

DS N°2 – PARTIE PHYSIQUE 1

Etude électrique du système Terre ionosphère

Document 1 : Equilibre électrostatique Terre/ Electrosphère

D'après le livre de Robert Delmas, Serge Chauzy, Jean Marc Verstraete, Hélène Ferré Atmosphère, océan et climat - Pour la science - Belin

L'environnement atmosphérique possède des caractéristiques électrostatiques. Au-delà d'une altitude de 60 km environ, l'ionosphère, sous l'effet de l'ionisation de ses composants par le rayonnement solaire a une conductivité suffisante pour qu'elle puisse être considérée comme un conducteur. A l'altitude $h = 60$ km on définit donc une sphère appelée électrosphère chargée positivement en surface avec une charge totale $+Q$ correspondant à une densité surfacique de charge σ . La Terre, supposée sphérique de rayon R et de centre O est elle aussi assimilée à un conducteur portant une charge totale $-Q$ uniformément répartie en surface.

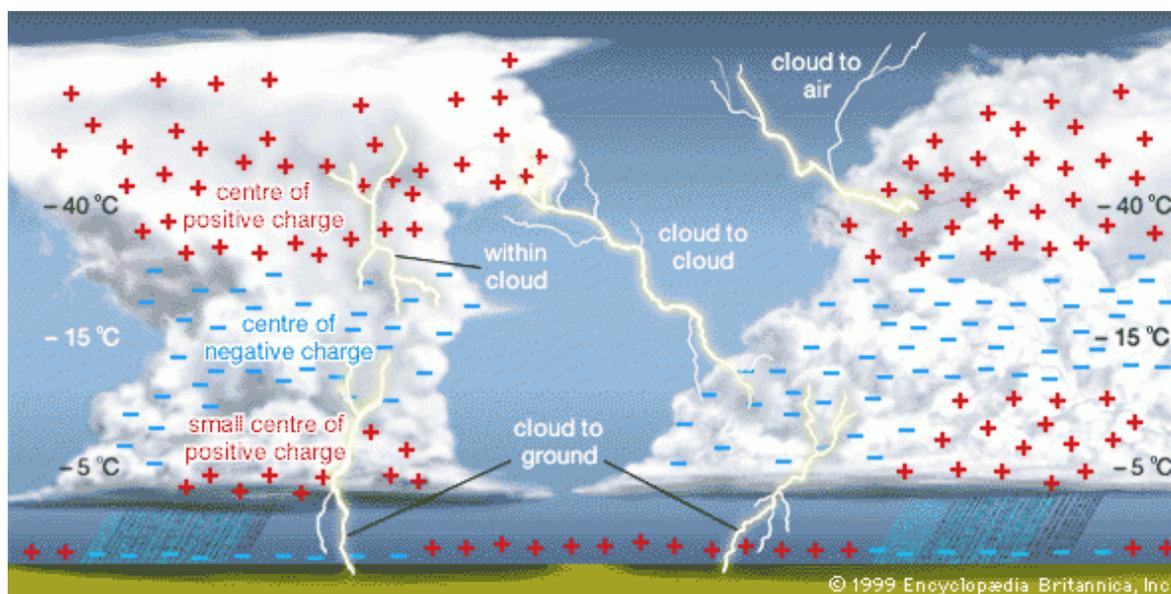
Par contre, la couche d'atmosphère comprise entre 0 et 60 km d'altitude est essentiellement isolante.

En réalité, l'air est faiblement conducteur et un faible courant de fuite (dit de beau temps) circule dans l'atmosphère et tend à décharger la Terre. Ce sont les phénomènes de convection dans les nuages orageux qui compensent par des transferts de charges ce courant de fuite et maintiennent une différence de potentiel de 360 kV entre la Terre et l'électrosphère.

L'état électrique moyen de ce système correspond donc à un équilibre dans lequel la Terre porte une charge globale négative de 550000 C, essentiellement répartie à sa surface, alors que l'atmosphère abrite une charge d'espace globalement positive de même intensité. La différence de potentiel moyenne de 360 kV engendrée par la répartition des charges crée un champ électrique qui s'exprime en V/m et n'est au signe près que le gradient de potentiel. Par beau temps, en l'absence de nuage, ce champ électrique dirigé vers le centre de la Terre possède une intensité maximale au niveau du sol de l'ordre de 100 à 120 V/m qui décroît ensuite régulièrement avec l'altitude jusqu'à devenir très faible au niveau de l'atmosphère.

Document 2 : Les orages

D'après le livre de Robert Delmas, Serge Chauzy, Jean Marc Verstraete, Hélène Ferré Atmosphère, océan et climat - Pour la science - Belin



Cumulonimbus d'orage

Durant un orage, les flux d'air ascendants et descendants dans les nuages (cumulonimbus générateurs d'orage, s'élevant sur plusieurs kilomètres, dont le haut est à une température bien plus basse que la base) provoquent des collisions entre particules de glace et particules de grésil, plus lourdes que les particules de glace. Les particules de glace, légères, restent en suspension alors que le grésil subit la gravité. Ces collisions entraînent des séparations de charge. Pour une température supérieure à T_c , ce sont les particules de grésil qui se chargent positivement, les particules de glace négativement. Pour une température inférieure à T_c , c'est le contraire. T_c dépend essentiellement de la quantité d'eau liquide surfondue présente dans le nuage.

En conséquence, le schéma électrostatique le plus courant pour le cumulonimbus est celui d'un tripôle électrostatique : la partie centrale chargée négativement est le plus souvent comprise entre deux régions chargées positivement, l'une occupant tout le sommet, l'autre à la base du nuage comme le montre la figure 1 ci dessus.

Il en résulte l'apparition d'une différence de potentiel entre la base du nuage et le sol, qui augmente au fur et à mesure de la séparation des charges dans le nuage. Quand le champ électrique associé est trop important, il y a ionisation de certaines zones du nuage, donc apparition d'éclairs qui se propagent dans l'air en formant des canaux conducteurs, d'abord dans le nuage, puis entre le nuage et le sol : c'est le précurseur. Le plus souvent, une décharge de connexion avec la Terre démarre d'un objet saillant (arbre, bâtiment élevé, tour, pylône) et rejoint le précurseur venant du nuage : le circuit électrique se ferme ainsi et apparaît l'arc en retour, onde de courant très intense qui parcourt le canal conducteur depuis le sol jusqu'à la poche de charge à l'origine de l'éclair. Ce courant très intense provoque un effet Joule important (la température locale peut atteindre 30000°C) qui dilate l'air brutalement, engendrant une onde de choc : c'est le tonnerre.



Document 3 : Photographie prise à 21 h 20 le 3 juin 1902

- 1) On considère un conducteur à l'équilibre électrostatique. Justifier que l'on puisse associer un unique potentiel V à ce conducteur.
- 2) On assimile la permittivité de l'atmosphère à celle du vide, soit $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ SI. Justifier par l'analyse du document 1 et les résultats du cours la modélisation du système Terre/électrosphère comme un condensateur sphérique dont on précisera sur un schéma les caractéristiques (on reprendra les notations du document 1, soit R , h , Q , σ). En particulier, justifier le choix d'une répartition surfacique des charges adoptée comme

modèle pour la Terre et l'électrosphère. Donner l'expression de σ , densité surfacique de charge, en fonction des données.

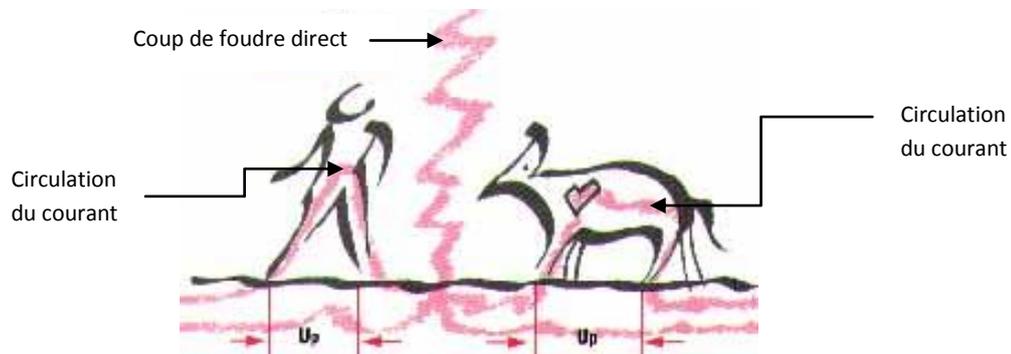
- 3) Dans quel type de système de coordonnées est-il judicieux de se placer pour l'étude de ce système ? Faire un schéma situant les vecteurs de base et les variables correspondantes. On notera r la distance entre le point M et le centre O de la Terre.
- 4) Etudier les propriétés de symétrie et d'invariance de la distribution de charge. En déduire les caractéristiques principales du vecteur champ électrostatique créé. Qu'en est-t-il pour le potentiel correspondant ?
- 5) Appliquer le théorème de Gauss à une surface dont le choix sera clairement justifié pour déterminer ce champ pour r compris entre R et $R+h$.
- 6) On note V_h le potentiel de l'électrosphère. Déterminer le potentiel V à l'altitude z où $0 < z < h$ en fonction de z , V_h , R , et h . On prendra l'origine des potentiels à la surface de la Terre. Tracer les lignes de champ sur un schéma et justifier leur orientation (cohérence avec \vec{E} trouvé).
- 7) On mesure à l'altitude h une différence de potentiel $U_h = 360$ kV. Exprimer la charge portée par la Terre (armature interne du condensateur).
- 8) La capacité d'un condensateur est donnée par $C = \frac{Q}{U}$ où Q est la charge portée par l'armature positive et U la différence de potentiel entre les armatures. Déterminer de la capacité C ainsi que de l'énergie électrostatique W_{elec} du système Terre/électrosphère.
- 9) Déterminer numériquement W_{elec} , Q et le champ électrique au niveau du sol. Ces dernières valeurs sont-elles cohérentes avec celles données dans le document 1 ? Sinon, quelles sont à votre avis les hypothèses à remettre en cause ? On prendra $R = 6400$ km et $U_h = 360$ kV.

Le document 2 explique l'apparition d'une différence de potentiel U_{bs} entre la base du nuage et sol durant un orage.

- 10) Quel est le moteur du mouvement des particules de glace et de grésil dans le nuage ? Faire un schéma du mouvement des particules de grésil et de glace, de leur charge et justifier la structure en tripôle donnée par le document 2. Faire un schéma situant l'isotherme T_c .
- 11) On considère que la base du nuage a une surface $S \approx 10^6$ m² et qu'elle est située à une altitude de 1 km par rapport au sol. Par une modélisation adaptée du système Terre – nuage dont on discutera la pertinence et les limites, sachant que le claquage de l'atmosphère se produit pour un champ $E = 300$ kV/m, donner l'ordre de grandeur de la valeur limite U_{bslim} au-delà de laquelle un éclair est généré. Quel est alors l'ordre de grandeur de la charge Q_b portée par la base du nuage ?

On cherche à justifier l'affirmation du document 2 : « *Le plus souvent, une décharge de connexion avec la Terre démarre d'un objet saillant (arbre, bâtiment élevé, tour, pylône)* ». Pour cela, on considère deux conducteurs sphériques de rayons R_1 et R_2 avec $R_1 < R_2$ reliés entre eux par un fil conducteur.

- 12) Exprimer le quotient des champs électriques E_1 et E_2 au voisinage de la surface des conducteurs en fonction de R_1 et R_2 . Qu'en déduit-on si $R_2 \gg R_1$? Interpréter alors la phrase extraite du document 2.
- 13) En quoi la photo du document 3 illustre-t-elle ce phénomène appelé « pouvoir des pointes » ? Connaissez-vous d'autres illustrations ou applications de ce phénomène ?
- 14) Reproduire rapidement la forme de la tour Eiffel sur votre copie et dessiner l'allure des lignes de champ et des surfaces équipotentielles qui permet d'illustrer les différences d'intensité du champ électrique en divers points à la surface de la tour.
- 15) La foudre a des conséquences graves : incendies de forêt, 20 à 30 personnes et 10000 têtes de bétail sont tuées chaque année en France par foudroiement. Il est très rare que les personnes ou animaux tués le soient par foudroiement direct (traversés par un précurseur). En fait l'électrocution provient d'un courant dérivé qui traverse le sol quand les échanges de charge ont lieu entre la Terre et le nuage (voir figure ci dessous).



Expliquer en modélisant le sol comme un conducteur ohmique et en se servant du schéma ci-dessus pourquoi un animal a une probabilité supérieure à celle d'un homme d'être foudroyé (on appelle « tension de pas » U_p la différence de potentiel correspondant à la distance qui sépare les pieds des humains ou les pattes des animaux ; cf. schéma).