

7.6 La foudre et le circuit électrique atmosphérique

7.6.1 Une mesure surprenante!

À peu près partout sur Terre, par temps clair on mesure au niveau du sol un champ électrique de 100–300 V/m, pointant vers le bas, i.e.,

$$\mathbf{E} = E_z \hat{\mathbf{z}} , \quad (E_z < 0) . \quad (7.6.1)$$

Situation plutôt surprenante s'il en est, d'autant plus que personne, à date, ne s'est jamais retrouvé(e) électrocuté(e) en sautant à la corde, ou en tombant en bas d'un arbre, etc. Ceci est dû à la très faible densité de courant électrique produite par ce champ. Nous avons déjà vu que cette dernière est donnée en terme du champ électrique par la relation

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} , \quad (7.6.2)$$

où la constante de proportionnalité σ est la conductivité électrique.

7.6.2. La conductivité électrique atmosphérique

La basse atmosphère $h \lesssim 10$ km (la troposphère) est un très mauvais conducteur électrique, à cause du peu de charges libres qu'elle contient. Celles qu'on y trouve proviennent surtout de l'ionisation et/ou dissociation de composantes atmosphériques moléculaires par l'impact de rayons cosmiques (voir Figure 1), avec à très basse altitude une contribution additionnelle provenant de la radioactivité dans la croûte terrestre. Ceci tend à produire des ions du genre NO_3^- et H_3O^+ , qui s'hydratent rapidement pour former des macromolécules hydratées du genre $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_8$ et $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_6$. Utilisant le formalisme décrit en classe, on peut calculer que la vitesse de dérive de ces molécules chargées est de l'ordre de $6 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, et donc que la conductivité au niveau du sol est d'environ $\sigma_0 = 3 \times 10^{-15} \text{ Ohm m}$ (voir exercice 1). La densité de courant produite par un champ électrique de 300 V/m est donc d'environ $10^{-12} \text{ A m}^{-2}$, ce qui est plus faible que les densités de courant dans vos neurones!

À un très bon niveau d'approximation, la conductivité électrique de l'atmosphère augmente exponentiellement avec l'altitude (z), à cause de la décroissance exponentielle de la densité (conduisant à une croissance exponentielle du libre parcours moyen):

$$\sigma(z) = \sigma_0 \exp(z/H) , \quad (7.6.3)$$

où $H \simeq 10$ km est la *hauteur de colonne* de l'atmosphère, dans la cadre de l'approximation de l'équilibre hydrostatique pour une atmosphère isotherme.

Dans une situation stationnaire (i.e., indépendante du temps), la Loi de conservation de la charge se réduit à

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 . \quad (7.6.4a)$$

Travaillant en coordonnées cartésiennes (ce qui est justifiable vu le fait que l'épaisseur de l'atmosphère est beaucoup plus faible que le rayon terrestre $R_{\oplus} = 6378$ km), l'équation (7.6.4a) se réduit à :

$$\frac{d}{dz}(\sigma(z)E_z) = 0, \quad (7.6.4b)$$

ce qui s'intègre immédiatement pour produire la relation :

$$\sigma(z)E_z = \text{constante}. \quad (7.6.4c)$$

Mais puisque σ croît de manière exponentielle avec z , E_z doit *décroître* exponentiellement en z afin de satisfaire à l'éq. (7.6.4c) :

$$E_z(z) = -E_0 \exp(-z/H), \quad (E_0 > 0), \quad (7.6.5)$$

où le signe “-” est introduit explicitement pour signifier que le champ électrique est dirigé vers le bas. La croissance exponentielle de la conductivité prend fin à environ 10 km d'altitude, où l'atmosphère est finalement devenue un conducteur raisonnable, et elle le demeure jusqu'à la base de l'ionosphère. Comme son nom l'indique, l'*ionosphère* est une couche atmosphérique ($60 \lesssim z \lesssim 100$ km) contenant une grande densité d'ions chargés, conséquence cette fois de l'ionisation par le rayonnement ultraviolet du soleil. Aux fins de notre discussion, toute la région s'étendant de 10 km d'altitude jusqu'à la base de l'ionosphère, et incluant celle-ci, peut donc être considérée comme un bon conducteur, à l'intérieur duquel il est donc impossible de maintenir un champ électrique.

7.6.3 L'atmosphère est un condensateur

Avec un peu de recul, le système Terre-troposphère-haute atmosphère-ionosphère peut être considéré comme un condensateur formé de deux coquilles sphériques concentriques, séparées d'une distance de 10 km (la troposphère). On a vu en classe que la capacité d'un tel objet est donnée par

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{(b-a)}, \quad (7.6.6a)$$

avec ici $a = R_{\oplus} = 6378$ km, et donc $b = 6388$ km. On en déduit que $C = 0.5$ F. La différence de potentiel entre le sol et l'altitude-clef de 10 km se calcule de la manière habituelle :

$$\varphi_{10} - \varphi_0 = - \int_0^{z_{10}} \mathbf{E} \cdot (\hat{\mathbf{z}} dz) = \left[-E_0 H \exp(-z/H) \right]_0^{z_{10}} \simeq 2000 \text{ kV}. \quad (7.6.6b)$$

Choisissant $\varphi_0 = 0$ comme potentiel de référence, la relation $Q = C\varphi$ (avec ici $\varphi = (\varphi_{10} - \varphi_0)/2$, pour un condensateur) nous permet de calculer que la charge nette contenue dans l'ionosphère (plaque extérieure du condensateur sphérique) est de $Q = 5 \times 10^5$ C, avec une charge négative correspondante au niveau du sol, comme dans tout condensateur qui se respecte.

Connaissant la densité de courant au niveau du sol, on peut calculer le courant net de l'ionosphère vers la Terre :

$$I = \int \mathbf{J} \cdot (-\hat{\mathbf{z}}) dS = 4\pi R_{\oplus}^2 (\sigma_0 E_0) \simeq 500 \text{ A}. \quad (7.6.7a)$$

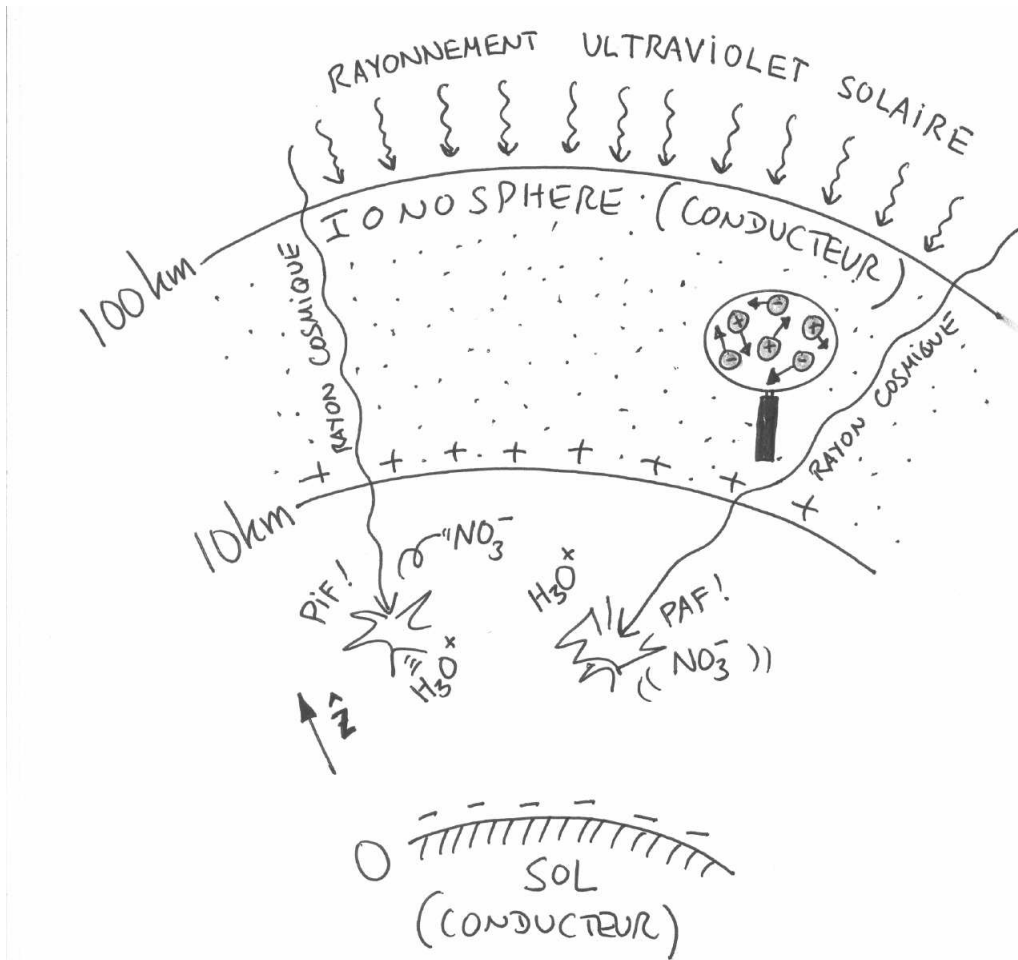


Figure 7.6.1: Représentation schématique de l'atmosphère terrestre. La base de l'ionosphère est traditionnellement fixée à une altitude de 60 km, mais comme toute la région à $z \gtrsim 10$ km est un bon conducteur, pour les fins de la présente discussion nous fixerons la base de notre (pseudo-) ionosphère à l'altitude de 10 km. L'épaisseur des diverses couches atmosphériques est ici grandement exagérée par rapport au rayon de courbure de la surface terrestre ($R_{\oplus} = 6378$ km).

Comme $I = dQ/dt$, on peut estimer le temps caractéristique (τ) requis pour drainer une charge Q par un tel courant via la relation:

$$\tau \sim Q \left(\frac{dQ}{dt} \right)^{-1} \simeq 1000 \text{ s} . \quad (7.6.7b)$$

Cependant, on observe que le champ électrique mesuré au niveau du sol, bien qu'il fluctue autour de sa valeur moyenne, demeure stable sur des échelles de temps beaucoup plus longues. Une force électromotrice est donc requise pour continuellement maintenir la différence de potentiel terre-ionosphère, ou, en d'autres mots, recharger le condensateur. Il y a en fait quatre processus physiques distincts qui contribuent:

- (1) Advection de charges dans les courants atmosphériques ascendants;
- (2) Séparation de charges dans les orages électriques;
- (3) Effet dynamo associé aux marées atmosphériques;
- (4) Courants ionosphériques à grande échelle induits au niveau de la magnétosphère.

Nous ne considérerons ici que les deux premiers de ces processus, qui sont de toutes façons les plus importants des quatre. Et de surcroît, les deux autres impliquent un bestiau que nous ne connaissons pas encore officiellement, soit l'effet d'induction dans un champ magnétique variable...

7.6.4 Les courants de Wilson

Reécrivons notre expression obtenue ci-dessus pour le champ électrique atmosphérique:

$$\mathbf{E} = E_z(z)\hat{\mathbf{z}} = -E_0 \exp(-z/H)\hat{\mathbf{z}}, \quad (7.6.8)$$

et substituons cette expression dans notre première équation de Maxwell (Loi de Gauss sous forme différentielle):

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}; \quad (7.6.9a)$$

comme toutes les quantités physiques impliquées ne dépendent que de la variable verticale z , ceci se réduit à:

$$\frac{\partial E_z(z)}{\partial z} = \frac{E_0}{H} \exp(-z/H) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (7.6.9b)$$

d'où

$$\rho(z) = \frac{\varepsilon_0 E_0}{H} \exp(-z/H), \quad (> 0). \quad (7.6.9c)$$

Surprise! l'air est électriquement chargé! ...mais au niveau du sol, il ne s'agit que d'une très faible densité volumique de charges positives, soit $\simeq +5 \times 10^{-13} \text{ C m}^{-3}$, mais qui est présente sur l'ensemble de la surface de la Terre (voir exercice 2).

Considérons maintenant ce qui se passe au voisinage d'un nuage de type cumulus, avec lequel sont associés de forts courants d'air ascendant (voir Figure 7.6.2). L'air ascendant entraîne vers le haut les charges positives normalement présentes dans la basse atmosphère, soit dans la direction *contraire* à leur direction de dérive sous l'influence du champ électrique ambiant. L'air en mouvement effectue en conséquent un travail *contre la force électrostatique*, et agit donc comme une *force électromotrice*.

7.6.5 Le cumulus est une batterie

Un effet électromotif encore plus important est associé à la séparation de charge se produisant à l'intérieur du nuage cumulus, et qui conduit à l'accumulation de charges négatives à la base du nuage, et positives à son sommet. Notons qu'encore une fois ce déplacement forcé des charges est tel qu'il effectue un travail contre la force électrique associée au champ électrique global. L'origine physique de cette séparation de charge demeure mal compris; tout ce qu'on sait —parce qu'on le mesure— est que le gel de l'eau dans la colonne nuageuse d'air chaud et humide ascendant tend à produire de petits cristaux de glace, relativement légers et chargés positivement, tandis que les charges négatives se concentrent préférentiellement dans de grosses gouttelettes d'eau s'accumulant à la base du nuage. Cette séparation de charge est très efficace, conduisant au développement d'un champ électrique pointant vers le haut sous le nuage, et à une accumulation de charges *positives* au sol, directement sous le nuage (voir Figure 7.6.2).

L'effet batterie associé à la séparation de charge à l'intérieur des cumulus électriquement actifs est le principal moteur du circuit électrique atmosphérique. Cette force électromotrice puise son énergie dans le champ gravitationnel (chute des gouttes chargées négativement), ainsi

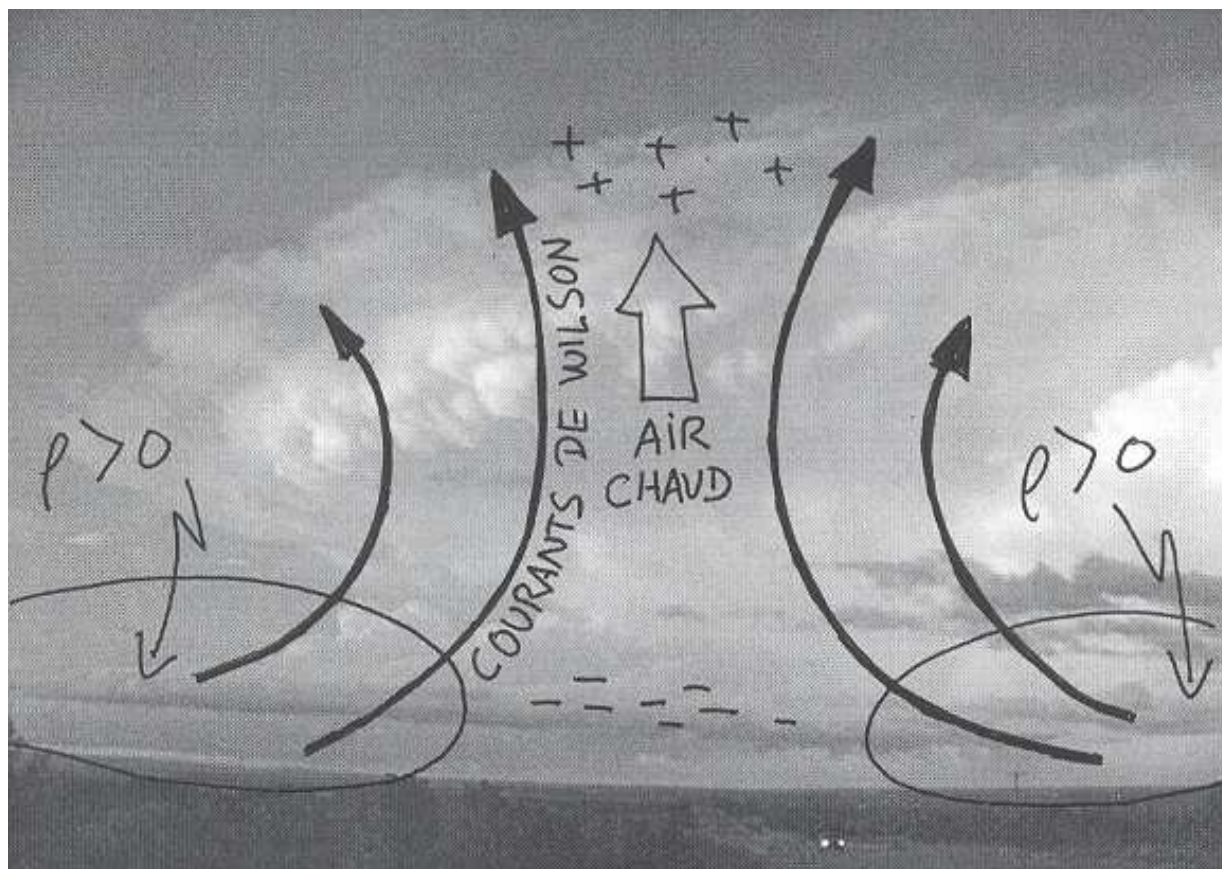


Figure 7.6.2: Production des courants de Wilson. L'air ascendant rapidement au coeur des cumulus aspire exerce un effet d'aspiration sur l'air situé près du sol, et qui porte une densité nette de charges positives. Ceci correspond donc à un courant électrique dirigé vers le haut, et donc *contre* le champ électrique ambiant, dirigé vers le bas. Il s'agit donc d'une force électromotrice.

que dans l'énergie cinétique des courants d'air ascendant (ultimement causés par le chauffage du sol par le soleil). La foudre fonctionne à l'énergie solaire!

Dans un nuage, le taux d'humidité est très élevé, et conséquemment les ions tendent à agglutiner un grand nombre de molécules de H_2O , ce qui réduit grandement leur mobilité, et donc aussi la conductivité électrique. Des calculs détaillés indiquent que la résistance nette entre le bas et le haut d'un cumulus typique est de plusieurs gigaOhm ($1 \text{ gigaOhm} = 10^9 \text{ Ohm}$). La résistance nette du haut du nuage vers sa base en passant par l'extérieur du nuage est d'environ 400 megaOhm, tandis que la résistance entre le haut du nuage et l'ionosphère n'est que de 40 megaOhm ($1 \text{ megaOhm} = 10^6 \text{ Ohm}$). Et, comme vous le calculerez dans l'exercice (1), la résistance nette entre l'ionosphère et le sol n'est que de quelques centaines d'Ohm. Les cumulus, aidés des courants de Wilson, agissent donc comme la batterie du circuit électrique atmosphérique global (voir Figure 7.6.3).

Le champ électrique nuage-sol ne peut croître indéfiniment cependant; comme on l'a vu en classe, plusieurs des molécules constituant l'atmosphère ont des moments dipolaires ou quadrupolaires, et peuvent être dissociées par un champ électrique suffisamment intense. Ceci nous conduit à considérer le dernier lien causal essentiel pour fermer le circuit atmosphérique global: la foudre.

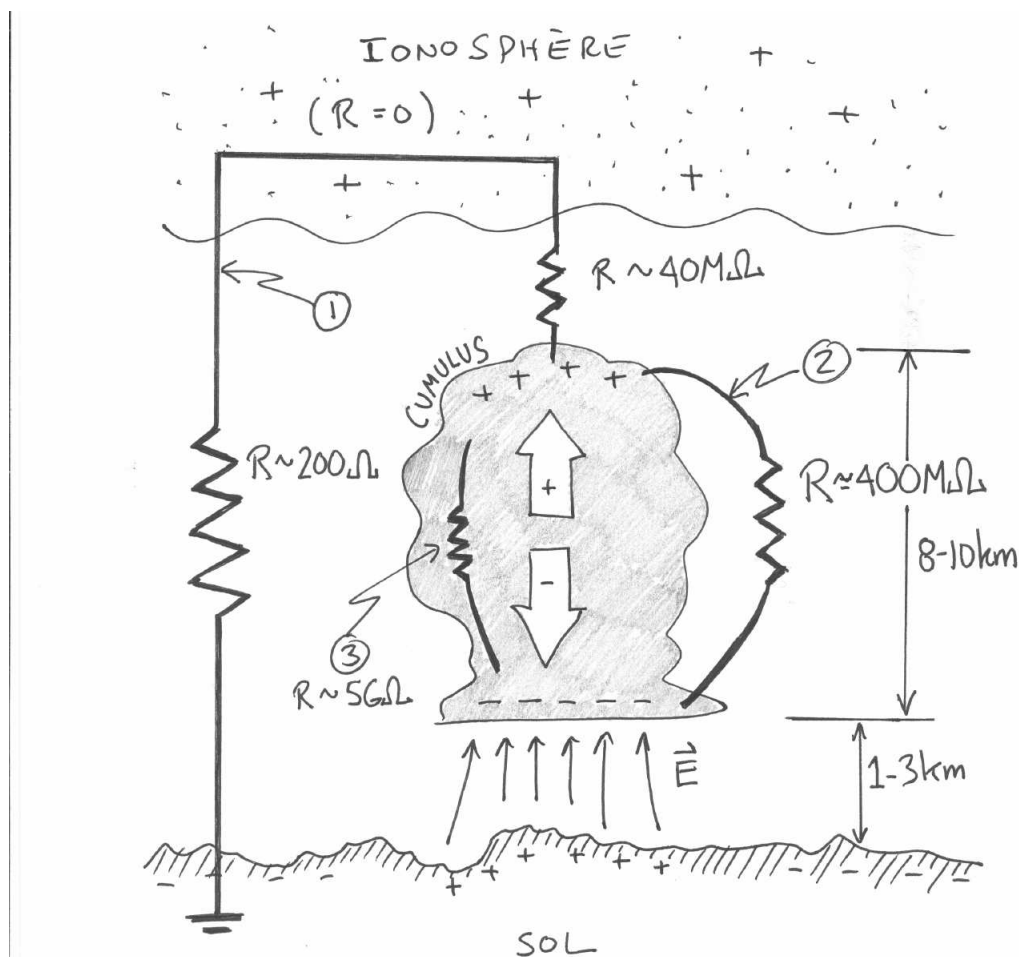


Figure 7.6.3: Effet batterie à l'intérieur d'un nuage électriquement actif, et le circuit atmosphérique global. La différence de potentiel établie entre le haut et le bas du nuage dispose de trois "circuits" possible pour y produire un courant; les régions périphériques intérieures du nuage (circuit 3) offrent une résistance de plusieurs gigaOhm, versus quelques centaines de megaOhm pour l'air à l'extérieur du nuage (circuit 2), moins chargé en vapeur d'eau. Le circuit de moindre résistance (circuit 1) consiste à monter jusqu'à l'ionosphère ($R \sim 40M\Omega$), s'écouler latéralement ($R = 0$), et redescendre dans le reste de l'atmosphère jusqu'au sol ($R \sim 200\Omega$).

7.6.6 La foudre

Un examen attentif de la Figure 7.6.3 révélera qu'il manque un "morceau" au circuit numéroté "1", soit la connexion sol-nuage. Cette connexion est établie de manière aussi spectaculaire qu'intermittente, par la *foudre*.

Dans un cumulus électriquement actif, la différence de potentiel entre la base du nuage et le sol peut atteindre jusqu'à 10^8 V, correspondant à un champ électrique de l'ordre de 10^3 V m⁻¹. Ceci conduit éventuellement, quelquepart entre le nuage et le sol mais habituellement assez près de la base du nuage, à la dissociation/ionisation d'une molécule. Les charges ainsi libérées se retrouvent maintenant libres de se déplacer dans le champ électrique ambiant. Les charges négatives sont accélérées vers le bas à de très hautes vitesses (jusqu'à 10% de la vitesse de la lumière!), et, par collisions, produisent d'autres dissociations/ionisations, libérant plus de particules chargées qui sont elles-même accélérées et libèrent collisionnellement encore plus de particules chargées, et

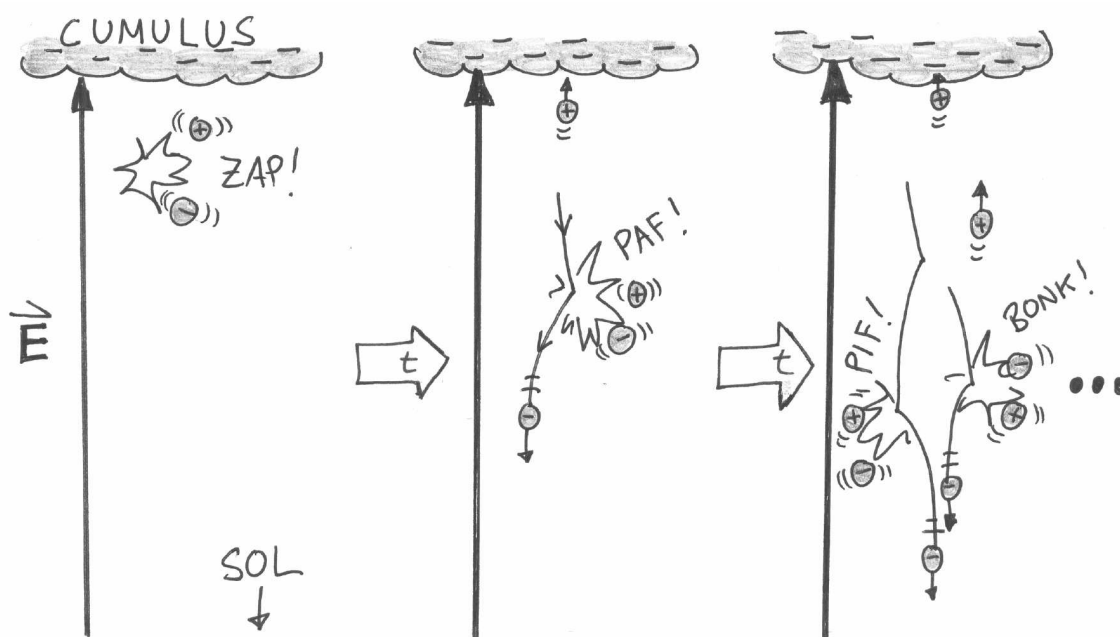


Figure 7.6.4: Bande dessinée: avalanche de libération de charges par dissociations/ionisations collisionnelles. Seules les quelques premières étapes de la formation du leader sont illustrées ici, le temps filant de gauche à droite, comme il se doit... Puisque le processus débute habituellement beaucoup plus près de la base du cumulus (chargé négativement) que du sol (chargé positivement) sous le nuage, les charges positives sont neutralisées avant les négatives, ce qui conduit à des arrêts épisodiques du leader (voir texte).

ainsi de suite. C'est donc une véritable *avalanche* de charges négatives qui se propage vers la bas, et positives vers le haut (voir Figure 7.6.4).

Ces avalanches ne peuvent se propager indéfiniment cependant. La séparation de charge qu'elles causent conduit en soi au développement d'un champ électrique secondaire qui annule localement le champ nuage-sol. Ne ressentant plus de force électrique, les charges freinent par collision. Les charges négatives auront ainsi parcouru une cinquantaine de mètres. Mais les charges positives s'étant déplacées vers le haut sont "neutralisées" par le réservoir de charges négatives à la base du nuage; le champ électrique secondaire s'en trouve neutralisé également, les charges négatives 50 m plus bas ressentent de nouveau le champ électrique sol-nuage, et repartent de plus belle, après une pause d'environ $50 \mu\text{s}$, dans une direction n'étant pas nécessairement la même que précédemment (quoique dirigée en gros vers le bas). Cette séquence d'accélération/freinage s'appelle le "leader". Lorsque celui-ci atteint le sol, il a laissé derrière lui une trace plus ou moins en zig-zag contenant un nombre important de charges libres. C'est là un véritable fil conducteur qui relie maintenant le nuage au sol; les charges négatives à la base du nuage, et les positives au niveau du sol, s'y engouffrent, conduisant à la décharge électrique principale, que nous nommons "l'éclair". Un éclair typique transporte ainsi 20–30 Coulomb entre le sol et le nuage, sous la forme d'un courant pouvant atteindre $\sim 10^4 \text{ A}$ dans la phase de décharge maximale,... mais ne durant qu'une demie milliseconde!

Comment équilibrer par ce processus extrêmement intermittent la densité de courant approximativement constante de $10^{-12} \text{ A m}^{-2}$ partout ailleurs dans l'atmosphère? Ici la solution se retrouve simplement dans le nombre: les météorologues mesurent/estiment qu'il se produit

en moyenne une centaine d'éclairs *par seconde* partout sur terre, ce qui correspond à un courant moyen de $\sim 2\text{--}3\text{ kA}$, ce qui est en effet semblable à une densité de courant de 10^{-12} A m^{-2} intégrée sur l'ensemble de la surface terrestre.

Exercices:

- (1) Calculez la résistance globale (R , en Ohm) de l'atmosphère à partir du profil vertical de conductivité. Explicitez toutes les hypothèses simplificatrices dans votre calcul.
 - (2) Calculez la charge totale contenue dans l'atmosphère terrestre ($0 \leq z \leq 10\text{ km}$). Comment ceci se compare-t-il à la charge nette dans l'ionosphère? Qu'en déduisez-vous quant à la validité de l'image du condensateur pour le système sol-ionosphère ?
 - (3) La séparation typique entre les composantes atomiques d'une molécule simple est de l'ordre de quelques Å ($\text{Å} = \text{Angstrom} = 10^{-10}\text{ m}$). Estimez la grandeur du champ électrique requis pour dissocier une molécule de N_2 .
-

Pour approfondir le sujet:

- R. P. Feynman, R. B. Leighton, et M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, vol. 2* (Addison-Wesley), chap. 9.
- E. A. Bering III, A. A. Few, et J. R. Benbrook, "The global electric circuit", *Physics Today*, octobre 1998, pps. 24-30.
- E. P. Krider, "Benjamin Franklin and lightning rods", *Physics Today*, janvier 2006, pps. 42-48.