

Orages et coups de foudre

Depuis une cinquantaine d'années que de progrès ont été réalisés tant dans la prospection de l'atmosphère que la détection des phénomènes météorologiques ! Les plus anciens, parmi nous, se souviennent que dans les années dans quarante et même cinquante, les météo ne disposaient ni de radars d'observation ou de mesure des vents, ni des photographies et mesures radiométriques de satellites, ni de dispositifs de mesure automatiques des paramètres physiques de l'atmosphère : stations automatiques, télémètres à nuages, transmissomètres... quant aux orages, seule la détection humaine, visuelle ou auditive permettait de les identifier et approximativement de les localiser (qui n'a pas compté les secondes entre éclair et tonnerre ?) Par la suite, la localisation globale de zones orageuses fut possible par la mesure et l'orientation des "atmosphériques"*, ondes radio électriques générées par les éclairs. Mais la méthode utilisée ne permettait pas de localiser précisément et individuellement les éclairs. L'article, ci-après, que nous reproduisons grâce à l'obligeance du rédacteur en chef de Met-Mar que nous remercions chaleureusement, décrit une nouvelle technique d'identification et de comptabilité de tous les impacts de foudre, informations essentielles pour la localisation précise des foyers orageux, l'évaluation de leur intensité et leur étude climatologique.

Chaque année en France, entre 700 000 et un million d'éclairs atteignent le sol (les éclairs intra-nuages ne sont pas comptés), frappant une cinquantaine de personnes et une dizaine de milliers de têtes de bestiaux. Les régions montagneuses sont les plus touchées avec plus de trente jours par an avec orage¹ : Pyrénées orientales, Massif central, Nord des Alpes et Jura. En plaine, deux régions dépassent les trente jours d'orage par an : le Sud-Ouest (Landes, vallée de la Garonne et Périgord) et la vallée du Rhône. A l'opposé, les régions les moins touchées

sont les côtes de Bretagne et le Cotentin où le tonnerre se fait entendre moins de dix jours par an. Dans le monde, le "niveau kéraunique" peut être considérablement plus élevé : de l'ordre de 100 en Floride, et même 180 dans certaines régions d'Afrique du Sud ou en Indonésie.

La catastrophe du Princess Irène

En mer, l'orage est un peu moins fréquent. Il n'y a ni échauffement du sol, ni relief pour favoriser l'ascendance

de l'air conduisant à la formation d'une cellule orageuse. Les orages sont tout de même suffisamment fréquents, et surtout assez dangereux, pour être craints des navigateurs. Tous les commandants de pétrolier et les responsables de port ont encore en mémoire la catastrophe du *Princess Irène*. Le 26 août 1972, à Saint-Nazaire, ce pétrolier

* En France ce procédé a été étudié dès avant guerre par Bureau, Doury et Perlât
1. En météorologie, un jour avec orage est un jour où le tonnerre s'est fait entendre. Ce paramètre est appelé "niveau kéraunique".

grec de 200 000 tonnes était foudroyé lors d'une opération de ballastage² et prenait feu instantanément. Six personnes devaient trouver la mort et 25 autres furent blessées. L'incendie fut tel que le pétrolier, irrécupérable, coupé en deux par l'explosion, fut remorqué par morceaux, d'abord l'arrière, puis l'avant, et coulé au large de Saint-Nazaire. Lors du procès, le capitaine fut accusé de n'avoir pas interrompu le ballastage à l'arrivée de l'orage comme l'y obligent les règlements en vigueur. Celui-ci se défendit en prétendant que de sa cabine, avec le bruit régnant à bord, il n'avait pas entendu le tonnerre et que personne ne l'avait prévenu. La station météo de Saint-Nazaire dut apporter la preuve qu'elle avait fait correctement son travail en avertissant à temps les services portuaires.

Le rappel de cet événement dramatique a pour but de montrer l'importance d'une détection efficace des orages. Si, de plus, on veut pouvoir effectuer une prévision par extrapolation du déplacement, la détection doit avoir lieu en temps réel et sur un vaste domaine autour du lieu à protéger.

Les météorologistes disposent de plusieurs moyens pour détecter les orages. Le plus simple, toujours utilisé, est des plus naturels. Il s'agit tout simplement... de l'oreille de l'observateur météorologiste.

En météorologie, on dit qu'il y a orage dès que l'observateur a entendu un coup de tonnerre. Celui-ci doit en tenir compte dans son observation et chiffrer en conséquence la partie temps présent du message Synop sur terre, ou Ship en mer. Le phénomène apparaîtra alors sur les cartes de tous les services météorologiques sous la forme d'un petit symbole (K).

Autre moyen de détection, plus moderne, l'imagerie satellitale. Par définition même du cumulonimbus, ce type de nuage est présent s'il y a de l'orage. Il peut être isolé ou noyé dans une masse de nimbostratus, mais il est quelque part dans les environs. Sa taille étant importante (jusqu'à 50 kilomètres de diamètre) et son som-

met constitué de nuages froids (cirrus), il apparaît généralement nettement sur les images satellite.

Autre outil très prisé des météorologistes, le radar. Le cumulonimbus étant constitué de grosses gouttes d'eau en suspension, voire de grêlons, il donne un excellent écho radar. Sur le sol métropolitain, un réseau de treize radars météorologiques permet de suivre en temps réel le déplacement des zones de pluie et d'en estimer l'intensité.

Enfin l'outil le plus récent, que nous allons décrire plus complètement, est le réseau foudre.

Le réseau "foudre"

Le réseau foudre a commencé à être installé en France en 1987, à l'initiative de la société privée Météorage. Il comprend maintenant dix-huit capteurs, tous propriété de Météo-France. Le réseau est exploité conjointement par la société Météorage et Météo-France. Lors d'un orage, chaque impact de foudre est accompagné de l'émission, dans la bande de fréquence de 1 à 500 kHz, d'une onde électromagnétique qui se propage sur plusieurs centaines de kilomètres.

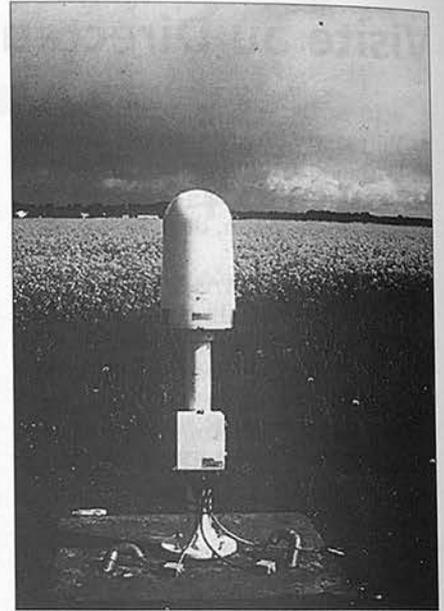
Le principe de localisation repose sur l'utilisation d'un réseau de dix-huit stations de détection équipées d'antennes radiogoniométriques adaptées à cette gamme de fréquences.

Dès qu'une station capte un signal électromagnétique, elle compare sa forme d'onde à une forme modèle caractéristique des éclairs nuages-sol. Elle détermine ensuite la direction de l'éclair, en effectuant le rapport des composantes nord-sud et est-ouest du champ magnétique, et transmet instantanément cette information au Centre opérationnel Météorage par Transpac.

Le Centre opérationnel Météorage dispose de calculateurs qui analysent en temps réel les données de toutes les stations et déterminent la localisation de l'éclair par triangulation. La polarité et l'amplitude de l'impact sont également déterminées.

La précision de localisation est de 2 à 4 kilomètres sur l'ensemble du territoire.

Elle est maximale quand l'impact est au centre d'un triangle formé par trois capteurs. Elle est un peu moins bonne, de l'ordre de 6 kilomètres, sur les côtes de France, la disposition des capteurs (tous à terre) ne pouvant être optimale. Au moins 90 % des éclairs qui se sont produits lors d'un épisode



Capteur Météorage.

Il y a en France 18 capteurs permettant de détecter les impacts de la foudre au sol. Leur hauteur est de 1,5 m. Sous le dôme de protection, une antenne permet de déterminer la direction d'où vient le rayonnement électromagnétique généré par la foudre. Au-dessous, un ordinateur et un module de transmission transmettent les informations par le réseau informatique Transpac au calculateur central de Météorage.

(Photo Météorage)

orageux sont détectés par le système. Cette efficacité de détection ne dépend pas du relief (compte tenu de la gamme de fréquences analysée) et elle est garantie sur la totalité du territoire français, à l'exception de la Corse.

Les services

En s'adressant à un Centre départemental de Météo-France, on peut obtenir une attestation d'orage ou "expertise foudre" établie d'après les données du réseau.

Les informations plus précises ou les services particuliers tels que ceux présentés ci-dessous sont traités soit par le Centre départemental de Météo-France soit par la société Météorage.

- Service d'alerte : ce service disponible sur abonnement permet à l'utilisateur d'être alerté par téléphone, par télécopie ou par Alphapage dès qu'un orage s'approche du site, c'est-à-dire dès qu'un impact de foudre est détecté à l'intérieur d'un périmètre de sécurité (en général de l'ordre de 30 kilomètres).

- Services statistiques : la banque de données Météorage contient les caractéristiques physiques de plus de 7

2. Le ballastage d'un pétrolier consiste à emplir partiellement d'eau de mer les cuves pour assurer la stabilité du navire lors des voyages à vide. Lors de cette opération, un mélange gazeux composé de vapeurs d'hydrocarbure et d'air s'échappe des cuves. Dans le cas du Princes Irène, c'est ce mélange explosif, stagnant sur le pont par absence de vent, qui s'est enflammé lors du foudroiement.

millions d'impacts ce qui permet d'élaborer cartes et expertises, et d'évaluer les risques.

La société Météorage propose également une information en direct par Minitel. Le service 3617 METEORAGE offre, parmi diverses informations, la possibilité de connaître précisément la localisation des impacts au cours des trois dernières heures. Chaque fois qu'un impact de foudre frappe quelque part en France, il apparaît à l'écran moins de 5 secondes après, sous la forme d'un petit carré blanc. Le temps de traitement est si rapide qu'il est possible de voir un éclair au loin, de constater l'affichage de l'impact sur l'écran du Minitel puis d'entendre le grondement du tonnerre. La précision est suffisante pour évaluer si l'orage se dirige droit sur vous, ou alors passe au nord ou au sud de votre commune. L'information issue du réseau foudre est disponible en permanence, dans toutes les stations météorologiques. On peut y voir, quart d'heure par quart d'heure et sur l'ensemble de la France, les impacts de foudre s'afficher sur un écran. C'est cette même séquence d'images qui est présentée par certaines chaînes de télévision lors des épisodes orageux. Météorage n'est plus le seul système permettant de détecter les éclairs. L'Onera (Office national d'études et de recherches aérospace) a développé le système Safir commercialisé par la société Dimensions. A la différence de Météorage, les antennes Safir détectent à la fois les éclairs intra-nuages et les impacts de foudre. Leur direction est déterminée par interférométrie et la localisation est calculée par triangulation. La détection des éclairs intra-nuages (environ trois fois plus nombreux que les impacts de foudre au sol) intéresse particulièrement l'aéronautique. C'est également un atout en matière de prévision immédiate car les éclairs intra-nuages apparaissent quelques minutes ou quelques dizaines de minutes avant les impacts au sol. La couverture du système Safir est actuellement limitée à la région parisienne et à quelques sites particuliers comme le centre aérospatial de Kourou et le Centre d'essai des Landes.

Des travaux de recherche toujours nécessaires

La détection des orages a donc fait de grands progrès depuis l'époque où les météorologistes se contentaient de noter l'apparition du tonnerre. Elle est

la conséquence des recherches entreprises depuis une trentaine d'années. En France, les services météorologiques ne participent pas, ou très peu, aux recherches sur les systèmes de détection ou sur les phénomènes d'électrification de la foudre. Traditionnellement, les météorologistes s'intéressent principalement à la prévision des phénomènes de grande et moyenne échelle, tels que la formation et le déplacement des fronts orageux. Les études d'échelle inférieure (mouvements au sein des cumulonimbus et foudre) sont menées principalement par les milieux aéronautiques et EDF. Ces deux secteurs d'activité sont en effet particulièrement sensibles aux orages. Mais ils ne sont pas les seuls. Le développement des systèmes électroniques et informatiques de contrôle, qu'il s'agisse de la surveillance automatique d'une chaîne de production ou d'une alarme dans une maison particulière, nécessite d'étudier de près les phénomènes de foudroiement et les méthodes de protection. L'électronique est très sensible aux champs électromagnétiques intenses produits par les orages. Le paratonnerre de Benjamin Franklin ne suffit plus, il faut maintenant des protections plus sophistiquées dont le développement passe nécessairement par une recherche de haut niveau.

Éléments bibliographiques

Deux ouvrages récents, remarquables, sont disponibles dans le commerce :

- *Les orages*, Franck Roux, 1991, chez Documents Payot,
- *La foudre, des mythologies antiques à la recherche moderne*, Claude Gary, 1994, chez Masson.

Lire également

• *Électricité atmosphérique et systèmes orageux*, V. Pircher et J.L. Chèze, *La Météorologie*, 8^e série, n° 4, décembre 1993.

Éclairs, foudre, feux de Saint-Elme

On distingue les éclairs inter-nuages, intra-nuages et les éclairs sol-nuages ou foudre.

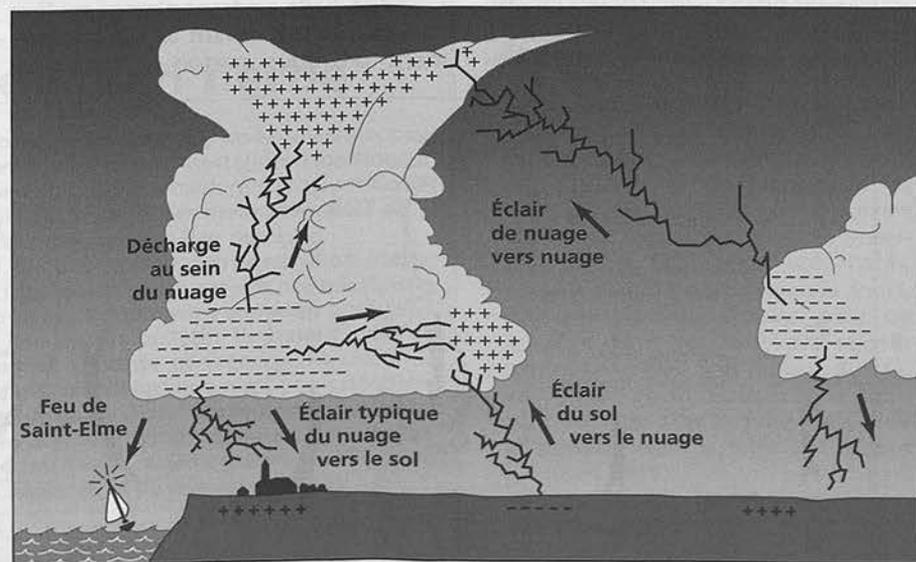
Dans le cas de la foudre, tous les cas de figure sont possibles : éclair descendant (partant du nuage), ascendant (partant du sol), positif (partant d'une zone, nuage ou terre, chargée positivement) ou négatif.

Néanmoins, le cas le plus fréquent, de loin, est l'éclair descendant négatif. L'éclair part de la base du nuage chargée négativement et se dirige vers la terre en se ramifiant.

L'éclair ascendant, positif ou négatif, est beaucoup plus rare. Il part d'une pointe (tour Eiffel, Empire State Building...) ou d'un sommet montagneux relativement isolé (Puy-de-Dôme, mont Cervin...) et se ramifie vers la base du nuage.

Les feux de Saint-Elme sont des petites décharges électriques, accompagnées d'un grésillement caractéristique, ayant pour siège la pointe d'objets métalliques. Ils indiquent la présence d'un champ électrique intense et peuvent ainsi être considérés comme un signe précurseur de l'orage.

Les orages sont associés à des cumulonimbus, nuages générés par des mouvements verticaux de l'atmosphère. Leur hauteur peut atteindre la tropopause, limite supérieure de la troposphère. La hauteur de la tropopause est comprise entre 7 kilomètres au pôle et 17 kilomètres à l'équateur. Aux latitudes tempérées, son épaisseur varie de 9 à 14 kilomètres selon qu'il s'agit d'une masse d'air polaire ou d'air tropical.



Dans le cas le plus simple – mais pas le plus fréquent car il est nécessaire que le vent soit constant sur toute la hauteur –, le cumulonimbus est formé d'une seule cellule convective (cellule convective : ensemble formé d'un courant ascendant et d'un courant descendant).

La durée de vie d'une cellule convective orageuse isolée est de l'ordre de 20 à 30 minutes. Le cycle peut être schématisé en cinq phases :

A. Phase de déclenchement

Tout débute par un courant ascendant. Celui-ci naît de l'effet du relief sur le vent, d'une bulle d'air plus chaude que son environnement due à un échauffement différent selon la nature du sol ou, tout simplement, (seule cause possible en mer) de la turbulence dans la masse d'air.

L'ascendance provoque le refroidissement de l'air et, à partir d'une certaine altitude fonction de la température et de l'humidité, la vapeur d'eau se condense. C'est la base du nuage.

Le dégagement de chaleur dû à la condensation augmente la flottabilité au sein du courant ascendant et renforce celui-ci dans le nuage en formation. Suite aux processus microphysiques internes, des précipitations commencent à se former dans le nuage. Une séparation des charges électriques s'effectue en créant un dipôle constitué d'une charge négative à la base du nuage et d'une charge positive sous le sommet (5 à 7 kilomètres). Au sol des charges positives s'accumulent. Le champ électrique augmente, notamment à proximité des pointes. A l'issue de cette phase, le nuage est au stade de cumulus congestus.

B. Phase d'intensification

Les courants ascendants s'intensifient. Les précipitations au sein du nuage deviennent significatives. C'est le début de la phase active de l'orage avec l'apparition du premier éclair intra-nuage. Le sommet du nuage a atteint une altitude où la température est inférieure à - 20 °C. Les gouttelettes d'eau devien-

nent particules de glace. Le sommet du nuage est moins net. De cumulus congestus, il passe au stade de cumulonimbus calvus.

C. Phase de maturité

L'activité électrique intra-nuage est maximale. Des éclairs nuage-sol commencent à se déclencher, induisant de très fortes variations du champ électrique au sol.

La condensation a donné naissance à des gouttes de pluie, grêlons ou flocons de neige, suffisamment gros pour que leur vitesse de chute soit supérieure à celle du courant ascendant qui peut dépasser 15 m/s. Des précipitations atteignent le sol sous forme d'averse de pluie, de neige ou de grêle.

Le nuage est au stade de cumulonimbus calvus ou de cumulonimbus capillatus (les cirrus formant la tête du nuage s'étalent sous la tropopause, donnant au nuage, vu de loin, l'aspect caractéristique d'une enclume. Cet étalement de la tête vient de ce que la structure thermique de l'atmosphère, à cette altitude, bloque tout mouvement vertical, comme un couvercle).

D. Phase d'effondrement

L'activité électrique intra-nuages faiblit mais l'activité nuage-sol est maximale.

Au cours de leur chute, lorsqu'elles sortent du nuage, les précipitations se trouvent en atmosphère non saturée en humidité. Une partie des gouttes d'eau, grêlons et flocons, s'évapore, refroidissant l'air environnant. De même que la condensation dans le nuage a favorisé le mouvement ascendant, l'évaporation hors du nuage favorise le mouvement descendant. Ce dernier vient contrarier le mouvement ascendant qui perd de son intensité. Le courant descendant s'étale au sol générant parfois un front d'orage avec rafales et variation brutale de la pression, de la température et de l'humidité. A l'image d'un front froid de grande échelle, un front d'orage soulève l'air plus chaud devant lui. Ce soulèvement provoque parfois la formation

d'un rouleau nuageux horizontal, sombre et menaçant, attaché ou non au cumulonimbus, appelé arcus.

Le courant descendant est généralement accompagné de fortes précipitations, mais il arrive aussi que ces dernières s'évaporent totalement avant d'arriver au sol, donnant naissance à des virga, sortes d'appendices nuageux sous le cumulonimbus.

E. Phase de dissipation

L'activité électrique intra-nuage et nuage-sol faiblit jusqu'à disparaître. Le courant ascendant a disparu. Le courant descendant s'est étendu à l'ensemble du nuage en perdant de son intensité. Les précipitations deviennent modérées à faibles avant de disparaître. Puis le nuage se désagrège. La tête donne naissance à des bancs de cirrus épais (cirrus spissatus cumulonimbogenitus) et la partie principale donne naissance à des bancs d'alto-cumulus et de stratocumulus.

Il s'agit là du cas le plus simple. Bien souvent le vent varie avec l'altitude. Cela conduit à séparer nettement courant ascendant et courant descendant qui peuvent coexister durablement. Les cellules convectives ainsi formées sont stables et leur durée de vie peut dépasser une heure.

Les cumulonimbus sont formés le plus souvent de plusieurs cellules convectives à différents stades de maturité. L'une se forme à l'avant alors qu'une autre disparaît à l'arrière. Le cumulonimbus progresse ainsi sans suivre obligatoirement la direction du vent moyen sur la hauteur. La durée de vie d'un cumulonimbus atteint alors plusieurs heures. Les cumulonimbus peuvent aussi être associés à un front froid, une ligne de grains, dont la durée de vie atteint un ou plusieurs jours.

◆ Avec la collaboration de **Michel Cadiou**, Météo-France/Toulouse, et de la Société **Météorage**. Dessins d'**Yves Sabourin**, Marine nationale

