

Les mécanismes de l'orage et de la foudre

Les cumulo-nimbus sont des nuages pouvant donner lieu à des manifestations orageuses. Ces nuages ont une extension verticale de l'ordre de 10 km dans les régions tempérées, mais qui peut atteindre jusqu'à 15 km dans les régions tropicales. A la base de ces nuages, de forts courants ascendants transportent de l'air chaud et humide en altitude, qui en rencontrant de l'air plus froid, se condense, alimentant ainsi les nuages en humidité. Un cumulo-nimbus peut contenir jusqu'à 300000 tonnes d'eau. A l'intérieur du nuage, les courants ascendants chargés en gouttelettes d'eau rencontrent des courants descendants chargés de cristaux de glace de plus ou moins grande dimension. Les gouttelettes d'eau et de glace se chargent par frottement, la base du nuage se chargeant ainsi négativement tandis que son sommet se charge positivement. Lorsque l'accumulation de charges devient importante, des phénomènes électriques tels que la foudre peuvent se produire.

L'objet de ce problème est de comprendre quelques aspects physiques des nuages d'orage. La première partie est dédiée aux ondes lumineuses et sonores produites par la foudre. Dans la deuxième partie, on étudie dans quelles conditions l'atmosphère devient instable et propice à la formation d'un nuage. La troisième partie est une étude de documents et traite de la formation de la foudre. La quatrième partie s'attache à modéliser le système terre-atmosphère comme un condensateur. Le sujet se termine par une étude simplifiée de la formation d'ozone dans l'atmosphère.

Constantes physiques

Célérité de la lumière dans le vide	$c \simeq 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\epsilon_0 \simeq 9.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Rappels d'analyse vectorielle

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E})) = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{E})) - \Delta \vec{E}$$

Précisions sur l'énoncé

Dans tout le problème, "exprimer" signifie donner l'expression littérale et "calculer" signifie donner la valeur numérique.

Toutes les parties peuvent être traitées de façon indépendante.

1 L'éclair et le tonnerre

Dans cette partie, nous étudions la présence simultanée du tonnerre et de l'éclair associés à l'orage. La contraction puis la dilatation des masses d'air surchauffé sur le trajet de l'éclair créent un phénomène sonore, appelé "tonnerre". On assimilera les propriétés électromagnétiques de l'air à celles du vide, on notera \vec{E} , le champ électrique et \vec{B} , le champ magnétique.

1.1 L'éclair

1) A quel type d'onde peut être associé l'éclair ? Donner l'intervalle de longueurs d'onde dans le vide du spectre visible.

2) Donner les équations de Maxwell vérifiées par les champs \vec{E} et \vec{B} , en l'absence de charge et de courant, dans un milieu assimilable au vide.

3) Démontrer l'équation de propagation du champ \vec{E} . Par analogie, donner l'équation de propagation du champ \vec{B} .

4) Exprimer la célérité de ce type d'onde en fonction des constantes physiques. Donner sa valeur.

1.2 Le tonnerre

5) A quel type d'onde peut-on associer le tonnerre ?

6) Définir une onde plane progressive.

7) On assimile localement le tonnerre à une onde plane progressive, on note $p(x,t)$ la surpression par rapport à la pression atmosphérique et v_{son} , la célérité du son dans l'air. Donner l'équation de propagation à une dimension vérifiée par $p(x,t)$.

8) D'après la figure 1, expliquer si le tonnerre est une onde longitudinale ou une onde transversale.

9) On rappelle que le domaine des fréquences audibles par l'homme s'étend de 20 Hz à 20 kHz et que la célérité du son dans l'air vaut $v_{son} = 340 \text{ m.s}^{-1}$ à la température de 20 °C. Quelles sont les longueurs d'onde correspondant à ces fréquences ?

10) Indiquer si les affirmations suivantes sont vraies ou fausses en justifiant vos réponses.

★ affirmation 1 : Une onde se propage toujours dans un milieu matériel.

★ affirmation 2 : Une onde sonore peut se propager dans le vide.

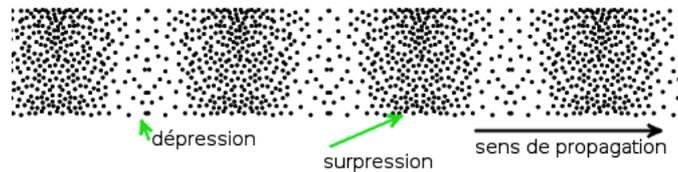


Figure 1 : répartition locale des particules au passage du tonnerre

1.3 Déterminer sa distance à l'orage

Lors d'un orage, la foudre tombe à 3,4 km d'un promeneur. L'éclair et le tonnerre sont émis simultanément au moment où la foudre tombe.

11) Au bout de combien de temps le promeneur verra-t-il l'éclair ? Au bout de combien de temps entendra-t-il le tonnerre ?

12) Justifier la technique qui consiste à compter les secondes entre éclair et tonnerre et à les diviser par 3 pour obtenir la distance, en km, à laquelle la foudre est tombée.

2 Instabilité de l'atmosphère

On s'intéresse dans cette partie aux propriétés thermodynamiques de l'atmosphère et aux conditions de développement d'un nuage. Dans toute cette partie, on se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On oriente l'axe des z selon la verticale ascendante.

Données :

- ★ Pression atmosphérique au niveau du sol : $P_0 = 1010 \text{ hPa}$
- ★ Valeur du champ de pesanteur terrestre : $g \simeq 10 \text{ N.kg}^{-1}$
- ★ Masse molaire de l'air : $M_{air} \simeq 30 \text{ g.mol}^{-1}$
- ★ Coefficient isentropique : $\gamma = 1,4$
- ★ Température de l'atmosphère au niveau du sol : $T_0 = 300 \text{ K}$
- ★ Viscosité dynamique de l'air : $\eta_{air} \simeq 2.10^{-5} \text{ Pa.s}$
- ★ Constante des gaz parfaits : $R \simeq 10 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Aide aux calculs pour la partie 2

$0,4/1,4 \simeq 0,3$	$1/9 \simeq 0,11$	$\sqrt{10} \simeq 3,2$	$12040/1,205 \simeq 9990$
----------------------	-------------------	------------------------	---------------------------

2.1 Profil de température au sein d'une colonne d'air

Dans la basse atmosphère (troposphère) où se développent les orages, l'air peut être assimilé à un gaz parfait. On suppose que l'ascension d'une parcelle d'air de volume mésoscopique V depuis la surface de la Terre à la pression P_0 et à la température T_0 , jusqu'à une altitude z à la pression $P(z)$, peut être assimilée à une détente adiabatique et mécaniquement réversible. Le champ de pesanteur est supposé uniforme et noté $\vec{g} = -g\vec{e}_z$, l'axe des z étant orienté selon la verticale ascendante. On note $\rho(z)$ et $P(z)$ la masse volumique et la pression de l'air à l'altitude z , M_{air} la masse molaire de l'air et $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ le rapport supposé constant entre les capacités thermiques massiques à pression constante et à volume constant de l'air.

13) Donner la relation scalaire de la statique des fluides reliant la variation de pression dP et la variation d'altitude dz en fonction de $\rho(z)$ et g .

14) Montrer que la masse volumique $\rho(z)$ de l'air à une altitude z peut s'écrire sous la forme :

$$\rho(z) = \frac{M_{air}P(z)}{RT(z)} \quad (1)$$

15) Énoncer la loi de Laplace en fonction de la température T , de la pression P et de γ . Préciser ses hypothèses d'application.

16) En déduire la relation suivante :

$$\frac{dP}{P} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} \quad (2)$$

17) En combinant les équations obtenues précédemment, montrer qu'on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT}{dz} = -\Gamma \text{ avec } \Gamma = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{M_{air}g}{R} \quad (3)$$

Calculer Γ et préciser son unité.

18) On appelle T_0 la température de l'air à l'altitude $z = 0$ m. Exprimer $T(z)$ en fonction de T_0 , Γ et z .

2.2 Instabilité de l'atmosphère et formation des nuages

Les nuages, et en particulier les nuages d'orage (cumulo-nimbus), se développent lorsque l'atmosphère est instable. Afin de déterminer à quelle condition l'atmosphère est stable ou non, on s'intéresse au mouvement d'une parcelle d'air de volume mésoscopique V de masse volumique ρ_p . On appelle ρ_e la masse volumique de l'air environnant.

19) Cette parcelle d'air de volume mésoscopique V est soumise à son poids et à la résultante des forces pressantes. Exprimer ces forces en considérant que la pression ne dépend que de z , les représenter sur votre copie.

20) En déduire que la résultante des forces massiques s'exerçant sur un volume V d'air humide s'écrit :

$$a_z = -g - \frac{1}{\rho_p} \frac{dP}{dz} \quad (4)$$

21) Montrer, en utilisant la relation de la statique des fluides pour l'air entourant la parcelle, que la résultante des forces massiques peut se mettre sous la forme :

$$a_z = g \frac{\rho_e - \rho_p}{\rho_p} \quad (5)$$

En météorologie, cette résultante s'appelle la flottabilité de la parcelle.

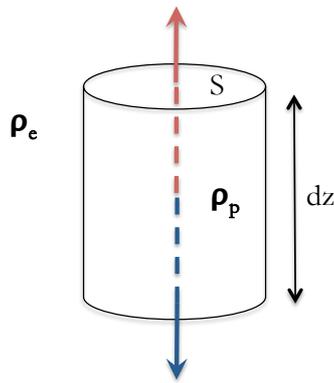


Figure 2 : Représentation des forces s'exerçant sur une parcelle de volume mésoscopique V d'air humide

22) En considérant l'évolution mécaniquement réversible, montrer que la flottabilité a_z peut également s'écrire :

$$a_z = g \frac{T_p - T_e}{T_e} \quad (6)$$

où T_p et T_e représentent respectivement les températures à l'altitude z de la parcelle et de son air environnant.

23) En utilisant le résultat de la question 18), donner les expressions de $T_p(z)$ et $T_e(z)$ en fonction de l'altitude z , de la température au sol T_0 et des gradients verticaux de température Γ_p et Γ_e pour l'air humide constituant la parcelle et pour l'air constituant son environnement.

24) En déduire finalement que la flottabilité de la parcelle peut se mettre sous la forme :

$$a_z = g \frac{\Gamma_e - \Gamma_p}{T_e} \cdot z \quad (7)$$

25) Ecrire l'équation différentielle vérifiée par $z(t)$, caractérisant le mouvement vertical de la parcelle d'air.

26) A quelle condition sur $\Gamma_e - \Gamma_p$ le mouvement de la parcelle sera-t-il oscillatoire et donc stable ? Exprimer dans ce cas la pulsation ω_0 des oscillations en fonction de g , Γ_e , Γ_p et T_e .

2.3 Stabilité d'un nuage

On cherche à comprendre dans cette partie pourquoi les gouttelettes de la partie inférieure d'un nuage ne tombent pas. On supposera dans cette partie que l'air est immobile dans le référentiel galiléen terrestre et que sa masse volumique reste constante. On considère la chute d'une gouttelette d'eau de rayon r et de masse volumique $\rho_{eau} = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ supposée constante, située initialement à une altitude $H = 500 \text{ m}$ au-dessus de la surface de la Terre avec une vitesse initiale v_0 nulle. On supposera par ailleurs que la résultante des forces de frottements exercées par l'air sur la goutte suit la loi de Stokes : $\vec{f} = -6\pi\eta_{air}r\vec{v}$, où η_{air} correspond à la viscosité dynamique de l'air et \vec{v} à la vitesse de la gouttelette. On négligera la poussée d'Archimède s'exerçant sur la gouttelette.

27) Exprimer la puissance P des forces de frottement exercées par l'air.

28) En appliquant le théorème de l'énergie mécanique, établir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse. En déduire que la gouttelette atteint une vitesse limite

$$\vec{v}_{lim} = \frac{2r^2}{9\eta_{air}} \rho_{eau} \vec{g}$$

29) Pour une gouttelette de rayon $r = 0,01 \text{ mm}$, calculer v_{lim} . En supposant que cette vitesse limite est atteinte très rapidement, évaluer la durée de chute d'une gouttelette de rayon $r = 0,01 \text{ mm}$ depuis la base du nuage à $H = 500 \text{ m}$ jusqu'au sol.

30) Une gouttelette de ce rayon atteint-elle réellement le sol ? Justifier que le nuage conserve son humidité.

2.4 Vitesse de chute de la pluie

Dans cette partie, on cherche à déterminer la vitesse de chute d'une goutte de pluie depuis la base du nuage. On pourra considérer les fluides incompressibles pour les questions suivantes.

31) En supposant à présent que les gouttes d'eau ont un rayon $r = 1 \text{ mm}$, calculer, en utilisant l'expression de la question **28**), la valeur limite de vitesse de chute. Cette valeur paraît-elle plausible ?

On considère le mélange air+pluie comme un milieu continu de masse volumique $\rho_{\text{pluie}} = 1,205 \text{ kg.m}^{-3}$, tombant verticalement avec une vitesse verticale $\vec{U} = -U(z)\vec{e}_z$ mesurée par rapport sol. On considère ce fluide comme un fluide parfait incompressible s'écoulant de façon stationnaire dans un cylindre conique de section S variable depuis la base du nuage d'orage ($z_{\text{base}} = 500 \text{ m}$) jusqu'au sol, avec une vitesse initiale $U(500)$ nulle.

32) Appliquer la relation de Bernoulli le long d'une ligne de courant comprise entre la base du nuage et le sol.

33) On note P_{500} , la pression atmosphérique à 50 m d'altitude. Montrer que la vitesse du fluide $U(0)$ au niveau du sol s'écrit :

$$U(0) = \sqrt{2 \times \frac{P_{500} - P_0}{\rho_{\text{pluie}}} + 2gz_{\text{base}}} \quad (8)$$

34) Calculer la valeur de $U(0)$ sachant que $P_{500} = (P_0 - 6020) \text{ Pa}$. Cette valeur vous paraît-elle plus plausible que celle calculée à la question **31**) ?

Pour les questions suivantes, la vitesse de chute de ce fluide sera prise égale à 3 m.s^{-1} au niveau du sol.

35) Calculer le débit volumique D_v des précipitations tombant sur une surface $S = 10 \text{ km}^2$. Sachant que la masse volumique de l'air sec vaut $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$, quelle est la masse d'eau liquide contenue dans 1 m^3 du mélange air+pluie ? En déduire le débit massique d'eau D_m en tonnes par seconde .

36) Exprimer la durée d'écoulement Δt d'une masse de fluide m en fonction de m et du débit massique D_m . Combien de temps pourra durer l'averse en supposant que le nuage contient 300 000 tonnes d'eau ?

3 Etude documentaire

Document

D'après G.Bonnet : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/QRorages.xml>

Formation des nuages d'orage... Les nuages d'orage sont des cumulonimbus, gros nuages en forme de hautes tours ou d'enclume, dont la base se situe aux environs de 1000 m d'altitude, et dont le sommet se situe aux environs de 10000 m. Ils sont composés à la fois d'eau et de glace. Ils se forment souvent à la fin d'une journée d'été lorsque de l'air chaud et humide s'élève dans l'atmosphère. Cet air, au fur et à mesure qu'il s'élève, se refroidit et se condense en donnant des gouttelettes d'eau, puis de la glace. Les nuages d'orage peuvent aussi résulter de la rencontre de deux masses d'air de températures et de degrés hygrométriques différents.

En-dehors des périodes d'orage... En-dehors des périodes d'orage il existe un champ électrique à la surface de la Terre. Ce champ électrique est d'environ 100 à 150 V.m^{-1} en moyenne. La Terre se comporte en effet comme un condensateur sphérique, avec un assez bon isolant, les parties basses de l'atmosphère (tropopause), placé entre deux conducteurs : le sol et l'ionosphère.

L'ionosphère est globalement neutre, tandis qu'à l'état naturel, la Terre est porteuse d'une charge négative : cette charge est à l'origine du champ électrique existant en permanence à la surface de la Terre.

En fait, l'atmosphère n'est pas un isolant parfait : il existe donc un petit courant de fuite entre le sol et l'ionosphère. Ce courant finirait par décharger le sol s'il n'y avait pas des mécanismes pour le recharger : le principal de ces mécanismes est l'orage.

Cas des orages... Lors des orages, le cumulo-nimbus est fortement chargé électriquement. Globalement, le sommet du nuage est chargé positivement alors que sa base est négative.

Le mécanisme de séparation des charges dans le nuage n'est pas parfaitement compris : de nombreuses explications existent (la première date de 1892), mais aucune n'est totalement satisfaisante. Suivant J.D. Sator, ce sont les chocs entre particules (grésil et petits cristaux de glace) à l'intérieur du nuage, causés par les importants mouvements de convection (air chaud ascendant, air froid descendant à des vitesses de l'ordre de 200 km/h) qui créent une électrisation. En fin de compte, les particules de glace sont chargées positivement tandis que les gouttelettes d'eau sont chargées négativement. La glace, plus légère, se retrouve au sommet du nuage tandis que les gouttelettes d'eau se retrouvent à la base du nuage.

Suivant Y. Takahashi, les charges apparaîtraient à l'intérieur du nuage suite à la rupture de gouttes d'eau (il y aurait congélation d'eau en surfusion puis rupture de la goutte).

La partie du nuage qui se trouve en regard de la Terre étant chargée négativement, le sol se charge positivement .

Lors des orages, le champ électrique est inversé par rapport à son état habituel. Sa norme est en moyenne de 10000 à 15000 V.m^{-1} environ. Ce champ peut être fortement modifié par le relief : ce n'est donc qu'une valeur moyenne. Par temps d'orage, on a donc un tripôle électrique : sommet du nuage (globalement positif), base du nuage (globalement négative) et sol (positif). Si on s'intéresse seulement à ce qui se passe entre la base du nuage et le sol, on peut comparer la situation par temps d'orage à un gigantesque condensateur constitué par de l'air placé entre le bas du nuage et le sol.

Qu'est-ce qui détermine l'endroit où va tomber la foudre ? La foudre ne tombe pas au hasard, mais préférentiellement sur des objets élevés ou des pointes (paratonnerres) car le champ électrique est alors intense, et, par conséquent, la force exercée sur les porteurs de charge est plus importante que dans un endroit plat. Parmi les nombreuses décharges électriques qui se produisent, seule une petite partie arrive au sol (environ un dixième des décharges totales). La plupart des décharges sont des décharges intra nuage ou des décharges inter nuages. L'ensemble des deux phénomènes : éclair au sol + tonnerre constitue ce qu'on appelle la foudre. Etant donnée la description que l'on a faite de la répartition des charges à l'intérieur du nuage, il semble logique de penser que la foudre va correspondre à un passage de courant électrique entre la Terre, chargée positivement, et le bas du nuage, chargé négativement. Dans ce cas, la Terre se recharge négativement. Cependant, ce phénomène, quoique correspondant à la majorité des coups de foudres observés, n'est pas le seul : il peut aussi y avoir des coups de foudre entre la Terre et la partie du nuage chargée positivement, ceux-ci représentent environ un tiers ou un quart du nombre total de coups de foudre, ils ne sont donc pas négligeables.

Quels sont les signes précurseurs de la foudre ? Il y a d'abord déplacement de traceurs (à la vitesse de 200 km/s environ) qui ionisent l'atmosphère sur leur trajet. Ces traceurs sont des particules chargées pouvant partir du nuage (majorité des cas) ou des objets au sol. Accélérés par le champ électrique, ils ont une énergie suffisante pour ioniser l'atmosphère, créant ainsi de nouvelles charges qui sont accélérées à leur tour par le champ électrique : de nombreux porteurs de charges peuvent ainsi être créés par un phénomène d'avalanche. Lorsqu'un canal ionisé est établi entre le sol et le nuage (typiquement, ce canal a un diamètre de 2 à 3 cm), une ou plusieurs décharges se produisent. Ces décharges constituent la foudre proprement dite. Elles se déplacent à une vitesse de l'ordre de 40000 km/s , c'est-à-dire plus d'un dixième de la vitesse de la lumière, et correspondent à une tension de l'ordre de 100 millions de Volts et un ampérage de 30000 A . Le long du trajet de la décharge, l'air peut atteindre une température de $30000 \text{ }^\circ\text{C}$...

Pourquoi l'éclair est-il lumineux ? L'éclair est le phénomène lumineux qui accompagne la foudre. Les gaz, sur le trajet de la décharge électrique sont surchauffés et ionisés, ils émettent alors de la lumière. La teinte exacte de l'éclair peut dépendre de plusieurs facteurs : la densité de courant, la distance à l'éclair, et les différentes particules présentes dans l'atmosphère. L'éclair est généralement rougeâtre s'il y a de l'eau dans l'atmosphère, blanc si l'air est très sec, jaunâtre s'il y a de la poussière, bleu s'il y a de la grêle.

Qu'est-ce qui produit le tonnerre ? La contraction (sous l'effet de forces électromagnétiques) puis la dilatation des masses d'air surchauffées sur le trajet de l'éclair créent une onde de choc qui engendre

le bruit appelé "tonnerre". Ce bruit est d'autant plus fort que le courant a été intense ; il dépend de la distance, de la longueur, et de l'orientation de l'éclair... Certains éclairs peuvent faire une vingtaine de kilomètres de long : le son en provenance des différentes parties du trajet de l'éclair arrive alors à nos oreilles à des moments différents (le son ne se déplace "qu'à" 340 m/s ...). On peut aussi envisager que des réflexions multiples du son, sur les nuages par exemple, puissent contribuer à allonger la durée du tonnerre. Les différentes fréquences de l'onde sonore produite par l'éclair ne se propagent pas non plus toutes de la même façon. Les fréquences les plus hautes sont anisotropes : elles se propagent essentiellement suivant une direction perpendiculaire au canal de l'éclair, tandis que les fréquences les plus basses se propagent de la même façon dans toutes les directions. Le son perçu variera donc grandement selon qu'il s'agira d'un coup de foudre proche de l'observateur, par exemple, ou d'un éclair inter nuage long et sinueux. Dans le premier cas le bruit est alors court et intense (éclair proche, courant important) et on entend un craquement sec. Dans le deuxième cas, le bruit est plus faible (l'éclair est plus éloigné, et l'intensité du courant est plus faible dans le cas d'un éclair inter nuage que dans le cas d'un coup de foudre), dure longtemps (car l'éclair est de grande taille ; la durée de l'éclair est très faible mais la durée du trajet du son est importante) et peut varier en fréquence et en intensité dans la mesure où les différents segments de l'éclair sinueux peuvent être orientés différemment. On entendra alors un long roulement de tonnerre.

Donnée utile :

Capacité thermique volumique de l'air $c_p \simeq 1,25 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

Aide aux calculs pour la partie 3.

$\pi \simeq 3$	$(1,4)^2 = 2$	$1,25 \times 0,6 = 0,75$
----------------	---------------	--------------------------

3.1 Questions

En vous appuyant sur les documents fournis, répondre aux questions suivantes :

- 37) En utilisant le théorème de Coulomb, justifier l'origine du champ électrique, à l'état naturel, E_{nat} , à la surface de la Terre. Représenter les lignes de champ électrique terrestre.
- 38) Justifier l'existence d'un courant électrique dans l'atmosphère et le représenter sur un schéma.
- 39) Expliquer l'inversion du champ électrique lors d'une situation d'orage. On définit le coefficient $\alpha = \frac{E_{orage}}{E_{nat}}$. Calculer le coefficient maximal α_{max} lors de la formation de l'orage.
- 40) Calculer le volume d'un canal ionisé de $2,8 \text{ cm}$ de diamètre établi entre le sol et la base du nuage.
- 41) Calculer la durée τ de la foudre entre le bas du cumulo-nimbus et le sol.
- 42) Calculer la puissance dissipée par effet Joule par la foudre.
- 43) Calculer l'élévation de température lors de la formation de la foudre. Est-ce cohérent avec les données du texte ? Commenter.
- 44) Quelle différence peut-on faire entre la foudre et l'éclair ?

4 Etude électromagnétique des nuages d'orage

4.1 Etude du condensateur Terre-ionosphère

On admet que la Terre et son atmosphère constituent les deux armatures d'un condensateur sphérique. On représente l'ensemble Terre-ionosphère comme un volumineux condensateur sphérique. La Terre, de rayon R , se comporte comme un conducteur parfait de potentiel, V_T pris nul et porte une charge négative $-Q$ uniformément répartie sur sa surface, tandis que l'ionosphère est représentée par une surface équipotentielle sphérique de rayon $R + z_0$, de potentiel V_{atm} . On suppose que l'atmosphère a la permittivité du vide.

Aide aux calculs pour la partie 4.

$4.\pi.\epsilon_0 \simeq 1,1.10^{-10}$ U.S.I.	$1/(36.\pi) \simeq 0,009$
---	---------------------------

- 45) Définir un condensateur électrique et la capacité associée.
- 46) Faire un schéma du condensateur Terre-ionosphère. Représenter 2 équipotentielles distinctes des armatures.
- 47) A l'aide d'un schéma et des arguments d'invariance et de symétrie, justifier que le champ est de la forme : $\vec{E} = E(r)\vec{e}_r$ entre les armatures du condensateur.
- 48) En utilisant le théorème de Gauss, exprimer $E(r)$, entre les armatures du condensateur, en fonction de r , Q et ϵ_0 .
- 49) Rappeler la relation différentielle entre le champ électrique \vec{E} et le potentiel V . En déduire la différence de potentiel $\Delta V = V_{atm} - V_T$ entre les deux armatures en fonction de Q , R et $R + z_0$ et ϵ_0 .
- 50) En déduire l'expression de la capacité C de ce condensateur en fonction de R et $R + z_0$ et ϵ_0 .
- 51) On souhaite calculer $\Delta V = V_{atm} - V_T$ en utilisant une procédure informatique d'intégration dite "méthode des rectangles", présentée ci-dessous :

```

function S=rectangles(a,b,n,f)
//méthode d'approximation dites des 'rectangles'
S=0
for i=0:n-1
    x1=a+i*(b-a)/n ;
    x2= a+(i+1)*(b-a)/n ;
    S=S+f((x1+x2)/2)*(x2-x1) ;
end
endfunction

```

Figure 3 : intégration par la méthode des rectangles

Donner les valeurs de a et b et l'expression de la fonction f utilisées dans la procédure ci-dessus.

4.2 Quand l'orage arrive

Par temps calme, des mesures à l'altitude $z_0 = 60$ km ont permis d'évaluer le potentiel $V_{atm}(z_0)$ à environ 360 kV. Le potentiel de la Terre est toujours pris égal à 0 V. Son rayon est estimé à $R = 6000$ km.

- 52) Schématiser un condensateur plan et rappeler sa capacité . Justifier que dans les conditions des mesures, le système se comporte comme un condensateur plan. Calculer sa capacité C .
- 53) Calculer la valeur de la charge portée par la Terre. En déduire la densité surfacique de charge σ .
- 54) En utilisant le théorème de Coulomb, en déduire la valeur du champ E au niveau du sol.

Lors d'un orage, le champ électrique est inversé par rapport à son état habituel. La valeur du potentiel passe à $V_{atm}(1\text{ km}) = -10^8$ V pour le système formé par le sol et la base des nuages d'altitude $z_1 = 1$ km.

- 55) Représenter les lignes de champ électrique entre le sol et la base des nuages.
- 56) Déterminer la nouvelle valeur du champ électrique, E_1 , à la surface de la Terre.

5 Formation d'ozone

On étudie un modèle simplifié de l'atmosphère. Celle-ci peut être assimilée à un mélange de diazote et de dioxygène. La molécule d'ozone O_3 est produite à partir du dioxygène de l'atmosphère.

- 57) Quels sont les pourcentages approchés de diazote N_2 et de dioxygène O_2 , dans l'atmosphère ?
- 58) On considère l'équilibre chimique entre O_2 et l'ozone O_3 . Ecrire l'équation bilan associée à la formation de l'ozone.
- 59) L'enthalpie standard de réaction de formation de l'ozone est $\Delta_r H^0 = 283$ kJ.mol⁻¹. Justifier si la réaction est endothermique ou exothermique. Cette réaction peut-elle se produire spontanément dans la basse atmosphère ?
- 60) Quelle influence peut avoir l'orage sur la production d'ozone dans la basse atmosphère ?

★ Fin de l'épreuve ★