

De l'orage dans l'air

par **Serge CHAUZY**

Université de Toulouse - Laboratoire d'aérodynamique

CNRS - UMR 5560

chas@aero.obs-mip.fr

RÉSUMÉ

Chaque système orageux fonctionne comme une énorme machine mécanique et électrique. Les principaux mécanismes d'électrification des nuages sont essentiellement la conséquence de chocs entre gouttes, gouttelettes et surtout particules glacées qui constituent les cellules orageuses. Éclairs intra-nuage et nuage-sol constituent l'essentiel de l'activité électrique des orages. Néanmoins, de nouveaux types de décharges ont été récemment découverts : les « Sprites », « Elves » ou « Jets » qui se produisent au-dessus des orages.

Les événements violents qui affectent notre atmosphère sont la manifestation d'une dissipation brutale de l'énergie reçue par les enveloppes fluides de la planète, atmosphère et océan, une énergie essentiellement issue du rayonnement solaire qui représente le carburant de leur fonctionnement. Ces événements constituent autant de soupapes de sécurité permettant d'évacuer le trop-plein d'une énergie stockée sous les formes les plus diverses.

Une perturbation atmosphérique est qualifiée d'orage lorsqu'elle est accompagnée de manifestations de nature électrique. Ainsi, un orage naît lorsque la formation d'un nuage aboutit à son électrification jusqu'à ce que se produisent des décharges électriques détectables par leurs manifestations lumineuses (éclairs) et sonores (tonnerre). Le nuage d'orage typique est le cumulonimbus, dont l'extension verticale atteint presque toujours et souvent dépasse l'altitude de la tropopause, cette limite supérieure de l'atmosphère météorologique, ou troposphère. Cette altitude varie entre huit kilomètres aux pôles et quinze ou seize kilomètres à l'équateur. Le « carburant » qui alimente la formation d'un tel phénomène est essentiellement l'air chaud et humide, alors que le mécanisme qui donne naissance au nuage générateur d'orage n'est autre que la convection provoquée par l'ascension de l'air atmosphérique.

Cette ascension peut être le résultat de l'instabilité des particules d'air humide situées au niveau du sol chauffé par le rayonnement solaire. Il s'agit alors d'orages « intra-masse » qui se développent au sein d'une masse d'air à peu près homogène. C'est le cas des orages qui se forment l'été en milieu ou en fin d'après-midi (cf. figure 1, page ci-après). L'ascension en question peut également être le résultat de l'arrivée d'un front froid qui force l'air chaud et humide du secteur chaud à s'élever le long de la surface

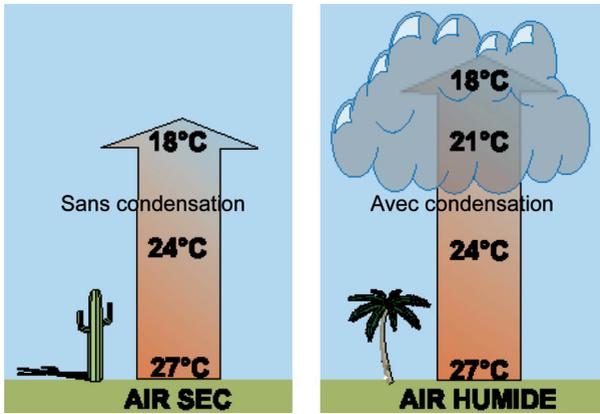


Figure 1 : Lorsque l’air ascendant est humide, la condensation de la vapeur d’eau provoque la formation d’un nuage et libère la chaleur latente qui tempère le refroidissement vertical des particules d’air qui s’élèvent.

frontale. On parle alors d’orage frontal (cf. figure 2). Les orages orographiques naissent, quant à eux, de l’ascension forcée des particules d’air provoquée par l’arrivée d’un flux d’air sur le flanc amont d’une montagne. Dans tous les cas, la condensation de la vapeur d’eau des particules d’air qui atteignent leur niveau de condensation produit une libération de chaleur latente. Cet apport de chaleur fournit au nuage un supplément d’énergie qui lui permet de poursuivre son ascension. Il modère en outre le refroidissement de l’air ascendant qui devient alors plus chaud que l’air environnant, augmentant ainsi sa « flotabilité ».

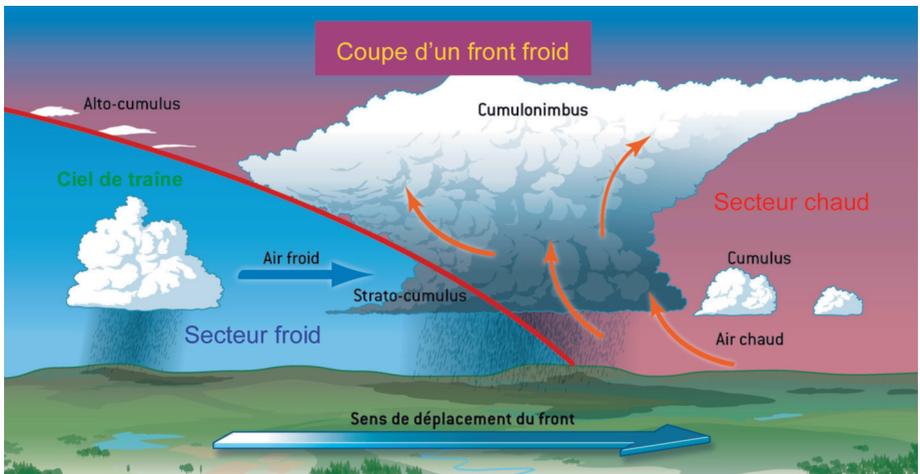


Figure 2 : Formation des orages le long de la surface d’un front froid.
(Copyright Météo-France)

ÉVOLUTION D'UN ORAGE

La structure dynamique d'un orage accompagne sa durée de vie et définit son type. L'élément de base de cet événement météorologique est la cellule orageuse dont l'évolution temporelle est en général caractérisée par la succession de trois phases (cf. figure 3) :

- ◆ *La phase de croissance* : elle correspond à la naissance et au développement vertical du nuage à partir de l'ascendance génératrice.
- ◆ *La phase mature* : le nuage a atteint son extension verticale maximale ; le sommet s'étale et un courant descendant s'établit accompagnant la précipitation.
- ◆ *La phase de dissipation* : les descendances occupent l'ensemble de la cellule orageuse qui génère une pluie de plus faible intensité jusqu'à sa disparition.

La durée de ces phases dépend du type d'orage et du milieu dans lequel il se développe.

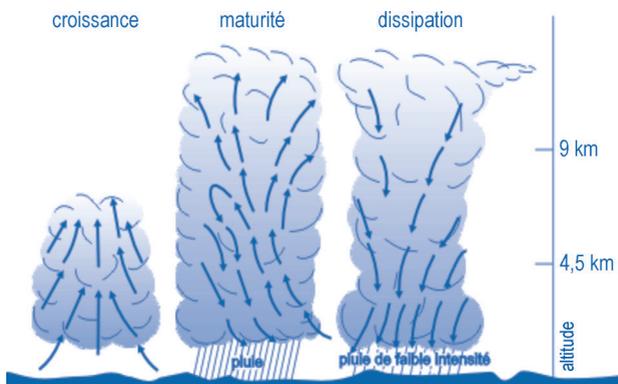


Figure 3 : Les trois phases du développement d'une cellule orageuse : croissance, maturité et dissipation.

DIFFÉRENTS TYPES D'ORAGE

L'orage unicellulaire, comme son nom l'indique, est constitué d'une seule cellule qui évolue selon la chronologie indiquée plus haut (cf. figure 4). Un tel orage peut être très localisé et de courte durée (moins d'une heure). Si l'énergie disponible (instabilité de l'atmosphère environnante) est particu-

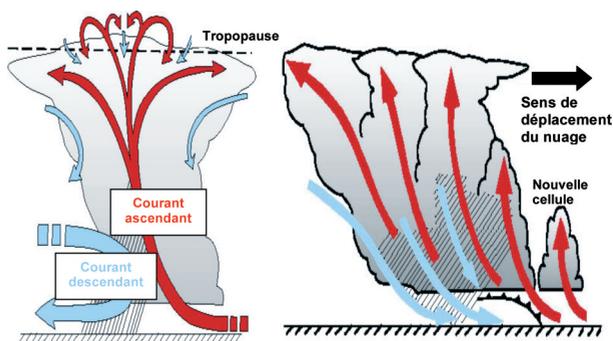


Figure 4 : Orage unicellulaire et orage multicellulaire.

lièrement élevée, l'orage peut devenir supercellulaire. La durée de vie, l'intensité des ascendances et des précipitations s'en trouvent alors considérablement renforcées. Cette catégorie, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs heures est susceptible de provoquer de gros dégâts, en particulier dans le cas d'un orage stationnaire.

L'orage multicellulaire est constitué d'une succession de cellules élémentaires situées à des stades différents de leur cycle de vie (*cf.* figure 4). Des cellules « neuves » naissent alors sous le vent des cellules plus matures. Ces systèmes possèdent des durées de vie considérablement plus longues et balayent des régions très étendues. Ils s'organisent parfois selon une structuration plus complexe et plus vaste encore, les « systèmes convectifs à mésoéchelle » ou MCS (« mesoscale convective systems » en anglais).

Lorsque les cellules orageuses s'organisent en ligne, elles forment ce qu'on appelle une ligne de grains qui couvre des distances très vastes (plusieurs centaines de kilomètres) sur des durées qui peuvent atteindre quelques jours. C'est le cas dans les grandes plaines américaines et surtout en Afrique où ces systèmes se régénèrent au cours de leur traversée du continent d'est en ouest



Figure 5 : Ligne de grains africaine (Khorogo, Côte d'Ivoire, 20 juin 1981 - Expérience COPT 81).

(*cf.* figure 5). Le plus souvent, ces lignes de grains ne s'atténuent qu'à leur arrivée sur l'océan Atlantique. Il n'est d'ailleurs pas exclu que ces perturbations intenses se régénèrent ensuite et soient à l'origine de certaines tempêtes tropicales qui deviennent les cyclones affectant les côtes est du continent américain.

L'ÉLECTRICITÉ DES ORAGES

Les orages se forment dans un environnement atmosphérique qui possède déjà des caractéristiques électrostatiques qu'il est nécessaire de préciser. L'ensemble Terre-atmosphère-ionosphère possède la structure d'un condensateur sphérique dont les armatures – la Terre et l'ionosphère (ou électrosphère) – enserrent le diélectrique constitué par l'atmosphère. Néanmoins, la charge électrique de ce condensateur possède une répartition particulière, puisque la charge négative est portée par l'armature interne – la Terre – et la charge positive par le diélectrique – l'atmosphère – alors que l'armature externe – l'ionosphère – est globalement neutre (*cf.* figure 6, page ci-contre). En effet, l'ionosphère est un milieu raréfié rendu conducteur du fait de l'ionisation des molécules d'air par les

rayonnements cosmiques et solaires, et dont la neutralité électrostatique est assurée par un équilibre approximatif entre les deux polarités d'ions. La Terre porte ainsi une charge négative de 550 000 Coulombs environ (charge essentiellement répartie à sa surface), alors que l'atmosphère abrite une charge d'espace globalement positive de même intensité et constituée d'ions des deux signes, mais majoritairement positifs. La densité volumique de la charge atmosphérique est maximale près du sol. En conséquence, il existe en permanence entre la Terre et l'ionosphère (ou électrosphère) une différence de potentiel estimée à environ 300 000 volts (cf. figure 7).

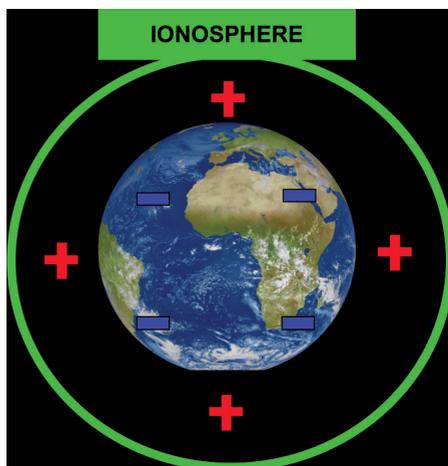


Figure 6 : Schéma de répartition de la charge électrique du système Terre-atmosphère-ionosphère.

Le circuit électrique global (cf. figure 7)

Cette distribution de charge produit donc dans tout l'espace atmosphérique non perturbé par les orages un champ électrique moyen négatif (dirigé vers le centre de la Terre), appelé champ de beau temps, dont l'intensité est maximale au niveau du sol (de 100 à 120 V/m) et qui décroît régulièrement avec l'altitude jusqu'à devenir très faible au voisinage de l'ionosphère. Du fait de sa polarité, ce champ électrique agit sur les ions atmosphériques dans le sens d'une neutralisation progressive de la charge négative terrestre. Ce courant électrique de beau temps est estimé à environ $2,7 \times 10^{-12} \text{ A m}^{-2}$. Si la charge de la Terre reste à peu près constante au cours du temps, c'est qu'il existe un mécanisme lui permettant de se maintenir. Ce mécanisme n'est autre que la perturbation électrique générée par les orages qui jouent ainsi le rôle de « chargeur de la Terre ». En effet, ils produisent dans leur environnement un champ électrique

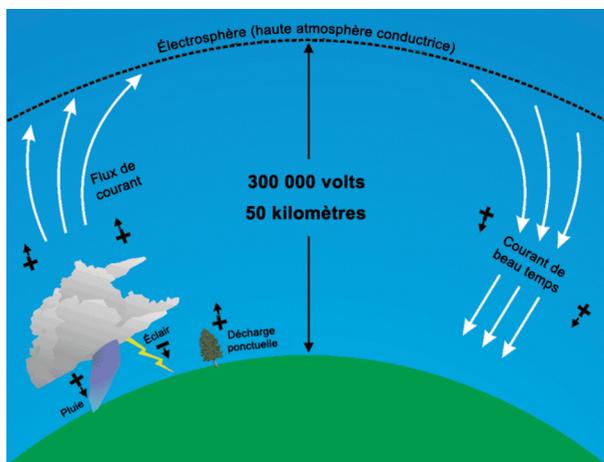
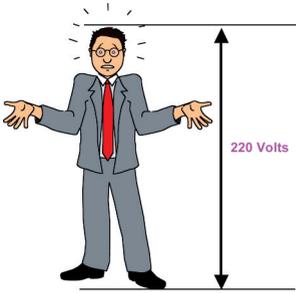


Figure 7 : Schéma simplifié du circuit électrique global.

qui agit sur les ions atmosphériques dans le sens d'une neutralisation progressive de la charge négative terrestre. Ce courant électrique de beau temps est estimé à environ $2,7 \times 10^{-12} \text{ A m}^{-2}$. Si la charge de la Terre reste à peu près constante au cours du temps, c'est qu'il existe un mécanisme lui permettant de se maintenir. Ce mécanisme n'est autre que la perturbation électrique générée par les orages qui jouent ainsi le rôle de « chargeur de la Terre ». En effet, ils produisent dans leur environnement un champ électrique

inversé par rapport au champ de beau temps. Ce champ perturbé produit un courant électrique qui apporte à la Terre les charges négatives que tend à neutraliser le courant de beau temps. Il s'établit ainsi un circuit électrique fermé entre la Terre et l'ionosphère qu'on appelle le circuit électrique global.

Un paradoxe explicable



La permanence d'un champ électrique de beau temps de 120 V/m environ au niveau du sol entraîne l'existence, entre la tête et les pieds d'une personne debout sur le sol, d'une différence de potentiel permanente de l'ordre de 220 volts ! Néanmoins, le générateur de cette différence de potentiel, l'air très faiblement conducteur, possède une résistance interne très élevée et n'est pas en mesure de fournir un courant électrique suffisant pour perturber la personne en question. Aucun effet électrique de beau temps ne peut donc nous affecter.

Les mécanismes d'électrisation des orages

L'apparition de charges électriques dans les nuages orageux a fait l'objet de recherches intenses et variées tout au long du xx^e siècle. Diverses théories ont été élaborées afin de rendre compte des observations. Alors que de nombreux mécanismes physiques peuvent expliquer une certaine électrisation du milieu nuageux, il ne subsiste de nos jours qu'un nombre limité de processus susceptibles de rendre compte de la réalité observée dans son ensemble. Nous nous limiterons ici aux trois mécanismes généralement admis par les chercheurs et d'une certaine manière complémentaires. Ceux qui impliquent les interactions microphysiques entre hydrométéores électrisent le nuage par séparation de charge électrique de polarité opposée à partir d'un milieu initialement neutre.

La glace, maître du jeu

Les phénomènes électriques orageux n'apparaissent de manière significative que dans la mesure où l'extension verticale du nuage permet l'existence de la phase glace (stade cumulus congestus et bien évidemment cumulonimbus). Le mécanisme de base de l'électrisation, dont l'efficacité a été vérifiée en laboratoire, est en fait lié aux collisions avec rebondissement entre particules glacées. Dès que ces particules possèdent des caractéristiques différentes, les chocs entre elles séparent une certaine quantité de charges électriques. Les différences de température et de taille jouent un rôle majeur. Ainsi, les collisions entre « graupels » (particules de neige roulée possédant des vitesses de chute de l'ordre du mètre par seconde) et cristaux de glace (en quasi-suspension dans l'air nuageux) s'avèrent les plus efficaces en terme de séparation de charge électrique. Les graupels provenant des régions supérieures sont plus froids que les cristaux qu'ils « bousculent » au cours de leur chute. En outre, la polarité et la quantité de charges séparées par chaque

collision dépendent de la température ambiante T à laquelle elle se produit (cf. figure 8). Lorsque la température est très basse (dans la partie haute du nuage), le graupel acquiert une charge négative, et le cristal une charge positive. L'inverse se produit à température plus élevée (dans la partie basse du nuage). Il existe ainsi une température critique T_c (dite « température d'inversion de polarité ») qui sépare les deux domaines d'acquisition de charge par chaque particule. Il a été établi que la valeur de T_c dépend de plusieurs paramètres, et surtout de la quantité d'eau liquide surfondue (c'est-à-dire à température négative) présente sous forme de gouttelettes dans la zone où se produisent les collisions et qui favorise le givrage des particules. Un tel mécanisme, qualifié de « non-inductif » par les spécialistes, explique l'essentiel des observations menées au sein des cellules orageuses. Néanmoins, d'autres processus sont susceptibles de prendre le relais et de compléter l'électrification du nuage.

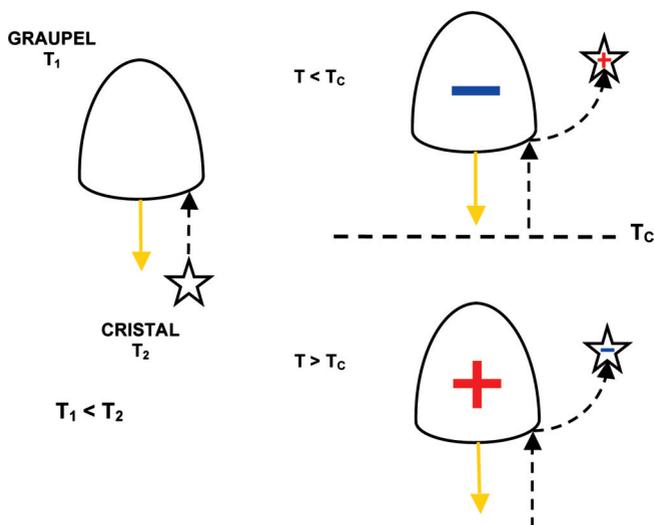


Figure 8 : Schéma microphysique d'électrification en phase glace par le mécanisme dit « non-inductif ».

Le mécanisme des chocs inductifs

Lorsque le milieu nuageux est électrisé, il y règne un certain champ électrique E qui « polarise » les hydrométéores. La figure 9 (cf. page ci-après) illustre l'apparition à la surface des hydrométéores conducteurs des charges électrostatiques induites par le champ ambiant. Lorsqu'une collision suivie d'un rebond se produit entre deux hydrométéores de tailles et donc de vitesses de chute différentes, un échange de charges a lieu et aboutit à une séparation. Lorsque le champ possède la direction et le sens indiqués (ce qui représente la situation au centre du nuage d'orage), l'hydrométéore le plus gros se charge négativement, le plus léger positivement. Ce mécanisme conduit au renforcement du dipôle

électrostatique qui créé le champ ambiant. Ce mécanisme n'est efficace que dans la mesure où ce champ électrique ambiant, générateur du phénomène d'induction électrostatique, possède une amplitude suffisante. Il est donc évident qu'il ne peut pas constituer le mécanisme initiateur de l'électrification du nuage. Par contre, il contribue vraisemblablement au renforcement du champ ambiant dès que le processus non-inductif lié à la phase glace lui a conféré une amplitude suffisante.

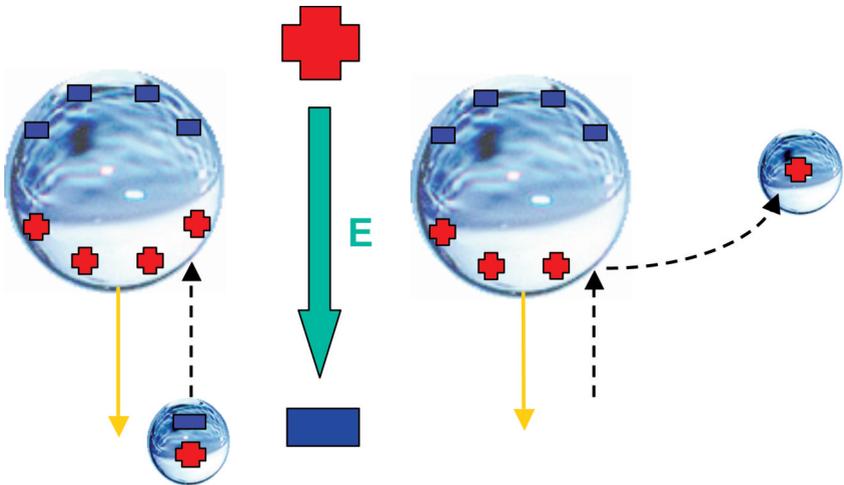


Figure 9 : Schéma microphysique d'électrification par le mécanisme des chocs inductifs.

La théorie de l'électrification convective

Imaginée par Gaston GRENET, en 1947, prolongée par Bernard VONNEGUT, en 1953, cette théorie explique l'électrification des nuages par une interaction entre les ions présents dans l'environnement du nuage et la dynamique des courants ascendants et descendants associés (cf. figure 10). Les ions positifs, majoritaires dans les basses couches atmosphériques, sont transportés dans le nuage cumuliforme par les courants ascendants qui lui donnent naissance. Ils finissent par se fixer sur les

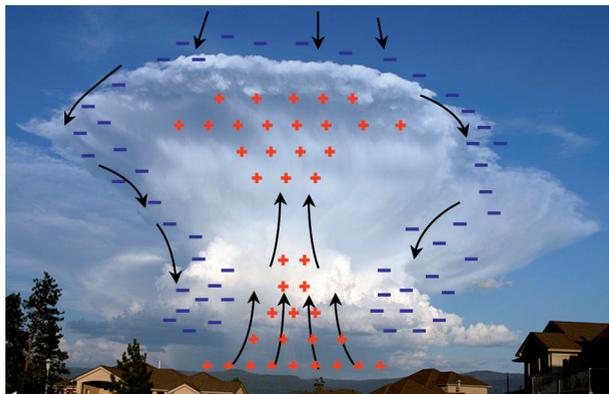


Figure 10 : Schéma d'électrification convective des nuages d'orage. (Earle WILLIAMS : http://metamiga.free.fr/Meteo_applique/Electrification/electrification.htm)

hydrométéores et par s'accumuler au sommet de ces ascendances, c'est-à-dire dans la région supérieure de la cellule orageuse. Le développement de ces zones positives agit sur la population ionique présente au-dessus du sommet du nuage, provoquant l'attraction des ions négatifs et la répulsion des ions positifs. Les ions négatifs qui pénètrent le nuage se fixent rapidement sur les hydrométéores et suivent les courants descendants jusque dans les zones inférieures du nuage. Ainsi prend naissance une structure électrique globalement dipolaire de chaque cellule.

L'efficacité de ce mécanisme s'avère d'autant plus grande que la densité volumique de charge positive au niveau du sol est élevée. Or, lorsque le champ électrique positif (dirigé vers le haut) créé au sol par le nuage d'orage devient suffisamment intense, il entraîne l'ionisation de l'air au voisinage des pointes par « effet Corona », ce qui libère une quantité importante d'ions positifs. Ces ions forment une couche de charge d'espace qui s'avère donc susceptible d'alimenter l'ascendance de la charge positive invoquée par cette théorie. Une estimation quantitative de la charge que peut acquérir le nuage par ce mécanisme tend à prouver, d'une part, qu'il ne peut à lui seul expliquer l'électrification du nuage, d'autre part, qu'il n'est pas en mesure de produire son électrification initiale. Il constitue néanmoins un bon candidat à la formation d'une poche de charge positive souvent observée à la base du nuage.

Le tripôle électrique

L'observation et l'analyse des phénomènes d'électrification aboutissent à l'établissement d'un schéma électrostatique moyen du cumulonimbus qui adopte la structure d'un tripôle électrique (*cf.* figure 11). La partie centrale négative (souvent située autour de

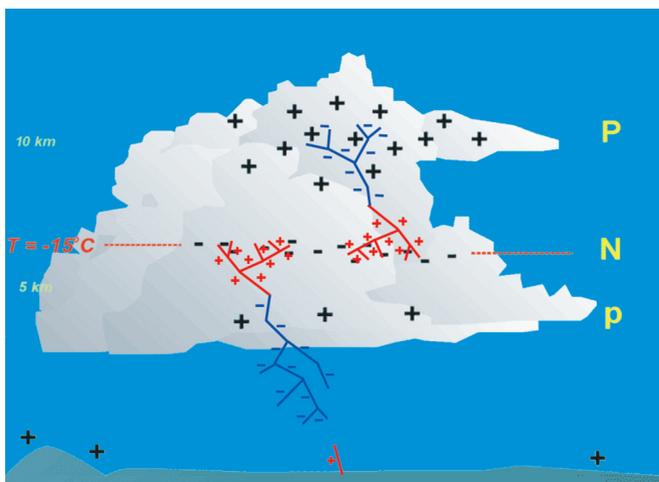


Figure 11 : Schéma de la structure électrostatique tripolaire moyenne d'un cumulonimbus générateur d'orage et déclenchement des décharges intra-nuage et nuage-sol. *P* représente la zone positive principale, *N* la zone négative principale et *p* la zone positive secondaire située à la base du nuage.

l'isotherme $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ s'avère comprise entre deux régions chargées positivement : une grande zone supérieure qui occupe tout le sommet (et notamment l'enclume) et une région située à la base, caractérisée par une faible extension et une accumulation plus réduite de charge. La présence de ce troisième pôle n'est en outre pas systématique.

Même si ce schéma est le plus répandu, on observe parfois des structures dipolaires ou tripolaires inversées qu'il n'est pas facile d'expliquer. En outre, dès que des décharges électriques (éclairs) se produisent entre les différentes zones d'accumulation de charge, la structure se modifie dans le sens d'une multiplication des régions chargées qui apparaissent le plus souvent comme une stratification électrique complexe de l'ensemble du nuage.

La région nuageuse chargée négativement induit, à la surface du sol qui lui fait face, l'apparition d'une densité surfacique de charge positive, inversant en cela le sens du champ électrique de surface qui devient ainsi positif.

Les éclairs

Les mécanismes d'électrification agissent en permanence dans le sens d'un accroissement de la charge électrique séparée au sein du nuage d'orage. Le champ électrique qui y prend naissance augmente donc jusqu'à ce que la contrainte électrostatique sur le milieu soit si forte que certaines zones du nuage s'ionisent et initient des décharges électriques, autrement dit des éclairs, qui se propagent dans l'air en formant des canaux conducteurs. Ces décharges sont en général classées en deux catégories, les éclairs intra-

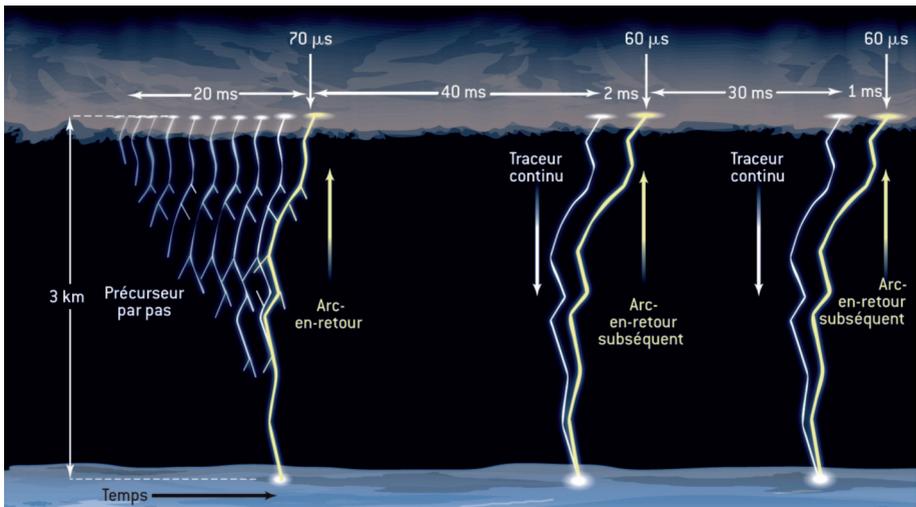


Figure 12 : Schéma du déroulement d'un éclair nuage-sol négatif à précurseur descendant. Le temps s'écoule de la gauche vers la droite.

(Niels JONASSEN, mr.static@scientist.com)

nuages et les éclairs nuage-sol. Les éclairs intra-nuage, qui apparaissent chronologiquement les premiers, se produisent entre deux régions nuageuses possédant des polarités opposées. Ils représentent en moyenne de 70 à 80 % de l'activité électrique des orages. Lorsque l'orage atteint sa phase mature, des éclairs nuage-sol se produisent à leur tour, entre une région nuageuse chargée et le sol.

Tous les éclairs qui naissent dans le nuage démarrent d'une région de champ électrique maximum par une phase bidirectionnelle appelée précurseur (ou traceur, ou leader). Cette phase consiste en une double décharge faiblement lumineuse dont la branche positive se propage vers une région chargée négativement et la branche négative vers une région chargée positivement (cf. figure 11). La recherche du chemin le plus conducteur entraîne la ramification des deux branches.

Lorsque la décharge est un éclair intra-nuage, les deux branches du précurseur relient entre elles deux régions nuageuses de charge opposée. Le canal conducteur ainsi formé joue le rôle de court-circuit et donne naissance à la deuxième phase de l'éclair appelée « recoil streamer ». Ce canal est alors parcouru par un courant électrique intense qui tend à neutraliser une partie des poches de charge qu'il connecte. Certains de ces éclairs, appelés « spider flashes » (ou éclairs araignée) parcourent des distances horizontales qui peuvent dépasser la centaine de kilomètres au sein des systèmes orageux étendus.

Lorsque l'une des branches du précurseur s'approche du sol, elle transporte avec elle le potentiel du nuage, ce qui a pour effet d'accroître le champ électrique qui règne au-dessus du sol. Le plus souvent, une décharge dite de connexion démarre alors d'un objet saillant du sol (arbre, bâtiment élevé, tour, pylône...) et se propage en direction de la branche descendante du précurseur nuageux. Lorsque celle-ci rencontre le précurseur descendant, elle ferme en quelque sorte le circuit électrique entre le nuage et le sol. La deuxième phase de l'éclair se produit alors sous la forme d'un arc-en-retour, onde de courant très intense qui parcourt le canal conducteur depuis le sol jusqu'à la poche de charge à l'origine de l'éclair.

La foudre

L'usage courant veut que la décharge nuage-sol soit baptisée « foudre ». On voit donc que la foudre correspond à un aller-retour de l'énergie électrique entre le nuage et le sol. Il existe néanmoins certains éclairs qui démarrent à partir d'un point saillant du sol, comme une tour, un bâtiment élevé, ou un pic montagneux. Le précurseur ascendant ainsi formé rejoint alors une poche de charge nuageuse. En général, un deuxième précurseur descendant suit alors le canal conducteur ainsi formé et vient déclencher un arc-en-retour ascendant. La direction des ramifications renseigne sur le sens de propagation du précurseur initial. Elles sont dirigées vers le bas lorsque ce précurseur est descendant, vers le haut lorsqu'il est ascendant (cf. figure 13, page ci-après)

Les diverses catégories d'éclairs nuage-sol sont dénommées selon la polarité de la zone de charge nuageuse qui lui a donné naissance et selon la direction du précurseur



Figure 13 : Éclairs nuage sol descendants (à gauche, photo National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)) et ascendants (à droite, photo BERGER et ORVILLE).

Le sens de propagation du précurseur est indiqué par la direction des ramifications.

initial. Un éclair nuage-sol peut donc être positif ou négatif, descendant ou ascendant. Étant donné la structure électrique nuageuse la plus couramment observée (le pôle négatif étant le pôle inférieur majeur), les éclairs nuage-sol les plus fréquents sont négatifs et descendants. Ils représentent plus de 90 % des décharges nuage-sol, alors que les quelques 10 % d'éclairs positifs se produisent le plus souvent en fin d'orage ou lors d'orages particulièrement violents.

La figure 12 schématise le déroulement en fonction du temps d'un éclair négatif descendant dans l'espace entre la base du nuage et le sol. La première étape visible, qui dure en moyenne 20 millisecondes, correspond à la descente du précurseur négatif qui progresse vers le sol par bonds successifs d'une cinquantaine de mètres en moyenne. Cette discontinuité de la propagation est une caractéristique spécifique du précurseur négatif qui parcourt le canal à la vitesse moyenne de l'ordre de 10^5 mètre par seconde. Lorsque la jonction avec la décharge ascendante positive de connexion s'est produite, la phase ascendante d'arc-en-retour, qui dure environ 70 microsecondes, conduit à la neutralisation d'une partie de la charge nuageuse par le courant positif de l'arc qui se propage à la vitesse moyenne de 10^7 à 10^8 mètres par seconde et dont l'intensité peut atteindre plusieurs centaines de milliers d'ampères. L'éclair peut alors s'arrêter. Néanmoins, s'il reste suffisamment de charge nuageuse, quelques dizaines de millisecondes plus tard un nouveau précurseur (appelé « dart leader » en anglais) se propage vers le sol, de manière continue cette fois et en empruntant le même canal. Il donne naissance à un nouvel arc-en-retour ascendant, qualifié de « subséquent ». Ce processus de va-et-vient peut se répéter plusieurs dizaines de fois donnant ainsi l'impression visuelle d'un clignotement lumineux. Cette propriété particulière des éclairs nuage-sol est appelée la multiplicité.

Le tonnerre

L'énorme intensité du courant que véhicule l'arc-en-retour a pour effet de chauffer, par effet Joules, le canal de l'éclair dont le diamètre est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. La température locale peut y atteindre jusqu'à 30 000 °C. L'air du canal subit alors une dilatation brutale qui engendre une onde de choc. Cette onde se résout finalement en onde sonore qui se propage autour du canal à la vitesse moyenne de 330 mètres par seconde. Il est ainsi possible d'estimer la distance qui sépare l'observateur de l'impact de l'éclair. Comme la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s) est très grande devant la vitesse du son, le retard du tonnerre par rapport à l'éclair correspond à peu près à la durée de propagation du son. Il suffit donc de diviser par trois le nombre de secondes qui séparent l'observation de l'éclair du début du roulement du tonnerre pour obtenir la distance en kilomètre à laquelle l'éclair a frappé. Le roulement du tonnerre est dû à la fois à l'extension considérable du canal qui peut atteindre une centaine de kilomètres et aux multiples réflexions du son sur le sol ou les parois montagneuses.

Elfes et farfadets

Une catégorie encore mystérieuse de décharges électriques produites par les orages fait actuellement l'objet de recherches approfondies. Il s'agit de phénomènes lumineux officiellement découverts à la fin des années 1980 au cours de vols de navette spatiale, mais dont il existe des observations antérieures rapportées par des pilotes d'avion. Ces « événements lumineux transitoires » (« Transient luminous events », ou TLE's, en anglais) se produisent essentiellement dans la stratosphère et la mésosphère entre le sommet des orages et l'ionosphère. On dénombre à ce jour trois types de phénomènes (cf. figure 14) : les « red sprites » (ou farfadets rouges), décharges rouges étirées verticalement qui apparaissent principalement groupées dans la mésosphère et qui couvrent des distances verti-

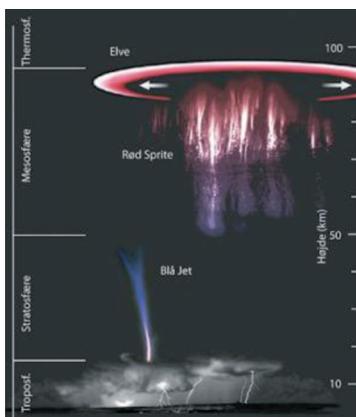


Figure 14 : Représentation des trois types d'événements lumineux transitoires.
(Danish National Space Center)

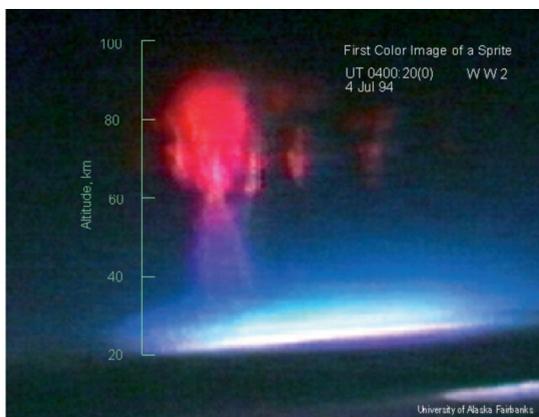


Figure 15 : Première photographie couleurs d'un sprite prise le 4 juillet 1994.
(Université d'Alaska edu web page)

cales et horizontales de l'ordre de 50 km ; les « blue jets » (ou jets bleus), sorte de jets rectilignes bleutés qui s'échappent du sommet du nuage d'orage à une vitesse approximative de 100 km/s ; les « elves », formés d'un anneau rougeâtre en expansion au fur et à mesure où il s'élève, souvent couplés aux sprites.

Les propriétés de ces objets fascinants ne sont pas encore bien connues, mais les premières études qui sont actuellement menées montrent que les sprites semblent le plus souvent être déclenchés par des éclairs nuage-sol positifs particulièrement intenses produits par des orages violents. Les observations se multiplient dans le monde, aussi bien depuis le sol que depuis l'espace (cf. figure 15, page précédente) et les mystères de ces étranges phénomènes devraient rapidement se dissiper.

Une climatologie des éclairs

Un éclair, constitué d'un canal conducteur parcouru par un courant électrique impulsionnel, se comporte un peu comme une grande antenne d'émission. Le rayonnement électromagnétique ainsi généré couvre un domaine très large de fréquences et de longueurs d'onde, depuis les fréquences radioélectriques jusqu'aux longueurs d'onde optiques. Ces caractéristiques ont permis de concevoir et de mettre en œuvre divers systèmes de détection de l'activité d'éclairs, certains détectant l'ensemble des éclairs (intra-nuage et nuage-sol), d'autres se limitant à l'activité nuage-sol. Outre les réseaux de détection basés au sol qui établissent la répartition spatiale et temporelle de l'activité électrique des orages à l'échelle d'un pays, la détection spatiale constitue un outil privilégié autorisant l'établissement d'une climatologie globale des éclairs. Deux systèmes, conçus et gérés par la NASA (National aeronautics and space administration, USA) et basés sur une détection optique de l'activité totale (intra-nuage et nuage-sol) ont équipé deux satellites à défilement : OTD (Optical transient detection) et LIS (Lightning imaging sensor). La figure 16

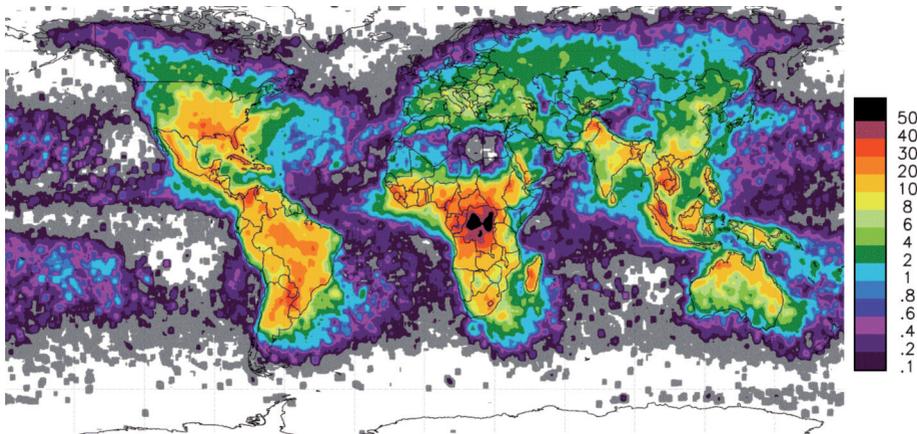


Figure 16 : Distribution globale de l'activité d'éclairs (exprimée en nombre d'éclairs par km² et par an) détectée par le capteur optique OTD de la NASA pendant la période 1995-2000.

représente la synthèse des détections opérées par OTD pendant la période 1995-2000. On observe que l'essentiel de l'activité d'éclairs, qui dépend aussi bien de la fréquence des orages que de leur intensité, se produit au-dessus des continents. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer ce contraste. L'hypothèse privilégiée avance le fait que le réchauffement de la surface des continents par le rayonnement solaire s'avère plus efficace que celui de la surface des océans, en raison de la plus grande conduction thermique de l'eau. Le phénomène de convection à l'origine du développement des orages s'y manifeste donc plus intensément. En outre, on peut également observer sur cette distribution globale que l'activité d'éclair déborde sous le vent dominant des continents : vers l'est en zone tempérée (où dominent les vents d'ouest), vers l'ouest en zone intertropicale (où se manifestent les alizés dirigés d'est en ouest). Enfin, il n'est pas surprenant de constater que l'activité orageuse est maximale dans la bande intertropicale où le bilan thermique est excédentaire.

CONCLUSION

Les dernières décennies ont permis de progresser considérablement dans la compréhension des phénomènes orageux. Les superstitions de jadis, notamment celle qui accompagnait la production des éclairs et de la foudre, ont fait place à une connaissance poussée des processus, parfois complexes, mis en jeu. Certains espoirs ont été déçus, comme celui qui consistait à envisager la récupération de l'énergie des éclairs. La forte puissance dissipée lors de ces décharges ne produit en définitive qu'une énergie limitée par la très faible durée du phénomène. En revanche, de nouveaux horizons s'ouvrent à la recherche, aussi bien fondamentale qu'appliquée. Il reste ainsi à comprendre et à caractériser les « Transient Luminous Events » et à développer les outils spatiaux du XXI^e siècle permettant une détection globale et en temps réel des manifestations électriques associées aux orages. L'observation satellitale pourrait notamment permettre de prévenir les catastrophes, de surveiller les effets, déjà observés, du réchauffement climatique sur ces manifestations, et également d'élucider les zones d'ombre qui affectent encore ces mécanismes.

REMERCIEMENTS

L'essentiel de cet article est extrait d'un ouvrage publié dans la collection « Pour la Science » des Éditions Belin, intitulé *Atmosphère, océan et climat* et cosigné par Robert DELMAS, Serge CHAUZY, Jean-Marc VERSTRAETE et Hélène FERRÉ.

BIBLIOGRAPHIE

En français

- ◆ ROUX F. *Les orages*. Documents Payot, 1991.
- ◆ HERMANT A. et LESAGE C. *L'électricité atmosphérique et la foudre*. Série « Que sais-je ? », Presses Universitaires de France, 1997.

- ◆ GARY C. *La foudre. - Des mythologies antiques à la recherche moderne.* Masson, 1995.
- ◆ WILLIAMS E. « L'électrisation des orages ». Article en français dans la revue *Pour la Science*, janvier 1989, n° 135.
- ◆ HERMANT A. *Traqueur d'orages.* Nathan, 2000.
- ◆ DELMAS R., CHAUZY S., VERSTRAET J.-M. et FERRÉ H. *Atmosphère, océan et climat.* Belin – Pour la Science, 2007.
- ◆ SOULA S. et VAN DER VELDE O. « Observation de sprites en France et analyse de leurs conditions de production » *La Météorologie*, à paraître.

En anglais

- ◆ GOLDE R. H. *Lightning - Volume 1.* Academic Press, 1977.
- ◆ REITER R. *Phenomena in atmospheric and environmental electricity.* Elsevier, 1985.
- ◆ VOLLAND H. *Atmospheric electrodynamicics.* Physics and Chemistry in Space, Springer Verlag, 1984.
- ◆ RAKOV V. et UMAN M. *Lightning : physics and effects.* Cambrid Ed., 2003.
- ◆ *Studies in Geophysics « The earth's electrical environment ».* National Academic Press, 1986.
- ◆ MACGORMAN D. R. et RUST W. D. *The electrical nature of storms.* Oxford University Press, 1998.



Serge CHAUZY
Professeur émérite
 Université de Toulouse
 Laboratoire d'aérodynamique
 CNRS - UMR 5560