. 14 - Le modèle électro géométrique.

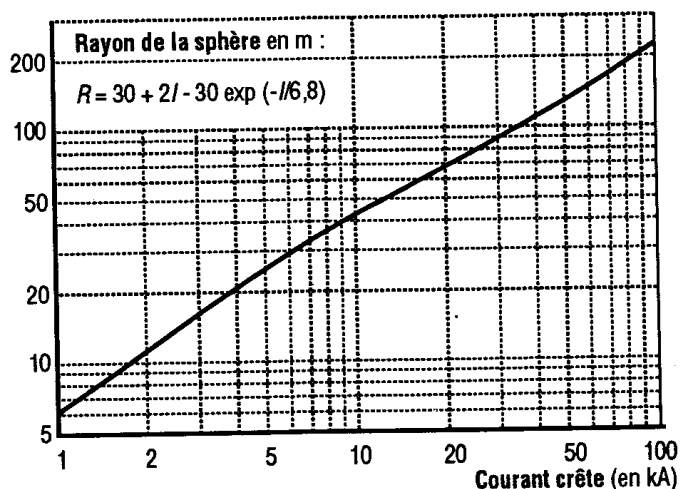


Fig. 15 – Distances d'amorçage selon le modèle électro géométrique.

Grâce au modèle électro géométrique on peut s'amuser pendant des heures sur des maquettes en coinçant une bulle d'autant plus grosse que le courant de foudre choisi par hypothèse est plus élevé. Ce modèle a au moins le mérite de réfuter l'idée reçue selon laquelle un paratonnerre protégerait le volume sous un cône de demi-angle au sommet de 60° (parfois plus modestement de 45°). Il indique en outre qu'il est inutile de surélever un paratonnerre.

La Fig. 15 donne les distances d'amorçage en fonction de l'intensité crête du courant.

Le modèle électro géométrique est à ce jour le seul modèle sérieux reconnu par la communauté scientifique. Que peut-on lui reprocher sur le plan scientifique? Tout d'abord il n'est valide que pour les chocs négatifs. Ensuite, lorsqu'un premier choc en retour jaillit, les réamorçages subséquents empruntent le même canal. Or nous savons qu'un premier arc en retour de faible amplitude, donc à faible distance d'amorçage, peut être suivi par un arc subséquent d'intensité supérieure. Même si statistiquement ce modèle était majorant, une distance de protection pour un courant donné ne pourrait pas être totalement garantie.

En pratique que constate t'on ? Le précurseur (leader) descendant n'est ni attiré ni repoussé par les paratonnerres. Il suit le parcours aléatoire des charges d'espace. Les chocs positifs quant à eux ont la fâcheuse tendance à tomber n'importe où, y compris dans les zones protégées par le modèle électro géométrique.

Conducteurs de descente

Si la nature des paratonnerres est indifférente, l'écoulement du courant jusqu'à la terre est essentiel, critique même devrions nous dire (nous avons vu l'effet de l'inductance d'un conducteur et celui de la terre réputée « bonne»). Les conducteurs de descente des paratonnerres devraient être raccordés directement, au plus court et par soudure à une ceinture de terre. Le courant foudre, une fois l'arc en retour déclenché, cherche et trouve un chemin direct vers la terre. Un conducteur de descente supporte en cas de foudroiement de forts di/dt.

Division et symétrie du courant foudre

Pour un bâtiment sensible, il est nécessaire d'utiliser plusieurs conducteurs de descente à la terre.

Multiplier ces conducteurs présente trois intérêts:

1) Améliorer "l'équipotentialité verticale" du bâtiment par la mise en parallèle d'inductances. Ceci réduit les risques d'amorçage à la masse. Nous considérons que quatre conducteurs de descente constituent un minimum raisonnable.

2) Améliorer "l'équipotentialité horizontale" du bâtiment par l'écoulement symétrique du courant de foudre à la terre. Des descentes périphériques et symétriques sont impératives pour la protection des bâtiments qui abritent des animaux: étables, bergeries, haras, etc. C'est en effet le gradient de potentiel horizontal qui électrocute les animaux. Les personnes aussi, mais des souliers secs limitent les risques.

3) Réduire le champ magnétique, donc son induction, au cœur du bâtiment par la combinaison vectorielle des champs H rayonnés par chaque conducteur de descente. A mi chemin entre deux conducteurs rectilignes parallèles parcourus par des courants égaux et de même sens, il n'y a aucun champ magnétique. Cet effet est miraculeux quand on connaît la difficulté de blinder ce champ.

Pour un bâtiment d'un seul niveau, disons de moins de 10 mètres de haut, avec au moins 4 conducteurs de descente, il est souvent possible de garantir la rigidité diélectrique entre conducteurs de descente et masses internes.

L'élévation de potentiel de la partie haute reste assez faible pour limiter le risque d'amorçage à travers un mur. Dans ce cas, on peut ne raccorder les conducteurs de descente externes qu'à la ceinture de terre, sans liaison aux masses internes.

Liaisons des conducteurs de descente à la masse

Dès que la hauteur du bâtiment excède 10 mètres, il devient à peu près impossible d'éviter un amorçage entre un conducteur de descente contre un mur et un fer à béton ou une masse interne. Il convient alors de relier chaque conducteur de descente à la masse la plus proche de chaque étage par une liaison électrique courte en traversée de mur.

Il serait en outre souhaitable de relier les conducteurs de descente entre eux par une ceinture horizontale à chaque étage. Si cette précaution est jugée trop contraignante ou trop coûteuse, il faudrait assurer au moins une interconnexion horizontale tous les 10 m de haut environ.

Une connexion en traversée de mur extérieur gagne à être tirée dans un trou incliné en bas vers l'extérieur pour éviter la pénétration d'eau par ruissellement.

Si les étages sont de hauteur normale, de 3 à 5 m, on peut se contenter de ne mailler les conducteurs de descente à la masse que d'un étage sur deux. Cette solution est toutefois moins efficace contre les effets indirects de la foudre. Pour les immeubles sensibles, les bâtiments informatiques en particulier, l'effet de "cage de Faraday" est sensiblement meilleur si l'on assure un raccordement de chaque câble de descente à la masse de chaque étage.

Réseaux suspendus

Il existe une autre méthode pour limiter les risques d'amorçage entre les conducteurs de descente et les structures de masse voisines. Elle consiste à tendre des fils au dessus de l'ouvrage à protéger et à éloigner les conducteurs de descente à une distance suffisante des murs. C'est le principe des "fils de garde" tendus au dessus des lignes THT qui protègent les conducteurs de phase.

Les fusées à Kourou comme à Cap Kennedy sont protégées sur leur pas de tir par un réseau de fils tendus. Au dessus d'une navette américaine, un mat isolant haut de 25 mètres supporte deux conducteurs de descente. Malgré cela, le 29 août 1983, un choc de foudre frappa le pas de tir dans la partie soi disant protégée par le cône de 60° de demi angle au sommet. Un magnifique cliché photo fut pris. Une fois de plus, le modèle électrogéométrique prouva sa supériorité sur les idées reçues. Le tir eut lieu sans encombre quelques heures plus tard.

Application: Distance entre un réseau suspendu et le bâtiment

On veut protéger un bâtiment de hauteur h par un réseau suspendu. Sachant qu'il y a 4 conducteurs de descente et qu'il faut environ 10 kV/cm pour amorcer dans l'air, à quelle distance faut-il surélever du bâtiment le réseau de fils ?

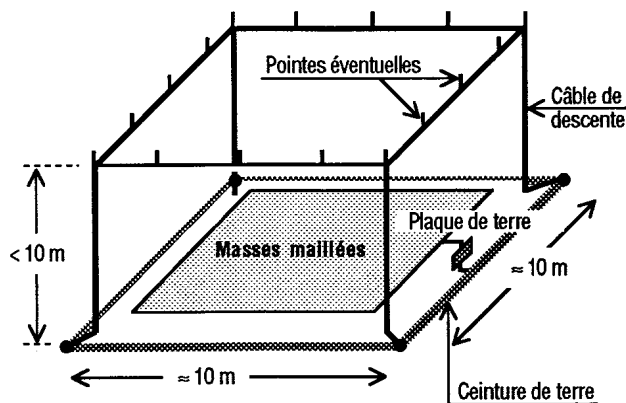


Fig. 16 – Conducteurs de descentes d'un petit bâtiment

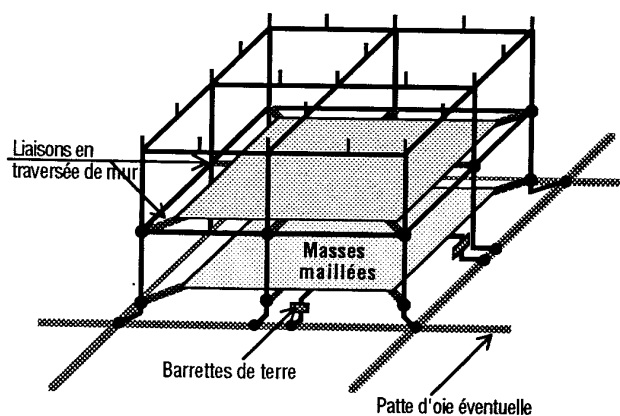


Fig. 17 – Conducteurs de descente d'un grand bâtiment

Solution:

Pour notre estimation, nous retiendrons un di/dt important, 400 kA/ μ s par exemple. En supposant que le courant est divisé en parts égales par chacune des quatre descentes, chaque câble supporte alors un di/dt de 100 kA/ μ s. L'inductance d'un câble de descente vaut 1 μ H/m. La d.d.p. U entre les fils suspendu distants d'une hauteur h par rapport au bâtiment est égale à :

$$U = 10,6 \cdot h \cdot 100000/10^{-6}$$

$$U = 100 \text{ kV par mètre de hauteur}$$

Or l'air peut amorcer en champ inhomogène à partir de 10 kV/cm. Pour ne pas risquer d'amorcer il faut éloigner le réseau suspendu du bâtiment d'au moins 10 centimètres par mètre de hauteur.

La solution des fils suspendus se justifie pour les bâtiments à haut risques (stockage d'explosifs, produits dangereux ...). Les bâtiments métalliques ainsi que la plupart des industries chimiques sont efficacement protégés par l'ensemble de leurs structures conductrices préexistantes poutres, charpentes, tuyaux, rails, chemins de câbles, rambardes, etc.

Une fusée tirée d'une région tropicale est évidemment exposée à la foudre. Le 26 mars 1987, une fusée Atlas Centaur de l'US Air Force fut foudroyée 73 secondes après son décollage. Le champ électrique au sol était raisonnablement faible mais un orage récent avait laissé des charges d'espace en altitude. Le calculateur de vol se planta et la destruction de la fusée dû être télécommandée. Depuis, on ne tire plus de fusée par temps orageux et on se préoccupe de la carte tridimensionnelle du champ électrique. En science, le malheur des uns profite aux autres.

Conducteurs de masse et conducteurs de terre

Un conducteur de terre n'est pas enterré: c'est un conducteur qui relie quoi que ce soit à une barrette de terre. Rappelons deux souhaits apparemment contradictoires : il est favorable de rapprocher autant que possible et de bout en bout un câble signal d'un conducteur de masse qui l'accompagne mais il est souhaitable d'éloigner les câbles des conducteurs de terre.

Un conducteur de masse, une goulotte métallique par exemple, peut servir de blindage s'il est raccordé aux masses des châssis au moins à chaque bout. Il apporte un effet réducteur vis à vis des perturbations électromagnétiques, effet d'autant meilleur que la structure de masse est proche du câble et enveloppante.

Un conducteur de terre au contraire peut écouler des courants extérieurs au système, tel celui de la foudre. Il serait maladroit de tirer un conducteur de terre au milieu d'une goulotte : la diaphonie pourrait perturber la transmission des signaux. Eloignons les câbles à bas niveau d'une trentaine de centimètres des conducteurs de terre et fixons ceux ci à l'extérieur des chemins de câbles.

Si ces deux structures de masse sont proches, quelle qu'elles soient, il serait maladroit de ne pas les relier. Cet oubli réduirait l'équipotentialité des masses. Ainsi, les conducteurs de terre "verticaux" devraient être systématiquement connectés à tous les conducteurs d'accompagnement "horizontaux". Un maillage devrait être tridimensionnel. Les électrons sont insensibles à la gravitation.

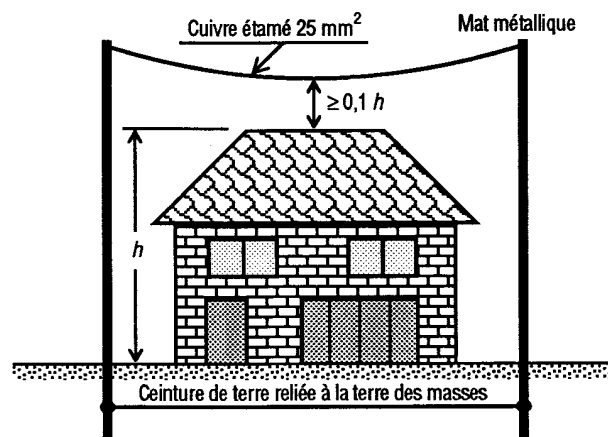


Fig. 18 – Protection foudre par réseau suspendu

Réseau de terre

Le rôle d'un réseau de terre est d'écouler dans le sol les courants qui pénètrent en mode commun dans le site. Un risque, en cas de foudroiement, est la vitrification d'un manchon de sol autour d'un tronçon des câbles enterrés. Cette vitrification élève de façon irréversible la résistance de la prise de terre mais elle ne remet pas en cause l'équipotentialité du site, du moins tant que le conducteur enterré n'est pas sectionné. Nous conseillons de corriger une telle dégradation car la partie vitrifiée est probablement devenue moins robuste. Le métal risquerait de fondre en cas de nouvelle surintensité.

Tout réseau de terre, pour conserver au bâtiment une équipotentialité "horizontale" convenable, devrait comporter au moins une ceinture périphérique. De nombreuses barrettes de terre permettent de relier en plusieurs points les masses internes à la terre. Une barrette de terre installée sur un conducteur de ceinture en épingle à cheveu permet d'éviter de braser une jonction enterrée.

L'équipotentialité du site implique le maillage systématique des conducteurs de masse, des conducteurs de descente (si possible à chaque étage) et du réseau de terre. On obtient de la sorte une "cage de Faraday" à grandes mailles. Tous les conducteurs accessibles, tels les structures métalliques du bâtiment et les huisseries métalliques, devraient aussi contribuer à ce maillage électrique.

Protection des conducteurs externes

Une fois l'équipotentialité des structures de masse assurée, il importe de limiter les surtensions entre les conducteurs externes et la masse. La position idéale d'une protection primaire contre les surtensions est le voisinage d'une masse, si possible à proximité d'une barrette de terre. Un écrêteur primaire installé en entrée du bâtiment permet de dériver les courants externes à la terre en limitant leur circulation dans les masses. L'impédance de liaison, donc la distance, entre un écrêteur secondaire et la masse des équipements protégés, est critique.

Montage des écrêteurs

Chiffrons par un exemple réaliste l'effet de la longueur d'une liaison de masse.

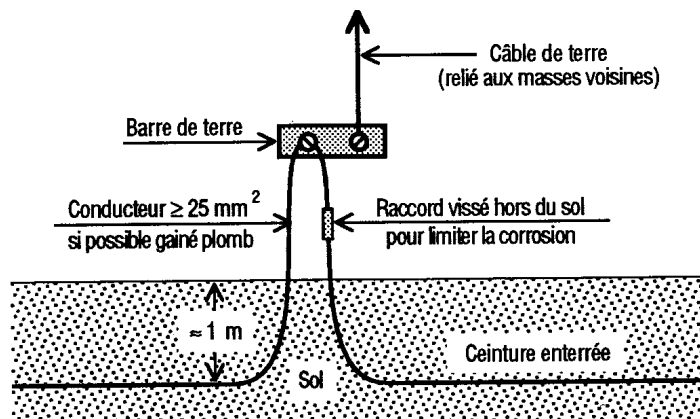


Fig. 19 – Raccordement conseillé au réseau de terre

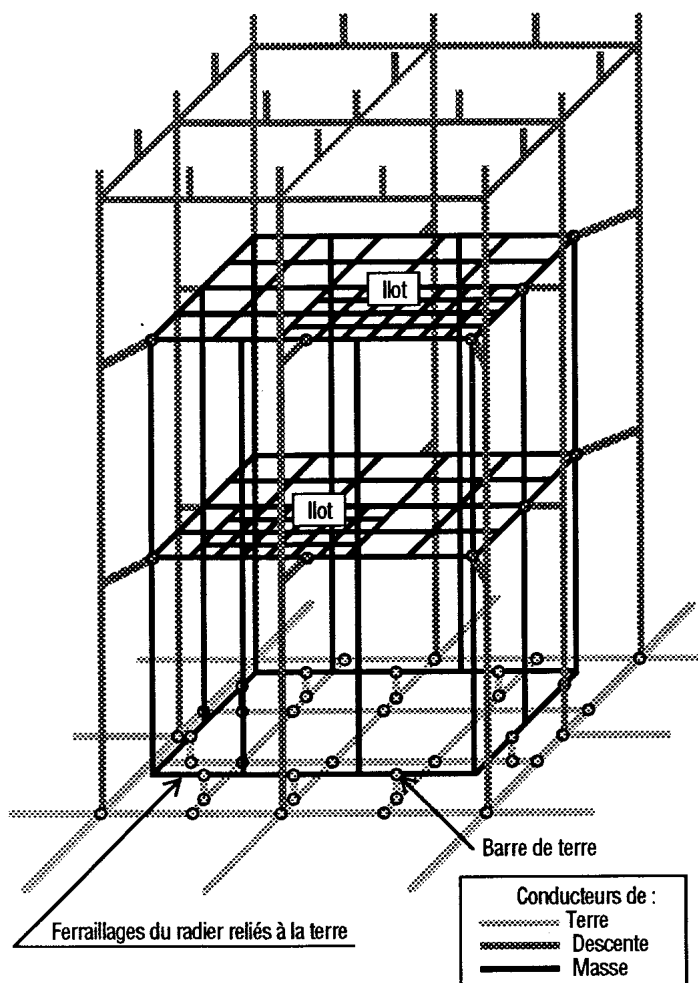


Fig. 20 – Exemple de maillage des conducteurs de descentes des masses et du réseau de terre

Application: Résiduelle d'un écrêteur selon sa longueur de câblage

Un parafoudre doit écouler une impulsion foudre de la kA en 1 μ s. La d.d.p. résiduelle aux bornes du composant est annoncée inférieure à 2 kV. Que devient elle si le composant est câblé en série avec un câble long de 1 m ?

Solution:

La d.d.p. aux bornes d'un conducteur de 1 m est voisine de celle aux bornes d'une inductance de 1 μ H:

$$U = L \cdot \Delta i / \Delta t = 10^{-6} \cdot 10\,000 / 10^{-6} = 10 \text{ kV}$$

La tension résiduelle totale est de 2 + 10 = 12 kV. Un écrêteur complémentaire installé au voisinage de l'équipement à protéger est nécessaire. Bien que la foudre ne puisse pas être considérée comme un phénomène à très hautes fréquences, les inductances parasites sont gênantes.

Dans ce cas sévère, si le conducteur de mise à la masse dépassait 2 m, la d.d.p. résiduelle dépasserait 20 kV. Sans protection secondaire, on subirait à coup sûr un contournement de bornier, un amorçage dans un connecteur ou pire une destruction électronique (claquage d'un optocoupleur, transformateur ou relais, perforation de jonction ...).

Limiter la longueur du câblage entre un écrêteur et la masse de l'équipement n'est pas un souhait, c'est une nécessité.

Pénétrations de canalisations conductrices

Toutes les canalisations conductrices venant de l'extérieur du bâtiment (dont les tubes isolants contenant un fluide conducteur et les écrans des câbles blindés) doivent légalement être raccordées à la terre pour raison de sécurité. Attention en particulier au câble d'un réseau local entre bâtiments dont l'écran est souvent oublié.

Ce raccordement à la masse devrait être effectué au plus court en entrée de bâtiment. Le mieux est de regrouper l'entrée de toutes les canalisations externes dans une même zone. Dans le cas contraire, le minimum est d'installer une barrette de terre au voisinage de chaque point d'entrée.

Les guides d'onde et les feeders d'antennes qui traversent le mur en hauteur devraient aussi être reliés à la terre. Ils doivent en outre être connectés à la masse de leur baie. Il est favorable de ceinturer les locaux techniques d'une ceinture de masse. Elle permet d'y raccorder les câbles, goulottes et autres canalisations externes. Indiquons qu'il est souhaitable de mailler les îlots à forte densité d'équipements électroniques. Un réseau de terre peu maillé est moins pénalisant contre la foudre que des masses internes mal maillées. Plus on se rapproche des circuits électroniques, plus l'équipotentialité importe.

Les protections en rayonnement

Le champ rayonné par la foudre est perturbateur car il est de forte amplitude, assez rapidement variable et à prédominance magnétique. La fréquence équivalente du champ de foudre est relativement basse, dans la gamme des ondes longues. Un tel champ est difficile à blinder efficacement. Les récepteurs radio à antenne de ferrite reçoivent les "grandes ondes" même dans un immeuble en béton armé. L'atténuation des bâtiments au champ de la foudre est faible.

Hormis les vraies chambres blindées, seuls les vastes immeubles à ossatures métalliques maillées y compris au niveau du sol (certains ateliers industriels par exemple) présentent une atténuation significative au champ de la foudre. Elle est parfois supérieure à un facteur 10.

L'antenne qui rayonne le champ de la foudre est le canal ionisé. On peut assimiler l'arc à un conducteur rectiligne sensiblement vertical et de grande longueur. Le champ H, en ampères par mètre, suit ainsi le théorème d'Ampère:

$$H = I / 2\pi R$$

Ce champ est essentiellement horizontal. La tension induite dans une boucle de masse verticale par ce champ magnétique (supposé homogène et orthogonal à la boucle) suit la loi de Lenz :

$$U = S \cdot \mu_0 \cdot H / \Delta t$$

En combinant ces deux équations, on en obtient une troisième tout aussi simple:

$$U = 200 \cdot S \cdot \Delta i / R \cdot \Delta t$$

avec:

U : Tension crête induite dans la boucle, en volts

S : Surface de la boucle, en mètres carrés

$\Delta i / \Delta t$: Pente maximale du courant de foudre, en kiloampères par microseconde

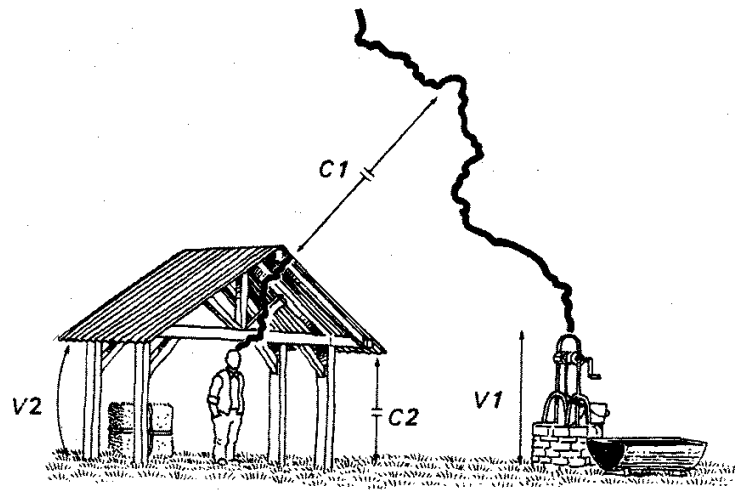
R : Distance entre l'éclair et la boucle victime, en mètres

Danger de l'effet d'induction.

La décharge induite, moins courante, concerne surtout les abris comprenant une structure métallique, mais isolée du sol, comme ici, une tôle ondulée sur une charpente en bois..

Quand la foudre tombe à proximité, l'abri se comporte comme un condensateur de capacité C_1 par rapport à l'éclair, et C_2 par rapport au sol. Ces condensateurs forment un diviseur capacitif et le potentiel V_1 de l'éclair porte alors le toit à la tension $V_2 = V_1 \cdot C_1 / (C_1 + C_2)$.

Cette tension est suffisante pour qu'une décharge induite frappe la personne abritée sans que le toit aie été touché par la foudre.



d.d.p. induite dans les boucles.

Plutôt que de longs discours, effectuons un petit exercice.

Application: Tension induite par la foudre dans une boucle de masse

La foudre tombe à 100 mètres d'un système micro-informatique. Sachant que la boucle entre le cordon secteur du micro ordinateur, le câble de données vers l'imprimante et le cordon secteur de cette dernière présente au champ une surface de 1 m^2 , quelle est la d.d.p. induite dans cette boucle ?

Solution:

Nous choisirons une menace moyenne : $\Delta i / \Delta t = 40 \text{ kA} / \mu\text{s}$.

$$U = 200 \cdot S \cdot \Delta i / R \cdot \Delta t$$

$$U = 200 \times 1 \times 40 / 100 = 80 \text{ volts}$$

Si nous avons retenu la pente dépassée une fois sur 10, nous aurions obtenu une tension induite de 240 volts par mètre carré. Enfin si nous avons supposé que le courant de foudre s'écoulait par un seul conducteur vertical distant de 10 mètres, la tension aurait atteint 2400 V/m^2 . Retenons qu'un choc de foudre assez proche induit une centaine de volts par mètre carré de boucle.

Dans l'exemple précédent, si le câble de liaison signal est blindé par une tresse, avec un raccordement bilatéral à la masse, son effet réducteur (au moins un facteur 100) permettrait d'assurer le bon fonctionnement. Si la liaison n'était ni blindée ni protégée par des écrêteurs, non seulement le bon fonctionnement pourrait être altéré mais des composants d'interface risqueraient d'être détruits.

L'expérience montre que si les masses sont mal maillées, avec des câbles d'interconnexions tirés sans effet réducteur, des cartes sont détruites par l'induction d'un choc de foudre distant de plusieurs centaines de mètres. En revanche, si les masses sont raisonnablement interconnectées, avec des goulottes conductrices vissées au châssis des baies, un choc de foudre même direct perturbe peu. En 1991, l'un des plus gros éclairs déclenché par la station de Saint Privat d'Allier, 53 kA crête, frappa directement un central téléphonique maillé de façon raisonnable. Rien ne fut détruit ni même perturbé de façon grave.

L'induction de la foudre est une sérieuse menace pour des équipements reliés, même s'ils sont hors tension lors du choc de foudre. L'expérience montre que le rayonnement foudre a des conséquences bien plus fréquentes sur les électroniques que les coups directs. En environnement mal maillé, seuls les équipements dont tous les câbles sont déconnectés ou bien blindés ne risquent rien.

Application: Induction entre deux baies raccordées en étoile à la terre

Un câble de réseau local galvaniquement isolé relie deux baies. Elles sont raccordées chacune à la terre par un conducteur relié en étoile à une prise de terre. La surface de la boucle de masse entre les conducteurs de protection et le câble signal est de 300 m^2 . Quelle est la d.d.p. en MC sur la liaison signal, induite par un choc de foudre de $\Delta i / \Delta t = 100 \text{ kA} / \mu\text{s}$ tombant à 400 m ?

Solution:

$$U = 200 \times 300 \times 100 / 400 = 15 \text{ kV}$$

La rigidité diélectrique de l'isolement galvanique ne peut certainement pas supporter une telle d.d.p. et des circuits seront probablement détruits.

Un utilisateur peu averti, constatant l'effet, pourrait conclure qu'il y a eu une "remontée de terre" donc qu'il est urgent de réaliser une "meilleure terre". Il risque de décider de forer le sol de notre vieille planète. Une décision à grands frais et bien entendu en pure perte : la planète n'y est pour rien. Les spécialistes savent que les plantages et destructions de matériels les jours d'orages sont plus souvent imputables au rayonnement de la foudre qu'à son courant direct.

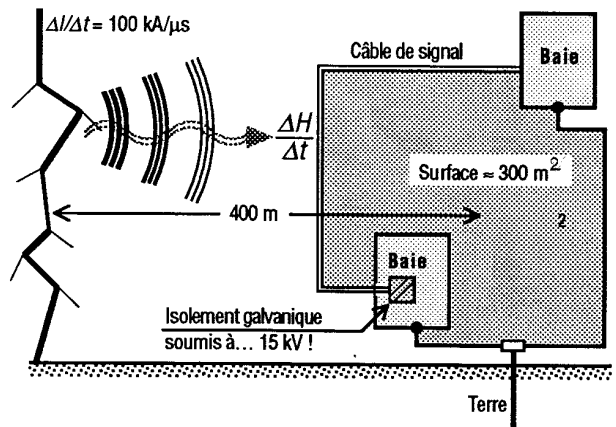


Fig. 21 – Un problème des réseaux locaux

Application: Courant induit dans une boucle de masse

Dans la configuration de l'exemple ci-dessus, la boucle de masse de 300 m² a un périmètre d'environ 100 m. Calculer le courant induit dans cette boucle par un choc de foudre de 100 kA tombant à 400 m. Le câble signal, long de 50 m, possède un blindage d'une résistance linéique de 20 m Ω /m. Il est heureusement mis à la masse aux deux bouts. Quelle est la d.d.p. en mode commun résiduelle sur les conducteurs signaux?

Solution:

Raisonnons de façon littérale tout d'abord. Appelons S la surface et L l'inductance totale de la boucle de masse, I le courant foudre et i le courant induit dans la boucle. La loi de Lenz (appliquée à un choc de foudre, en ampères par seconde) et la tension aux bornes d'une inductance (supposée pure) donnent les équations:

$$U = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot S \cdot \Delta I / R \cdot \Delta t \quad \text{et} \quad U = L \cdot \Delta i / \Delta t$$

Nous en déduisons une troisième équation très simple: $i = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot S \cdot I / R \cdot L$

Le courant induit dans une boucle de masse est ainsi l'image exacte du courant de la foudre, avec en particulier le même temps de montée et la même durée, du moins tant que l'on peut négliger la résistance des câbles devant leur self (c'est à dire typiquement au-dessus de 3 kHz). On peut considérer que l'arc de la foudre est le circuit primaire d'un transformateur à fortes fuites dont la boucle de masse est un secondaire en court-circuit.

Nous en déduisons le rapport: $i / I = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot S / R \cdot L$

ici $L = 100 \mu\text{H}$ (un câble a une inductance linéique = 1 μH /m), d'où:

$$i / I = 0,2 \times 10^{-6} \times 300 / 400 \times 100 \times 10^{-6} = 0,0015, \text{ soit } 0,15 \%$$

i vaut ainsi 100000 x 0,0015 = 150 ampères crête

La tension induite en mode commun u sur les conducteurs d'un câble blindé dont l'écran de résistance r supporte un courant i, en dessous de quelques mégahertz, vaut $u = r \cdot i$.

$$\text{Ici, } r = 20 \times 10^{-3} \times 50 = 1 \Omega$$

$$u = 1 \times 150 = 150\text{V}$$

Cette surtension interne à l'écran a la même forme, et en particulier a la même durée, que l'impulsion du courant de foudre, soit une centaine de microsecondes. Elle est d'amplitude trop faible pour contourner un isolement galvanique mais elle peut suffire à détruire ou à fragiliser un composant, un circuit d'interface en particulier.

Les solutions peuvent être de réduire la surface de la boucle de masse, de doubler le câble par un conducteur de masse de résistance inférieure à 20 m Ω /m (un chemin de câbles par exemple) ou de protéger les entrées/sorties électroniques par un écrêteur (Transzorb par exemple) entre chaque fil et la masse. Retenons que le courant induit par champ dans une boucle de masse a la même forme que celui de la foudre. Il peut atteindre plus de 100 A sur une grande boucle.

Ces exemples montrent que les tensions induites peuvent être aussi très dangereuses et peuvent donc endommager votre matériel bien que le coup ne soit pas direct.

Réduction des tensions induites

La d.d.p. induite par le champ rayonné par la foudre dans une boucle de masse peut être forte, surtout entre équipements distants. Réduire cette d.d.p. tient en trois méthodes: réduire la surface des boucles de masse, réduire globalement le champ en multipliant les boucles entre les masses et utiliser localement des effets

réducteurs. La superposition de ces trois méthodes est bien sûr souhaitable.

Rappels sur les effets réducteurs

Plaquer un câble contre un câble de masse relié au moins aux châssis à chaque extrémité réduit typiquement les perturbations foudre d'un facteur 3 ou 4. Un chemin de câble métallique boulonné de bout en bout apporte un effet réducteur de 30. La tresse d'un câble blindé raccordée à la masse des deux côtés sans queue de cochon réduit la tension collectée d'un facteur 100 environ (et même d'un facteur 300 en hautes fréquences, au delà du mégahertz).

Considérations sur le maillage des descentes

Le maillage des masses, c'est à dire la multiplication des boucles entre les masses réduit le champ résiduel au cœur du maillage : les courants induits dans les boucles entre masses s'opposent au champ qui leur donne naissance. Si le maillage est souvent bon en horizontal, il est souvent moins dense en vertical. C'est une raison supplémentaire pour mailler systématiquement tous les conducteurs de descente aux masses de chaque étage.

Il est souhaitable d'éloigner les équipements sensibles et leurs câbles d'interconnexion des murs externes du bâtiment. Une baie installée en périphérie est plus agressée par un champ externe que si elle était installée au cœur du bâtiment.

Il a été mesuré dans des atelier à charpentes métalliques des atténuations en champ magnétique de l'ordre d'un facteur 10 au centre par rapport à la périphérie dans la bande des ondes longues. L'éloignement des murs extérieurs réduit l'exposition des équipements au champ de la foudre par l'effet de blindage des boucles entre masses verticales. Cet éloignement réduit aussi l'agression d'un coup au but par la symétrie du courant de descente.

La foudre en conclusion ...

La foudre est un phénomène fréquent que l'on ne sait pas éviter. On sait néanmoins garantir l'immunité des systèmes électroniques à un foudroiement. Les effets chimiques, acoustiques, thermiques et mécaniques de la foudre sur les électroniques sont négligeables devant les effets électromagnétiques. Ses principaux ordres de grandeur sont désormais statistiquement bien connus. La sévérité d'un choc de foudre est définie par le courant crête et le di/dt crête.

Le fort champ électrique statique qui précède l'éclair indique l'imminence d'un choc mais il n'a aucun effet sur les électroniques. L'éclair génère un champ magnétique variable bien plus perturbateur que la variation du champ électrique. Les effets du champ magnétique sont sévères car il pénètre au cœur des immeubles où il agit par l'induction de surtensions. Les boucles de masse sont de plus en plus nombreuses dans les sites industriels, médicaux et tertiaires : boucles des réseaux locaux, de systèmes de contrôle-commande, d'alarme, etc. Des pannes latentes, avec une constante de temps de l'ordre du mois, ont été souvent observées après le foudroiement d'un site mal maillé. Les problèmes d'induction sont de plus en plus fréquents et coûteux.

La foudre peut aussi perturber ou détruire des équipements par des impulsions directement propagées par les câbles externes. Ces perturbations conduites peuvent être une partie du courant de la foudre (couplage galvanique) ou être collectées par effet d'antenne (couplage champ à boucle). Quelle que soit la résistance de la prise de terre, toute canalisation conductrice qui pénètre dans un bâtiment devrait y être raccordée. De même, tout conducteur électrique externe devrait être protégé par un écrêteur câblé aussi court que possible à la masse.

Les coups directs sont rares, d'où le confort de la vente des paratonnerres. Des paratonnerres ne sont pas indispensables. Des conducteurs posés le long des arêtes saillantes du bâtiment sont préférables. Les réseaux à fils tendus sont intéressants quand la sûreté de la protection prime sur l'esthétique. Dans tous les cas, les conducteurs de descentes à la terre doivent être multiples et si possible reliés aux masses internes. Un tel maillage est efficace contre les chocs directs par division du courant et contre les effets induits par "cage de Faraday".

Durcir un site existant contre la foudre est possible, simple et peu coûteux par rapport aux risques. Il suffit pratiquement de mailler soigneusement les masses internes et de veiller au bon montage des écrêteurs installés sur chacun des câbles externes.

Des raccordements équipotentiels entre masses peuvent être ajoutées en service, sans modifier les matériels, leurs logiciels, leurs câblages ou leurs connectiques.

Admirons la richesse, la diversité et l'astuce des arguments de vendeurs de paratonnerres lorsqu'ils prétendent sans rire que leur grigri à catalyse breveté SGDG peut décharger le nuage à partir du sol, ou repousser la foudre chez le voisin, ou l'attirer à coup sûr, ou l'empêcher de tomber, ou évacuer le courant

dans une terre séparée, ou supprimer à lui seul les effets néfastes de la foudre.

Protégeons nous de façon aussi sérieuse que les électroniques embarquées à bord des avions. Respectons les règles simples conformes à la physique de base. Alors tout ira bien, la preuve n'est plus à faire.

Et du côté de nos transeivers et antennes ?

Nous venons de voir, par des exemples, la difficulté et le danger des coups de foudres, tant directs que indirects, et l'application des principes examinés ci dessus concernent la protection en général ne sont pas très faciles à mettre en œuvre dans un QRA existant, mais ils ont, je l'espère, permis de mettre en évidence la difficulté de se prémunir de la foudre, et à aussi je crois bousculé un peu les croyances à ce sujet.

Si certaines de ces mesures sont réalisables, je crois qu'il est bon de les réaliser, ne fut-ce que pour, si pas éliminer bien sur (résultat très orgueilleux !!), du moins, atténuer les effets des coups de foudre.

Mais la première mesure, et la plus efficace (lorsque on s'y prend à temps !!) est bien sur, lors d'un risque d'orage annoncé ou lors de son approche, est de débrancher les antennes et de les écarter au maximum des récepteurs et transeivers de au moins deux mètres si possible, et de déconnecter les appareils du secteur.

Si cela est possible, l'application, même partielle des principes présentés ci dessus est toujours intéressant pour une protection générale.

20 Recommandations générales de prudence en cas d'orage

Toutes les recommandations pour protéger les personnes contre la foudre sont fondées sur deux principes: ne pas constituer une cible pour la foudre et ne pas se placer dans des situations qui risquent d'appliquer une différence de potentiel entre deux parties du corps. En pratique, il faut toujours essayer de trouver la situation de moindre risque: il est en effet rare de ne pas trouver une situation de haut risque dans les comptes rendus d'accidents. Les recommandations qui suivent visent toutes à respecter les principes énoncés ci-dessus.

Ces recommandations sont logiquement déduites des propriétés physiques de la foudre, des mécanismes de foudroiement, des caractéristiques spécifiques des courants électriques associés à la foudre, toutes ces données étant aujourd'hui bien connues, enfin de la physiopathologie des foudroiements.

Les recommandations qui suivent s'appliquent uniquement à l'homme et aux êtres vivants; en sont exclues les recommandations de protection des matériels et équipements, traitées ailleurs.

I. Activités à risque

1) D'une façon générale, on évitera certaines activités extérieures, du domaine des loisirs, des sports ou du travail, connues pour être particulièrement dangereuses par temps d'orage. Tel est le cas des activités suivantes: pêche, baignade, bateau, cyclisme, golf, alpinisme, ainsi que des travaux électriques, de réparations de toiture. D'une façon générale, toute activité qui expose au foudroiement direct.

En ce qui concerne les activités qui mettent le corps en contact avec l'eau, on se souviendra que le corps mouillé, aussi bien que l'eau, sont bons conducteurs de l'électricité, ce qui favorise le passage de courants relativement intenses et dangereux.

II. À la campagne

2) Il est impératif de ne jamais s'abriter sous un arbre, surtout si cet arbre est isolé ou ne fait partie que d'un petit groupe d'arbres.

Cette précaution est enseignée depuis longtemps par la sagesse populaire. On peut démontrer aujourd'hui que le risque de foudroiement d'un arbre isolé en espace ouvert est environ 50 fois supérieur à celui d'un homme debout.

3) En espace ouvert (champ, pré), ne porter aucun objet, en particulier métallique, qui émerge au-dessus de la tête: fourche, faux, club de golf ... Surtout ne jamais s'abriter sous un parapluie ouvert. Toute pièce conductrice doit au contraire être abaissée, ou même mieux déposée à côté de soi.

Par contre, l'utilisation d'un téléphone mobile n'entraîne aucun accroissement du risque, tout au moins lorsque son antenne ne dépasse pas la tête, ou que de très peu. Son volume, même s'il est métallique, reste insuffisant pour avoir un effet attractif sur la foudre.

Le risque de foudroiement d'une structure quelconque augmente en effet avec le carré de sa hauteur; un objet qui surélève de 1,4 fois la hauteur d'une personne double le risque. En outre, tout objet métallique pointu et allongé favorise le foudroiement.

4) Des personnes se trouvant en groupe doivent s'écarter les unes des autres d'au moins 3 mètres, pour éviter le risque d'un éclair latéral entre deux personnes.

Le foudroiement d'une personne peut se propager à ses voisins par une étincelle franchissant l'espacement entre personnes trop rapprochées: ce phénomène est appelé éclair latéral.

5) Il faut penser à s'écarter de toute structure métallique, notamment de pylones, de poteaux, de clôtures, afin de ne pas être victime d'une électrocution par «tension de toucher».

6) Pour les mêmes raisons, il conviendra d'éviter de s'abriter dans une cabine téléphonique extérieure, et a fortiori de téléphoner par temps d'orage, sauf avec un téléphone mobile, comme expliqué plus haut.

Si la ligne téléphonique est aérienne, elle peut être touchée par la foudre, mais aussi subir une élévation de potentiel induite par un coup de foudre voisin. Même si l'un de ces deux phénomènes se produit loin de la cabine, disons à quelques kilomètres, la « surtension » générée localement se propage le long de la ligne, et atteint la cabine, où elle peut faire des dégâts, et sérieusement commotionner la personne qui s'y abrite.

7) Ne jamais se tenir debout les jambes écartées, ni marcher à grandes enjambées lorsqu'on se trouve sous un orage. On risque alors d'être commotionné, voire électrocuté, par une « tension de pas ». La meilleure position consiste à se pelotonner au sol, après avoir étendu sous soi un ciré ou toute autre pièce en matière isolante (par exemple, en plastique). Même si l'on ne dispose pas de pièce isolante, la position couchée, jambes repliées sous soi, reste la position de moindre risque.

8) Lorsqu'on est surpris par un orage en pleine forêt, on ne peut évidemment pas éviter d'être sous des arbres. La position de moindre risque consiste alors à s'écarter le plus possible des troncs, et à éviter la proximité de branches basses. Cette position minimise les risques d'être victime de tensions de pas ou de tensions de toucher.

9) De bons abris protégeant contre la foudre sont des huttes de pierre. On s'abritera également dans une église ou une chapelle; mais si ces édifices ne sont pas protégés par un paratonnerre, il faut s'abstenir de s'appuyer contre ou de toucher un pilier ou un mur. Une automobile, à condition qu'elle ne soit pas décapotable ou à toit en plastique, constitue une excellente cage de Faraday. Penser à rabattre ou à rentrer l'antenne radio s'il y a lieu.

Par contre, on évitera de s'abriter dans un hangar, lorsque celui-ci comporte un toit de tôle supporté par des poutres de bois. En effet, si un coup de foudre survient près du hangar, même sans le toucher, le champ électrique intense qui accompagne tout coup de foudre peut induire entre le toit et le sol une tension élevée, tension qui peut à son tour générer un amorçage puis un arc électrique à travers le hangar. Cet effet d'induction est par contre sans risque si le toit est supporté par des poutres métalliques.

III. Dans un bâtiment ou une habitation

10) Éviter certaines activités à l'intérieur des bâtiments, surtout des maisons de campagne; ainsi, pour les raisons données en 6), il est recommandé de ne pas téléphoner lorsqu'un orage est menaçant. Toutefois, cette recommandation ne doit pas dissuader de téléphoner en cas d'urgence grave: il s'agit alors d'un risque calculé. Rappelons que le téléphone mobile est sans risque.

11) Dans une habitation dont la protection intérieure contre la foudre n'a pas été spécialement réalisée (même si l'habitation est équipée d'un paratonnerre), éviter de toucher des pièces métalliques telles que conduites et robinets d'eau, de prendre un bain ou une douche, de toucher les machines électrodomestiques. La seule façon de supprimer tout risque à l'intérieur consiste à réaliser une « équipotentialisation » de toutes les pièces métalliques, c'est-à-dire de les interconnecter par des liaisons conductrices. Cette opération est toutefois affaire de spécialiste en systèmes de protection contre la foudre, et doit être confiée à un installateur agréé de paratonnerres.

12) En l'absence de dispositifs de protection tels que parafoudres, il est vivement recommandé de débrancher le cordon d'alimentation secteur et le câble d'antenne d'un téléviseur, et de les éloigner d'au moins un mètre du poste. Un téléviseur non protégé et non débranché peut en effet « implorer » lors d'une forte surtension, constituant ainsi un risque pour les personnes se trouvant dans la même pièce.

IV. En montagne

13) Les alpinistes se trouvent souvent sur des sommets ou des arêtes, particulièrement exposés aux foudroiements. La première précaution évidente que doit prendre un alpiniste est donc de s'éloigner des pointes et des arêtes dès les premiers signes avant-coureurs d'un orage: lorsqu'il entend le bourdonnement ou le bruit d'abeilles caractéristique de « l'effet de couronne », le champ électrique ambiant est déjà intense, et il faut de

toute urgence quitter les crêtes.

14) La meilleure façon de se protéger contre un coup direct est de se réfugier sous un ressaut: celui-ci doit dominer d'au moins cinq à dix fois la hauteur du sujet.

15) Même à l'abri du coup direct, il faut prendre en compte les divers risques de foudroiement indirect par tensions de pas ou tensions de toucher. À 15 mètres sous un pic, ces tensions sont dangereuses, et il faut descendre à au moins cinquante mètres pour que le risque soit suffisamment réduit. Une précaution évidente est toutefois de ne jamais se plaquer contre une paroi, afin de ne pas s'exposer à des différences de potentiel, notamment en présence de failles humides. S'en tenir éloigné d'au moins 1,5 mètre.

16) Il peut également être dangereux de s'abriter dans une petite anfractuosité ou une petite grotte: en restant debout près de l'entrée, on risque de provoquer l'amorçage d'un arc électrique entre le plafond et la tête, et en s'appuyant au fond, on risque d'être traversé par un courant dérivé. Se tenir accroupi le plus loin possible du plafond, des parois et du fond.

17) Une commotion électrique même légère, et qui ne laisserait aucune trace en d'autres circonstances, peut, par surprise ou par perte momentanée du contrôle musculaire, faire lâcher prise et entraîner une chute grave. Ces accidents secondaires sont fréquents. Il y a donc lieu de tenir compte de ce risque lorsque l'alpiniste s'installe pour attendre la fin de l'orage.

V. Sur l'eau (mer, lac, rivière)

18) Sur une grande surface d'eau, un bateau, et notamment un voilier, constitue une saillie, donc un point d'impact privilégié pour la foudre. Dans une barque ou un bateau sans mât, la meilleure précaution, si le temps le permet, est de rejoindre d'urgence la rive.

19) Sur un bateau équipé d'un mât, celui-ci peut être frappé par la foudre de la même façon qu'un paratonnerre. Le principe qui guide alors la protection du bateau consiste à assurer une continuité électrique parfaite entre le sommet du mât et l'eau.

Un voilier moderne est généralement équipé d'un mât métallique; les haubans sont également des filins métalliques, dont les attaches font partie d'une ceinture, elle aussi métallique, courant tout autour du pont. Dans ces conditions, cette superstructure constitue une sorte de cage de Faraday à larges mailles, assurant une bonne protection du bateau. Si la coque est elle-même métallique, l'écoulement éventuel des courants de foudre vers l'eau se fait sans difficulté. Si la coque est en matière synthétique, il convient de fixer une ou deux chaînes à la ceinture métallique, l'autre extrémité plongeant dans l'eau. Celle-ci est suffisamment bonne conductrice pour constituer une bonne « prise d'eau ». Une solution plus élégante consiste à relier la base du mât au lest du bateau, par un conducteur installé une fois pour toutes.

20) Certains voiliers sont en bois, de même que leur mât, et les haubans peuvent être des cordes plus ou moins isolantes. Sur ce type de bateaux, on recommande de fixer une chaîne tout le long du mât, ou un conducteur fixé à demeure, en en faisant ainsi un paratonnerre. Comme en 19), la base du mât sera électriquement reliée à l'eau par une chaîne ou un conducteur. La protection du bateau est ainsi correctement assurée; quant aux personnes à bord, elles devront se placer le plus bas possible, voire à l'intérieur de la coque, pour celles qui ne participent pas aux manœuvres.

Bibliographie :

Parasites et perturbation des électroniques (compatibilité électromagnétique), par ALAIN CHAROY (éd. DUNOTTECH

La foudre – Nature, histoire, risques et protection ; de Claude Gary (éd. DUNOT)

L'électricité – tome 1 (éd. Larousse)

SCIENCES ET VIE : n°732 – Septembre 1978

ELECTRONIQUE APPLICATION n°34 - février-Mars 1984

ELECTRONIQUE APPLICATION n°35 - Avril-Mai 1984

ELECTRONIQUE APPLICATION n°56 – Octobre-Novembre 1987

Revue de l'électricité et de l'électronique (REE) n°9 – Octobre 2001