



La foudre

LES MÉCANISMES DE L'ORAGE

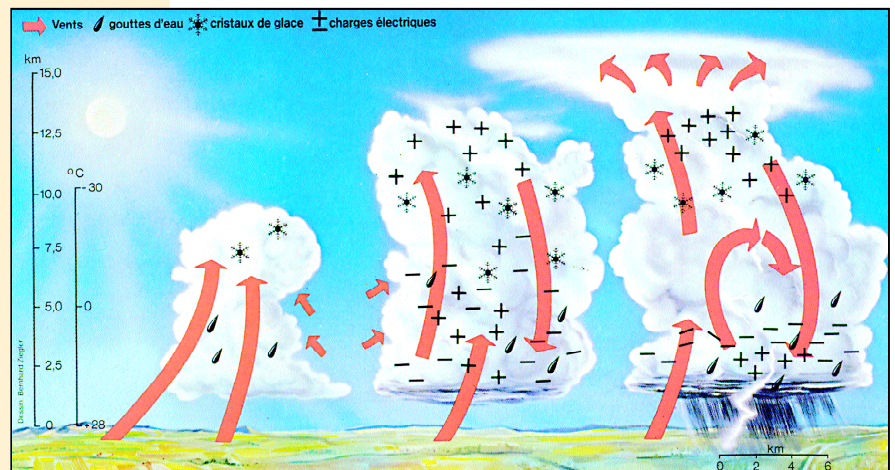
Les Cumulo-Nimbus.



Les nuages orageux, appelés cumulo-nimbus ou roi des nuages, diffèrent des autres nuages d'averses par l'échelle de leur extension tant verticale (de l'ordre de 15 km d'altitude, avec enclume supérieure) qu'horizontale (de l'ordre de 10 km de diamètre à leur base située à environ 2 km d'altitude), mais aussi par leur aptitude à donner naissance à des phénomènes électriques. Leur durée de vie moyenne excède à peine une heure. Leur extension verticale exige la présence de masses d'air instable (c'est-à-dire de l'air chaud et /ou humide en dessous d'air froid et / ou sec) donc d'importants gradients de température sur des épaisseurs considérables (c'est-à-dire des variations de température avec l'altitude). Ils contiennent jusqu'à 300.000 tonnes d'eau.

Dans ce type de nuage, le courant ascendant transporte en altitude des gouttelettes d'eau résultant de la condensation de l'humidité à proximité du sol. Ce courant d'air ascendant peut être provoqué par un simple effet de convection lié à un échauffement localisé du sol ou par la rencontre de masse d'air chaudes et humides avec d'autres plus froides.

La séparation des charges dans les nuages orageux n'est pas encore complètement connue, mais on y trouve une charge électrique de l'ordre de 50 à 100 C, avec une différence de potentiel base du nuage - sol de l'ordre de 100 MV, lorsque la décharge est imminente. Il est vraisemblable que plusieurs mécanismes d'électrification interviennent simultanément, mais que les phénomènes d'échange de charge dans les transitions eau liquide - eau solide y jouent un rôle important. On admet qu'en général les gouttelettes légères transportent vers le sommet du nuage des charges positives, alors que les glaçons devenus trop lourds pour être maintenus en suspension tombent en portant vers la base du nuage des charges négatives. Le cumulo-nimbus fonctionne donc comme une gigantesque machine électrostatique à séparation de charges.



Au niveau du sol, en l'absence de nuage, le champ électrique normal dû à la charge positive de la très haute atmosphère (dans l'ionosphère, la concentration en ions positifs dépasse de 20% celle des ions négatifs, si bien que la surface de la Terre se charge négativement de l'ordre de -500 kC) est dirigé vers le sol; il est de l'ordre de 100 V/m.

L'atmosphère est un diélectrique dans l'immense condensateur formé de deux électrodes quasi sphériques: l'ionopause et le sol. Un courant de fuite global de 1800 A implique une tension de 360 kV entre les électrodes. La reconstitution de la charge de cet immense condensateur provient de l'activité orageuse sur l'ensemble de la planète. En l'absence de foudre, ce condensateur se déchargerait

en moins d'une demi-heure ce qui entraînerait probablement la disparition de toute vie sur terre.

Lorsque le nuage, très négatif à sa base, approche, le champ s'inverse et atteint des valeurs beaucoup plus élevées (10 à 15 kV/m). Le sol, et tous les objets qui s'y trouvent, subissent son influence et deviennent donc positifs. La présence d'objets pointus ou proéminents renforce par ailleurs considérablement le champ par effet de pointe d'un facteur qui peut atteindre plusieurs centaines. Il est, dans ces conditions, tout à fait possible d'atteindre le champ disruptif (30 kV/cm d'air) et donc d'obtenir l'ionisation en avalanche à l'extrémité de l'objet ou de l'édifice pointu (feux de Saint-Elme); une décharge au sol est alors imminente.



La foudre

LES MÉCANISMES DE L'ORAGE

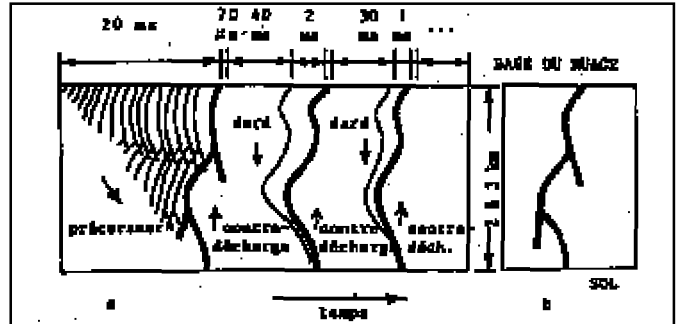
L'éclair atmosphérique

Il y a entre 2000 et 5000 orages en permanence autour du globe terrestre. Ils produisent une centaine de décharges électriques par seconde.

L'étincelle atmosphérique peut jaillir entre des zones différentes d'un même nuage (décharge intra-nuage) ou de nuages voisins (décharge inter-nuage), ou encore entre nuage et sol (1 fois sur 3 dans les régions tempérées, 1 fois sur 10 dans les régions tropicales ou équatoriales).



Coup de foudre descendant



Aspects dynamique a et statique b de la naissance d'un éclair (terrain plat)

mènes précurseurs se répètent sous forme de dards qui, contrairement au premier traceur, progressent de façon continue à la vitesse de 1000 km/s; une nouvelle contre-décharge l'emprunte, afin de vider la poche de charges affectée par la décharge. Les mêmes phénomènes se répètent plusieurs fois. Dans les régions tempérées, une majorité de décharges ne comportent qu'une à trois composantes (coups).

Dans le cas de structures élevées (dépassant 60 m de haut), on observe des décharges initiées par des précurseurs ascendants; un dard descendant intercepte ce précurseur et attire la contre-décharge qui jaillit de la structure (arbre, antenne, tour, sommet de montagne, paratonnerre,...).

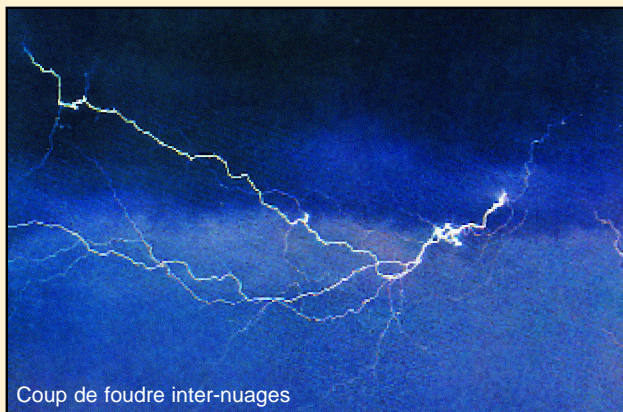
Le bruit du tonnerre est dû à la dilatation explosive de l'air fortement échauffé (plasma à 30 000K) et la durée pendant laquelle ce bruit est



Coup de foudre ascendant

perçu dépend de la longueur de l'éclair. Les bruits émis par chaque segment élémentaire de celui-ci, parviennent en effet à l'oreille avec un décalage temporel qui traduit leur différence d'éloignement. En outre, les bruits graves et aigus ne sont pas émis de la même façon dans toutes les directions, ce qui donne lieu à la perception d'une succession de roulements sourds ou au contraire de claquements.

On appelle niveau kéraunique (ou isokéraunique) T_d d'un lieu, le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu en ce lieu; c'est une notion improprement quantifiable (environnement, climat, durée des perturbations orageuses, position précise de la décharge, type). En Belgique le niveau kéraunique est compris entre 8 et 22 selon les régions, avec une valeur moyenne $T_d = 15$, ce qui donne une densité moyenne de coups au sol égale à $N_g = 1,5 \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (loi empirique). Grâce à l'installation du réseau de détection SAFIR, nous possédons maintenant des données beaucoup plus précises sur l'activité orageuse dans notre pays.



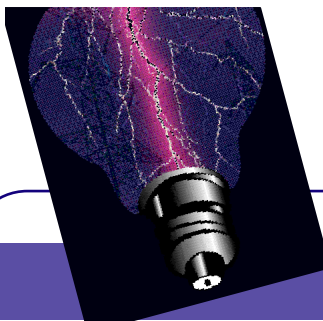
Coup de foudre inter-nuages

La longueur de l'éclair peut varier de 2 à plusieurs dizaines de kilomètres. Les éclairs les plus intenses restent toutefois les éclairs nuage sol.

Le mécanisme du coup de foudre est désormais bien connu. En terrain plat, partant du nuage vers le sol (coup de foudre descendant), de petites décharges (appelées traceurs ou précurseurs), peu lumineuses et négatives, progressent par bonds successifs de quelques dizaines de mètres, se ramifient, repartent d'une branche déterminée et descendent à nouveau à la vitesse d'environ 100 km/s; ces prédécharges pilotes durent environ 1 s et franchissent de 10 à 200 m; entre celles-ci s'écoulent des périodes de repos apparent de 30 à 200 s.

Lorsqu'un précurseur arrive à quelques dizaines de mètres du sol (un traceur ascendant provenant des aspérités, des proéminences, des édifices élevés ou d'un paratonnerre), la décharge principale, ou contre-décharge, se développe et rejoint le nuage en moins de 100 s par le canal ionisé qu'a créé le traceur; cette décharge est un plasma porté à 30 000 K, de pression axiale atteignant plusieurs centaines d'atmosphères, de diamètre voisin de 2 cm, progressant à 150 000 km/s et portant un courant de crête moyen de 30 kA (le record mesuré est de 540 kA).

Quelques centièmes de seconde plus tard, les phéno-



La foudre

PROTECTION CONTRE L'ORAGE

Protection externe: le paratonnerre

Les dégâts causés par la foudre peuvent être très variés et présenter des caractéristiques parfois surprenantes. Lorsque la foudre frappe des matériaux mauvais conducteurs, le courant cherche la voie la plus conductrice possible et celle-ci est souvent celle qui recèle la plus grande humidité (infiltrations dans les constructions, vaisseaux remplis de sève dans les arbres,...).

Dans ces conditions la vaporisation explosive de l'humidité engendre une forte surpression qui fait exploser le matériau. Par ailleurs, à faible distance d'un coup de foudre (1 à 2 mètres), la brutale dilatation de l'air peut produire un effet de souffle destructeur.

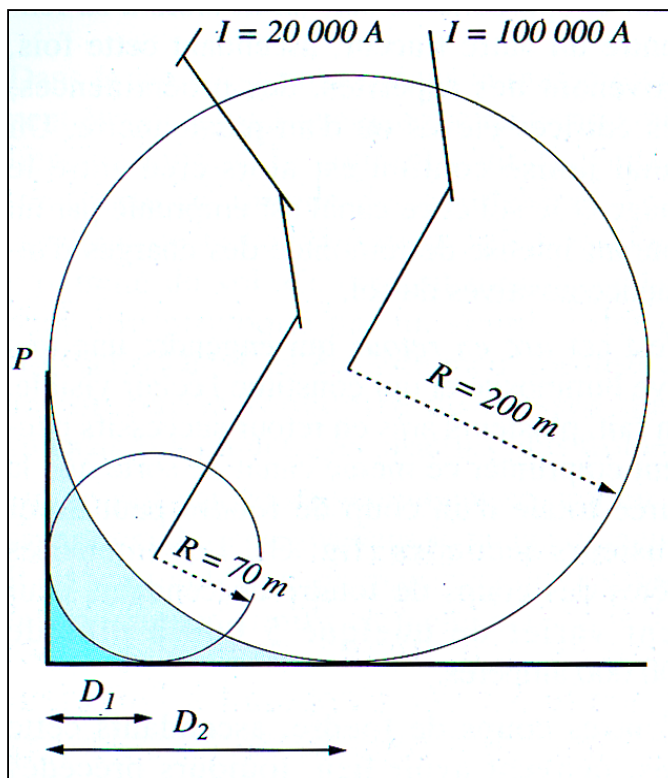
Enfin, si la foudre frappe un conducteur métallique, celui-ci, en raison de la très bonne conductivité des métaux, ne subit pas d'échauffement très important dès que sa section est suffisante (un conducteur de cuivre de seulement 20 mm² de section ne s'échauffera pas à plus de 200°C, même dans le cas d'un coup de foudre).

En revanche, aux points de pénétration et de sortie, un échauffement considérable peut conduire à la fusion locale du métal et à son percement, avec projection de gouttelettes en fusion si ce métal est en plaque mince (danger d'incendie).

Dans ces conditions, la nécessité d'une protection assurée par le paratonnerre paraît évidente. Rappelons que le rôle du paratonnerre est de constituer le point d'émission privilégié du traceur ascendant assurant la jonction avec le traceur descendant parvenu en étape terminale proche du sol. On a évalué, dans le cadre du modèle électro-géométrique de la foudre, la distance d'amorçage (c'est-à-dire la distance minimale d'un objet au sol à la pointe du traceur descendant en deçà de laquelle cet objet peut devenir point d'impact), et on a établi qu'elle était fonction de l'intensité du coup de foudre (d'une cinquantaine de mètres pour un coup de 30 kA à plus de 250 m pour un coup de 150 kA).

La zone de protection au sol d'un paratonnerre peut donc être considérée comme interne à la zone colorée en bleu, puisque tout traceur parvenu au point P trouvera un impact possible au sol ou sur la tige avant de pouvoir frapper les points de cette zone ainsi protégée.

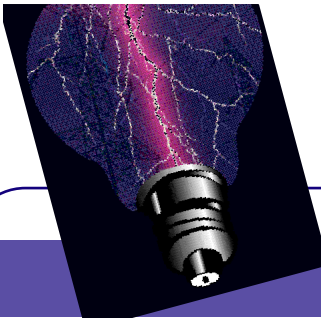
On voit immédiatement que la zone de protection d'un paratonnerre est plus grande pour les forts coups de foudre. Dans le cas de coups de foudre modestes, la sphère d'amorçage peut même devenir réduite au point que l'impact ne se produise plus à la pointe du paratonnerre, mais à mi-hauteur sur la tige. Des mesures ont même montré (pour une antenne métallique de 537 m à Moscou) que le nombre de



coups au sol dans l'environnement proche du paratonnerre (moins d'un km) était plus important que dans une région plus éloignée (2 à 3 km de l'antenne). La tour exerce donc un effet de protection négatif.

Le professeur Dr Ir C. Bouquegneau, de la Faculté Polytechnique de Mons, a également mis en évidence qu'une tige verticale raccordée à la terre n'attire pas davantage une décharge à haute tension qu'un conducteur horizontal de même acuité géométrique également raccordé à la terre. Il a aussi montré la non-efficacité des paratonnerres radioactifs (actuellement interdits en Belgique) et de paratonnerres ionisants aujourd'hui sur le marché. Par contre, l'impédance de terre de la structure susceptible d'être frappée exerce une influence considérable sur la probabilité d'impact: plus basse est la résistance de terre, plus grande est la probabilité d'impact.

En conclusion, la seule protection efficace consiste à entourer la structure à protéger d'une cage de Faraday (à mailles lâches) reliée correctement à la terre, à moins que la structure ne soit elle-même métallique.



La foudre

PROTECTION CONTRE L'ORAGE

Protection interne

Les coups de foudre n'engendrent pas que des problèmes liés aux effets thermiques, acoustiques et électrochimiques. En effet, d'autres effets peuvent survenir: des effets électrodynamiques, des effets électromagnétiques.

Les effets électrodynamiques sont ceux que l'on rencontre lorsqu'un courant fort circule dans deux conducteurs parallèles (attraction ou répulsion). Ces effets sont négligeables si l'écartement entre les conducteurs dépasse 50 cm.

Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de couplages sur une structure. Il convient de distinguer le couplage résistif (conduction, résistance du blindage des câbles, résistance et montée en potentiel de la prise de terre,...) des couplages par champs magnétiques (boucles de l'installation, inductances de liaison,...) et électriques (antennes tiges,...). Le couplage est influencé par les mises à la terre, les liaisons d'équipotentialité, les blindages, le cheminement et la disposition des conducteurs métalliques. Les phénomènes d'induction électromagnétique liés à la propagation d'ondes de courant sur les conducteurs se manifestent à des dizaines de mètres du

point d'impact, vu l'importance des amplitudes de courant mis en jeu. Le caractère oscillatoire à haute fréquence de la décharge atmosphérique entraîne une circulation de courant uniquement à la surface des conducteurs et l'accumulation des charges d'un même signe conduit à l'éclatement de leurs parties superficielles (par répulsion électrostatique).

Il convient donc d'utiliser, suivant l'installation électrique et électronique (téléphone, ordinateur, télévision,... même éteints), des protections supplémentaires fondées sur quatre grands principes :

- éviter un impact de la foudre sur les équipements et empêcher la circulation de courants importants dans les équipements, les installations et les liaisons entre appareils ;
- limiter le niveau des surtensions induites dans la filière du bâtiment ;
- limiter la montée en potentiel de la prise de terre ainsi que les différences de potentiel entre terres voisines ;
- empêcher la pénétration dans les équipements de surtensions susceptibles de les détériorer ou de les perturber.

Effets sur l'homme

Les effets physiologiques vont du simple éblouissement au foudroiement immédiat, en passant par des chocs nerveux, des paralysies ou des comas momentanés.

Parfois la victime voit ses vêtements se volatiliser. Si la brièveté du phénomène thermique lui épargne des brûlures autres que superficielles, les parties métalliques que la per-

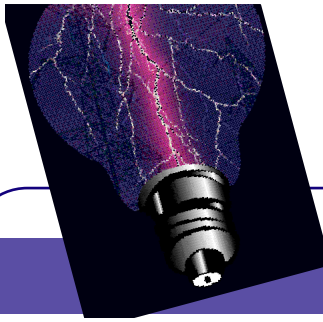
sonne porte sur elle peuvent être amenées à température de fusion.

Atteint directement, le corps humain est traversé des pieds (traces kéraunographiques) à la tête (le corps se comporte comme un gel du point de vue électrique): la décharge périphérique lèche le corps côté intérieur des vêtements humides, la pression de vapeur brutalement créée étant suffisante pour déchirer les habits et même les chaussures, soufflés à distance.

Un coup indirect se manifeste sous forme d'une décharge latérale, d'une décharge induite ou via des potentiels déphasés. Il ne faut jamais s'abriter sous un arbre ou rester à proximité de clôtures métalliques isolées du sol.

Lorsque la foudre frappe le sol, le courant s'écoule dans les couches sous-jacentes du terrain souvent hétérogène, avec une montée de potentiel importante au point d'impact ; la tension de pas est souvent dépassée au voisinage de ce point, surtout pour les quadrupèdes qui se font électrocuter par potentiels déphasés.



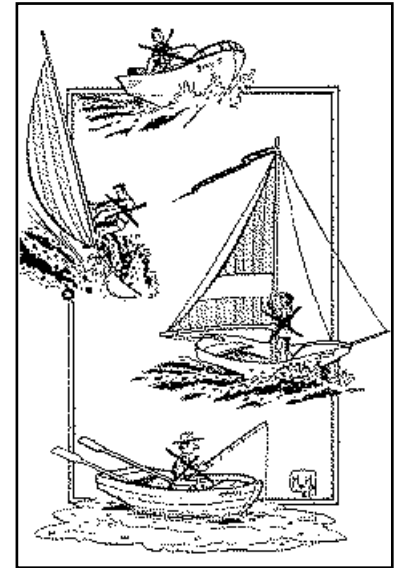
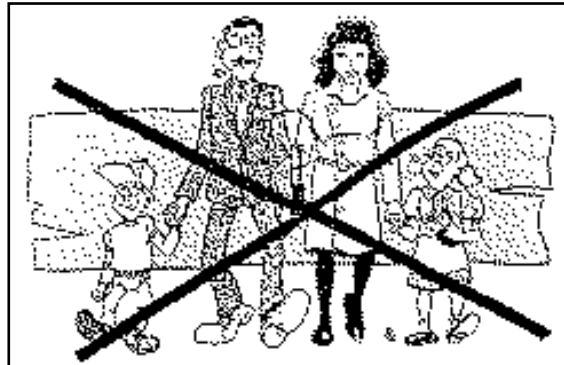
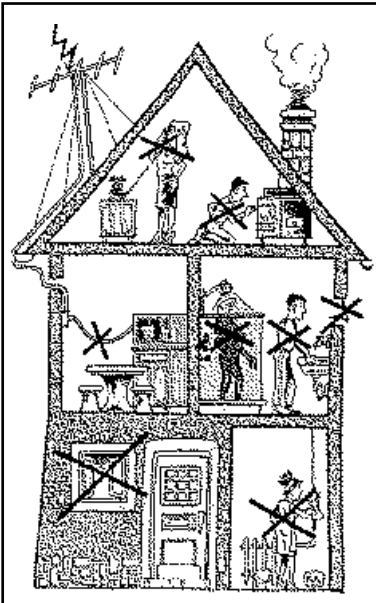


La foudre

PROTECTION CONTRE L'ORAGE

Il convient donc, chez soi, en cas d'orage, de ne pas utiliser le téléphone, de ne pas prendre de bain, de débrancher les antennes de radio ou de télévision, de déconnecter le câble de télédistribution et de rester assis autour de la table familiale, à l'écart des cheminées, portes ou fenêtres, afin de ne toucher aucun conducteur.

De même, en ville, il ne faut pas rester sur la voie publique, mais rentrer dans un magasin. Si ce n'est pas possible, à la campagne par exemple, il ne faut pas rester groupés. Il faut également s'éloigner de tout conducteur (réverbères, arbres isolés, clôture métalliques,...). Il ne faut pas non plus pratiquer des sports nautiques.



La position la plus sûre est de s'accroupir, les pieds joints sans toucher le sol avec les mains. Il s'agit de la position en boule de sécurité.

Grâce à sa carrosserie métallique, une voiture à l'arrêt ou se déplaçant à faible vitesse (afin d'éviter un accident par éblouissement ou explosion des pneus) est également très sécurisante. En effet, elle représente une cage de Faraday.

