

---

## PHENOMENE METEOROLOGIQUE : ORAGES ET LA FOUDRE EN MER

Parmi les risques encourus par la navigation, plus que les tempêtes ou l'échouement, la crainte de l'orage et du foudroiement tient une bonne place, principalement chez les plaisanciers. À cela, plusieurs raisons.

Tout d'abord, avec la généralisation des systèmes de localisation par satellite, les erreurs de navigation se font rares ; ensuite, le plaisancier navigue essentiellement l'été, saison où coups de vent et tempêtes d'origine frontale ou dépressionnaire sont peu fréquents et, disons-le, suffisamment bien prévus par les services météorologiques pour qu'il puisse s'abriter à temps. En revanche, l'été, c'est aussi la saison des orages (3 à 5 jours par mois), avec une fréquence maximale en août sur les côtes du Languedoc et de Provence et en octobre en Corse.

Mais, que l'on se rassure. Bien que les risques dus à la foudre en mer, ou sur des plans d'eau, soient périodiquement évoqués, le risque d'orage en mer est statistiquement moins élevé que sur terre, et les accidents corporels sont relativement rares. Sur ce point, nombreux sont les témoignages de plaisanciers qui, après avoir traversé un orage, ont été très étonnés de n'avoir pas été touchés par la foudre, alors que partout autour d'eux les éclairs frappaient la mer. Persuadés qu'un mât, surtout métallique, isolé sur l'océan, ne peut qu'attirer la foudre, certains n'hésitent pas à parler de miracle. Comme on va le voir dans ce qui suit, un mât métallique " n'attire " la foudre que dans un tout petit rayon : ce qui, sur terre, est un inconvénient pour les paratonnerres devient, sur mer, un avantage.

### LES NUAGES ORAGEUX

Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du type cumulonimbus, en forme d'enclume, couvrant plusieurs kilomètres carrés, et atteignant souvent dix kilomètres et plus d'altitude. Ils sont constitués de gouttes d'eau à leur partie inférieure, de particules de glace à leur partie supérieure. Leur formation est due à l'apparition de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 20 m/s, provoqués par la convection naturelle ou par la rencontre d'air chaud humide et d'air froid. Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation et un transfert de charges électriques au sein du nuage, dont la partie supérieure se charge positivement, tandis que la base se charge négativement. On note souvent un îlot de charges positives enserré dans la masse négative.

Dans un nuage ainsi électrisé, des décharges électriques peuvent être générées. Parmi celles-ci, un tiers environ frappe le sol, et on parle alors de foudre : les deux autres tiers jaillissent à l'intérieur d'un nuage, ou entre deux nuages orageux, et on les appelle éclairs internuages ou intranuages. Pour le seul territoire français, on estime à plus d'un million le nombre de coups de foudre qui s'abattent chaque année sur le pays.

### LES PHENOMENES PRECURSEURS

Lorsque le nuage est mûr pour éclater en orage, il constitue un vaste dipôle, créant des champs électriques entre les différentes couches intérieures, de même qu'entre sa base et la surface de la terre. Au moment de la formation ou de l'approche d'un nuage chargé, le champ électrique atmosphérique au sol, qui est normalement de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre, commence à s'inverser, puis croît dans de fortes proportions.

Lorsque son intensité atteint 4 à 10 kV/m, selon les conditions locales, une décharge au sol est imminente. Sur un plan d'eau assez vaste (lac ou mer), le champ critique est plus élevé ; il atteint 40 à 50 kV/m, en raison de l'absence de charges d'espace dues à l'effet de couronne, qui existent sur la terre mais non sur un plan d'eau. Cette inversion, puis cette forte croissance du champ électrique, est donc le premier signe annonçant la chute probable de la foudre. Les valeurs de champ électrique indiquées ci-dessus supposent un sol horizontal plat. Les reliefs, les proéminences modifient fortement cette situation, et renforcent localement le champ à leur sommet : c'est l'effet de pointe. Lorsqu'une aspérité est suffisamment effilée, il se manifeste à sa pointe des effluves, sorte de filaments bleu-violet, qui produisent des crépitements caractéristiques. Ce phénomène est connu depuis longtemps sous le nom de feux de Saint-Elme, et correspond à ce que l'on désigne aujourd'hui par " effet de couronne ".

### CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DE LA FOUDRE

La première phase d'un coup de foudre est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse, ou traceur, qui progresse à travers l'air neutre.

Suivant l'origine du traceur, on distingue :

- les coups de foudre descendants (le traceur part du nuage et progresse par bonds successifs, formant des arborescences ouvertes vers le bas) ; ce traceur est appelé " traceur par bonds " ;
- les coups de foudre ascendants (le traceur part du sol, d'une aspérité importante telle que tour ou pic pointu, et donnera des arborescences ouvertes vers le haut).

Les coups descendants sont de loin les plus fréquents en pays plat. En second lieu, on distingue :

- les coups négatifs (qui déchargent la partie négative du nuage) ;
- les coups positifs (qui déchargent la partie positive du nuage).

Dans nos régions tempérées, 90 % des coups de foudre sont négatifs. La proportion de coups de foudre positifs est, semble-t-il, nettement plus élevée en mer, selon les plus récentes observations de la société Météorage(1).

Chaque décharge relève d'un processus physique propre : ainsi, très schématiquement, lorsqu'un traceur descendant, dont la tête progresse par bonds, approche du sol, un autre traceur issu d'une proéminence s'élançe et le rejoint. Ceci forme un canal ionisé continu entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité, appelé " arc en retour ". Le processus de jonction, dont la compréhension est essentielle pour la mise au point des modèles de protection, est appelé "attachement". L'attachement est le processus principal du mécanisme d'impact, qui explique comment se décide le point exact où va frapper la foudre. Contrairement à des idées largement répandues, la foudre ne frappe pas un objet à la manière de Zeus, qui vise sa cible et projette le feu du ciel avec précision. Bien au contraire ; le traceur par bonds issu du nuage orageux, première phase d'un coup de foudre, est myope et progresse en se frayant un chemin dans l'air de façon complètement aléatoire sur la plus grande partie de sa trajectoire. Ce n'est qu'au dernier moment, lorsqu'il est arrivé à deux ou trois cents mètres de la terre, que tout se joue : le rôle des décharges ascendantes est alors essentiel dans le processus. Dans le cas le plus fréquent du coup de foudre négatif, le traceur par bonds est un canal ionisé qui porte un excédent de charges négatives, avec une forte concentration à sa pointe. Lorsque ce traceur se rapproche du sol, il génère au-dessous de lui un champ électrique, qui croît jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de kilovolts par mètre. À ce moment, des traceurs ascendants positifs se développent brusquement en direction du traceur descendant, alors qu'ils n'existaient auparavant qu'au plus sous forme d'effluves d'effet de couronne. L'un des traceurs ascendants, le plus proche, ou celui qui a démarré le plus tôt, ou celui qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur descendant : le canal ionisé est dès lors continu depuis le sol jusqu'au nuage, et l'arc en retour, phase la plus violente du coup de foudre, peut avoir lieu. L'expression utilisée en anglais pour caractériser le rôle des traceurs ascendants est " connecting leader ", et, en allemand, on le désigne par le terme très évocateur de " Fangentladung ", c'est-à-dire "décharge de capture". La distance entre le point d'origine du traceur ascendant et le point de jonction est habituellement appelée "distance d'amorçage". Elle ne dépasse jamais quelque 300 mètres. En général, un coup de foudre complet dure de 0,01 à 2 secondes et comporte en moyenne 2 à 3 arcs en retour ; leur intensité est comprise entre 3 000 et 200 000 ampères, avec une valeur médiane de 25 000 ampères. Récemment, on aurait même observé quelques cas d'intensité aussi élevée que 500 000 ampères.

Le premier arc en retour est aussi désigné par " premier coup ", et les arcs en retour suivants par " coups subséquents ". Le front d'onde du courant du premier coup dure de 1 à 10 micro secondes ; le front des coups subséquents est beaucoup plus court, inférieur à une microseconde. La durée moyenne d'un arc en retour, dont la décroissance suit une loi exponentielle, est de la centaine de microsecondes. Entre les arcs en retour successifs d'un coup de foudre complet, il s'écoule dans le canal ionisé un courant de quelques centaines d'ampères, appelé "courant persistant", qui dure jusqu'à la fin de la décharge. Pour terminer ce paragraphe, on notera que, pour que ces divers processus puissent se développer, il faut que la "tension" entre la base du nuage et le sol soit de l'ordre de la centaine de million de volts.

## L'ENERGIE ET LA Foudre

Est-il intéressant de capter l'énergie de la foudre ? C'est là une question souvent posée. On pourrait croire en effet que l'énergie électrique dissipée par les orages est importante. En réalité, s'il est exact que la puissance instantanée de la foudre est énorme, la puissance moyenne reste relativement modeste. Pour s'en convaincre, il suffit d'intégrer l'énergie dissipée annuellement par l'ensemble des coups de foudre frappant le territoire français. Une évaluation simple montre que la puissance permanente équivalente est de 100 mégawatts, soit moins du dixième de la puissance d'une tranche nucléaire moderne. De plus, on imagine les difficultés techniques à résoudre pour capter une énergie aussi diffuse et aléatoire que celle de la foudre.

## LA LUMIERE ET LE TONNERRE

Au moment où l'intense courant s'écoule le long du canal ionisé que constitue le traceur, ce canal se transforme instantanément en un véritable arc électrique, où les températures atteignent 20 000 à 30 000 °K ; une violente lumière est alors émise. Simultanément, l'élévation de pression explosive due à l'échauffement du canal produit une onde de choc acoustique, source du tonnerre. Distance, longueur et orientation des éclairs sont très variables, ce qui explique la perception, soit de longs roulements sourds, soit au contraire de claquements secs.

## LE RISQUE DE FOUROIEMENT

Il est d'usage de caractériser la sévérité orageuse d'une région par son niveau kéraunique. Celui-ci est, par définition, "le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu". En France, le niveau kéraunique

moyen est de l'ordre de 20. Il est supérieur à 30 dans le sud-est montagneux et inférieur à 15 dans les régions côtières du nord-ouest. Dans d'autres régions du globe, ce niveau dépasse 100 comme en Floride, et même 180 en Afrique du Sud ou en Indonésie. Ces données sont maintenant complétées par les indications de réseaux de localisation des impacts. En France, deux réseaux de radiogoniométrie complémentaires sont installés : Météorage (impacts foudre) et Safir (activité électrique des nuages). Ces réseaux fournissent la densité de foudroiement exprimée en nombre d'impacts par km<sup>2</sup> et par an. Ce nombre est de deux en moyenne sur notre territoire.

Connaissant la densité de foudroiement d'une région, on peut évaluer la probabilité de foudroiement d'un objet par une méthode simple basée sur le modèle électrogéométrique. Pour ce faire, on détermine pour un objet saillant quelconque (bâtiment, arbre, paratonnerre, et pour ce qui nous intéresse ici, mât d'un bateau) sa "surface équivalente de capture". Cette surface est définie comme la surface d'un sol plan qui aurait la même probabilité de foudroiement que l'objet en question. Connaissant la densité de foudroiement locale, exprimée en nombre d'impacts par kilomètre carré et par an, le foudroiement de la surface équivalente, et donc de l'objet, s'en déduit par simple proportionnalité. Dans le cas d'une tige verticale de hauteur H au-dessus du sol, la surface équivalente de capture est un cercle dont le rayon vaut trois fois la hauteur de la tige. Certains spécialistes préconisent de retenir pour ce calcul un rayon de deux fois la hauteur, mais il est clair qu'en prenant trois, on obtient une valeur conservatoire du risque de foudroiement. Appliquons cette formule au cas d'un mât de bateau, qui aurait une hauteur de 15 mètres au-dessus du plan d'eau. On obtient une surface équivalente de 6362 mètres carrés, ou 0,0064 kilomètre carré. Si maintenant nous supposons que le bateau se trouve dans une zone en mer où la densité de foudroiement est de 3 coups de foudre par kilomètre carré et par an, nous obtenons une probabilité de foudroiement de  $0,0064 \times 3 = 0,02$  soit une fois tous les 50 ans. Mais, comme de plus ce bateau ne sera pas occupé en permanence pendant la saison orageuse, les occupants éventuels encourent un risque encore bien moindre. Si, maintenant, nous prenons l'hypothèse de deux fois la hauteur du mât, comme le préconisent certains, avec une densité de 2 coups par km<sup>2</sup> et par an, la probabilité de foudroiement tombe alors à 0,006, soit une fois tous les 170 ans. La réalité est certainement encadrée par ces deux probabilités. Ces exemples numériques mettent ainsi clairement en évidence pourquoi les accidents de mer dus à la foudre sont en fait relativement rares.

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, il est préférable de se mettre à plat dans le fond, pour ne pas former saillie, mais la meilleure précaution, si le temps le permet, est de rejoindre d'urgence la rive ; sinon essayer de trouver un abri sous une falaise, un pont ou une estacade. 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 et d'un haubanage métalliques. Si la coque est elle-même métallique, l'écoulement éventuel des courants de foudre vers l'eau se fait sans difficulté. À l'intérieur de la coque, les personnes bénéficient d'une excellente protection. Si la coque est en matière synthétique ou en bois, il convient de fixer une ou deux chaînes au pied de mât ou au haubanage, l'autre extrémité plongeant dans l'eau. On constitue ainsi un véritable paratonnerre, comportant son extrémité (il n'est pas indispensable que celle-ci soit pointue), sa descente et sa prise d'écoulement du courant dans l'eau. La protection du bateau est correctement assurée ; quant aux personnes à bord, elles devront se placer le plus bas possible, éloignées de la chaîne, voire à l'intérieur de la coque. Reste le problème des anciens voiliers ayant coque et mât en bois et un haubanage dans un matériau (cordages) plus ou moins isolant. Sur ce type de bateaux - heureusement peu fréquents -, on recommande de fixer une chaîne tout le long du mât et de l'enrouler une ou deux fois autour du pied du mât, puis de la prolonger jusque dans l'eau. Mais, si rien n'a été prévu à l'origine, on imagine mal la mise en oeuvre d'un tel bricolage lorsque le vent fraîchit à l'approche de l'orage et que la mer se lève. En ce qui concerne l'électronique (radio, aide à la navigation, sondes...), reste à protéger ce matériel. Il s'agit alors d'un

problème de "compatibilité électromagnétique", en abrégé CEM. Notons à ce propos que le matériel électronique, très sensible aux coups directs sur le bateau, peut également être endommagé par effet d'induction, dû au rayonnement électromagnétique d'un coup de foudre proche, mais non direct. En effet, le rayonnement électromagnétique généré par les courants de foudre est assez intense pour induire des surtensions dangereuses, même si la foudre est tombée à une centaine de mètres, voire plus, du bateau. La première précaution consiste alors à isoler les antennes des appareils en les déconnectant, et en installant des éclateurs à gaz les reliant à l'infrastructure métallique, ou à défaut à la chaîne faisant office de "prise d'eau". Ces éclateurs, isolants en fonctionnement normal, n'ont aucune incidence sur la transmission des signaux électriques. À partir d'un certain niveau de surtension, le gaz devient conducteur et dérive la surtension vers la masse. Mieux, il est recommandé d'installer des parafoudres au plus près de l'appareillage électronique ; mais il s'agit là d'une installation à faire réaliser par des spécialistes. En tout état de cause, en l'absence de dispositifs de protection, il est conseillé de débrancher antennes et sondes et d'éviter d'utiliser l'électronique de bord ".

En annexe, une enquête auprès de navigateurs et un résumé.

---

(1) Météorage est une société de droit privé qui exploite, en collaboration avec Météo-France, un réseau de capteurs foudre sur le territoire français métropolitain.

---