

LE CUMULO-NIMBUS

roi des nuages

vidéo : L'aspiration sous le cumulo-nimbus (images de Martin Lisius) : [ici](#)

vidéo : La majestuosité des cumulo-nimbus (images de Alex Horner) : [ici](#)

vidéo : Orage pyrénéen nocturne à éclairs (chaîne chateaubausejour, youtube) : [là](#)

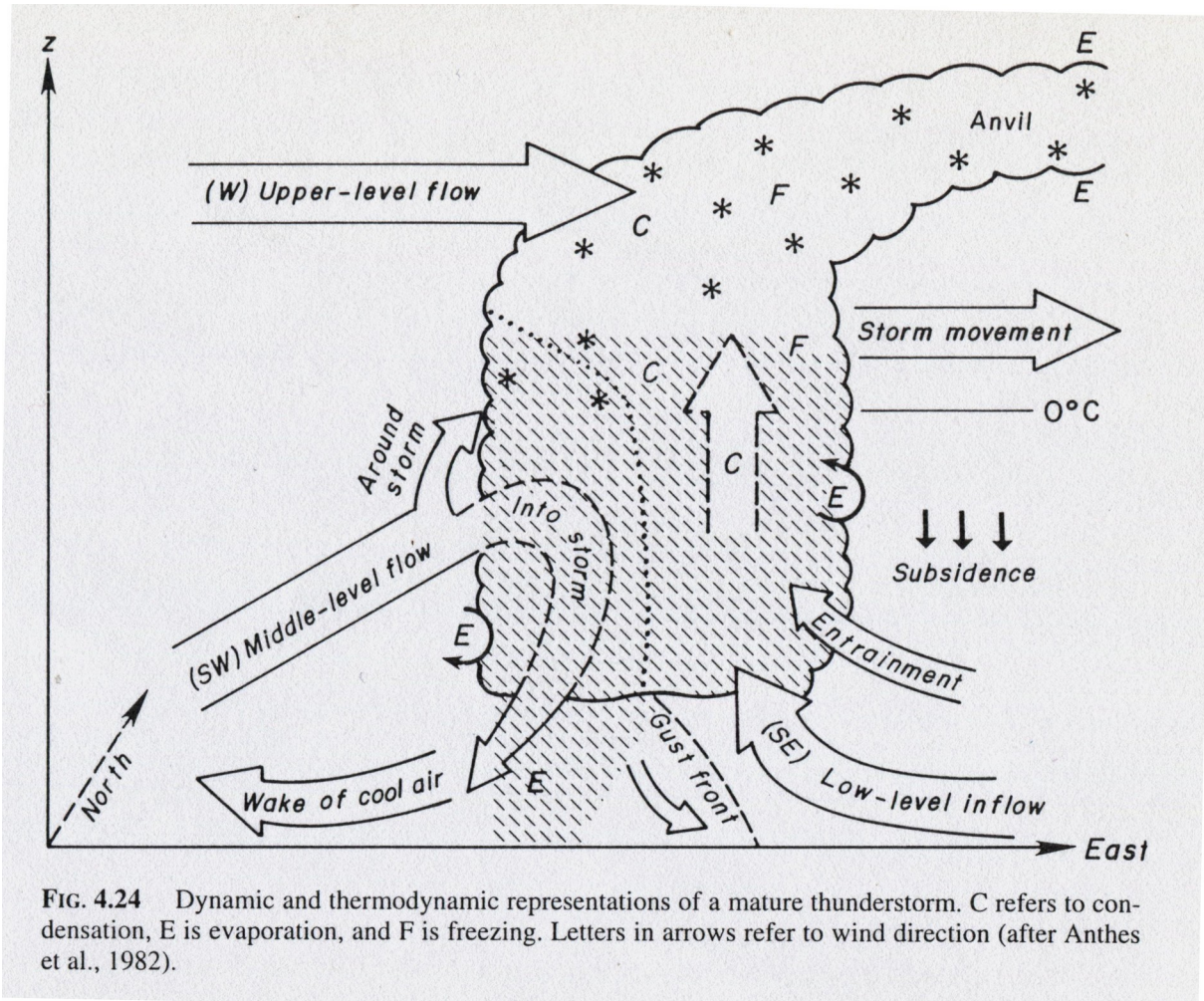
anegeo, années 2000

Vielles **notes de lectures...** (ça plutôt que rien) :

- 1) Liou, K.N. 1992, "Radiation and **Cloud** Processes in the Atmosphere", Oxford University Press (juste pour le schéma)
- 2) Dickerson, R. R. - Huffman, G. J. - Luke, W. T. - Nunnermacker, L. J. - Pickering, K. E. - Leslie, A. C. - Lindsey, C. G. - Slinn, W. G. N. - Kelly, T. J. - Daum, P. H. - Delany, A. C. - Greenberg, J. P. - Zimmerman, P. R. - Boatman, J. F. - Ray, J. D. - Stedman D. H. 1987, "**Thunderstorms : An important mechanism in the transport of air pollutants**", Science, vol. 235, 23 january: 460-65. (un témoignage clair des échanges entre niveaux de la stratosphère)
- 3) Bouqueneau, C 2006, "**Doit-on craindre la foudre ?**"; EDP Sciences, 184p. (bonne présentation simple du cumulo-nimbus et l'aspect électrique) **p. 7**
- 4) Moore, C.B. - Vonnegut, B. - Rolan T.D. - Cobb, J.W. - Holden, D.N. - Hignight, R.T - McWilliams, S.M. - Cadwell, G.W. 1986, "**Abnormal polarity of thunderclouds grown from negative charged air**", Science, vol. 233, 26 September: 1413-16. (une manip d'électrisation artificielle par câble chargé traversant un canyon où la position des orages est assez statique) **p. 13**
- 5) Williams, E. 1989, "**L'électrisation des orages**", Pour la Science, n°135, janvier : 84-94 (état de notre manque de connaissance sur ce nuage) **p. 16**
- 6) Biémont, E. 1997, "Météores et effets lumineux dans l'atmosphère terrestre", Qsj, PUF, 127p.
- 7) Few, A 1985, "**Le tonnerre**", in "Les phénomènes naturels", bibliothèque "Pour la Science", diff. Belin: 31-41. [très intéressant] **p. 23**

1) Liou 1992, p. 241

pour le schéma :



2) Dickerson, R. R. et al. 1987

"Les orages : un mécanisme important dans le transport des polluants de l'air"

p. 462. "...on sait que le mélange de l'air environnant dans les nuages (entraînement) restreint la croissance des cumuli, mais la connaissance de la dynamique d'entraînement est encore limitée..."

"Dans ce rapport, on présente une observation directe de transport convectif de gaz trace photochimiquement actifs dans un cumulo-nimbus, et on peint un portrait d'orage en utilisant la concentration des gaz.

Plusieurs avions de recherche ont été équipés d'instruments pour la mesure des paramètres météorologiques et les gaz traces CO, O₃, NMHC_s [non methane hydrocarbon], et les composants d'azote réactifs NO_x et NO_y. Pour cet expérimentation, NO_x est défini comme la somme de NO, NO₂ et PAN (peroxyacetyl nitrate, un composé nitrogène organique caractéristique du smog photochimique)." (...)

"Nous avons choisi CO et, dans une moindre mesure, O₃ comme traceurs primaires parce qu'ils sont faiblement solubles dans l'eau, détectés rapidement, et ont des temps de résidence atmosphérique bien

plus longue que la durée de vie d'un orage. Ces gaz en général ont des profils d'altitude troposphérique distinctifs. CO est produit principalement par des sources au sol et détruit dans la troposphère, et ainsi généralement décroît avec l'altitude. Dans l'atmosphère clair O₃ est produit principalement dans la stratosphère et détruit à la surface de la terre, et ainsi généralement s'accroît avec l'altitude. Dans l'atmosphère pollué, la production photochimique génère souvent une maximum local de O₃ dans le PBL [Planetary Boundary Layer, le premier kilomètre et demi de la troposphère (dite "libre" au dessus)]. Toute déviation des profils environnementaux de ces gaz dans le nuage pendant un orage est présumé être du à la convection."

Ils expliquent que les NMHC se comportent comme le CO mais ne peuvent être analysés dans un avion, ils ont procédé par échantillonnage.

"Bien qu'elle ne soit que faiblement soluble dans l'eau, la combinaison qui constitue NO_x ne convient pas comme traceur de la circulation de l'air à cause de sa grande réactivité et parce que les éclairs produisent NO. Cependant, la photooxydation de CO et des hydrocarbures dans la troposphère peut soit produire soit détruire O₃, en dépendance de la concentration du catalyseur NO_x. Si les traceurs CO et O₃ montrent que la convection est un mécanisme significatif de transport dans la troposphère supérieure, la détection de quantités significatives de NO_x dans la zone d'écoulement du nuage indique que la convection peut être importante pour la formation de O₃ dans la troposphère libre [i.e. c'est à dire au dessus de la PBL].

Les orages choisis pour ces études ont commencé à se développer tard dans la nuit du 14 juin 1985, quand une grande masse d'air froid et sec se déplaçait vers le Sud [AMP évidemment] sur un air chaud humide du Golfe de Mexico. Le résultat a été une bande intense d'orages s'étendant de Amarillo à Chicago [classique, grande diagonale traversant toutes les grandes plaines US, front de l'AMP] . A l'aube du 15 juin, l'avion a volé vers les régions d'alimentation et de sortie d'un cumulo-nimbus situé près de la limite Oklahoma-Arkansas [frontière N-S; latitude 35° soit = Nord du Maroc, Crête, Chypre, Syrie...].

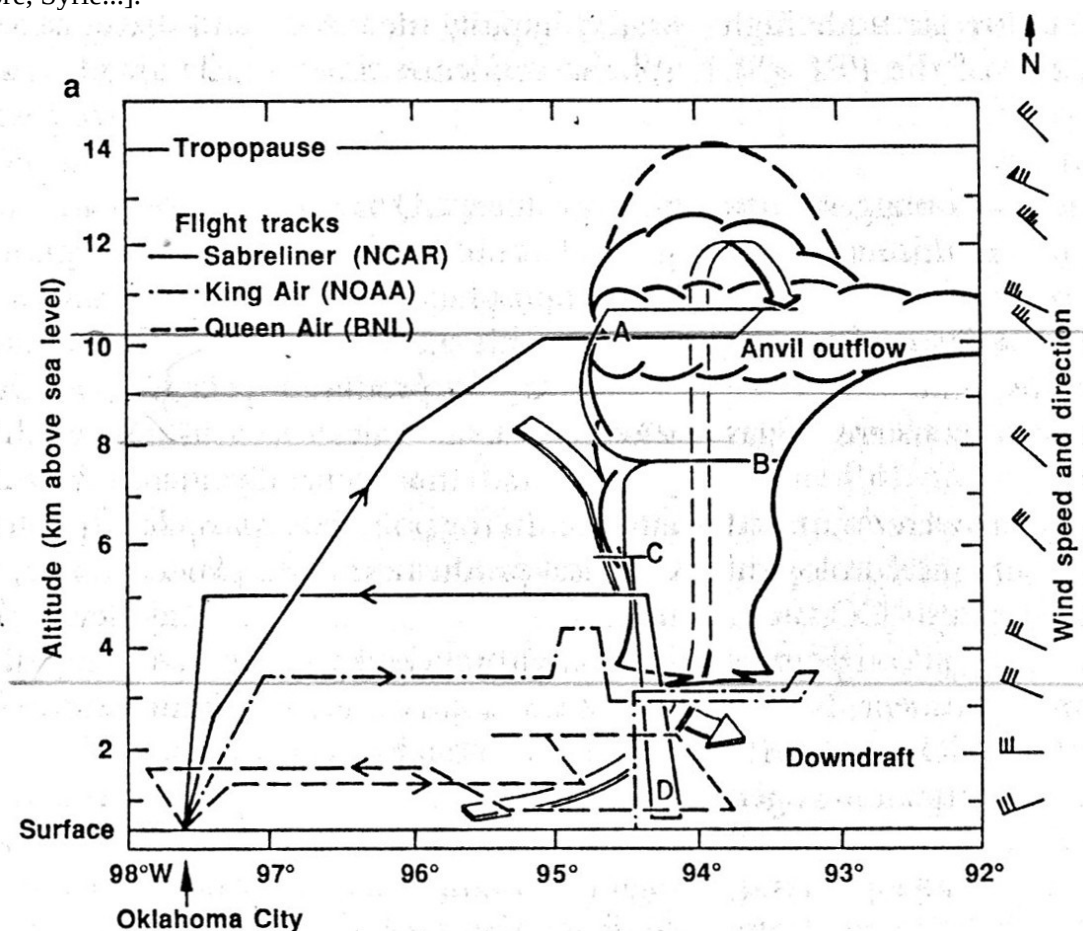


Fig. Dessin schématique basé sur les ballons sonde et radars, satellite, et observation in situ. La coupole en tirets indique l'altitude du nuage dans son étape mure, 2 heures avant que l'avion soit dans la zone [qui mesure donc phase post cataclisme]. L'écoulement de sortie était vers le Sud-Est [coté opposé à l'AMP...], à droite et en dehors du plan de la feuille. Les flèches montrent les mouvements de l'air déduits, incluant le transport ascendant d'air humide, pollué de la PBL et l'écoulement descendant d'air froid de la haute troposphère [perso : l'air froid devrait venir du volume déplacé par l'air chaud ? rappel que AMP < 1500m surtout en juin] Lignes brisées : trajets des 3 avions

Comme le sabreliner [petit avion à réaction] s'élevait dans l'air, le rapport de mélange de CO tombait doucement jusqu'à ce que l'avion pénètre dans l'enclume à 10 km. Dans les secondes, le niveau de CO s'est élevé fortement [temps de réponse de l'appareil : 60 sec.]. Bientôt il a plus que doublé, atteignant des concentrations rarement observées à cette altitude. La concentration de CO dans le nuage était plus haute que celle de CO dans l'air en dehors du nuage à toutes les altitudes échantillonnées. Le niveau CO maximum et le cœur de l'écoulement étaient apparemment vers 10km."

(...) "Dans la PBL, O₃ était à environ 65 ppb et CO était à à peu près 214 ppb, typique de l'air continental rural et indicateur d'un smog photochimique modéré."

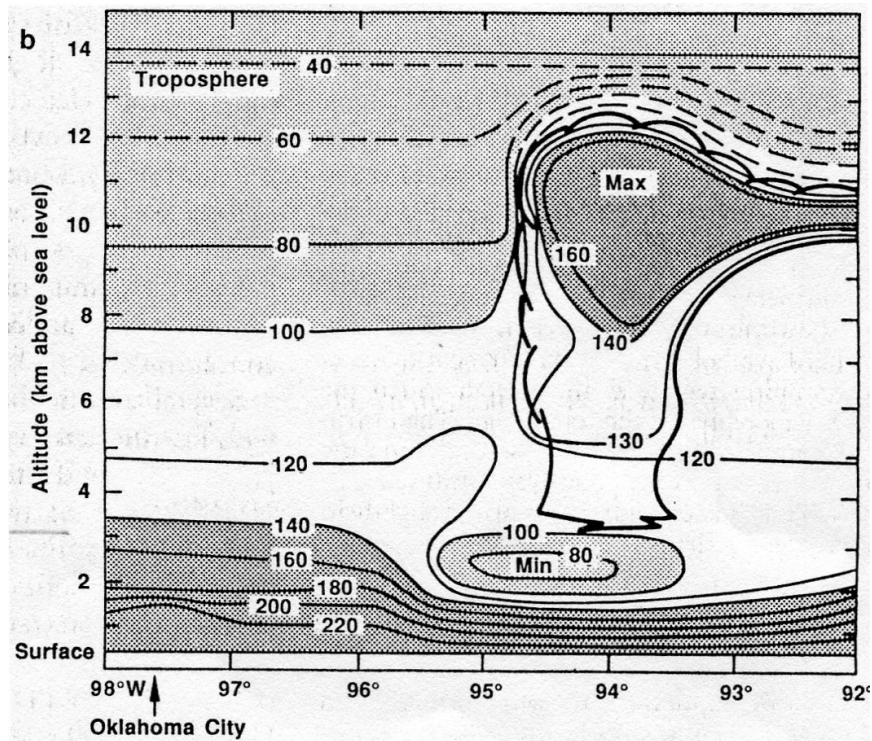


Fig. Contour de la concentration de CO en parties par milliard le 15 juin 1985.

Ils présentent brièvement des résultats de NMHC et les composés azotés.

(...) p. 463. "L'objectif principal de cet expérience était de tester pour l'air pollué de la PBL dans la région d'écoulement d'un orage. Les hauts niveaux de CO et NMHC_s décrits prouvent que l'enclume du nuage contenait de l'air qui avait son origine dans la plus basse atmosphère et confirme l'hypothèse que les phénomènes convectifs peuvent être importants dans le transport vertical des polluants."

(...) "A une altitude de 10 km en dehors du nuage, la valeur mesurée de NO_y d'environ 0.6 ppb était dans l'intervalle de concentrations prédites par les modèles ordinateurs. Dans l'enclume, cependant les concentrations observées de NO, NO_x et NO_y étaient bien au dessus attendues pour la troposphère supérieure non perturbée."

Deux sources peuvent être identifiées pour la haute concentration de NO_x observée dans le nuage. D'abord, NO_x est monté dans l'ascendance de l'orage juste comme le sont CO et NMHC_s; cependant

l'air dans la PBL n'était pas lourdement pollué le jour de l'orage, et le transport aurait contribué pour un maximum de grossièrement 1 ppb sur les 4 ppb NO_x ; puisque cet orage a généré beaucoup de coup de foudre nuage-sol, les éclairs apparaissent être la source principale de NO_x dans la partie supérieure du nuage.

On s'attendrait à ce que le courant ascendant humide de l'orage, non seulement élève NO_x , mais retire aussi les espèces solubles NO_y telles que HNO_3 et NO_3^- de l'air. Le rapport élevé de NO_x à NO_y observé entre 7.6 et 10.6 km supporte cette idée. L'injection de NO_x frais par les éclairs peut aussi être utilisé pour expliquer ces rapports. Il faut au moins un jour pour convertir NO_x en d'autres espèces NO_y .

Le courant descendant de l'orage peut être identifié des concentrations de gaz trace. Il y a un minimum local en CO , O_3 , composés azotés réactifs, et humidité à environ 2 km [sous la base des nuages sur leur dessin] ou le mouvement vertical de l'air dans cette région était d'environ -1m/sec [3,6 km/h, lent mais 2h après paroxysme] (vers le bas). A des altitudes plus élevées, l'avion a apparemment volé au Sud du courant descendant. Comme on s'y attend, le courant descendant transporte un air propre **et sec** [intéressant pour le reconnaître...] d'en haut à la basse troposphère. **L'origine apparent du courant descendant à un altitude de 7 à 10 km** est plus élevé qu'il avait été observé précédemment. **Les courants descendants, contrairement aux courants ascendants, voyagent souvent sur les distances horizontales longues par rapport à la taille du nuage**, et la possibilité que le courant descendant ai pris son origine dans la troposphère moyenne à quelque distance au Nord-Ouest de l'orage est actuellement en train d'être examinée.

(...) "Si on assume que l'enclume était composée de parcelles d'air qui sont parties de la PBL et ont été diluées avec de l'air de la haute troposphère qui contenait 100 ppb CO , alors **l'enclume était composé d'environ 64% d'air de la PBL et 36% d'air de la haute troposphère.** Cet entraînement est clairement discernable avec notre technique de traceurs chimiques mais est sous la limite de détection des traceurs thermodynamiques conventionnels (potentiel équivalent et contenu total d'eau).

L'ozone aussi atteint un maximum local dans l'enclume. La source O_3 pourrait avoir été la couche de concentration haute de O_3 à 5 km [une observation qu'ils ont ce jour là autour du nuage], ou, plus probablement, l'entraînement de l'air environnant dans le sommet du nuage. Quand l'orage atteint la tropopause à 14 km, du mélange avec de l'air stratosphérique riche en O_3 devrait être attendu. On peut faire une approximation de l'entraînement moyen dans le sommet du nuage en assumant que le nuage était formé d'air de la PBL contenant 65 ppb O_3 . Si la concentration de O_3 était ~ 500 ppb à 14 km, alors un entraînement de 4% produirait la concentration moyenne de O_3 (81 ppb). L'effet corona électrique aussi produit O_3 , mais le taux de production de O_3 par l'activité électrique des nuages est hautement incertain."

Puis ils s'intéressent à l'origine de la concentration des NMHC_s dans la haute atmosphère : "La durée de vie d'une classe de gaz traces, NMHC_s, calculée en respect à l'attaque OH et O_3 , varie de quelques mois pour les composés qui réagissent lentement comme l'éthane et l'acétylène à plusieurs heures pour le propylène qui réagit vite. Pourtant nous avons observé les deux, les NMHC_s à vie longue et ceux à vie courte dans la troposphère supérieure." (...)

"Nos résultats supportent l'hypothèse que les émissions anthropogènes de NO_x et NMHC, qui réagissent en présence de lumière solaire pour former O_3 , peuvent accroître l' O_3 troposphérique sur une grande échelle. Un tel accroissement aurait un impact majeur sur la chimie globale de la troposphère et aggraverait le réchauffement global des autres gaz trace atmosphériques tel que CO_2 . D'un autre coté, le même processus convectif qui transporte NO_x et NMHC_s dans la haute troposphère peut aussi transporter et diluer les NO_x et SO_2 anthropogéniques, diminuant la quantité d'acide fait par l'homme déposé localement. Nous suggérons donc que les processus convectifs doivent être considérés dans les modèles de chimie troposphérique et de déposition acide." (...)

"L'orage utilisé dans notre étude était trop grand pour naviguer autour... Le courant ascendant d'un nuage profond est dangereux à cause de la formation de glace et la grêle. Des nuages plus petits, particulièrement aux altitudes au dessus ou bien en dessous du niveau du gel, peuvent être pénétrés en sécurité." (...)

"Les techniques thermodynamiques demande de mesurer la température, pression, et contenu d'eau (les deux, liquide et vapeur) dans et près du nuage. Les différences comparativement petites dans les

propriétés thermodynamiques entre un nuage et l'air environnant dictent que les variables thermodynamiques soient mesurées de manière très précise. Nous suggérons que les gaz traces peuvent fournir un outil utile pour visualiser l'entraînement dans les systèmes convectifs, et prouvera qu'il est de plus en plus utile dans les études futures de la dynamique des nuages."

3) Bouquegneau 2006

"Doit-on craindre la foudre ?"

p. 35. "... hauts mats garnis de lamelles de cuivre... Par temps d'orage, des aigrettes... jaillissaient des sommets... Ces effluves (décharges partielles dans l'air) connus aujourd'hui sous le nom d'effet de couronne (ou effet corona...)..."

p. 42. "Sur le toit d'une maison de Philadelphie, Franklin installa une tige métallique qui pouvait capter et neutraliser une décharge de foudre, grâce à son extrémité inférieure enfoncée dans le sol. Le paratonnerre à tige de Franklin était né. Il s'imposa d'abord aux États-Unis d'Amérique : 10 000 exemplaires furent installés en moins d'une décennie. Son efficacité se vérifia aussitôt, tout particulièrement sur les clochers des églises, cibles privilégiées de la foudre. Par exemple, jusqu'en 1766, le campanile de la Basilique Saint-Marc à Venise avait été complètement détruit par la foudre à trois reprises; après installation d'une tige de Franklin, il n'eut plus jamais à subir de tels outrages."

p. 46. "... la durée d'un coup de foudre qui est souvent inférieure à une milliseconde (< 1 ms).

p. 47. "L'une des fantaisies de la foudre consiste à déshabiller ses victimes et à faire éclater leur chaussures par l'onde de pression intense qui l'accompagne, pression pouvant atteindre axialement plusieurs centaines de fois la pression atmosphérique."

p. 47. "... Karl Berger... dans sa station expérimentale du Mont San Salvatore, près du Lac de Lugano [intrusion du territoire suisse dans l'Italie avec lac allongé et // et entre les lacs Majeur et de Come, zone fortement contaminée par Tchernobyl], en Suisse... Ses observations ont permis de préciser que dans le cas d'un coup au sol la décharge principale (ou contre-décharge) jaillit toujours du sol et se propage vers les nuages (et non l'inverse selon les idées reçues). Il montra que les formes d'éclairs sont simples, arborescentes (avec des tronçons quasi linéaires) ou exceptionnellement en chapelet, que la durée d'une décharge varie entre 0,1ms et une seconde (coups froids durant moins de 10 ms incapables d'enflammer du bois sec, coups chauds au delà de 10 ms pouvant provoquer des incendies) et que la décharge atmosphérique est simple (cas fréquent pour les coups positifs qui représentent 10% des coups dans nos régions tempérées) ou multiples (majorité des coups négatifs comprenant en moyenne dans nos régions 3 ou 4 composantes par décharges)."

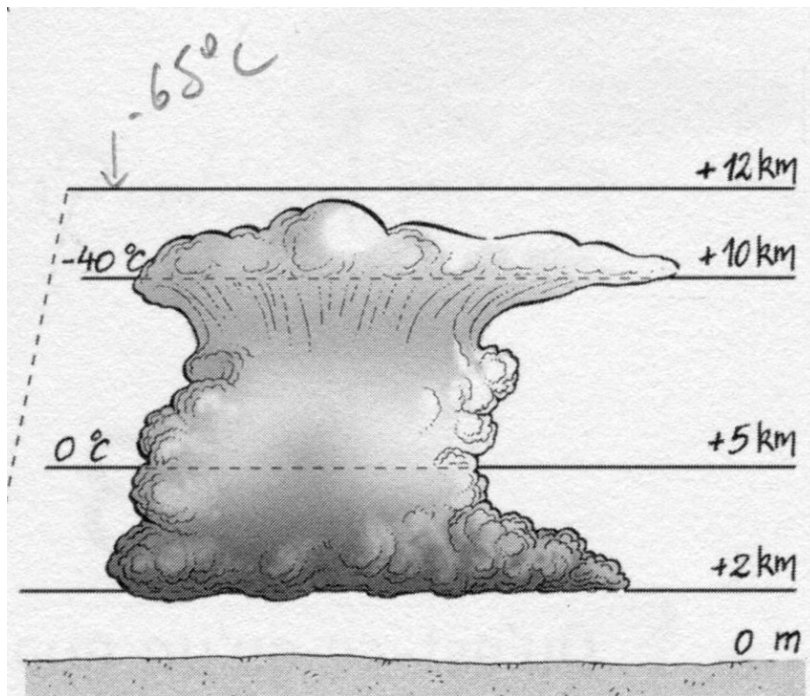
p. 51. "... le physicien écossais Charles T.R. Wilson (1869-1959), qui inventa la chambre à brouillard, fut le premier à déterminer la quantité de charges électriques présentes dans un nuage orageux, à partir de la mesure à distance du champ électrique rayonné."

p. 53. "Caractéristiques du cumulo-nimbus :

Le nuage orageux est le plus vigoureux des nuages. On l'appelle cumulo-nimbus ou roi des nuages. Les cumulo-nimbus se présentent rarement sous forme isolée mais plutôt en agrégats. Ils diffèrent des autres nuages d'averses à la fois par l'échelle de leur extension tant verticale qu'horizontale et par leur aptitude à donner naissance à des phénomènes électriques.

Un cumulo-nimbus isolé a la forme d'une énorme tour verticale surmontée d'une supérieure en forme d'enclume et appelée enclume, située à une altitude variant entre 6 et 18 km, parfois d'avantage. Les cumulo-nimbus sont pratiquement tous observés dans la troposphère où la température décroît, en moyenne, jusqu'à la tropopause, limite supérieure de la troposphère."

p. 55. "La hauteur des cumulo-nimbus est liée à l'altitude de la tropopause, fonction de la température. Elle varie avec la latitude et diffère selon les saisons; elle atteint 17 km sous les tropiques [2 fois l'Everest]; toutefois, dans les régions tempérées, à des latitudes moyennes, de 12 km l'été, elle décroît jusqu'à 6 km l'hiver [moitié...]. la base d'un cumulo-nimbus, quasi horizontale est située généralement entre 1 et 2 km du sol et occupe une surface de quelque 10 km de diamètre."



p. 55. "Naissance et développement du cumulo-nimbus :

L'extension verticale d'un cumulo-nimbus exige la présence de masses d'air instables, humide et chaud, donc d'importants gradients de température sur de grandes épaisseurs.

Dans sa phase de développement convectif, le nuage orageux isolé, plus chaud que l'air ambiant, monte rapidement et accroît l'instabilité propre de la masse d'air originelle au fur et à mesure que la vapeur d'eau se condense en altitude. Les courants ascendants aident le nuage à atteindre des hauteurs où la température est nettement négative, **l'isotherme de 0°C étant situé généralement aux environs de 4 ou 5 km d'altitude. Au sein de l'enclume**, définie ci-dessus, les vitesses atteintes par les courants d'air sont de l'ordre de 30m/s (mètre par seconde [**108 km/h**]).

Les échos détectés par radar signalent la présence de précipitations liquides (gouttelettes) ou solides (cristaux de glace), maintenues en altitude par les courants ascendants rapides. Lorsque l'accumulation d'eau, sous forme solide ou liquide, devient telle que les courants ascendants ne peuvent plus supporter son poids, la pluie est prête à tomber. La phase de maturité du cumulo-nimbus commence avec les premières précipitations. Les averses s'intensifient sous la partie frontale du nuage et s'accompagnent de rafales de vent qui accroissent brutalement et passagèrement la pression ambiante. **Une telle cellule orageuse contient habituellement une masse de plusieurs centaines de milliers de tonnes d'eau."**

p. 56. "Les courants ascendants et descendants coexistent, mais ces derniers finissent par l'emporter : c'est la phase de dissipation. Le nuage répand alors ses dernières précipitations décroissantes avec le déclin des courants ascendants qui les alimentaient. Il se dissout suite à l'évaporation due au réchauffement adiabatique [sans échange de chaleur avec l'extérieur] des courants descendants. Il arrive que le nuage orageux se fragmente en laissant un voile de cirrus à la place de l'enclume et quelques débris inorganisés au voisinage du sol. **La durée de vie d'un cumulo-nimbus excède rarement une heure.**

Chaleur, ou plus exactement gradient de température, et humidité, même légère, sont indispensables à la formation des cumulo-nimbus. Chaque fois que l'un de ces deux facteurs manque, dans les régions polaires ou dans les régions désertiques par exemple, il ne se produit d'orages qu'exceptionnellement.

Dans un nuage orageux, les charges électriques positives et négatives se séparent pour former un gigantesque dipôle, voire un tripôle électrique. Ces **charges électriques proviennent du frottement par collisions entre les petits cristaux de glace, qui se chargent positivement, et les grosses gouttes d'eau liquide (en surfusion) agglutinées sous forme de sphéroïdes de dimensions centimétriques, qui se**

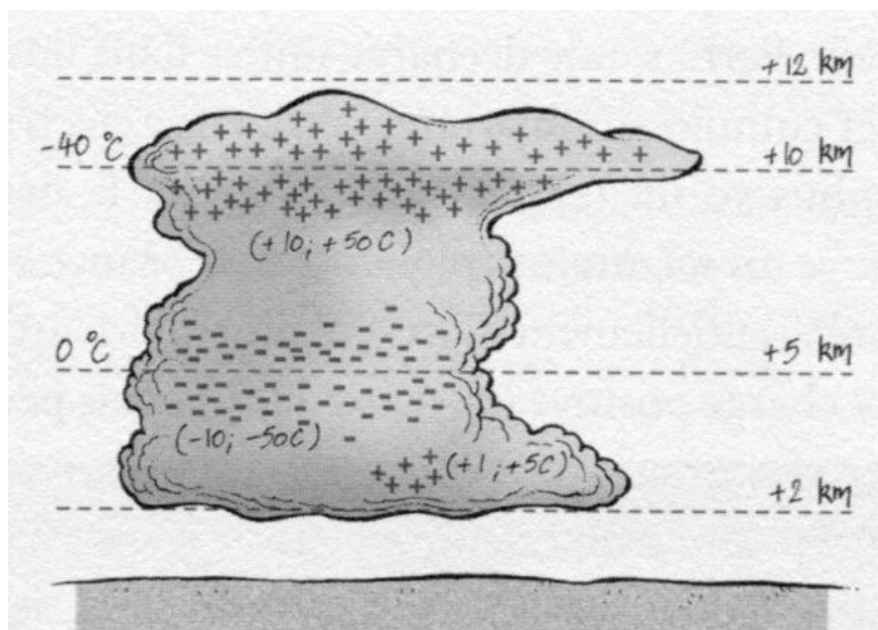
chargent négativement. Les petits cristaux de glace s'élèvent grâce aux courants d'air ascendants, les grosses gouttes liquides négatives, parfois appelées hydrométéores, descendent par gravité. Un champ électrique relativement intense apparaît. Si ce champ électrique atteint la valeur de la rigidité diélectrique de l'air, une décharge électrique de foudre est imminente à l'intérieur même du nuage.

p. 60. "On appelle rigidité diélectrique d'un milieu en champ électrique uniforme, la valeur limite du champ électrique avant que ne se manifeste la disruption dans ce milieu, c'est-à-dire la décharge électrique qui le rend conducteur. Dans l'air ambiant, la rigidité diélectrique en champ uniforme vaut 30 kV/cm (kilovolt par centimètre) ou 3 MV/m.

Une grande variété de conditions atmosphériques favorise les phénomènes orageux. Les cumulo-nimbus estivaux sont les plus classiques, mais la foudre apparaît aussi lors des tempêtes de grêle. elle accompagne les tornades, les ouragans, les tempêtes de neige hivernales. Elle est présente dans les longs systèmes convectifs océaniques ou les systèmes convectifs terrestres dépassant une centaine de kilomètres d'expansion horizontale. En l'absence de courants ascendants suffisamment rapides et de mélanges de phases suffisamment intenses, la décharge de foudre ne se manifeste pas."

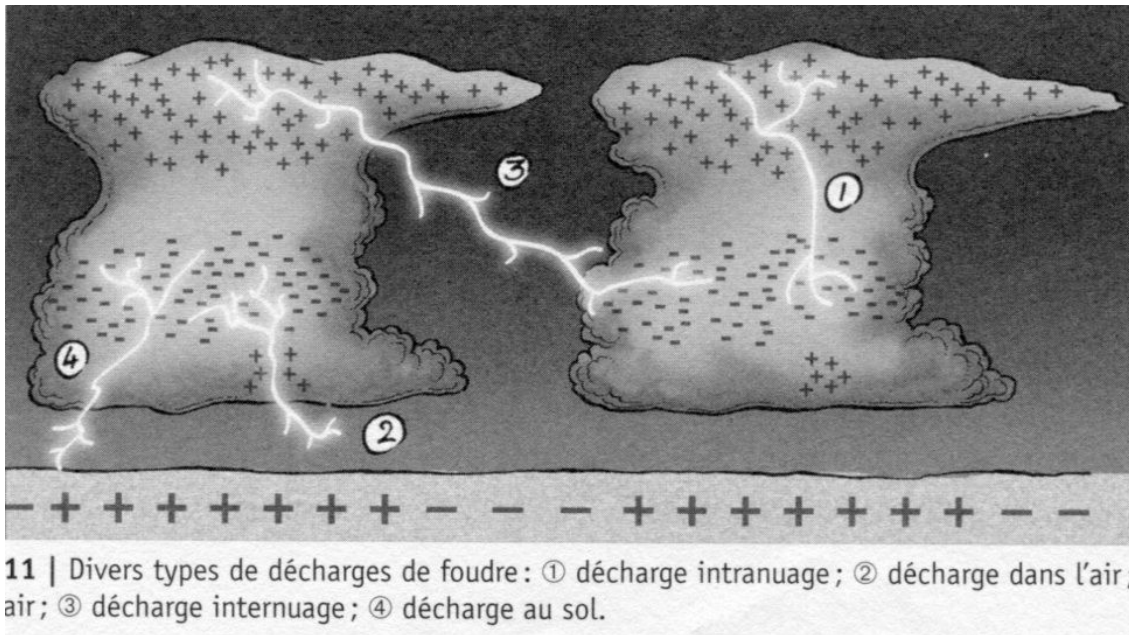
p. 59. "Répartition de la charge électrique

Comme le montre la figure, dans la phase de maturité du cumulo-nimbus, un certain équilibre électrique (tripôle) s'établit entre l'énorme charge électrique positive, de 10 à 50 C (coulombs), voir jusqu'à 300 C, assez diffuse de sa partie supérieure, et la charge électrique négative, tout aussi énorme, relativement concentrée verticalement (sur 1 km d'épaisseur environ) dans sa partie médiane et séparée de la charge positive supérieure par une zone quasi neutre, ainsi que sous forme d'une petite poche positive, de l'ordre de dix pour cent (régions tempérées l'été) de la charge positive supérieure (souvent comprise entre 1 et 5 C, parfois davantage), qui se maintient dans la partie inférieure du nuage en dessous de l'isotherme de 0°C."



p. 59. "Types de décharges de foudre :

Le type de décharge électrique le plus fréquemment rencontré est la *décharge intranuage*, c'est-à-dire à l'intérieur même du cumulo-nimbus (figure ci-dessous). Plus rarement, la décharge se prolonge dans l'air à l'extérieur du nuage mais s'interrompt, on parle de *décharge dans l'air*. Parfois, une décharge initiée dans une partie chargée d'un premier cumulo-nimbus atteint la charge électrique opposée du cumulo-nimbus voisin, c'est la *décharge internuage*. La décharge au sol, moins fréquente que beaucoup le pensent, semble initiée préférentiellement dans la région inférieure du nuage où subsiste la petite charge positive, mais peut aussi avoir pour origine la charge négative médiane ou encore, mais moins souvent, la charge positive supérieure.



L'été, dans les régions tempérées, dix pour cent seulement des décharges au sol sont positives. Les décharges négatives sont nettement majoritaires. L'hiver, ou toute l'année dans les régions de latitude élevée (régions polaires), la partie supérieure positive du nuage est plus proche du sol et la statistique des décharges au sol montre que les décharges positives ont autant de chances de se présenter que les décharges négatives.

Sans qu'il n'existe à l'heure actuelle d'observations en nombre suffisant, on estime que la fraction des décharges au sol, par rapport à l'ensemble des décharges, augmente avec la latitude (la température diminuant généralement avec celle-ci), les nuages étant de plus en plus bas et donc proches du sol. Cette fraction vaut approximativement un sur six dans les régions équatoriales, un sur quatre sous les tropiques, un sur trois dans les régions tempérées (latitude de 50°), un sur deux aux cercles polaires. En moyenne, à l'échelle mondiale, on considère une décharge au sol pour deux ou trois décharges intranuages ou internuages.

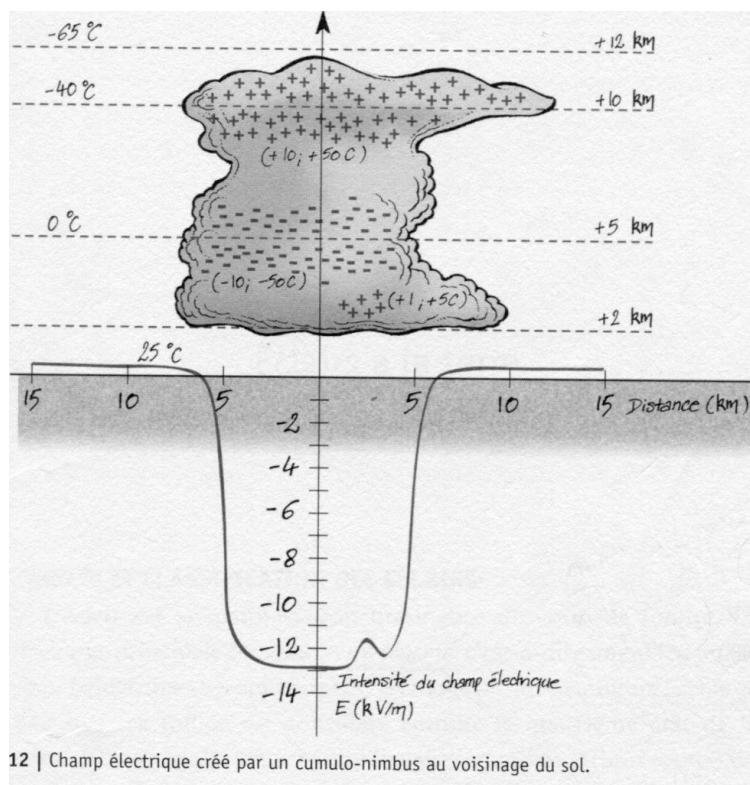
Si nous connaissons mieux les mécanismes d'émission électromagnétique de ces différents types de décharges, surtout dans la gamme allant de 3 à 30 MHz, nous pourrions établir une meilleure discrimination entre ces différents types de décharges."

Rappel : les ondes radio "courtes" vont de 1,7 à 30 MHz (λ , longueur d'onde, de 180 à 10m); aussi 3 à 30 MHz est la bande HF des radaristes, c'est la bande qu'on doit utiliser avec les radars de longue portée, dits OTH (Over The Horizon) qui voient par réflexion sur l'ionosphère.

Dans sa phase de maturité, le cumulo-nimbus chargé électriquement a, à sa base, un potentiel électrique de l'ordre de 100 MV (million de volts) par rapport au sol.

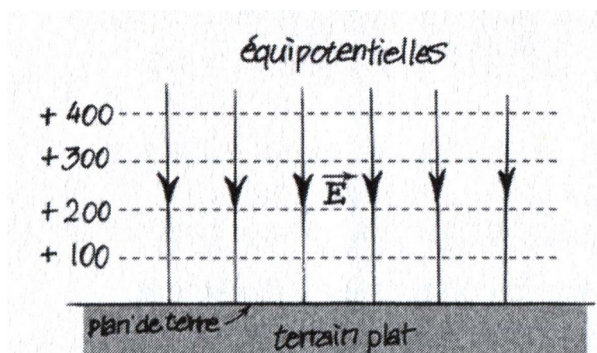
La figure ci-dessous représente le champ électrique que créent les charges électriques d'un cumulo-nimbus au voisinage du sol.

A l'approche du nuage orageux, qui se déplace à des vitesse atteignant parfois 80 km/h, le champ électrique au niveau du sol s'inverse et croît fortement, car la base du nuage agit comme une charge négative nette importante par rapport à un sol qui s'électrise positivement. Dès que le champ électrique atteint des valeurs de l'ordre de 10 kV/m, c'est-à-dire dix mille volts par mètre, la décharge au sol est imminente."



p. 62. "Courbe du champ électrique au voisinage du sol

En terrain plat, par beau temps, la composante verticale du champ électrique est de l'ordre de 100V/m, à cause de la présence d'une charge électrique positive au niveau de l'ionosphère, et de charges négatives en même nombre au niveau du sol.



p. 84 : "Suite à une ionisation intense due aux rayons solaires et aux rayons cosmiques, la conductivité électrique de l'air augmente rapidement avec l'altitude. Au niveau de l'ionosphère (parfois appelée électrosphère), située entre la neutropause (à environ 60 kilomètres du sol) et environ 500 km d'altitude, la concentration en ions positifs dépasse de 20% celle des électrons, si bien que la surface de la Terre se charge négativement (une charge électrique de - 400 000 C est maintenue en permanence sur toute sa surface). Il apparaît une composante verticale du champ électrique à la surface du sol d'environ 100 V/m par beau temps, dirigée vers le sol. Cette charge négative attire les ions positifs qui tendent à la neutraliser.

La basse atmosphère se comporte comme un diélectrique (l'air est un isolant très légèrement ionisé) dans l'immense condensateur formé de deux électrodes (armatures) particulières quasi sphérique : la base de l'ionosphère (neutropause) et la surface du sol. Par beau temps, la résistance électrique d'un

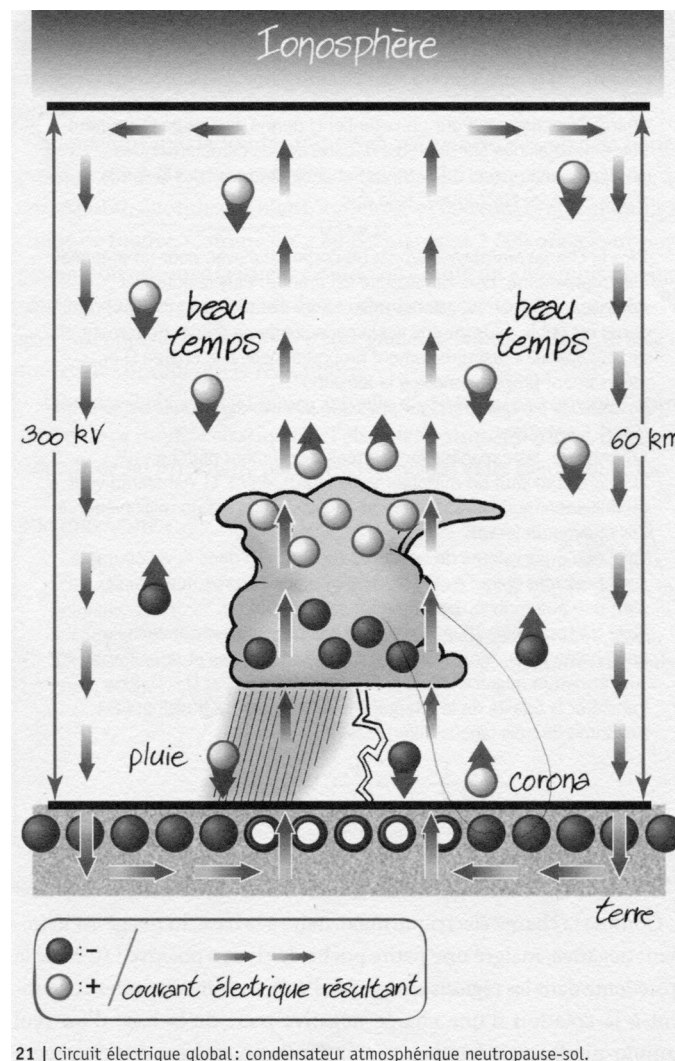
tube d'air vertical d'un centimètre carré de section et de 60 kilomètres de longueur atteint une valeur énorme, ce qui entraîne une résistance globale d'environ 300 ohms pour toute la surface de la Terre. Un courant de fuite total de l'ordre de 1500 ampères, conduit, par application de la loi d'Ohm, à une tension entre les armatures de l'ordre de 300 kV (kilovolts). La reconstitution de la charge de cet immense condensateur provient de l'activité orageuse sur l'ensemble de la planète où l'on dénombre constamment cent coups de foudre à chaque seconde. Les cumulo-nimbus, énormes machines électrostatiques naturelles, s'en révèlent les moteurs.

En l'absence d'activité orageuse, la constante de temps de décharge du condensateur atmosphérique se déchargerait complètement en moins d'une demi-heure, rendant la vie tout à fait impossible sur Terre, par absence d'écran protecteur contre les rayons solaires et les rayons cosmiques.

Comme la charge électrique majoritaire à la base du nuage est nettement négative..., trois mécanismes concourent à la création d'une charge négative issue de la base d'un seul cumulo-nimbus et s'écoulant vers la Terre : un courant de 0,9 ampère lié aux décharges par effet de couronne au sol, un courant de 0,2 ampère accompagnant la pluie et un courant de 0,3 ampère par orage (coups négatifs), soit globalement un peu plus d'un ampère par orage.

Rappelons que la foudre frappe en permanence la planète entière presque 100 fois par seconde (25 coups au sol à chaque seconde), ce qui correspond, quotidiennement, à environ 44 000 orages et 8 millions de coups de foudre. Comme il y a en permanence 2000 orages sur notre planète, on retrouve la valeur estimée de l'ordre du kiloampère pour le courant de fuite permanent du condensateur atmosphérique, dans ce que l'on appelle le circuit électrique global. La foudre y joue la rôle de source de courant qui le rééquilibre.

Comme il n'y a pas à l'heure actuelle d'expérience prouvant l'application de ce modèle classique de l'électricité atmosphérique, il reste un sujet de débat prioritaire parmi les physiciens et le météorologues.



▫ (Mueller "Le PC" p. 1120) parle du danger d'électrocution à une prise de courant si le contact se produit via les deux mains : "Le chemin emprunté par l'électricité pour passer d'un bras à un autre passe directement par le cœur. Or le muscle cardiaque a tendance à cesser de fonctionner lorsqu'il est soumis à de fortes tensions." **Bouqueneau** écrit que la même chose est vraie pour les éclairs proches, le courant passant par le sol. En cas de risque d'éclair, il ne faut pas avoir les jambes écartées, il faut s'accroupir en boule les membres serrés contre le corps. Les vaches sont souvent tuées par les éclairs (notamment si elles sont près d'un arbre) parce qu'il y a une grande distance entre leurs pattes avant et arrières, le cœur entre les deux.

4) Moore et al. 1986

(manip d'électrisation artificielle par câble chargé sur un canyon ou la position des orages est assez statiques)

"Les mesures électriques qui ont été faites depuis partout dans le monde confirme sa découverte [à Benjamin Franklin] et montrent que dans presque tous les orages, il y a une charge négative dominante dans la partie basse du nuage. Les mesures faites d'avions et de ballons montrent qu'il y a d'habitude aussi une charge positive dominante dans la partie supérieure de ces nuages.

Cette forte charge de polarité a des conséquences importantes. La partie supérieure, positive du dipôle attire une charge négative de l'atmosphère supérieur au sommet du nuage par conduction. La partie inférieure, négative du dipôle exporte une charge négative à la terre par les éclairs et décharge-point [prob. décharge corona]. En résultat de ces processus, les approximativement 1000 orages qui sont continuellement en cours sur la terre, apporte environ 1kA de charge négative de l'atmosphère à la terre. Ce courant, comme Wilson [C.T.R. Wilson, Observatory 45, 393 et 484 (1922)] l'avait perçu, est responsable du maintien continu d'une charge négative d'environ $0,5 \cdot 10^6$ C sur la terre et une charge positive égale dans l'atmosphère."

p. 1413 "Pendant l'orage habituel, un champ électrique négatif (dirigé vers le bas, beau temps) existe brièvement sous un nuage, juste après un éclair nuage-sol, pendant des ondées denses de pluie, et à l'étape de la mort de l'orage."

p. 1413. "Une nécessité de toute théorie de l'électrification est d'expliquer pourquoi, avec quelques exceptions, le dipôle électrique dans le nuage se développe avec une charge positive tout en haut et une charge négative dessous. Les mécanismes d'électrification variés proposés peuvent être divisés en deux classes, dépendantes sur les explications pour cette distribution des charges.

Selon la première classe, qui est basée sur les dites théories d' "induction", d' "influence" ou de "feed-back" de l'électrification des nuages, la polarité du dipôle est déterminée par la polarité des faibles charges de l'espace, ou champs électrique, qui peut être présent dans l'atmosphère pendant le développement du nuage cumulus avant qu'il ne devienne un orage. Il est possible qu'un nuage cumulus se comporte comme une machine d'influence de haut voltage, tel que la pipette à eau de Kelvin [W. Thomson (Lord Kelvin), Proc. R. Soc. London 16, 67 (1867)] et appareils semblables développés plus tard. Si un nuage cumulus devient électriqué par un mécanisme semblable, la polarité de l'orage sera déterminée par la polarité des faibles charges qui sont transportée vers le haut du nuage et cela initie le processus d'électrisation pendant les étapes précoces du développement du nuage. L'air à partir duquel se forme un cumulus presque invariablement contient les charges de l'espace légèrement positives par beau temps. Par conséquent, si un mécanisme d'influence est actif et que l'électrisation se produit, la charge positive sera dans la partie haute du nuage et la charge négative dans sa partie basse. Des exemples de mécanismes d'électrification de nuages qui sont initiés par des charges ou champs préexistants incluent ceux basés sur le transfert de charges inductives entre des particules du nuage en collision [J. Elster and H. Geitel, Phys. Z. 14, 1287 (1913)], sur la capture sélective d'ions par les précipitations tombantes [C.T.R. Wilson, J. Franklin Inst. 208, A (1929); Proc. R. Soc. London, Ser. A 236, 297 (1956)], et sur la formation de couches écran de particules chargées à la surface du nuage qui sont transportées par convection pour former des régions chargées [G. Grenet,

Ann. Geophys. 3, 306 (1947); B. Vonnegut, Geophys. Res. Pap. N° 42, Proceedings of the conference on Atmospheric electricity, AFCRC-TR-55-222, Portsmouth, NH, May 1954 (1955), p. 169].

Selon la deuxième classe de mécanismes, la charge initiale de l'espace et champs électrique, ne jouent aucun rôle dans le développement de l'électrification. Dans ces mécanismes, la polarité du processus de séparation des charges est déterminé par d'autres variables, telles que la phase, la concentration, la température, la taille, les caractéristiques de surface, ou la pureté des particules du nuage s'entrechoquant ou se brisant. Les mécanismes de ce type incluent ceux basés sur la fragmentation des gouttes [G.C. Simpson, Proc. R. Soc. London ser. A 114, 376 (1927)], glaçage de particules de glace [E.J. Workman et S.E. Reynolds, Phys. Rev. 78, 254 (1950)], et impacts de glace [A.J. Illingworth, J. Geophys. Res. 90, 6026 (1985)].

Les deux classes d'explication doivent aussi rendre compte des exceptions - comment est-il possible que occasionnellement un orage a une charge supérieure négative au lieu de positive. Avec les mécanismes de la première classe, un orage à polarité inverse pourrait se développer si l'air à partir duquel il se forme contient une charge d'espace négative au lieu de positive. Bien que ce soit peu commun, cela est parfois le cas dans les orages de poussière, sur les vagues d'eau douce se brisant, au dessus des chutes d'eau, et à proximité d'un autre nuage qui a déjà été électrisé. La polarité du processus de feed-back peut aussi être déterminée par d'autres facteurs tel que des champs électriques d'origine externe ou de champs développés dans le nuage par la chute de précipitations chargées.

Un nuage de polarité inverse pourrait se former avec la seconde classe de mécanismes si des changements se produisent dans les variables, tels que la population de particules du nuage, la température, ou la concentration d'impuretés, qui renversent la polarité de la charge acquise par précipitation. Saunders et al (1985), discutent d'une telle possibilité."

C'est donc dans le but de tester tout cela qu'ils ont fait leurs manipulations... :

p. 1414. "Les prédictions des mécanismes d'influence peuvent être testées en déterminant si l'incidence de nuages ayant des dipôles de polarité inverse est accrue si l'air duquel ils se forment est achalandé avec une charge d'espace négative. Une charge négative ou positive sous la forme d'ions peut être introduite dans l'atmosphère par des décharges corona d'un fil élevé qui est maintenu à un potentiel "d-c" élevé. Des quantités suffisamment grandes de charge d'espace négative peuvent être produites pour renverser la polarité de la charge d'espace et champs électrique pour des distances de jusqu'à quelques kilomètres sous le vent du fil."

Ils rapportent que cela a été fait dans les années 60 dans l'Illinois [au Sud des grands lacs] sur des cumulus de beau temps, avec des avions pour mesurer "Quand une charge positive était fournie, la partie supérieure du nuage devint positive, et la partie inférieure négative. Quand une charge négative était fournie, la partie supérieure du nuage devint négative et la partie supérieure positive. Évidemment, la charge transportée dans le nuage par les courants ascendants attirait l'autre signe de charge par conduction de l'atmosphère clair environnant. Cette charge était alors transportée par des courants descendants pour former le centre de charge dans la partie inférieure du nuage. Les intensités du champ électrique au dessus des nuages modifiés ont pu atteindre une valeur aussi grande que 400 V/m. Bien que ces champs soient plusieurs fois plus intenses que ceux produits par les nuages proches non affectés [donc dans cumulus de beau temps on a à peine 100V/m ?], ils étaient faibles par comparaison à ceux des orages. Ces expériences de l'Illinois ont montré que la polarité de l'électrification d'un cumulus de beau temps peut être déterminée par la polarité de la charge d'espace dans l'air duquel les nuages se forment."

Pour passer au stade de l'expérience sur orage, ils ont choisi le Langmuir laboratory dans les Magdalena Mountains près de Socorro, New Mexico [rocheuses orientales, pas loin du Mexique, il y a des montagnes à 3000 m dans le coin]. "La probabilité qu'un orage se forme dans cette zone est plus élevée qu'à la plupart des autres lieux. Parce que la vitesse du vent là est souvent basse, les nuages parfois se forment et se développent en un orage sans bouger de plus de quelques kilomètres... en été quand un nuage isolé près du Laboratory se développe et devient un orage, la partie basse du nuage invariablement porte une charge négative."

Déjà, ils donnent l'enregistrement du champ électrique d'un orage naturel (hors manip donc polarité normale, négative dans le bas du nuage et plusieurs éclairs qui ont abaissé la charge négative vers le

sol [to ground]), assez bref, le tout étant terminé en à peine 45mn, la phase des éclairs ayant duré 1/4 d'heure :

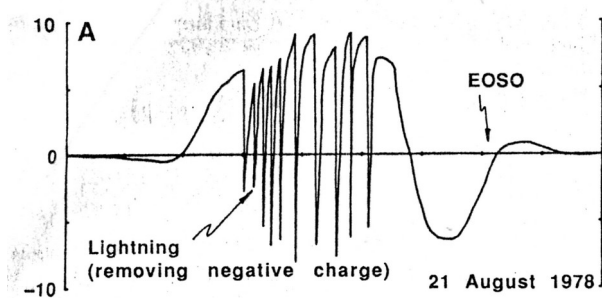


Fig. Champs électrique sous un orage de polarité normale. L'unité de l'ordonnée est kV/m (le «A» est pour la numérotation de la fig), la longueur totale en abscisse est 35 minutes. EOSO = End of Storm Oscillation.

La manip :

Il ont tendu un câble long de 2 km sur isolateurs entre deux pics, il se trouve 400 m au dessus du sol du canyon, et il relâche des ions négatifs par décharge corona quand porté à un potentiel négatif élevé avec un fournisseur de puissance "d-c". "Avec le vent habituel de quelques mètres/seconde, le flux de charge émise dans l'atmosphère était de l'ordre de 400 μ A quand le potentiel du fils était d'environ 120 kV.

"Chaque matin quand les nuages cumulus commençaient à se former sous l'influence du chauffage part le soleil, l'appareil était mis en opération. Une charge négative était relâchée du fil jusqu'à ce que les nuages proches étaient devenus si électrisés qu'ils menaçaient de produire des éclairs qui auraient pu endommager la source de puissance. Des mesures faites sous le vent ont montré, comme pour les expériences dans l'Illinois, que sous le panache de charge d'espace la polarité du champs électrique avait été renversée et son intensité s'était accru de 10 fois. La zone affectée par la fourniture de charge était petite, probablement pas plus que quelques kilomètres carrés. Comme les expériences l'ont montré, la charge fuit au sol à un taux déterminé par la constante de temps électrique de l'atmosphère ambiant. Prés du Langmuir Laboratory le temps de relaxation était de l'ordre de 3mn, aussi la charge fuyait si elle n'était pas transportée rapidement dans le nuage ou la constante de temps est beaucoup plus grande.

On a utilisé un réseau de 6 mesureurs de champs ("field meters") étendu le long de la ride montagneuse sur 2 km pour mesurer le champs électrique des orages. Les données de ces équipements ont été complétés par d'autres observations électriques qui incluait les changements de champs produits par les éclairs et des mesures faites par un avion instrumenté et un ballon libre portant une mesureur de champs électrique."

Toutes leur manips, au moins trois orages à proximité du fil ont donné des orages dipôle inverse, positif en bas, négatif en haut, c'est à dire inverse du champs de l'orage naturel reproduit ci-dessus, avec les éclairs abaissant la charge positive du bas du nuage !

p. 1416. "L'idée que le fils électrique alimenté par moins de 100 W pourrait influencer le développement d'un orage qui produit 100 MW peut à première vue mettre la crédulité à l'épreuve. Cependant, si l'électrification d'un orage est apportée par un processus de feed-back similaire à celui qui agit dans une machine d'influence de laboratoire, cette croissance des charges dans les orages peut raisonnablement être attendue. En décrivant ses expériences de laboratoire, Kélin [W. Thomson (Lord Kelvin), Proc. R. Soc. London 16, 67 (1867)], p. 69, écrivait : "il est curieux, après avoir commencé sans électricité en dehors d'une faible charge dans l'une des jars, qu'on ne peut découvrir avec un électromètre délicat, de voir en l'espace de quelques minutes un plutôt rapide succession d'étincelles passer dans des parties de l'appareil..". Juste comme son appareil alimenté avec une énergie mécanique était capable de multiplier "la faible charge dans la jar", jusqu'à ce que cela produise des étincelles, ainsi le nuage en croissance, alimenté en énergie de l'atmosphère devrait être capable, par induction électrostatique, de multiplier, soit la charge positive naturelle, ou une charge négative introduite artificiellement jusqu'à ce que le champs électrique résultant deviennent suffisamment intense pour produire des éclairs. Le processus électrique de beau temps, qui peut usuellement initier

l'électrification des orages, implique un courant de seulement $1\mu\text{A}$ et une puissance de $<1\text{ W}$ pour chaque kilomètre carré.

Que la charge relâchée du fil pourrait avoir influencé la polarité des charges bien plus grandes se formant plus tard dans l'orage, indique que le processus d'électrification peut être du type "feed-back" ou "d'influence". Il apparaît qu'en des occasions, il y a assez de charge négative issue du fil élevée dans le nuage pour contrebalancer les autres facteurs qui normalement déterminent la polarité électrique des orages."

5) Williams 1989

"L'électrisation des nuages" (ce qu'on en sait...)

p. 84. "La foudre... depuis que Benjamin Franklin [autodidacte] a démontré, il y a 200 ans, qu'il s'agissait d'une gigantesque décharge électrique... (...) En 1752, il observa que "les nuages d'une ondée orageuse sont le plus souvent dans un état d'électricité négative, mais parfois dans un état d'électricité positive". (...) depuis ces mots écrits par Benjamin Franklin, on admet que la foudre est un transfert de charges électriques, soit positives, soit négatives d'une région d'un nuage à une autre, ou entre le nuage et la Terre. Pour que ce transfert de charge ait lieu, il faut que le nuage soit électrisé, c'est à dire que les charges positives et négatives soient séparées. Comment les charges se séparent-elles ? (...)

Généralement la foudre résulte d'une différence de potentiel de plusieurs centaines de millions de volts, et peut transférer plus de 10 coulombs vers le sol; c'est la charge électrique que transportent 10^{20} électrons (le transport d'une charge d'un coulomb pendant une seconde est, par définition, un courant d'intensité d'un ampère). Une décharge de foudre constitue donc un courant bien supérieur à 10 ampères puisqu'il dure beaucoup moins d'une seconde. Les nuages orageux de taille moyenne produisent quelques éclairs par minute et quelques centaines de mégawatts..."

p. 85. "Après les observations de Benjamin Franklin, il était naturel de supposer que la répartition de charges dans les nuages pluvieux était conforme au modèle le plus simple qu'il soit possible d'imaginer : des charges positives s'accumuleraient dans une région du nuage et des charges se regroupaient dans une autre région, formant ce que l'on appelle un dipôle. Pour tenter d'expliquer cette structure dipolaire hypothétique des nuages orageux, les chercheurs ont invoqué deux modèles très différents : l'hypothèse de la précipitation et celle de la convection.

PRECIPITATION OU CONVECTION

L'hypothèse de la précipitation, proposée pour la première fois par les physiciens allemands Julius Elster et Hans Geitel en 1885, repose sur un phénomène que l'on observe en regardant fonctionner n'importe quel arroseur rotatif de jardin : les plus grosses gouttes d'eau tombent du jet d'eau, tandis qu'un brouillard des petites particules reste en suspension dans l'air, avant d'être balayé par le vent. De même, selon l'hypothèse de la précipitation, les gouttes de pluie, les grêlons et les particules de grésil (les grains de glace de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre, ou *graupel* en anglais) tombent d'un nuage par gravité vers le bas du nuage, sous les gouttes d'eau et les cristaux de glace de plus petite taille, qui restent en suspension. Les collisions entre les grosses particules et le brouillard de petites gouttes d'eau et de cristaux de glace seraient responsables de l'électrisation du nuage, les particules qui tombent acquérant une charge négative (tout comme ils produisent un transfert de charge du tapis sur les chaussures) tandis que, du fait de la conservation de la charge, le brouillard serait chargé positivement. Par conséquent, si les particules précipitantes se chargent négativement, une charge négative s'accumule dans la partie inférieure du nuage et une charge positive dans la partie supérieure (voir la figure... [c'est un peu comme les cristaux de chambre magmatique dans ma thèse]). On appelle dipôle positif une structure de charge dipolaire où la région positive se situe au-dessus de la région négative.

L'hypothèse de la convection, formulée indépendamment par Gaston Grenet, à Paris en 1947, et par Bernard Vonnegut, de l'Université d'Albany, en 1953, est un peu plus complexe. L'analogie est ici le fameux générateur de van de Graaff [une courroie transporte les charges positives qui s'accumulent à la surface d'une sphère métallique, par ex. [ici](#)]. Dans ce dispositif, une charge électrique positive ou négative est déposée sur une courroie mobile en caoutchouc qui transporte ensuite les particules chargées (les ions) vers une borne haute tension.

Selon le modèle de la convection, deux sources externes fournissent les charges électriques du nuage. La première est constituée par les rayons cosmiques, qui entrent en collision avec les molécules d'air situées au-dessus du nuage et les ionisent (c'est à dire séparent leur charges positives de leurs charges négatives). La seconde source est le champ électrique intense au voisinage des objets pointus à la surface de la Terre, qui produit une "décharge corona" d'ions positifs : quand le potentiel de l'objet pointu est suffisant, un champ électrique intense peu produire l'excitation et l'ionisation des molécules d'air avoisinant. Ces ions positifs sont entraînés par l'air chaud qui, s'élevant par convection, agit comme la courroie du générateur de van de Graaff. Lorsqu'ils ont atteint les régions supérieures du nuage, ces ions positifs attirent les ions négatifs formés par les rayons cosmiques au dessus de ce nuage. Les ions négatifs pénètrent dans le nuage et se fixent aux gouttes d'eau et aux cristaux de glace, formant ainsi une "couche écran" chargée négativement. Les courants d'air descendant de la périphérie du nuage entraînant ensuite les charges négatives de la couche écran vers le bas, où ils constituent là encore une structure dipolaire positive.

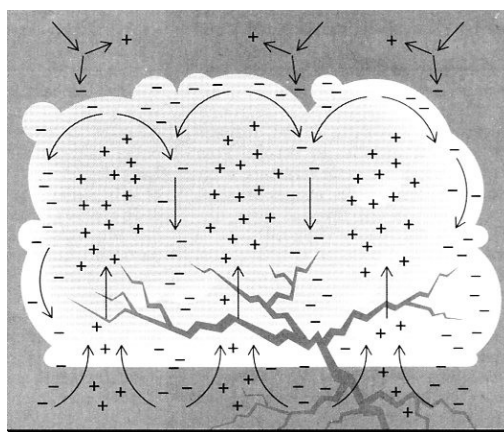


Fig. « Selon le modèle convectif, des courants d'air chaud transportent jusqu'au sommet du nuage des charges positives libérées à la surface de la terre. Les charges négatives, produites par les rayons cosmiques au dessus du nuage, sont attirés à la surface du nuage par les charges positives qu'il contient. Là elles se fixent aux particules du nuages pour former une "couche écran" négative. Enfin les courants descendants transportent les charges négatives vers le bas du nuage; il en résulte à nouveau un dipôle positif. »

Bien que l'on observe les phénomènes de précipitation et de convection dans tous les nuages produisant des éclairs (et de fait ces deux phénomènes ne se manifestent pas l'un sans l'autre dans les nuages de grande taille), l'hypothèse de la précipitation et le phénomène de la convection sont indépendants."

p. 87. "Dans les années 1920, Wilson (l'inventeur de la "chambre de Wilson") observa à distance un certain nombre d'orages et en conclut que la structure fondamentale d'un nuage orageux était celle d'un dipôle positif. A peu près à la même époque, Simpson, mesurant la charge des précipitations pluvieuses d'un nuage orageux, abouti à la conclusion inverse : selon lui, la région la plus basse d'un nuage orageux était chargée positivement tandis que la région supérieure était chargée négativement; il s'agissait donc d'un dipôle négatif." (...)

"L'un comme l'autre, Wilson et Simpson n'avaient fait des mesures que dans une seule position, ce qui est notoirement insuffisant.

Depuis la controverse entre Wilson et Simpson, un demi siècle supplémentaire d'observation a établi que la structure fondamentale d'un nuage orageux n'était pas dipolaire, mais tripolaire : une région principale de charges négative, au centre du nuage, est entourée d'une région de charge positive, au dessus d'elle, et d'une seconde région de charge positive plus petite, au dessous d'elle :

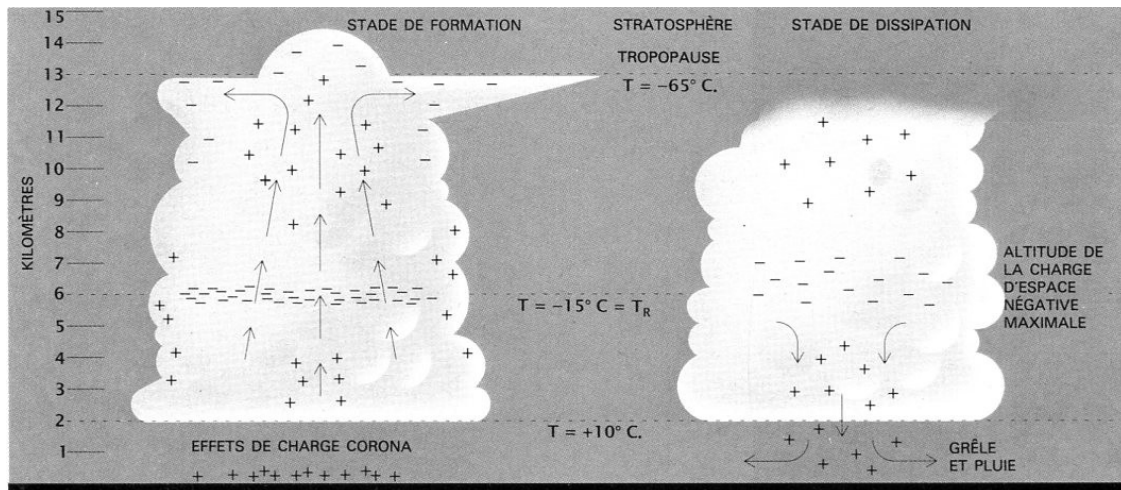


Fig. "La structure réelle des nuages n'est pas dipolaire mais tripolaire, avec une région principale négative prise en sandwich entre deux régions positives. L'altitude de la région négative principale d'un nuage orageux (à gauche) est à environ six kilomètres du sol, et sa température avoisine -15°C . Elle n'est épaisse que de quelques centaines de mètres, ce qui lui donne une forme de galette. La région positive supérieure s'étend souvent jusqu'à la tropopause, à une altitude d'environ 13 kilomètres. Tout à fait au sommet du nuage, une mince couche négative, la "couche écran", est probablement due aux rayons cosmiques qui ionisent les molécules d'air. Une seconde région de charge positive, plus petite que la première, occupe la base du nuage. Normalement les courants ascendants (flèches) dominent dans un nuage orageux, mais lorsque celui-ci se dissipe (à droite), la région positive inférieure précipite avec de violents courants descendants. Le modèle de la précipitation n'explique pas la structure tripolaire des nuages orageux; le modèle de la convection en rend compte : il attribue la région positive inférieure à la "décharge corona" des objets pointus présents à la surface de la Terre."

p. 87-88. "La caractéristique la plus remarquable de la couche négative principale est sa forme en galette : épaisse de moins d'un kilomètre, elle s'étend parfois horizontalement sur plusieurs kilomètres; elle est située à une altitude d'environ six kilomètres, où la température est voisine de -15°C . Dans cette zone, les trois phases de l'eau - glace, liquide, vapeur - coexistent. Les champs électriques les plus intenses dans le nuage règnent aux frontières supérieure et inférieure de cette couche négative principale. La densité de la charge positive dans la région supérieure de charge positive est inférieure à la densité de charge dans la couche négative : elle peut s'étendre verticalement sur plusieurs kilomètres, aussi haut que le nuage lui-même. En revanche, la région inférieure de charge électrique à la surface de la Terre est fréquemment dominée par la charge négative principale. Certains nuages présentent une autre caractéristique : une seconde couche de charge négative, d'une centaine de mètres d'épaisseur, surplombe la région supérieure de charge positive. Cette couche peut résulter des ions négatifs produits au dessus et à l'extérieur du nuage, puis fixés sur les gouttelettes d'eau et les particules de glace du nuage; c'est la couche écran prévue dans l'hypothèse de la convection. Cependant, quelle que soit son origine, la couche écran semble être une caractéristique secondaire qui ne modifie pas de façon notable la structure tripolaire, fondamentale, du nuage."

Ainsi de loin, Wilson ne voyait qu'un dipôle positif alors que Simpson mesurait la charge positive juste au dessus de lui.

Des mesures récentes ont montré que le flux de charges positives vers la base du nuage par décharge corona est d'un ordre de grandeur trop faible pour expliquer le taux de charge du nuage. "Le modèle convectif est, en partie pour cette raison, délaissé; on tente aujourd'hui d'améliorer le modèle de la précipitation." (p. 88). Avec le modèle de la précipitation, il a été argumenté que le fractionnement des grosses gouttes d'eau donnait la charge positive inférieure, mais la charge positive qui résulte de cette fragmentation mesurée dans les chutes d'eau n'est pas suffisante pour expliquer celle mesurée dans les orages.

p. 89. "... les **collisions entre les cristaux de glace et les particules de grésil** (grains de glace) jouent manifestement un rôle fondamental. Au cours de ces 20 dernières années de nombreux chercheurs, notamment Stephen Reynolds, Marx Brook et leurs collaborateurs du New Mexico Institute of Mining

and Technology, Tsutomu Takahashi, de l'Université de Hawaï à Manoa, Clive Saunders, John Latham et Anthony Illingworth, de l'Université Victoria, à Manchester, ont montré que lorsque des particules de grésil entrent en collision avec les cristaux de glace, la polarité de la charge transférée aux particules de grésil dépend de la température. Au-dessous d'une température critique, appelée température d'inversion de charge, c'est une charge négative qui est transférée; aux températures supérieures (correspondant à des altitudes inférieures dans le nuage), la charge transférée est positive... La valeur exacte de la température d'inversion de charge est encore débattue, mais la plupart des chercheurs s'accordent à la situer entre -20 et -10°C.

Diverses observations des nuages ont déterminé que la couche principale chargée négativement se trouve à une altitude où règne une température d'environ -15°C. L'hypothèse de l'inversion de charge explique pourquoi l'on trouve moins souvent de charges négatives au-dessous de cette altitude : les particules de grésil acquièrent une charge positive en tombant et en se heurtant aux cristaux de glace en suspension dans l'air; ces charges positives forment la région positive inférieure du tripôle. De plus, la quantité de transfert de charge par collision mesurée au laboratoire est suffisante pour rendre compte de la charge transférée par les éclairs dans les nuages d'activité moyenne. La détermination d'une température d'inversion de charge en accord avec les résultats des expériences de laboratoire et avec les observations des nuages constitue le progrès le plus décisif de ces 20 dernières années dans la compréhension des phénomènes électriques orageux."

MAIS la physique fondamentale de l'électricité par frottement, comme un bâton de verre sur un chiffon de laine "*reste à ce jour un mystère que l'on a pas encore percé*" !!!! donc on est coincé aussi pour comprendre l'électricité orageuse !

p. 90. "LA CONVECTION. Même si le modèle convectif ne permet apparemment pas de rendre compte de l'importance de la région positive inférieure, il est manifeste que les orages sont le siège de puissants courants d'air ascendants et descendants; il se produit indiscutablement un phénomène de convection. On a également observé que les fréquences maximales d'éclairs étaient liées au mouvement ascendant des particules de grésil au-dessus de la région négative principale : ces faits combattent l'hypothèse naïve de la précipitation, selon laquelle l'électrisation n'est due qu'à la chute des particules de grésil. C'est probablement le mouvement relatif des cristaux de glace par rapport aux particules qui crée des distances importantes entre les charges. Pour cela, il faut que les cristaux de glace s'élèvent, par rapport à la Terre, plus rapidement que les particules de grésil; cela équivaut à une chute relative des particules. Par ailleurs, les courants ascendants ne sont pas seulement compatibles avec l'électrisation, il en sont aussi une condition essentielle : ils alimentent la réserve de gouttes d'eau surfondue au-dessus de l'altitude d'inversion de charge. Ces gouttes d'eau assurent la croissance des particules de grésil responsable de l'électrisation, et, selon les expériences de laboratoire mentionnées précédemment, leur présence est indispensable pour le transfert de charge entre particules de grésil et cristaux de glace.

Ces dix dernières années, les courants descendants des orages ont constitué une préoccupation croissantes pour la sécurité de la navigation aérienne. On pense que des courants descendants inhabituellement violents appelés *microbursts* par Tetsuya Fujita, de l'Université de Chicago, ont été la cause de plusieurs désastres aériens. Selon des études récentes d'orages stationnaires, ces courants descendants suivent de cinq à dix minutes la période de courant ascendant maximal et d'activité électrique intranuageuse maximale; les courants descendants sont également liés à une forte précipitation, consécutive à la disparition du courant ascendant.

Les mesures montrent également qu'à cet instant la direction du champ électrique au sol s'inverse; le champ n'est plus dirigé vers le haut, mais vers le bas. Les précipitations sont chargées positivement, ce qui indique que la région inférieure de charge positive est conduite vers le sol pendant la phase de *microburst* du courant d'air descendant... (...) Étant donné que ces puissants courants de convection sont caractéristiques des orages, le modèle convectif devrait expliquer certains aspects de l'électrisation des nuages. Comme nous l'avons déjà vu, ce modèle prédit effectivement l'existence d'une couche écran.

C'est pour cette raison que certains chercheurs, dont Charles Moore, de l'Institut de technologie du Nouveau Mexique et B. Vonnegut, ont continué à l'étudier. Leurs expériences consistaient à électriser l'air situé sous un cumulus de beau temps à l'aide d'un fil électrique relié à une borne à haute tension. Les observations effectuées à bord d'un avion ont montré que la charge libérée par la décharge corona

du fil était entraînée à travers le nuage par des mouvements atmosphérique convectifs. De plus, lorsque la charge émise était positive, le sommet du nuage se chargeait positivement et la base du nuage négativement : ainsi un dipôle positif se formait. Cependant lorsque la polarité de la charge émise par la source était inversée, et devenait donc négative, le nuage prenait alors une structure de dipôle négatif. Ces résultats indiquaient que la charge était conduite par convection vers le sommet du nuage.". Mais... on est là avec un champs électrique plus d'un millier de fois inférieur à celui nécessaire pour le déclenchement d'un éclair donc ça ne prouve pas grand chose. De plus le modèle convectif n'explique pas du tout la forme de galette de la zone négative. Il conclue qu'il faudra probablement combiner les meilleurs aspects des deux modèles.

p. 91. "LES ECLAIRS. Quand la charge du nuage est suffisamment importante pour que le champs électrique dépasse la rigidité diélectrique locale de l'atmosphère... l'éclair jaillit. Au moment de la décharge, le champs électrique est de l'ordre d'un million de volts par mètre et, en moins d'une seconde, la foudre transfère la charge de 10^{20} électrons... Durant cette fraction de secondes, l'énergie électrostatique de la charge accumulée est transformée en énergie électromagnétique (le phénomène lumineux et des rayonnements), en énergie acoustique (tonnerre) et enfin en chaleur."

p. 92. "Presque tous les éclairs naturels commencent à l'intérieur du nuage et se développent comme des arbres "à deux têtes", dont l'une se fiche dans les régions de charge négative et l'autre dans les régions de charge positive. Dans le cas d'une décharge du nuage vers la Terre, l'extrémité négative de l'arbre devient une prédécharge qui progresse par bon et qui conduit un courant négatif de quelques centaines d'ampères vers la Terre. Lorsque la prédécharge est à une centaine de mètres du sol, il se produit un coup en retour, qui renvoie vers le nuage un courant d'une dizaine de kiloampères, soit une charge de 10 000 coulombs de charge positive par seconde. C'est ce coup en retour lumineux que l'on voit : **lorsque l'on parle d'éclair partant d'un nuage vers le sol, il faut conserver présent à l'esprit que l'éclair se propage dans les deux sens, quelque fois plusieurs douzaines de fois** (voir Le tonnerre, par Arthur Few, Les phénomènes naturels, Bibliothèque Pour la Science)."

(...) "Lors d'études récentes, on a utilisé des radars, des radiogoniomètres et des microphones afin de déterminer la trajectoire des éclairs et de la relier à la structure des nuages. On observe des éclairs à la fois dans des régions où il y a précipitation et dans des régions sans précipitation, à l'intérieur et à l'extérieur des nuages, et leur trajectoires semblent chaotiques."

p. 94. "... c'est essentiellement la répartition de charge qui détermine la trajectoire des éclairs.

On pense que la plus grande partie de l'énergie électrique des orages est libérée sous forme d'éclairs : un orage de force moyenne engendre quelques éclairs par minute, et la puissance produite est à peu près équivalente à celle d'une petite centrale nucléaire. Quelques règles simples de calcul fondées sur les équations de l'électromagnétisme montrent que la puissance débitée est approximativement proportionnelle à la puissance cinquième de la taille du nuage : le doublement des dimensions du nuage multiplie environ par 30 la puissance émise. les orages plus importants peuvent produire jusqu'à plus d'une centaine d'éclairs par minute."

p. 94. ""Rien ne se perd, rien ne se crée" : l'énergie électrique libérée sous forme d'éclairs doit venir de quelque part. A l'origine, elle dérive de la chaleur qui détend la vapeur d'eau jusqu'à ce que sa densité soit inférieure à celle de l'air, ce qui fait qu'elle s'élève [note perso : en réalité le poids molaire de la molécule d'eau, H₂O est inférieur à celui de l'air, N₂ et O₂ ! et elle ne représente que quelque %, c'est tout l'air chaud qui monte !]. En montant, la vapeur d'eau se condense et ou gèle; la chaleur latente est libérée, et l'eau ou la glace commencent à tomber.

Selon le modèle de la précipitation, c'est l'énergie potentielle de gravitation libérée par leur chute qui électrifie le nuage; cette énergie potentielle de gravitation est le produit de la force gravitationnelle par la hauteur de chute et la masse déplacée. En fait, d'après les mesures radar de la pluie et des particules de grésil, cette énergie gravitationnelle est, pour des orages de moyenne importance, bien supérieure à l'énergie électrique libérée par les éclairs. Dans le cas des orages extrêmement actifs, caractérisés par une énergie électrique beaucoup plus élevée (supérieure de plusieurs ordres de grandeur), on estime que l'énergie gravitationnelle et l'énergie électrique sont quasi égales.

En vertu du principe de conservation de l'énergie, la vitesse de chute de la précipitation devrait sensiblement augmenter au moment d'une décharge, lorsque les forces électriques diminuent soudainement : les tentatives pour évaluer ce phénomène à l'aide d'un radar Doppler, qui mesure la

vitesse des objets en mouvement, sont pour l'instant restées infructueuses. On ne sait encore expliquer de façon satisfaisante l'absence de "sautes" de vitesse, mais il est possible que les turbulences des orages les masquent."

6) Biémont 1997

chap. II, "Electrométéore : Les orages et la foudre"

p. 90 : "Les décharges intra- et inter-nuages sont nettement plus fréquentes que les coups de foudre. dans les régions tempérées, ce rapport est de l'ordre de 3 à 1 tandis que dans les régions tropicales, il atteint 6."

p. 90-1. "Les nuages orageux sont de type cumulo-nimbus. Leur épaisseur atteint généralement plusieurs kilomètres et leur sommet peut se situer à environ 15 000 m d'altitude. La partie supérieure comporte des particules de glace et la région inférieure est formée de gouttes d'eau. Suite à différents mécanismes assez complexes, un processus de séparation des charges intervient, les charges négatives se regroupant dans la partie inférieure et les charges positives dans la partie supérieure. Le nuage orageux constitue alors un énorme dipôle engendrant des champs électriques entre sa base et la surface terrestre. Suite à la présence des charges nuageuses, le champ terrestre, qui est généralement faible, c'est-à-dire de l'ordre de 100 à 150 V. m⁻¹ en terrain plat, augmente et s'inverse jusqu'à atteindre - 15 000 V. m⁻¹. Lorsque l'intensité du champ est suffisante, par *effet de couronne*, la foudre éclate... Celle-ci est cependant précédée d'une prédécharge peu lumineuse appelée *traceur* (*leader*, en anglais) qui progresse dans l'air à une vitesse faible. Ce traceur se ramifie et donne lieu à la formation d'arborescences. Il peut émerger des nuages en direction du sol (coup de foudre descendant) ou, en sens contraire, partir du sol en direction des nuages (coup de foudre ascendant). Le canal ainsi formé entre le nuage et le sol est peu ionisé et ouvre en fait la voie à la décharge extrêmement intense que constitue la foudre. Le coup de foudre descendant est le plus fréquent. On distingue, en outre, le coup positif ou le coup négatif selon que la partie positive ou la zone négative du nuage se décharge. (...)

"Les aspérités du sol, les tours élevées ou les sommets montagneux notamment, peuvent accumuler, par effet d'induction, des charges positives. Si le champ est suffisamment intense, un traceur ascendant se développe en direction du nuage anticipant un coup de foudre ascendant. La vitesse du traceur est de l'ordre de 0,2 à 1 m.μs⁻¹. Dans le cas du coup de foudre descendant négatif, le traceur progresse en direction du sol par bonds successifs avec des temps d'arrêt de 50 à 100 ms (*stepped leader*)... Lorsque les traceurs ascendants, issus d'une aspérité, et descendants, émergeant des nuages, se rejoignent, un courant à forte intensité s'établit. Un éclair lumineux se propage du sol en direction du nuage : c'est l'*arc en retour* (*return stroke*). Un coup de foudre (p. 92 :) peut comporter plusieurs arcs en retour, les décharges subséquentes étant précédées d'un traceur plus rapide appelé le *trait pilote* (*dart leader*). Dans le cas d'un coup de foudre descendant positif, la progression du traceur se fait de façon continue plutôt que par bonds."

p. 96. "Dans le cas des coups de foudre négatifs, l'amplitude des courants, de nature impulsionnelle, comporte, pour la première décharge, un temps de montée généralement compris entre 2 et 20 μs et une durée de décroissance oscillant entre 100 et 200 μs. Les intensités peuvent s'étaler entre quelques milliers et plusieurs centaines de milliers d'ampères. Lors des coups subséquents, les temps de montée sont beaucoup plus courts (inférieurs à la microseconde) et les intensités plus faibles (quelques milliers d'ampères). Les coups de foudre positifs comportent une seule impulsion d'intensité généralement supérieure à celle des coups négatifs."

p. 96. "Lorsque l'arc en retour s'écoule le long du traceur (canal ionisé), il y a déclenchement d'un énorme arc électrique et production de lumière. Suite à des effets d'origine électrodynamique, on observe la formation d'une onde de choc qui se transforme en onde sonore. C'est le *coup de tonnerre*. Vu le trajet en zig-zag de la foudre, et selon l'orientation des segments du canal par rapport à l'observateur, le tonnerre sera perçu soit comme un bruit sourd, soit comme un claquement plus sec. (...)

p. 97. "La perception à distance ne dépasse pas cependant la dizaine de kilomètres (soit un décalage d'une trentaine de seconde)."

p. 97. "Des études spectrales de la foudre ont été réalisées dès le début du XX^e siècle. Les spectres révèlent la présence de la molécule N₂, de l'ion moléculaire N₂⁺ mais également de certaines transitions

des atomes d'oxygène et d'azote neutres et ionisés : NI, OI, NII, OII. On a identifié aussi des transitions de ArI et Cl, dans l'infrarouge, ainsi que des bandes moléculaires attribuées à OH, NH et NO."

p. 97 "Effet électromagnétiques - Des ondes électromagnétiques sont associées à l'activité électrique des nuages orageux. Elles se manifestent surtout à l'écoute des grandes ondes et des ondes moyennes par des craquements qui affectent la réception radio par temps d'orage.

Rappel : les ondes radio "moyennes" = "AM" (amplitude modulation) vont de 1,7 MHz à 522 kHz (λ , longueur d'onde, de 180 à 575 m), ainsi j'ai la BBC à "648" et Radio chine internationale à "1440" (donc kHz), un poste de radio allant de "522" à "1611" en "AM". Les ondes longues vont de 522 à 100 kHz (λ , longueur d'onde, de 575 m à 3 km).

Elles affectent peu la modulation de fréquence [ondes ultra courtes : 37,5 à 108 MHz] et la télévision [il y a plusieurs bandes entre 30 et 300 MHz, on est donc dans ces deux cas à des fréquences plus hautes]. Ceci résulte du fait que l'intensité du spectre des radiations électromagnétiques diminue en raison inverse de la fréquence (*spectre de Pierce*)."

p. 97. "... la foudre cherche systématiquement, pour s'écouler vers la terre, la voie de moindre résistance."

p. 97. "Le contact de la foudre et des sols sablonneux peut engendrer la vitrification de la silice suite à la forte chaleur dégagée au point d'impact : on obtient dans ce cas, la formation de *fulgurites*."

p. 98. "... actuellement, en moyenne, de 20 à 40 personnes sont encore foudroyées chaque année sur le territoire français."

p. 98-9. "Les feux Saint-Elme. On désigne de cette manière des phénomènes, d'origine électrique, précurseurs d'un orage. ils sont constitués d'aigrettes lumineuses ou d'effluves apparaissant à l'extrémité du mât de navires ou du piolet des alpinistes - de façon générale, aux pointes d'objets métalliques - et engendrés par l'électricité atmosphérique. Ils sont accompagnés d'un grésillement caractéristique et sont annonceurs de la foudre, ce que n'ignorent pas les marins et les alpinistes... (...) L'explication des feux Saint-Elme est maintenant bien connue. En accord avec les lois de l'électrostatique, un renforcement du champ électrique, suite à une concentration plus élevée des lignes de forces à proximité d'une aspérité ou d'un objet pointu est bien établi. On sait d'autre part que, pour provoquer un processus d'ionisation et des avalanches électroniques dans l'air atmosphérique à une pression normale, il faut un champs électrique de l'ordre de $30\,000\text{ V. cm}^{-1}$. Suite au renforcement dont il vient d'être question, un champ atteignant cette valeur peut aisément être produit à proximité d'une pointe même si le champs ambiant est beaucoup moindre. C'est l'*effet de couronne* ou le pouvoir des pointes déjà mentionné plus haut. Les avalanches se manifestent par des effluves de couleur bleuâtre qui peuvent atteindre quelques centimètres, voire dan certains cas, quelques décimètres. Le champs électrique peut également engendrer des forces électrostatiques à la surface des corps avec la conséquence que, si de telles forces s'appliquent à l'être humain, elles peuvent produire quelquefois des effets inattendus (cheveux dressés, baisers électriques, etc.)."

7) Few 1985 "Le tonnerre"

p. 32. "On proposa essentiellement quatre théories qui soulevèrent de violentes controverses pendant la première décennie du XX^e siècle (en 1903, quatre articles sur la nature et la cause du tonnerre furent publiés dans *Scientific american*).

La première de ces théories soutenait que la foudre créerait un vide et que le tonnerre résulterait du comblement de ce vide par l'air environnant. La deuxième hypothèse invoquait les gouttes d'eau présentes sur le passage de l'éclair; elles seraient vaporisées et l'expansion rapide de la vapeur d'eau produirait un bruit intense. Selon la troisième hypothèse, la décharge électrique décomposerait les molécules d'eau par électrolyse, puis l'hydrogène et l'oxygène ainsi formés se recombineraient de façon explosive. Enfin, la quatrième explication, la plus simple, attribue le tonnerre à au brusque échauffement de l'air sur le passage de l'éclair : en raison de sa résistance électrique, l'air serait chauffé comme un filament par le passage du courant et l'expansion de l'air chaud serait suffisante pour engendrer le tonnerre.

On sait maintenant que cette dernière interprétation est la bonne : le courant électrique chauffe l'air sur son passage, donnant ainsi naissance à un canal d'air dans lequel la température et la pression sont très élevées. L'air contenu dans ce canal se répand dans l'atmosphère environnante en produisant une **onde de choc qui**, après avoir parcouru une courte distance, **se transforme en onde acoustique** : le tonnerre.

Les autres théories n'étaient pas toutes dépourvues de fondement. Ainsi, pendant un temps très bref, une région d'air raréfié se forme effectivement sur le passage de l'éclair; cependant ce vide partiel est plus un effet qu'une cause du tonnerre. De même, les gouttes d'eau sont effectivement vaporisées [explosion vapeur...] dans le canal de l'éclair et les molécules d'eau décomposées. L'étude du spectre optique de l'éclair met parfaitement en évidence cette décomposition : l'une des caractéristiques les plus remarquables de ce spectre est la présence d'une raie d'émission de l'hydrogène. mais ce ne sont là que des effets secondaires de la foudre et qui ne contribuent pas notablement à la formation du tonnerre.

La nature du tonnerre, si ardemment discutée au début de notre siècle, n'intéressa ensuite plus personne pendant une cinquantaine d'années."

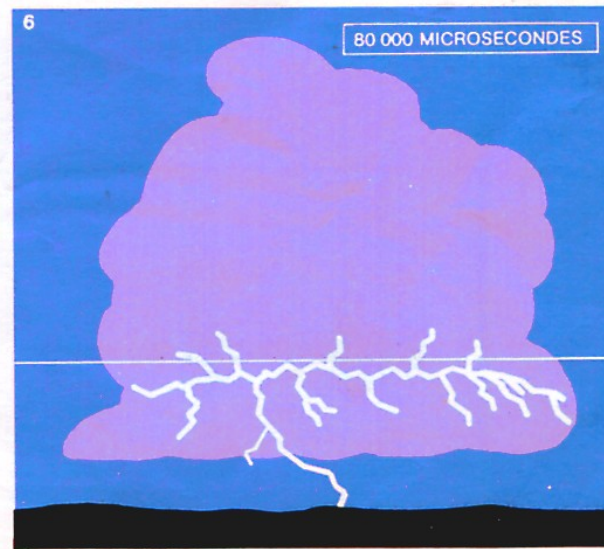
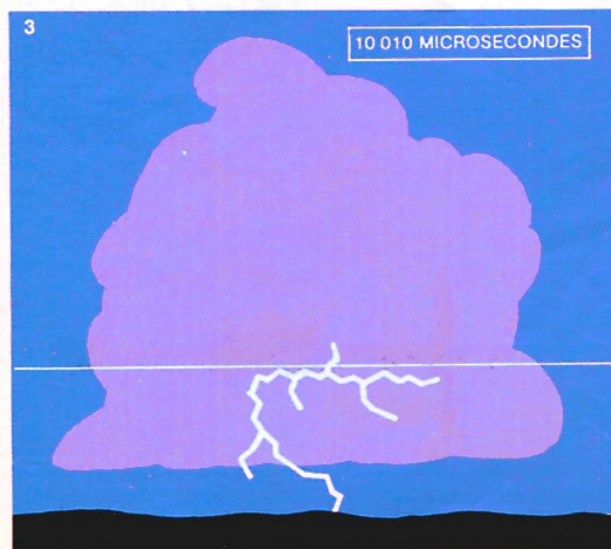
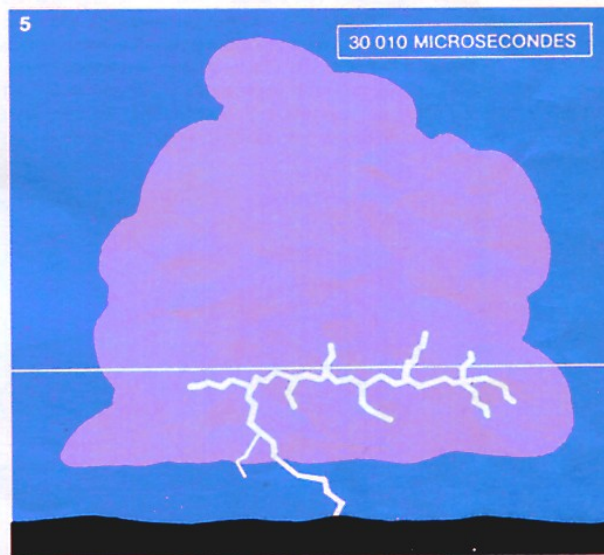
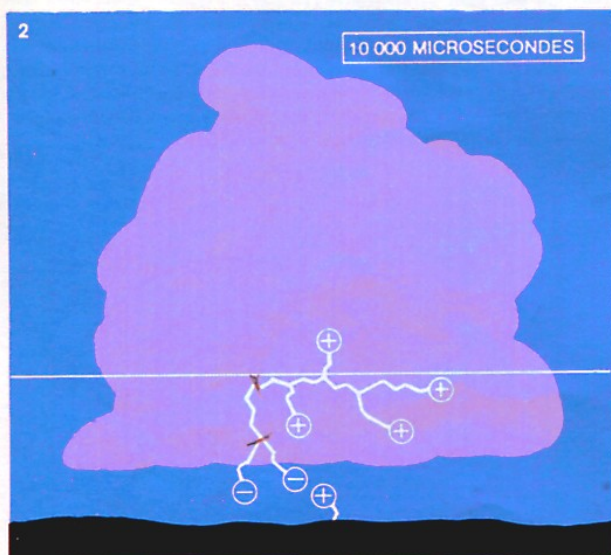
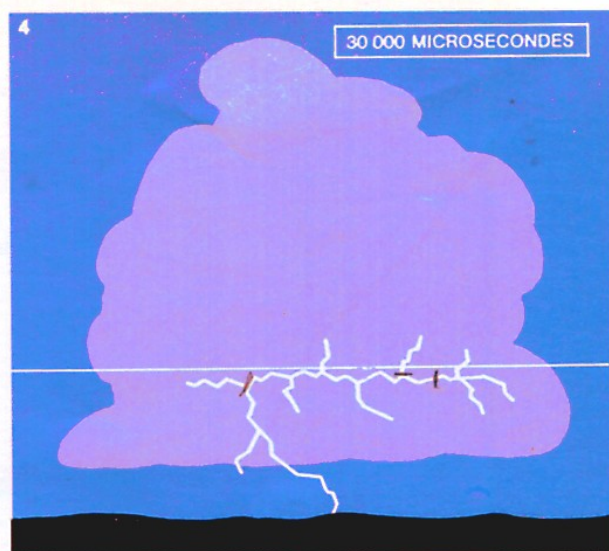
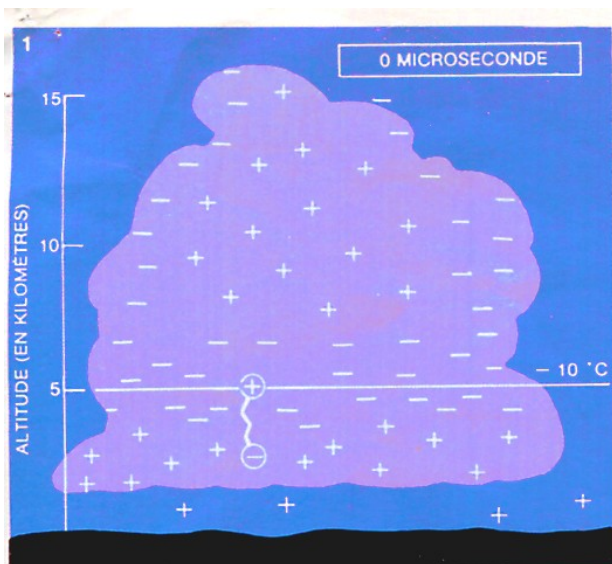
p. 33. "Un éclair prend généralement naissance près de la base d'un nuage, dans une région riche en charges négatives. Cette couche se trouve à une altitude d'environ cinq kilomètres, dans une zone où la température avoisine - 10° Celsius. C'est dans cette région du nuage que les gouttelettes d'eau gèlent; on peut relier ce phénomène à l'apparition des charges électriques.

Si la base du nuage chargée négativement peut atteindre un potentiel de 300 millions de volts, cet énorme potentiel est encore insuffisant pour permettre le déclenchement spontané d'**un arc électrique** à travers une couche d'air de cinq kilomètres. La décharge principale ne peut pas s'amorcer tant qu'une première décharge de faible intensité, appelée "**traceur par bonds**" n'a pas tracé le canal. Cette première décharge commence à se former quand les électrons émis par les gouttelettes en train de geler [??] sont accélérés sous l'effet du champ électrique intense. Ces électrons entrent en collision avec des molécules d'air qui émettent alors un grand nombre d'électrons secondaires, ouvrant un chemin conducteur d'air partiellement ionisé. Cette cascade d'électrons accélérés ne progresse que par sauts de 50 à 100 mètres; cependant, à chaque bond, une partie de la charge du nuage est transférée vers le bas, si bien que l'étape suivante commence directement à partir de l'extrémité avancée du traceur.

Le chemin suivi par le traceur par bonds est très irrégulier. Pendant sa progression vers le sol, il donne naissance à de nombreuses ramifications. Chaque bond s'accomplit en moins d'une microseconde et est séparé du suivant par un temps d'arrêt d'une cinquantaine de microsecondes. Au fur et à mesure que le traceur s'approche du sol, le gradient de potentiel (c'est-à-dire le champ électrique en volts par mètre) augmente et des étincelles jaillissent à partir d'objets ou de constructions situées au sol (généralement à partir de points hauts, par exemple les clochers d'église). Dès qu'une de ces étincelles (ou décharge de capture) rencontre le traceur par bonds, un chemin conducteur est tracé entre le nuage et le sol. Comme la différence de potentiel le long de ce chemin atteint quelques centaines de millions de volts, il s'écoule **aussitôt un courant** d'une intensité considérable, appelé premier **trait retour**.

Le traceur par bonds peut mettre 20 millisecondes pour conduire le courant vers le sol, mais le trait retour ne dure que quelques dixièmes de microsecondes. Quelque fois, cela marque la fin de l'éclair; mais le plus souvent, le processus traceur-trait se répète dans le même canal à des intervalles de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de millisecondes. Les traceurs qui suivent, appelés traits flèches, progressent plus vite et avec moins d'à-coups que le traceur par bonds, puisque la résistance électrique le long du trajet suivi est moindre que celle de l'air environnant. Au fur et à mesure que le trait flèche avance vers le sol, les processus intranuageux augmentent l'étendue du canal si bien que de nouvelles régions se déchargent."...

Fig. ci-dessous ↓ LE CANAL D'UN ÉCLAIR se développe à partir d'une région riche en charges négatives, située à la base d'un nuage (dans la zone où les gouttelettes d'eau se transforment en glace). L'éclair commence par la formation d'un traceur par bonds qui descend par étapes de 50 à 100 mètres tout en étendant des ramifications horizontales à travers la région chargée du nuage. Quand le traceur s'approche du sol, des étincelles (ou décharges de capture) montent vers lui. Dès qu'il y a rencontre, la voie conductrice est tracée; elle permet alors le passage d'un courant intense qui constitue le premier trait de retour. D'autres traceurs appelés traits-flèches et progressant beaucoup plus vite, étendent le canal à d'autres parties du nuage; chacun d'eux est suivi d'un trait de retour. Pour l'essentiel, le canal est horizontal et on n'en voit qu'une petite fraction sous le nuage. Chaque traceur et chaque trait chauffent le gaz qui se trouve sur le trajet de l'éclair, ce qui renforce l'intensité du tonnerre.



"Dans un éclair, **chaque onde de courant** (décharges du traceur par bonds, traits flèches et traits en retour) chauffe le gaz contenu dans le canal, ce qui engendre un signal acoustique. L'amplitude et la durée de ce signal dépendent de l'intensité du courant... Habituellement, il est impossible de distinguer, dans un enregistrement du tonnerre, les impulsions acoustiques dues à chacun des traceurs ou des traits; (...) La morphologie de l'éclair influence beaucoup plus le tonnerre que la succession chronologique des événements électriques. Le canal d'éclair décrit un trajet sinueux composés de segments droits séparés par des coudes aigus."

p. 34. "On peut considérer l'ensemble du canal comme un chapelet de perles, chaque perle étant un segment mésosinueux qui rayonne une série d'impulsion électriques constituant l'éclair."

"La vibration sonore responsable du tonnerre prend naissance dans un canal de gaz chauds, à haute pression. Grâce aux mesures spectroscopiques, nous savons que **les températures dans ce canal peuvent atteindre 30 000°C et la pression varier entre 10 et 100 atmosphères**. Tout d'abord, la zone central, à haute pression se dilate comme une onde de choc. **A la différence d'une onde acoustique, une onde de choc comprime et chauffe le milieu dans lequel elle se propage, ce qui augmente localement la vitesse du son. Puisque cette dernière croît avec la température, l'onde de choc se déplace plus vite que le son dans le même milieu.** Les taux de compression et de chauffage et, par conséquent, l'augmentation de la vitesse du son, dépendent de l'amplitude de l'onde de choc. Derrière elle, l'air continue à se déplacer et il se forme un région de basse pression.

En se détendant, **l'onde de choc perd de l'énergie et elle fournit du travail à l'air environnant**. Quant l'éclair a communiqué toute son énergie à l'onde de choc, celle-ci se relaxe et la pression au voisinage du canal redevient normale; la zone centrale du canal reste cependant une région de haute température et de [donc de ?] faible densité [et de composition chimique différente ce changement ayant prélevé une autre partie de l'énergie]. Si l'on connaît la pression ambiante et l'énergie de l'éclair par unité de longueur, on peut calculer la distance de relaxation de l'onde de choc. Ce rayon de relaxation détermine à son tour la longueur d'onde du signal acoustique du tonnerre. En conséquence, cette longueur d'onde (ou la "hauteur" du son) dépend de l'énergie de l'éclair et de la pression atmosphérique ambiante dans la région où le tonnerre prend naissance : plus l'éclair est énergétique ou plus la pression atmosphérique est basse, plus la **fréquence** [ν , hertz, s^{-1}] **du tonnerre est basse. La valeur moyenne se situe aux alentours de 60 hertz .**" [voie humaine : 100 à 1500 Hz; ligne haute tension 50 Hz, traction électrique chemin de fer : 16 Hz; donc, plus la puissance est élevée, plus le son est grave].

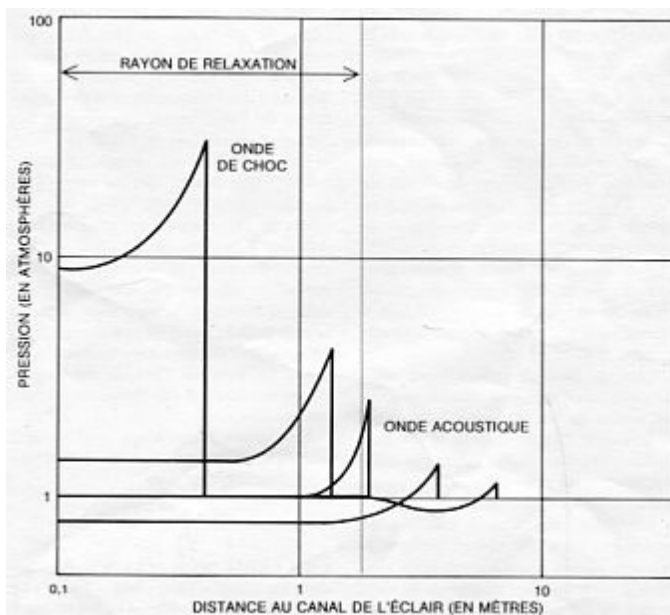


Fig. « UN CANAL DE GAZ chaud en expansion, produit par un éclair, se propage d'abord sous forme d'une onde de choc, puis d'une vibration acoustique : le tonnerre. Comme l'onde de choc initiale comprime et chauffe l'air, elle perd rapidement son énergie. A quelques mètres du canal de l'éclair, elle se relaxe pour donner naissance à une onde acoustique de plus faible amplitude et la pression dans la région qui se trouve en arrière de l'onde diminue rapidement. L'onde de acoustique n'absorbe qu'un pour cent de l'énergie émise par l'onde de choc; l'énergie restante sert à chauffer l'air autour du canal de l'éclair.

p. 34. "L'onde de choc n'est pas un source sonore efficace; elle transmet moins d'un pour-cent de son énergie à l'onde acoustique. Les 99 pour cent restant sont dissipés dans le canal de l'éclair sous forme de chaleur. Malgré ce faible rendement, l'énergie totale de l'onde de choc est très grande et il se forme un onde acoustique très puissante. Il en résulte alors un des bruits les plus intenses connus dans la nature.

L'onde acoustique produite par les segments mésosinueux n'est pas rayonnée avec une égale puissance dans toutes les directions. L'étude de grandes étincelles produites en laboratoire montre que 80 pour cent de l'énergie acoustique se concentre dans une région limitée par des plans faisant un angle de 30° avec le plan perpendiculaire à l'étincelle... Le bruit entendu au sol dépendra donc essentiellement de l'orientation de l'observateur par rapport aux éléments constitutifs de l'éclair."

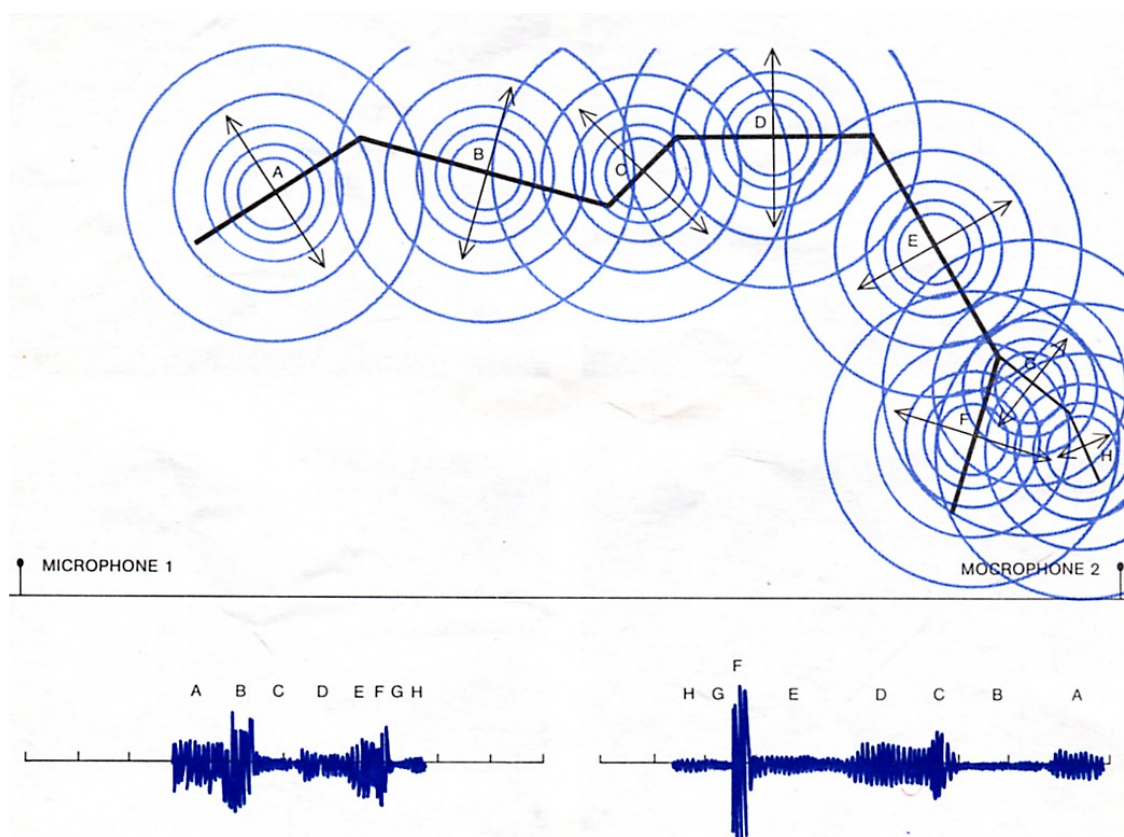


Fig. « Les éléments macrosinueux du canal de l'éclair déterminent la distribution d'ensemble des craquements et des roulements de tonnerre. La nature et la durée du signal produit par chaque segment dépend de l'orientation de celui-ci et la distance qui le sépare de l'observateur. Des micros placés en différents endroits enregistrent différentes signatures issues du même canal d'éclair. Pour l'éclair hypothétique, visible sur cette figure, on a représenté deux de ces signatures : un roulement prolongé (à gauche) et un claquement sec (à droite). »

p. 34. "Les ondes acoustiques sont émises, quasi-simultanément par les différentes parties d'un éclair. L'émission du signal complet dure moins d'une seconde (temps nécessaire pour que se forme toute la série des traceurs et des traits). Cependant, le tonnerre est rarement aussi bref. Cela résulte de deux causes : d'abord, **le canal de l'éclair est long (au moins cinq kilomètres et souvent bien davantage)** et ensuite, les signaux venant des éléments les plus proches atteignent l'observateur avant ceux qui sont issus des segments les plus lointains... Quand les éléments macrosinueux sont orientés en direction de l'observateur, le son perçu est relativement faible amplitude puisque la plus grande partie de l'énergie acoustique est émise perpendiculairement à ces éléments. Dans ce cas, les ondes acoustiques issues de chaque élément mésosinueux atteignent l'observateur les unes après les autres, les premiers signaux sonores provenant des parties de l'éclair les plus proches. Il en résulte un grondement sourd ou un roulement prolongé. Quand les éléments macrosinueux sont orientés perpendiculairement à

l'observateur, celui-ci reçoit une beaucoup plus grande partie de l'énergie acoustique. Les systèmes d'ondes issus de tous les éléments mésosinueux arrivent presque tous en même temps et il en résulte un claquement bref mais intense."

p. 34. "En général, le tonnerre produit par un seul éclair est perçu comme une combinaison de claquements et de roulements; ceci est dû à ce que les sons qui le composent proviennent de différentes parties de l'éclair qui ne sont pas toujours orientées de la même façon par rapport à l'observateur. C'est pourquoi un même coup de tonnerre n'est pas perçu de la même façon par différents observateurs situés en plusieurs endroits puisque chacun d'eux occupe une position spécifique par rapport au canal de l'éclair.

Entre le canal de l'éclair et l'observateur, le milieu traversé modifie le son du tonnerre. L'atmosphère atténue, disperse et réfracte les signaux; de plus, ceux-ci subissent les effets d'une propagation non linéaire et enfin ils se réfléchissent lorsqu'ils atteignent le sol."

p. 37. "La propagation non linéaire résulte de divers processus qui affectent plus particulièrement certaines parties ou certaines fréquences des ondes acoustiques. La propagation non linéaire change la forme des ondes sonores ou bien en modifie le spectre. Un tel comportement tend à allonger chaque vibration au fur et à mesure qu'elle se propage; les ondes acoustiques de grandes amplitude étant les plus perturbées. C'est près du canal de l'éclair que ce phénomène est le plus intense.

L'atténuation du tonnerre dans l'atmosphère provient de deux processus indépendants : l'atténuation "classique" et l'atténuation "moléculaire". L'atténuation "classique" résulte de la viscosité de l'air, c'est-à-dire du fait que l'air n'est pas un milieu parfaitement élastique. On connaît les lois de l'atténuation classique et on peut estimer cette atténuation à l'avance. L'atténuation "moléculaire" est la conséquence d'une interaction complexe entre les ondes acoustiques et les molécules d'eau ou d'oxygène, interaction au cours de laquelle l'énergie acoustique provoque des vibrations intramoléculaires. Pour évaluer cette atténuation, il faut connaître la température et l'humidité en chaque point du trajet suivi par le signal acoustique. Des deux effets, l'atténuation moléculaire est, en général, le plus important. L'atténuation varie comme le carré de la fréquence du signal, c'est à dire qu'une onde de 20 hertz parcourt quatre fois plus de chemin qu'une onde de 40 hertz, avant de subir la même atténuation.

La dispersion du tonnerre est encore plus difficile à prévoir que son atténuation. Cette dispersion est due à la présence de remous atmosphériques dont les dimensions varient de quelques micromètres (pour des perturbations microscopiques) à plusieurs kilomètres (la taille de la cellule orageuse elle-même). Les remous qui provoquent une dispersion importante ont une taille voisine de la longueur d'onde moyenne du tonnerre (moins de 50 mètres [??? il dit p. 34 que la fréquence moyenne se situe aux alentours de 60 Hz soit une longueur d'onde de 5000 m, une longueur d'onde de 50 m correspond à 6 MHz ce qui est les ondes courtes]). Les pertes affectent surtout les fréquences élevées.

La dispersion et l'atténuation ont un autre effet : quand le tonnerre traverse plusieurs kilomètres d'un milieu turbulent, les composantes de plus basse fréquence du spectre original sont les seules à ne pas être profondément modifiées. En conséquence, un éclair de faible énergie, qui produit un son comportant peu de fréquences basses, ne donnera pas naissance à un tonnerre audible, sauf à faible distance.

La réfraction du tonnerre est un phénomène de grande ampleur qui résulte des variations de la vitesse du son dans l'atmosphère. Quand un rayon acoustique se réfracte, il acquiert une certaine courbure qui l'éloigne du trajet en ligne droite reliant la source l'observateur. On connaît bien les lois de la réfraction et, si on possède suffisamment d'informations sur les conditions atmosphériques, on peut calculer le trajet courbe suivi par les rayons acoustiques. Les paramètres les plus importants sont la température et le vent.

Dans la basse atmosphère, la température décroît en général avec l'altitude, d'environ 6,5°C par kilomètre. Au-dessous d'un nuage d'orage, le gradient de température est généralement plus important et atteint parfois 9,8°C par kilomètre [ah..]. Comme le son va plus vite dans l'air chaud que dans l'air froid, le gradient de température tend à courber le rayon acoustique vers le haut. Pour cette raison, le tonnerre produit par les parties les plus basses d'un éclair ne peut s'entendre très loin; il existe même

une distance au delà de laquelle la totalité du son passe au dessus de la tête de l'observateur qui alors ne perçoit plus aucun son.

Le vent affecte d'une double façon la propagation des ondes acoustiques. D'une part, la vitesse réelle d'un front d'onde est la somme de la vitesse du son dans l'air et de la vitesse du vent; le son se propage donc plus vite lorsqu'il se déplace avec le vent que contre le vent. Dans une analyse précise des signaux constitutifs du tonnerre, il faut tenir compte de cette différence. D'autre part, les variations de la vitesse du vent avec l'altitude sont cause d'une courbure supplémentaire des rayons acoustiques. (p. 38) La vitesse du vent augmente généralement avec l'altitude. Quand le son se déplace contre le vent, les effets de la variation de la vitesse du vent avec l'altitude s'ajoutent à ceux de la réfraction due à la température; quand le son se déplace avec le vent, ces effets se soustraient.

Conjugués aux phénomènes d'atténuation et de dispersion, le gradient de température et la variation de la vitesse du vent avec l'altitude imposent une limite maximale à la portée du tonnerre. Cette portée n'est parfois que d'une dizaine de kilomètres, mais elle est souvent beaucoup plus importante. Elle dépend surtout de l'altitude de l'éclair et de la vitesse du vent.

La réflexion modifie aussi le signal du tonnerre. Pour un son de basse fréquence, l'amplitude de l'onde réfléchi est grossièrement proportionnelle à l'angle sous lequel l'observateur voit la surface réfléchissante. Dans la plupart des cas, le sol est la seule surface réfléchissante suffisamment grande pour produire des amplitudes comparables à celles des signaux reçus directement. Puisque le sol remplit complètement notre champ de vision quand on regarde vers le bas, l'amplitude de l'onde réfléchi est égale à celle de l'onde directe, à condition que les vibrations sonores ne soient pas absorbées par le sol (hypothèse probablement exacte pour les sons basse fréquence). Ainsi, le son perçu par un observateur est la somme des ondes directes et des ondes réfléchies.

Selon la hauteur de l'observateur par rapport au sol et l'angle du signal acoustique incident, les ondes directes et les ondes réfléchies se combinent; leurs amplitudes s'ajoutent pour certaines longueurs d'onde tandis qu'elles se soustraient pour d'autres. Quand on enregistre la "signature" du tonnerre, on évite les interférences négatives en plaçant les micros à une hauteur proportionnelle à la plus petite longueur d'onde mesurée.

Le son perçu lors d'un coup de tonnerre est spécifique de l'endroit où l'on se trouve. Un micro placé quelques mètres au-dessus d'un même micro posé sur le sol, détecte un signal légèrement différent. Quand les micros sont situés tous deux près du sol, mais séparés par une distance horizontale de 20 à 30 mètres, ils enregistrent des signatures de tonnerre analogues; cependant, on peut distinguer des différences mineures, du fait que les micros n'occupent pas la même position par rapport aux éléments mésosinueux du canal de l'éclair. Quand les micros sont placés à 100 mètres l'un de l'autre, les enregistrements des deux signatures sont sensiblement différents, mais la distribution des claquements et des roulements n'est guère modifiée; dans ce cas, la distance qui sépare les micros est comparable à la longueur des éléments macrosinueux de l'éclair. En revanche, des micros distants de quelques kilomètres enregistrent des signatures de tonnerre qui parfois n'ont plus qu'un ou deux points communs.

p. 39. "La "signature" du tonnerre renferme une grande quantité d'informations, tant sur le canal de l'éclair qui l'a produit que sur l'atmosphère située entre l'éclair et le lieu de l'observation. La signature est une courbe complexe, mais qu'il est cependant possible d'analyser. Lorsque cette analyse est achevée, on peut reconstituer le canal de l'éclair, ce qui est particulièrement intéressant quand l'éclair traverse des nuages et que la photographie ou d'autres méthodes d'étude optique sont inefficaces.

Pour enregistrer la signature du tonnerre, on dispose sur le sol une rangée de micros. On divise le signal représentant le tonnerre en une suite de fragments brefs (de l'ordre d'un quart à une demi-seconde), afin de faciliter l'analyse. Les micros mesurent la direction d'arrivée de chaque fragment sonore, tandis que par ailleurs, on détermine la durée de l'éclair et l'instant où chaque élément constitutif de la signature du tonnerre (roulement, claquement...) atteint les micros. A l'aide d'un ordinateur et d'un modèle mathématique de l'atmosphère, il est possible de déterminer l'origine de chaque élément et de déduire la position de chaque source sonore au moment de l'éclair. De cette façon, on peut reconstituer l'ensemble du canal dans un modèle à trois dimensions. Grâce à cette technique assez sensible, on peut localiser le canal principal et certaines des ramifications les plus

importantes; les plus petites d'entre elles échappent cependant à cette analyse, le tonnerre qu'elles produisent étant de trop faible amplitude.

Après avoir étudié l'enregistrement sonore de tout un orage, nous avons pu reconstituer sur un graphique la succession des principales décharges électriques. Grâce à ces résultats, nous avons déduit des informations sur la manière dont un nuage acquiert une charge électrique, sur le volume dans lequel cette charge est stockée et sur le temps nécessaire pour que la charge se reconstitue après chaque éclair. Ainsi, l'étude du tonnerre permet de rendre compte, d'une façon globale, de l'activité électrique de l'atmosphère et elle conduit à des découvertes surprenantes sur les éclairs qui se forment à l'intérieur des nuages.

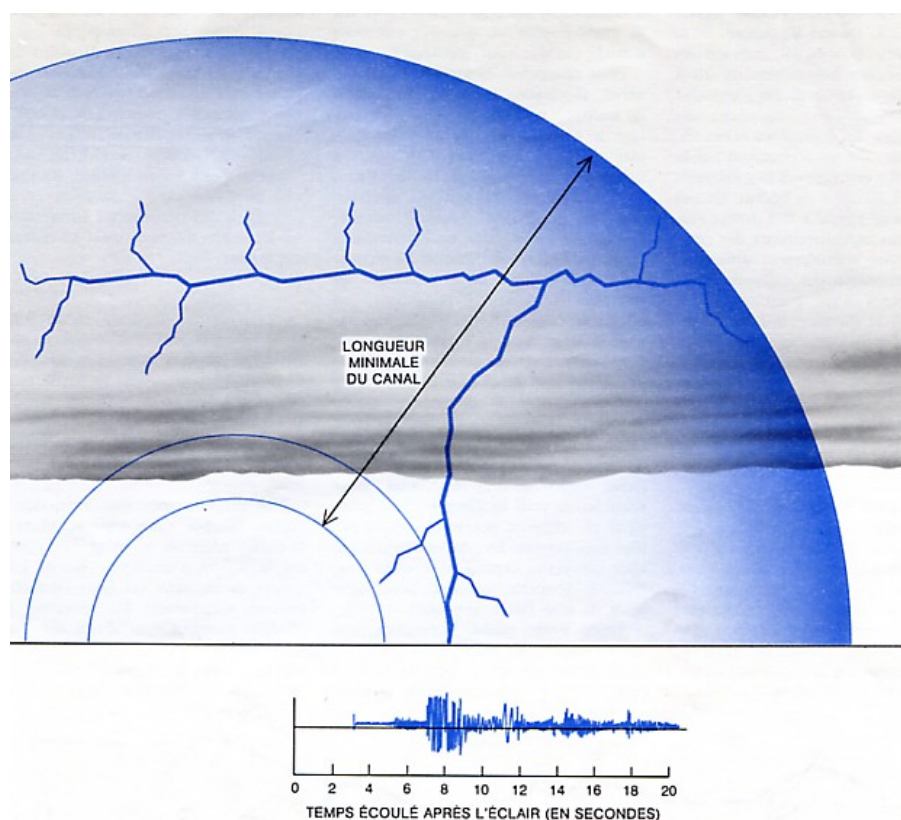
Nous avons constaté qu'un éclair intranuageux (c'est-à-dire qui ne se décharge pas vers le sol) est quasiment horizontal, tout comme la partie intranuageuse d'un coup de foudre au sol. Les canaux d'éclairs horizontaux tendent à s'aligner si bien que la plupart d'entre eux sont grossièrement parallèles.

Nos résultats montrent aussi que la région chargée négativement, située à la partie inférieure du nuage, a en général la forme d'un disque de 10 km de diamètre sur deux kilomètres environ d'épaisseur. En revanche, les charges positives sont dispersées dans toute la partie supérieure du nuage. La région chargée négativement suit de très près l'isotherme - 10°C; ainsi la formation de cette charge électrique serait en étroite relations avec la congélation des gouttelettes d'eau ou avec la coexistence de glace et d'eau ou avec la coexistence de glace et d'eau en surfusion dans la même partie du nuage. Il semble également que les charges électriques apparaissent de préférence dans les zones du nuage où circule un air chargé en fines gouttelettes d'eau plutôt que dans celles contenant de grosses gouttes de pluie.

Au début d'un orage, les éclairs sont localisés dans la région inférieure du nuage, chargée négativement; la région supérieure ne devient active que par la suite. les éclairs successifs conduisent des charges issues des différentes régions du nuage mais les canaux se coupent fréquemment au même point. Tout se passe comme si un éclair prenait naissance à l'endroit même où le précédent s'était terminé. De plus, l'apparition d'un éclair déclenche souvent une décharge dans une autre partie du nuage. Certains processus importants de la physique des nuages, comme par exemple la croissance des particules de neige ou de glace, paraissent fortement influencés par le champs électrique intranuageux et sont corrélés avec l'activité des éclairs.

Enfin, la longueur moyenne des canaux d'éclairs varie, semble-t-il, selon la nature de l'orage. Les orages brefs et localisés produisent des **éclairs** relativement **courts (cinq kilomètres en général)**, ayant tous sensiblement la même longueur. En revanche, dans les orages associés aux grands systèmes frontaux, les **éclairs** sont beaucoup plus **longs (15 kilomètres en moyenne)** et la dispersion des tailles est bien plus importante. Dans les gros orages, les canaux des éclairs sont horizontaux sur une grande partie de leur longueur.

la reconstitution complète d'un canal d'éclair nécessite un équipement spécialisé : une rangée de micros sensibles aux basses fréquences, un équipement capable d'enregistrer ces sons et un ordinateur. Cependant, il est possible de recueillir une partie de l'information contenue dans la signature du tonnerre avec un simple bracelet-montre. Vous pouvez ainsi déterminer approximativement la distance vous séparant de la source du tonnerre en multipliant la vitesse du son par le temps écoulé entre l'apparition de l'éclair et l'arrivée du signal acoustique [nota : dans l'air, le son voyage à environ 340 m/s, la valeur précise dépend de la température, humidité, et pression]. Pour calculer cette distance (en kilomètres), il vous suffit de diviser par 3 le temps exprimé en secondes. De la même façon, vous pouvez évaluer la longueur minimale du canal de l'éclair, en multipliant la durée du coup de tonnerre par la vitesse du son (Fig.) :



p. 41. "Si vous observez avec beaucoup d'attention, vous pourrez distinguer plusieurs des événements constitutifs d'un éclair au sol : la création du canal sinueux ramifié par le traceur par bonds, l'illumination du canal par le premier trait de retour, à des lumières intermittentes produites par de multiples traits de retour. Parfois, un éclair se ramifie quand un des traits flèches dévie du canal initial.

Durant un orage nocturne, vous pouvez aussi essayer de photographier des éclairs. Il faut mettre l'appareil photo sur un trépied, l'orienter vers la région la plus active de l'orage, fermer le diaphragme au maximum, régler la distance focale à l'infini et choisir des temps de pause de 20 à 30 secondes. En moyenne, un cliché sur trois ou quatre donnera l'image d'un éclair, mais cela dépend bien sûr de l'activité orageuse.

Pour obtenir plus d'informations sur le canal de l'éclair, il faut analyser soigneusement la signature du tonnerre. En mesurant le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et 1) le premier coup de tonnerre, 2) le claquement le plus fort, 3) le dernier roulement, on peut calculer les distances séparant le lieu d'observation 1) de la branche de l'éclair la plus proche, 2) du canal principal et 3) de la branche la plus éloignée. On peut aussi noter la durée totale du tonnerre pour calculer, comme nous l'avons indiqué précédemment, la longueur minimale du canal de l'éclair.

Si une décharge frappe le sol à proximité de vous, vous entendrez un court craquement précédé parfois d'un bref roulement ou d'un bruit de déchirure; ces derniers sons proviennent probablement d'une branche courte, dérivée du canal principal et dirigée dans votre direction. Quand un éclair proche se compose de plusieurs traits, il est parfois possible de distinguer les différentes impulsions acoustiques; dans ce cas, le bruit évoque un peu le crépitement d'une mitraille.

Quand un coup de tonnerre, assez puissant pour faire trembler les vitres, ressemble plus à un grondement qu'à un claquement ou à un fracas, c'est qu'il a été émis par un éclair très énergétique, situé à grande distance ou à haute altitude. En effet, après avoir parcouru quelques kilomètres, les sons haute fréquence sont bien plus atténués que les sons basse fréquence, si bien que l'on ressent le tonnerre plus qu'on ne l'entend. Dans certains cas, la hauteur du son perçu diminue au fur et à mesure que les roulements : c'est que les claquements de tonnerre proviennent d'endroits de plus en plus éloignés de l'observateur.

Enfin, il existe une signature du tonnerre assez rare : il s'agit d'un bruit de déchirure; peut-être à la déchirure de quelque étoffe cosmique ! On attribue ce bruit à un traceur par bonds qui n'atteint pas le sol. En revanche lorsque le traceur achève sa progression vers le sol, le son qu'il émet est couvert par celui du trait de retour."