

I. Composition du jury pour la session 2021

M. François VANDENBROUCK, inspecteur général de l'éducation, du sport et de la recherche, président du jury

Mme Marie-Blanche MAUHOURLAT, inspectrice générale de l'éducation, du sport et de la recherche, vice-présidente du jury

Mme Muriel COQUELIN, professeure agrégée, académie de Normandie

M. Clément DEBLIECK, professeur agrégé, académie de Lille

Mme Karine FAYON, professeure agrégée, académie de Créteil

M. Vincent FREULON, professeur agrégé, académie de Créteil

M. Pierre JAMONNEAU, professeur agrégé, académie de Nantes

Mme Patricia KESTER professeure agrégée, académie de Versailles

Mme Caroline NOLORGUES-NAVINEL, professeure agrégée, académie de Versailles

M. Jean-Christophe PELHATE, professeur agrégé, académie de Versailles

Mme Élise PRALY, professeure agrégée, académie de Grenoble

Mme Clara SCHATTNER, professeure agrégée, académie de Créteil

M. Pierre TOGNETTI, professeur agrégé, académie de Paris

II. Statistiques pour la session 2021

La session 2021 a vu concourir 2094 candidats, soit un peu plus de 96% des 2177 candidats inscrits. Ce taux élevé révèle l'engagement fort et remarquable des candidats à préparer l'épreuve écrite de physique-chimie du concours général des lycées. Le nombre de candidats est en léger recul par rapport à la session 2019 (2094 candidats contre 2208). Cette baisse est probablement à mettre sur le compte de la crise sanitaire.

L'ensemble des candidats inscrits à la session 2021 se répartissent comme suit selon leur genre et leur origine territoriale.

Académie	Filles	Garçons
Aix-Marseille	29	60
Amiens	4	21
Besançon	4	7
Bordeaux	27	34
Clermont-Ferrand	3	17
Corse	1	0
Créteil	57	79
Dijon	18	43
Grenoble	22	38
Guadeloupe	7	3
Lille	38	64
Limoges	2	6
Lyon	54	126
Mayotte	1	0
Montpellier	14	26
Nancy-Metz	20	30
Nantes	28	50
Nice	16	24
Normandie	32	58
Orléans-Tours	16	34
Paris	92	168
Poitiers	9	15
Polynésie Française	7	5
Reims	13	23
Rennes	13	42
Réunion	14	24
Strasbourg	12	39
Toulouse	33	53
Versailles	127	208
Lycées français à l'étranger	59	108
Totaux	772	1405

On dénombre donc 35% de filles parmi les inscrits, alors qu'elles représentent 47,5% des élèves qui suivent l'enseignement de spécialité physique-chimie en terminale générale à la rentrée 2020¹.

Les candidats des lycées français à l'étranger représentent 32 pays différents. Ils se répartissent comme suit :

1. Note d'information de la DEPP n° 20.38, novembre 2020.

Ambassade	Filles	Garçons
Ambassade de France en Algérie	2	1
Ambassade de France en Allemagne	4	2
Ambassade de France au Bahreïn	0	2
Ambassade de France en Belgique	1	2
Ambassade de France au Brésil	2	1
Ambassade de France au Cambodge	0	3
Ambassade de France au Canada	0	3
Ambassade de France en Chine	0	2
Ambassade de France en Colombie	5	1
Ambassade de France en Corée du Sud	2	0
Ambassade de France au Danemark	0	1
Ambassade de France aux Émirats Arabes Unis	0	1
Ambassade de France en Espagne	5	7
Ambassade de France aux États-Unis	2	6
Ambassade de France en Inde	0	1
Ambassade de France en Italie	1	0
Ambassade de France au Japon	0	2
Ambassade de France au Liban	0	3
Ambassade de France au Luxembourg	2	7
Ambassade de France au Maroc	9	25
Ambassade de France à Maurice	2	5
Ambassade de France au Mexique	1	1
Ambassade de France à Monaco	0	3
Ambassade de France aux Pays-Bas	1	0
Ambassade de France au Portugal	1	2
Ambassade de France en République Dominicaine	0	2
Ambassade de France en Roumanie	2	1
Ambassade de France au Royaume-Uni	3	3
Ambassade de France au Sénégal	2	5
Ambassade de France à Singapour	2	2
Ambassade de France en Suisse	1	2
Ambassade de France en Tunisie	9	10
Ambassade de France en Turquie	0	1
Ambassade de France au Viet-Nam	0	1

III. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve de la session 2021 porte sur quelques aspects de la physique et de la chimie des nuages ainsi que sur leur impact dans le bilan radiatif infrarouge terrestre. Le sujet comporte quatre parties largement indépendantes. Il débute par une première partie traitant de l'équilibre radiatif des planètes du système solaire et de l'influence de l'effet de serre sur la température de surface des planètes. La deuxième partie aborde un mécanisme de formation des nuages par ascension isentropique d'une masse d'air ainsi qu'une modélisation de la chute d'une goutte de pluie. La troisième partie s'intéresse à un mécanisme d'oxydation des polluants atmosphériques et à la caractérisation d'une eau de pluie acide. Enfin, la dernière partie du sujet propose une évaluation de l'impact des nuages sur le bilan radiatif infrarouge de la Terre à partir d'observations satellitaires.

De nombreux candidats ont abordé un nombre important de questions et ont ainsi réussi à bien avancer dans le sujet. Le jury les félicite et se réjouit d'avoir pu découvrir d'excellentes prestations. Le jury constate avec satisfaction que les questions ouvertes et la résolution de problème ont été abordées par de nombreux candidats, qui en ont tiré profit.

1) Remarques circonstanciées à propos des réponses apportées par les candidats

Partie I

1. L'appropriation et l'utilisation de la loi de Stefan ont été bien réussies par les candidats.
3. L'utilisation de l'albédo dans l'expression de la puissance absorbée a mené à beaucoup d'erreurs d'homogénéité.
8. et 9. Une bonne appropriation de la figure 2 était nécessaire pour répondre à cette question. Ceci a fait défaut à un certain nombre de candidats qui n'ont pas pris en compte l'ensemble des flux dans les bilans thermiques.
12. Le terme d'« effet de serre » pour décrire le confinement par l'atmosphère du flux infrarouge émis par la Terre est connu de la majorité des candidats.

Partie II

14. Le jury a remarqué des problèmes récurrents de manipulation de puissance lors de l'établissement de la relation (10).
17. et 18. De nombreux candidats ont montré sur ces questions de bonnes capacités d'appropriation d'un code Python et d'écriture d'une ligne de code en Python.
22. Le jury a noté de nombreuses erreurs de signe lors de la projection de la seconde loi de Newton sur l'axe vertical descendant. Des erreurs concernant le volume d'une boule ont aussi été observées.
30. De nombreux candidats ont bien pensé à comparer les normes des forces pour répondre à la question. Cette comparaison s'est cependant souvent limitée au poids, le cas de la poussée d'Archimède n'était que rarement discuté.
31. La résolution de problème a été assez souvent abordée par les candidats. Ces derniers ont montré que les relations d'électroncinétique telles que celle liant charge des armatures et tension aux bornes d'un condensateur ou encore celle donnant l'expression de la puissance électrique sont majoritairement connues. Le jury invite les candidats à toujours commenter les résultats numériques obtenus lors d'une résolution de problème afin d'en discuter la pertinence par comparaison à des ordres de grandeur usuels.

Partie III

32. Les structures de Lewis proposées par les candidats étaient souvent erronées, conséquence d'une difficile appropriation de la notion de radical.
33. Le jury attendait que les candidats citent la rupture d'une liaison covalente comme conséquence de l'absorption d'un photon.
34. L'énergie molaire de liaison a souvent été confondue avec l'énergie d'une unique liaison covalente.
36. Le jury a pu observer de fréquentes confusions entre $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ et $\text{molécules} \cdot \text{cm}^{-3}$.
38. L'expression de la vitesse de disparition d'un réactif est connue d'un grand nombre de candidats.
41. Cette question n'a été que peu abordée.
42. L'utilisation d'une coupelle à solide pour introduire le solide pesé dans la fiole a bien souvent été omis par les candidats.
45. Le jury a noté un certain nombre d'équations bilans non équilibrées.
46. Le jury a apprécié que la discussion sur les formes prédominantes de l'acide carbonique mette souvent en jeu une comparaison du pH avec le $\text{p}K_a$ du couple.
48. Question très peu abordée.
51. L'exploitation de la seconde équivalence a bien souvent posé problème. Il fallait en effet utiliser la différence des volumes équivalents pour trouver la concentration en acide carbonique.

Partie IV

57. C'est la vitesse du satellite qui doit intervenir dans l'expression de la résolution latérale et non la célérité de la lumière.
62. Il est important de remarquer que l'ordonnée à l'origine ne peut pas être lue directement sur le graphique car l'axe des abscisses ne commence pas à 0.
65. à 68. Questions très peu souvent abordées.

2) Proposition de corrigé

Le corrigé de l'épreuve écrite de physique-chimie de la session 2021 qui suit n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

Le temps d'un nuage

I. Température de surface d'une planète

1) Température de surface d'une planète sans atmosphère

1) L'aire de la surface du Soleil est $\mathcal{A}_S = 4\pi R_S^2$ donc la puissance émise par rayonnement par le Soleil s'écrit, selon la loi de Stefan-Boltzmann : $P_S = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4$.

2) Le terme πR_P^2 représente l'aire de la surface de la planète projetée perpendiculairement au rayonnement solaire incident.

Le terme $4\pi d_{S-P}$ représente l'aire de la sphère de rayon d_{S-P} .

La puissance solaire totale P_S est répartie uniformément sur l'ensemble de la sphère de rayon d_{S-P} . Ainsi, la proportion de la puissance solaire totale effectivement reçue par la planète, $P_{r,S}/P_S$, est à hauteur de l'aire occupée par la planète πR_P^2 par rapport à l'aire de la sphère $4\pi d_{S-P}^2$. Ce qui s'écrit

$$\frac{P_{rS}}{P_S} = \frac{\pi R_P^2}{4\pi d_{S-P}^2} \quad \text{soit} \quad P_{rS} = P_S \frac{\pi R_P^2}{4\pi d_{S-P}^2} .$$

3) La puissance solaire absorbée par la planète est $P_{aS} = (1 - A)P_{rS}$ soit $P_{aS} = (1 - A)P_S \frac{R_P^2}{4d_{S-P}^2}$.

4) L'aire de la surface de la planète est $A_P = 4\pi R_P^2$ donc la puissance émise par rayonnement par la planète s'écrit, selon la loi de Stefan-Boltzmann : $P_P = 4\pi R_P^2 \sigma T_P^4$.

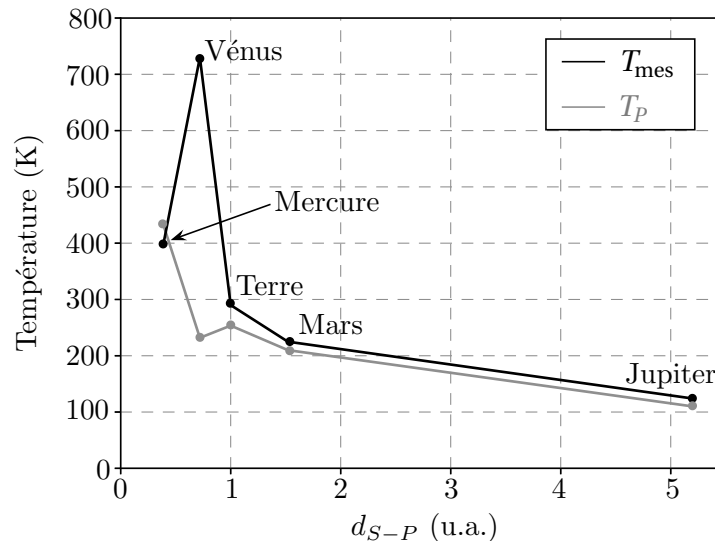
À l'équilibre thermique, la puissance émise par la planète doit compenser la puissance solaire absorbée, ce qui s'écrit

$$P_{aS} = P_P \quad \text{avec} \quad P_P = 4\pi R_P^2 \sigma T_P^4 \quad \text{et} \quad P_{aS} = (1 - A)\pi R_S^2 \sigma T_S^4 \frac{R_P^2}{d_{S-P}^2} . \quad \text{Il vient alors}$$

$$T_P = T_S \left(\frac{(1 - A)R_S^2}{4d_{S-P}^2} \right)^{1/4} .$$

5) La température de la Terre dans le modèle sans atmosphère est $T_{\text{Terre}} = 2.5 \times 10^2 \text{ K}$.

6) Les températures T_P et T_{mes} des différentes planètes sont représentées en fonction de la distance d_{S-P} en unité astronomique sur le graphique ci-dessous.



7) Les températures calculées de Mercure, Mars et Jupiter sont en bon accord avec les températures mesurées.

Les températures calculées pour la Terre et Vénus sont plus basses que les températures mesurées. En particulier, en ce qui concerne la Terre, l'eau devrait y être solide. Le modèle développé dans cette partie n'est pas adapté pour décrire la température de surface de ces planètes.

2) Influence de l'atmosphère sur la température de surface de la Terre

8) Le bilan de puissance pour la surface de la Terre à l'équilibre thermique s'écrit :

$$(1 - A)P_{rS} + P_a = P_T \quad (1)$$

9) Le bilan de puissance pour l'atmosphère à l'équilibre thermique s'écrit :

$$P_{rS} + P_T = AP_{rS} + (1 - A)P_{rS} + 2P_a \quad \text{soit} \quad P_T = 2P_a \quad (2)$$

10) En combinant les équations (1) et (2), on a $P_T = 2(1 - A)P_{rS}$ où d'après la loi de Stefan-Boltzmann : $P_T = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$ et d'après la partie précédente : $P_{rS} = \pi R_S^2 \sigma T_S^4 \frac{R_T^2}{d_{S-T}^2}$. Finalement, il vient

$$T_T = T_S \left(\frac{(1 - A)R_S^2}{2d_{S-T}^2} \right)^{1/4} ,$$

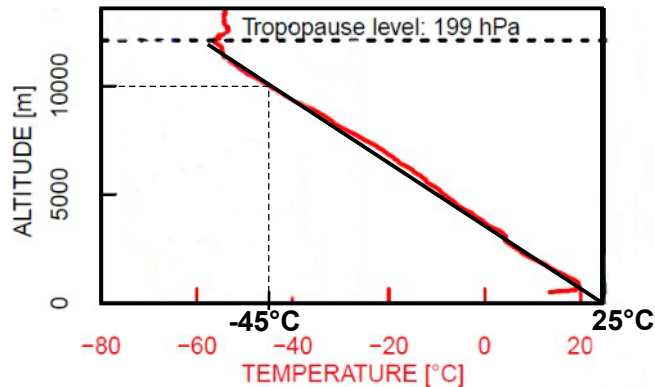
11) L'application numérique donne $T_T = 3.0 \times 10^2 \text{ K}$. L'ordre de grandeur est cohérent avec la température de surface mesurée sur la Terre. Dans le cadre de ce modèle l'eau est bien liquide sur Terre.

- 12) L'effet d'augmentation de la température de surface de la Terre en raison de la présence de l'atmosphère est appelé *effet de serre*.

II. Formation des nuages

1) Formation d'un nuage troposphérique

- 13) La chute de la température dans la troposphère peut être modélisée par une loi affine $T(z) = T_0 - \lambda z$ avec $T_0 = 298\text{ K} = 25^\circ\text{C}$.



En traçant la droite affine associée à ce modèle sur la courbe du document 1, on trouve deux points de manière à fixer le paramètre λ du modèle qui correspond à l'opposé de la pente de la droite de modélisation : pour $z = 0$, $T(z = 0) = T_0 = 25^\circ\text{C}$ et pour $z = 10000$ m, $T(10000) \approx -45^\circ\text{C}$. On en déduit alors

$$\lambda = \frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{T(10000) - T_0}{10000} = 7.0\text{ K/km}.$$

- 14) En utilisant la loi des gaz parfaits, on a $V = nRT/P$. La relation $PV^\gamma = \text{cste}$ devient : $(nR)^\gamma P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cste}$. Or le volume V d'air est un système fermé donc nR est une constante. On a donc

$$P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cste}.$$

- 15) Entre le début de l'ascension (niveau du sol) et l'altitude z , la quantité $P^{1-\gamma} T^\gamma$ est conservée. On peut donc écrire

$$P(z)^{1-\gamma} T(z)^\gamma = P_0^{1-\gamma} T_0^\gamma.$$

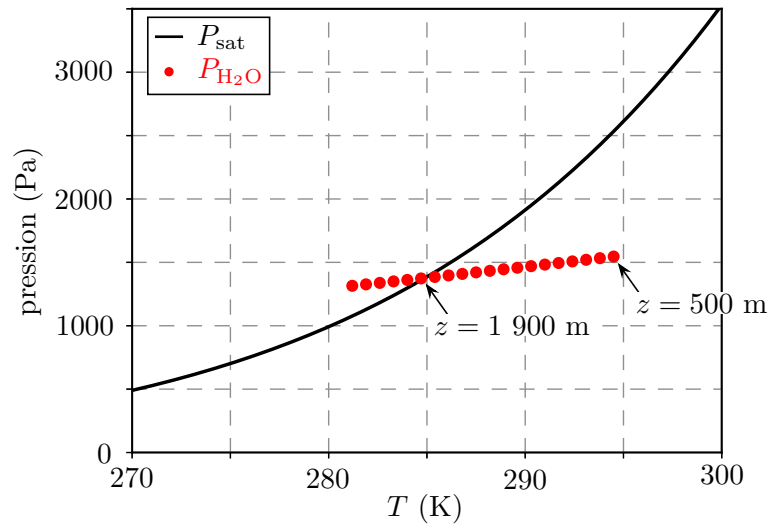
où P_0 et T_0 sont respectivement la pression et la température au niveau du sol. En utilisant la loi affine déterminée précédemment pour l'évolution de la température $T(z)$ dans la troposphère, on a

$$P(z) = P_0 \left(\frac{T_0}{T_0 - \lambda z} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}.$$

- 16) On a $\Pi \ll 1$ donc $\Pi = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{sec}}} \approx \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{tot}}}$. D'après la loi des gaz parfaits, $m_{\text{tot}} = M_{\text{tot}} PV/RT \approx M_{\text{sec}} PV/RT$ et $m_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2\text{O}}(z) V/RT$. Il vient alors

$$P_{\text{H}_2\text{O}}(z) = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \Pi P(z).$$

- 17) Le premier élément de la liste z correspond à $i=0$ soit 500 m. Le pas en altitude est de 100 m. Le dernier élément de la liste z correspond à $i=19$ soit 2400 m. La liste z contient 20 éléments lorsque la boucle « pour » est terminée
- 18) À la question 14, on a obtenu $T = T_0 - \lambda z$ avec $T_0 = 298\text{ K}$ et $\lambda = 7.0\text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$. La ligne 8. s'écrit donc `T.append(298-0.007*z[i])`.
- 19) Sur le graphique de la figure 5, on remarque que $P_{\text{H}_2\text{O}}$ devient supérieure à P_{sat} pour une altitude $z = 1900$ m ce qui correspond à l'altitude de formation du nuage.



La valeur trouvée semble raisonnable pour des nuages bas. Cependant des nuages se forment à bien plus haute altitude (document de l'annexe sur les différents types de nuages). Ceci peut s'expliquer par un retard à la liquéfaction c'est-à-dire que la vapeur d'eau reste sous forme gazeuse bien que l'état thermodynamique le plus stable soit un état liquide.

- 20) Les nuages se formant dans la haute atmosphère sont composés en partie de glace, or le phénomène de solidification de l'eau n'a pas été pris en compte dans le modèle développé dans cette partie.

2) Chute d'une goutte d'eau

- 21) L'équation aux dimensions obtenue à partir de l'expression du nombre de Reynolds est

$$[Re] = \frac{[2][R][\rho_{\text{air}}][v]}{[\eta]}$$

avec

$$[Re] = 1 \quad [2] = 1 \quad [R] = L \quad [\rho_{\text{air}}] = ML^{-3} \quad [v] = LT^{-1}$$

On en déduit la dimension du coefficient de viscosité dynamique

$$[\eta] = \frac{[2][R][\rho_{\text{air}}][v]}{[Re]} = ML^{-1}T^{-1}$$

Le coefficient de viscosité dynamique s'exprime donc en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le système international ou encore en $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

- 22) Dans l'hypothèse où $Re < 1$, la force de traînée s'écrit sous la forme $\vec{F}_t = -6\pi\eta R \vec{v}$. La loi de la quantité de mouvement appliquée à la goutte de masse $m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{eau}}$ donne

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -6\pi\eta R \vec{v} + m \vec{g}$$

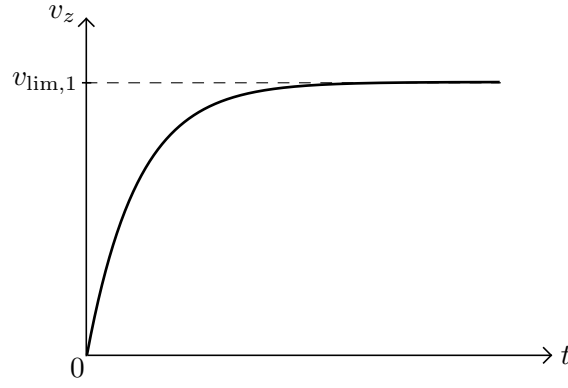
La projection sur le vecteur directeur \vec{u}_z de l'axe vertical descendant donne

$$\frac{dv_z}{dt} + \frac{9\eta}{2R^2 \rho_{\text{eau}}} v_z = g$$

Par identification, il vient $\tau = \frac{2R^2 \rho_{\text{eau}}}{9\eta}$.

- 23) Avec la condition initiale $v_z(t=0) = 0$, la solution de l'équation différentielle précédente est

$$v_z(t) = g\tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$



Il y a existence d'une vitesse limite car la limite de v_z aux temps longs est finie. Il vient alors :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_z(t) = v_{\text{lim},1} = \frac{2gR^2\rho_{\text{eau}}}{9\eta} = 6.8 \times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}.$$

24) En régime permanent, le nombre de Reynolds est $\text{Re} = \frac{2R\rho_{\text{air}}v_{\text{lim},1}}{\eta} = 5.7$.

On trouve $\text{Re} > 1$, ce qui n'est pas cohérent avec l'hypothèse de départ et le modèle utilisé pour la force de traînée.

25) Dans l'hypothèse où $1 < \text{Re} < 5$, la force de traînée s'écrit sous la forme $\vec{F}_t = -6\pi\eta R\vec{v} - \frac{9}{4}\rho_{\text{air}}\pi R^2\|\vec{v}\|\vec{v}$. La loi de la quantité de mouvement appliquée à la goutte s'écrit

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -6\pi\eta R\vec{v} - \frac{9}{4}\rho_{\text{air}}\pi R^2\|\vec{v}\|\vec{v} + m\vec{g}.$$

La goutte chutant du nuage vers le sol dans la direction de l'axe (Oz), $v_z = \vec{v} \cdot \vec{u}_z > 0$. Ainsi, $\|\vec{v}\| = v_z$. La projection de la loi de la quantité de mouvement suivant l'axe (Oz) donne

$$m \frac{dv_z}{dt} = -6\pi\eta Rv_z - \frac{9}{4}\rho_{\text{air}}\pi R^2v_z^2 + mg.$$

En régime permanent, la vitesse de la goutte atteint la vitesse limite $v_{\text{lim},2}$, le mouvement de la goutte est alors rectiligne uniforme donc $dv_z/dt = 0$. En notant que $m = \frac{4}{3}\pi R^3\rho_{\text{eau}}$, on trouve l'équation vérifiée par $v_{\text{lim},2}$

$$\frac{3\rho_{\text{air}}R}{8\eta}v_{\text{lim},2}^2 + v_{\text{lim},2} - \frac{2g\rho_{\text{eau}}R^2}{9\eta} = 0. \quad (3)$$

26) L'équation (3) est une équation du second degré dont les solutions sont

$$v_{\text{lim},2\pm} = -\frac{4\eta}{3\rho_{\text{air}}R} \pm \frac{4\eta}{3\rho_{\text{air}}R} \sqrt{1 + \frac{\rho_{\text{air}}\rho_{\text{eau}}gR^3}{3\eta^2}}.$$

La vitesse de la goutte doit être positive, on choisi donc la solution avec un signe « + ». Finalement,

$$v_{\text{lim},2} = -\frac{4\eta}{3\rho_{\text{air}}R} + \frac{4\eta}{3\rho_{\text{air}}R} \sqrt{1 + \frac{\rho_{\text{air}}\rho_{\text{eau}}gR^3}{3\eta^2}} = 4.1 \times 10^{-1} \text{ m s}^{-1}.$$

En régime permanent, le nombre de Reynolds est $\text{Re} = \frac{2R\rho_{\text{air}}v_{\text{lim},2}}{\eta} = 3.4$.

Le nombre de Reynolds calculé vérifie $1 < \text{Re} < 5$, la modélisation de la force de traînée est donc acceptable.

27) Le régime transitoire a une durée d'environ $\Delta t = 1$ s. Durant le régime transitoire, la vitesse de la goutte est telle que $v_z < v_{\text{lim}}$ avec $v_{\text{lim}} = v_{\text{lim},2}$ (car le modèle dont l'hypothèse est $1 < \text{Re} < 5$ a été validé). Ainsi la distance parcourue par la goutte est $d_{\text{RT}} < v_{\text{lim},2}\Delta t = 4.1 \times 10^{-1}$ m.

Une fois le régime transitoire terminé, le régime permanent débute jusqu'à ce que la goutte touche le sol. La distance parcourue durant le régime permanent est donc $d_{\text{RP}} = h - d_{\text{RT}} \approx 1000$ m car $h \gg v_{\text{lim},2}\Delta t$.

On a $d_{\text{RP}} \gg d_{\text{RT}}$. La phase transitoire ne représente qu'une très petite partie du mouvement de la goutte. Cette dernière atteint donc rapidement sa vitesse limite $v_{\text{lim},2}$, puis le mouvement est rectiligne uniforme. On peut donc considérer que la vitesse est quasiment constante lors de la chute égale à $v_{\text{lim},2}$.

28) En supposant la vitesse de chute de la goutte constante égale à $v_{\text{lim},2}$, le temps nécessaire T pour atteindre le sol est :

$$T = \frac{h}{v_{\text{lim},2}} = 2.4 \times 10^3 \text{ s} \approx 41 \text{ min} .$$

29) On peut estimer que le modèle est trop simpliste car lorsque la goutte chute, elle va entrer en collision avec d'autres gouttes et former une goutte de rayon plus important. Cette modification de la taille de la goutte va augmenter la vitesse de chute et diminuer le temps mis par la goutte pour arriver au niveau du sol.

30) L'expression de la poussée d'Archimède est $\vec{\Pi}_A = -\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{air}} \vec{g}$. Comparons cette force au poids et à la force de traînée :

- comparaison de la poussée d'Archimède au poids de la goutte :

$$\frac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{\Pi}_A\|} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{air}}} \approx 10^3 \gg 1 .$$

- comparaison de la poussée d'Archimède à la force de traînée :

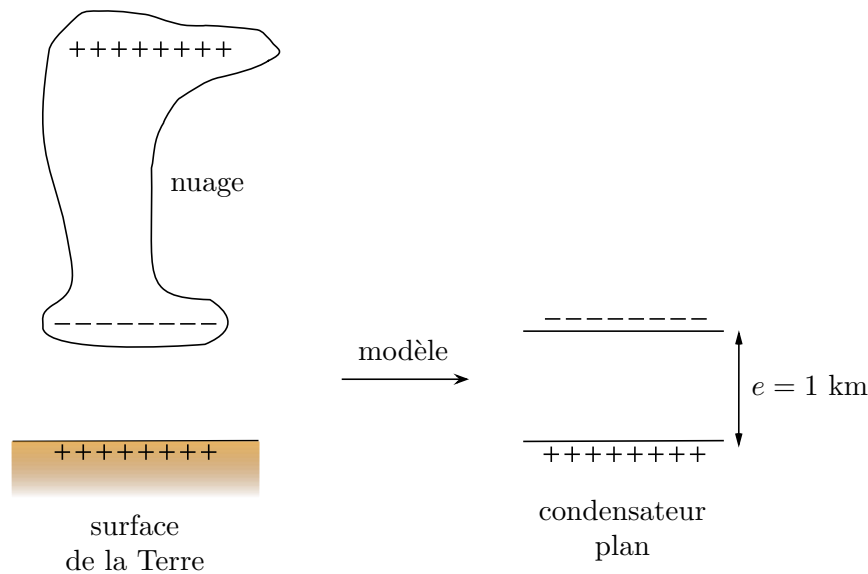
$$\frac{\|\vec{F}_t\|}{\|\vec{\Pi}_A\|} \approx \frac{6\pi\eta R v_{\text{lim},2} + \frac{9}{4}\rho_{\text{air}}\pi R^2 v_{\text{lim},2}^2}{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_{\text{air}} g} = \underbrace{\frac{9\eta v_{\text{lim},2}}{2R^2 \rho_{\text{air}} g}}_{\approx 6 \times 10^2} + \underbrace{\frac{27 v_{\text{lim},2}^2}{16Rg}}_{\approx 4 \times 10^2} \approx 10^3 \gg 1 .$$

La poussée d'Archimède est donc bien négligeable devant le poids et la force de traînée.

3) Orage

31) On peut modéliser l'ensemble composé de la base du nuage et de la surface de la Terre comme un condensateur plan. La distance entre les armatures correspond à l'altitude de la base du nuage, soit $e = 1 \text{ km}$. La surface des armatures correspond à la surface de la base du nuage. En considérant le nuage de base carré de côté 2 km (annexe sur les différents types de nuages), l'aire de sa base est $A \approx 4 \text{ km}^2$. La capacité du condensateur à air ainsi formé est

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{e} \approx 4 \times 10^{-8} \text{ F} .$$



La tension entre les armatures est $U \approx 20 \text{ MV}$. Un coup de foudre transfère donc une charge $Q = CU$ vers la surface terrestre durant un temps $\tau \approx 500 \mu\text{s}$. L'intensité du courant correspondant à un débit de charge, on a donc :

$$I = \frac{CU}{\tau} \approx 2 \text{ kA} .$$

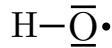
La puissance lors d'un coup de foudre est $\mathcal{P} = UI = 40 \text{ GW}$ et l'énergie transportée par la foudre est $\mathcal{E} = \mathcal{P}\tau = UI\tau = 20 \text{ MJ}$. L'intérêt de récupérer cette énergie est qu'elle est renouvelable, disponible dès qu'un orage se forme. Cependant, en convertissant l'énergie transportée par un coup de foudre en kilowattheure, il vient $\mathcal{E} = 5.5 \text{ kWh}$. Cette valeur est

très petite devant la consommation annuelle d'un ménage (~ 5000kWh). Ainsi, bien que la puissance d'un coup de foudre soit très grande, l'énergie transportée est très faible car la durée du coup de foudre est courte. De plus, technologiquement, il est difficile de prévoir où la foudre va tomber et comme les orages sont des phénomènes localisés, une station de récupération fixe ne récupérerait que très ponctuellement de l'énergie.

Partie III - Acidité des eaux de pluie

1) Création du radical hydroxyde dans l'atmosphère

32) On peut proposer le schéma de Lewis suivant :



Un radical est très réactif à cause de la présence de l'électron célibataire qui va chercher à s'associer à d'autres électrons célibataires de manière à s'apparier et ainsi former une liaison covalente.

33) Le photon d'énergie $\mathcal{E} = h\nu$ est absorbé par la molécule d'ozone et si l'énergie est suffisante, une liaison covalente de la molécule est brisée.

34) L'ordre de grandeur de l'énergie liaison pour une unique molécule d'ozone est $\mathcal{E}_{\text{cov}} = \mathcal{E}_{\text{m,cov}}/\mathcal{N}_A = 6.48 \times 10^{-19} \text{ J}$. Pour que la liaison covalente puisse être brisée par irradiation, il faut que l'énergie du photon incident soit supérieure à celle de la liaison covalente $\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} > \mathcal{E}_{\text{cov}}$. On en déduit une condition sur la longueur d'onde

$$\lambda < \frac{hc}{\mathcal{E}_{\text{cov}}} = 310 \text{ nm.}$$

Cette radiation lumineuse est une radiation ultraviolette.

35) On observe que la concentration en radical hydroxyde est maximale en milieu de journée et nulle pendant la nuit. Ceci s'explique car le mécanisme de formation de ce radical met en jeu une irradiation UV qui ne peut être réalisée naturellement que par la lumière du soleil. La nuit, il n'y a plus de lumière UV pour former le radical, sa concentration atmosphérique devient alors très faible.

36) En moyenne, en milieu de journée, la concentration en radical hydroxyde est de

$$[\text{HO}^\bullet] \approx 5 \times 10^6 \text{ molécules} \cdot \text{cm}^{-3} = \frac{10^3}{\mathcal{N}_A} \times 5 \times 10^6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 8.5 \times 10^{-15} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

2) Cinétique de création d'acide nitrique atmosphérique en journée

37) L'impureté M joue le rôle d'un catalyseur.

38) Comme NO_2^\bullet est un réactif, la vitesse de disparition est

$$v = -\frac{d[\text{NO}_2^\bullet(\text{g})](t)}{dt}.$$

39) En égalant les expressions de la vitesse obtenue à la question précédente avec celle donnée dans l'énoncé, on obtient l'équation différentielle suivante

$$-\frac{d[\text{NO}_2^\bullet(\text{g})](t)}{dt} = k[\text{HO}^\bullet(\text{g})][\text{NO}_2^\bullet(\text{g})](t).$$

La solution de cette équation différentielle d'ordre 1 est

$$[\text{NO}_2^\bullet(\text{g})](t) = [\text{NO}_2^\bullet(\text{g})]_0 \exp(-k[\text{HO}^\bullet(\text{g})]t).$$

40) Le temps de demi-réaction $\tau_{1/2}$ est le temps au bout duquel la concentration en réactif a été divisée par deux, c'est-à-dire $[\text{NO}_2^\bullet(\text{g})](\tau_{1/2}) = [\text{NO}_2^\bullet(\text{g})]_0/2$. On trouve alors

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k[\text{HO}^\bullet(\text{g})]}.$$

41) L'application numérique donne $\tau_{1/2} = 2.1 \times 10^2 \text{ min} = 3.6 \text{ h}$.

Par définition du temps de demi-réaction, au bout d'un temps $\tau_{1/2} = 3.6 \text{ h}$, 50% du réactif $\text{NO}_2^*(\text{g})$ a été consommé.

On en déduit que le taux de transformation de $\text{NO}_2^*(\text{g})$ en acide nitrique est de $14 \% \text{ h}^{-1}$.

On trouve un taux de transformation de $\text{NO}_2^*(\text{g})$ qui est plus élevé que ce qui est mesuré expérimentalement. On peut expliquer cette différence par le fait que l'estimation a été faite à 12:00 au maximum de concentration en radical $\text{HO}^*(\text{g})$. Une diminution de la concentration en $\text{HO}^*(\text{g})$ fait diminuer le taux de transformation de $\text{NO}_2^*(\text{g})$. La concentration en $\text{HO}^*(\text{g})$ étant toujours inférieure à sa concentration à 12:00, en moyennant sur toute la journée, on doit retrouver l'ordre de grandeur du taux de transformation $\text{NO}_2^*(\text{g})$ de quelques pour cent par heure.

3) Titrage d'une eau de pluie acide

42) La concentration de soude demandée est faible. On va donc réaliser une solution de concentration $C_1 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ molL}^{-1}$ puis diluer 10 fois afin d'obtenir la concentration de soude recherchée de $C_2 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$. Afin de réaliser la solution de concentration C_1 on peut utiliser une fiolle jaugée de 500 mL. La masse de cristaux de soude à prélever est alors

$$m = C_1 V_{\text{fiolle}} M(\text{NaOH}) = 200 \text{ mg},$$

où $M(\text{NaOH}) = 40 \text{ g mol}^{-1}$ est la masse molaire de la soude.

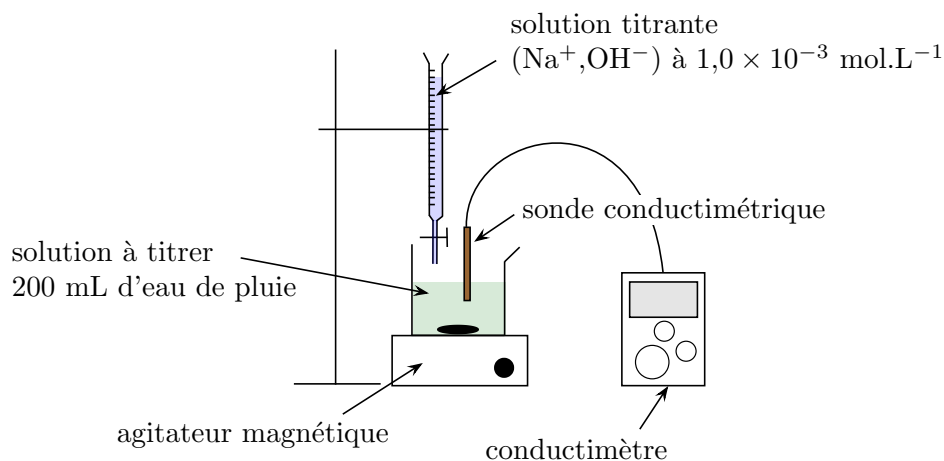
protocole : Peser 200 mg de solide et l'introduire dans la fiolle jaugée avec un entonnoir à solide. Remplir la fiolle au deux tiers d'eau distillée et agiter jusqu'à dissolution du solide. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à ce que le bas du ménisque coïncide avec le trait de jauge, boucher et agiter afin d'homogénéiser la solution.

On obtient alors une solution de soude de concentration $C_1 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ molL}^{-1}$ qu'il faut par la suite diluer 10 fois afin d'obtenir la solution de soude à la concentration $C_2 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$. La verrerie à utiliser comprend une pipette jaugée de 20 mL, une fiolle jaugée de 200 mL et un bécher de 50 mL pour le prélèvement.

protocole : Verser un volume d'environ 40 mL de la solution de soude de concentration C_1 dans le bécher de prélèvement. Utiliser la pipette jaugée afin de prélever 20 mL de la solution du bécher en faisant monter le liquide dans la pipette avec la poire à pipeter jusqu'à ce que le bas du ménisque coïncide avec le trait de jauge supérieur. Déverser le contenu de la pipette dans la fiolle jusqu'à ce que le bas du ménisque coïncide avec le trait de jauge inférieur de la pipette. Remplir la fiolle d'eau distillée jusqu'à ce que le bas du ménisque coïncide avec le trait de jauge de la fiolle, boucher et agiter afin d'homogénéiser la solution.

43) La solution de soude doit être titrée avant son utilisation afin de s'assurer que sa concentration est bien celle qui est attendue. Cette concentration pourrait être faussée par une erreur de pesée du cristal de NaOH ou par le processus de carbonatation de la soude.

44) Le montage expérimental est le suivant :



45) Les équations qui modélisent la dissolution des gaz dans l'eau sont :

- pour l'acide nitrique : $\text{HNO}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{NO}_3^-(\text{aq})$ car $\text{HNO}_3(\text{aq})$ est un acide fort;
- pour le dioxyde de carbone : $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$.

46) Au début du dosage, $\text{pH}=4.1$. Comme l'acide nitrique est un acide fort et que $\text{pH} < \text{pK}_a(\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})/\text{HCO}_3^-(\text{aq}))$, les formes prédominantes des acides nitrique et carbonique sont : $\text{NO}_3^-(\text{aq})$ pour l'acide nitrique et $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ pour l'acide carbonique.

47) Les équations qui modélisent l'action la soude sont :



48) On reconnaît dans l'équation (4) la réaction inverse de l'autoprotolyse de l'eau. La constante d'équilibre de cette réaction est donc $K_1 = 1/K_e = 10^{14}$.

La constante d'équilibre de l'équation (5) s'identifie au quotient de réaction à l'équilibre :

$$K_2 = \frac{[\text{HCO}_3^- (\text{aq})]_{\text{eq}}}{[\text{HO}^- (\text{aq})]_{\text{eq}} [\text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq})]_{\text{eq}}} = \frac{[\text{HCO}_3^- (\text{aq})]_{\text{eq}} [\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})]_{\text{eq}}}{[\text{HO}^- (\text{aq})]_{\text{eq}} [\text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq})]_{\text{eq}} [\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})]_{\text{eq}}}$$

On a donc

$$K_2 = \frac{K_a (\text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq}) / \text{HCO}_3^- (\text{aq}))}{K_e} = 10^{7,6}$$

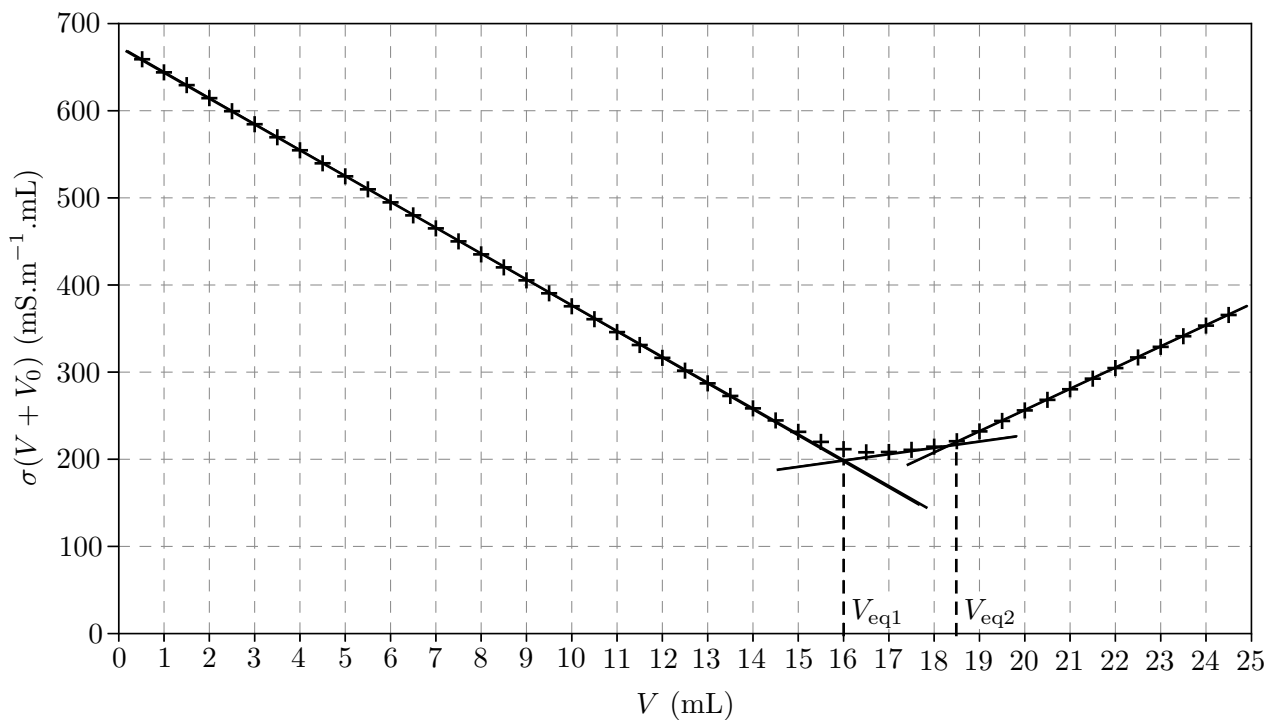
Comme $K_1 \gg 1$ et $K_2 \gg 1$, les transformations chimiques associées peuvent être considérées comme totales.

49) Dans la première partie de la courbe ($V \leq V_{\text{eq}1}$), la réaction (4) a lieu c'est-à-dire que l'ajout de soude consomme les ions H^+ en rajoutant des ions Na^+ . Pour une mole d'ions H^+ consommée, une mole d'ions Na^+ a été ajoutée. Comme $\lambda_{\text{H}^+}^0 \geq \lambda_{\text{Na}^+}^0$, la conductivité de la solution chute car les ions Na^+ possèdent une conductivité plus faible que les ions H^+ .

Dans la deuxième partie de la courbe ($V_{\text{eq}1} \leq V \leq V_{\text{eq}2}$), la réaction (5) a lieu c'est-à-dire que l'ajout de soude, en plus d'ajouter des ions Na^+ , réagit avec l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq})$ pour produire un ion $\text{HCO}_3^- (\text{aq})$ qui contribue à la conductivité de la solution. La conductivité de la solution augmente grâce à l'augmentation conjointe des concentrations de ces deux ions lors de la réaction (5).

Dans la dernière partie de la courbe ($V \geq V_{\text{eq}2}$), aucune réaction n'a lieu, ajouter de la soude revient simplement à ajouter des ions Na^+ et HO^- dans la solution augmentant ainsi sa conductivité.

50) La conductivité modifiée $\sigma \times (V + V_0)$ est linéaire dans chacune des parties de la courbe. Afin de repérer les volumes équivalents, il faut repérer les volumes où la pente est brusquement modifiée. Les abscisses des points d'intersection des droites tangentes à la courbes sur ses parties linéaires correspondent aux volumes équivalents $V_{\text{eq}1}$ et $V_{\text{eq}2}$.



On mesure ainsi

$$V_{\text{eq}1} = 16.0 \text{ mL}$$

et

$$V_{\text{eq}2} = 18.5 \text{ mL}$$

51) On note C_N la concentration en acide nitrique de l'eau de pluie. L'équivalence de la réaction (4) donne

$$C_b V_{eq1} = C_N V_0 \quad \text{donc} \quad C_N = \frac{C_b V_{eq1}}{V_0} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ molL}^{-1}.$$

On note C_{CO} la concentration en acide carbonique de l'eau de pluie. L'équivalence de la réaction (5) donne

$$C_b (V_{eq2} - V_{eq1}) = C_{CO} V_0 \quad \text{donc} \quad C_{CO} = \frac{C_b (V_{eq2} - V_{eq1})}{V_0} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ molL}^{-1}.$$

52) La concentration en acide nitrique dans l'eau dosée est de $C_N = 8.0 \times 10^{-5} \text{ molL}^{-1} > 4.8 \times 10^{-6} \text{ molL}^{-1}$. On peut donc considérer que l'eau est plus polluée que la moyenne et donc qu'il y a pollution locale à l'azote de l'atmosphère.

IV. Effet des nuages sur le rayonnement infrarouge terrestre

1) Observation satellitaire de la couverture nuageuse

53) En utilisant la troisième loi de Kepler, le rayon de l'orbite R est

$$R = \left(\frac{T^2 G M_T}{4\pi^2} \right)^{1/3} = 7.1 \times 10^3 \text{ km}.$$

On en déduit l'altitude du satellite

$$h = R - R_T = 7.2 \times 10^2 \text{ km}.$$

54) En supposant l'orbite circulaire, la vitesse du satellite sur l'orbite héliosynchrone est

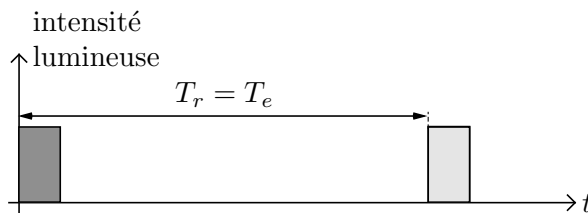
$$v = \frac{2\pi R}{T} = 7.5 \text{ km s}^{-1}.$$

55) La lumière parcourt une distance $2d$ à la vitesse c durant T_r avant d'être détectée sous forme d'écho par le satellite. La distance d est donc

$$d = \frac{c T_r}{2}.$$

56) Il peut y avoir ambiguïté sur la distance d séparant le satellite du nuage si l'écho provenant d'une première impulsion est reçu après l'émission d'une seconde impulsion (cf. figure ci-dessous). Pour éviter toute ambiguïté, la durée séparant l'impulsion et la réception de l'écho doit être $T_r \leq T_e = 1/f_e$. La distance maximale pouvant être mesurée par cette méthode est donc atteinte lorsque $T_r = T_e$, on a donc

$$d_{\max} = \frac{c T_e}{2} = \frac{c}{2 f_e} = 7.44 \times 10^3 \text{ km}.$$



L'altitude du satellite n'étant que d'environ 700 km $\ll d_{\max}$, cette méthode de détection permet de sonder l'ensemble de l'atmosphère jusqu'à la surface de la Terre.

57) Les mesures effectuées par le satellite sont échantillonnées car le laser émet des impulsions à une fréquence f_e . L'intervalle de temps entre deux mesures LIDAR est donc $T_e = 1/f_e$. Pendant ce temps, le satellite s'est déplacé à la vitesse v d'une distance Δl correspondant à la résolution latérale du sondage atmosphérique effectué par le satellite. Il vient alors

$$\Delta l = v T_e = \frac{v}{f_e} = 3.7 \times 10^2 \text{ m}.$$

2) Résultats d'observations

- 58) La présence d'un nuage est caractérisée par un écho de forte amplitude reçu par le satellite. On peut donc dire qu'il y a présence d'un premier nuage à une altitude de 13 km et d'un second à une altitude de 6.5 km.
- 59) Le premier nuage laisse passer une partie du signal LIDAR, il s'agit donc d'un nuage fin.
Le second nuage ne laisse pas passer de signal LIDAR, c'est donc un nuage opaque.

3) Détermination de l'effet des nuages sur le rayonnement infrarouge de la Terre

- 60) Le flux surfacique infrarouge total de la Terre s'écrit

$$\Phi_T^{\text{IR}} = C_{\text{opaque}} \Phi_{\text{opaque}}^{\text{IR}} + C_{\text{fin}} \Phi_{\text{fin}}^{\text{IR}} + C_{\text{clair}} \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}.$$

- 61) Selon la loi de Stefan-Boltzmann, le flux surfacique est donné par $\Phi_{\text{opaque}}^{\text{IR}} = P_{\text{opaque}} / \mathcal{A}_{\text{opaque}} = \sigma T_{\text{opaque}}^4$. Or, on observe que l'évolution de $\Phi_{\text{opaque}}^{\text{IR}}$ avec T_{opaque} est linéaire. Il n'est donc pas possible de modéliser les données par la loi de Stefan-Boltzmann.
- 62) Par une modélisation affine, on a

$$\Phi_{\text{opaque}}^{\text{IR}} = 2,1 T_{\text{opaque}} - 331.$$

- 63) En utilisant les expressions des flux surfaciques déterminées précédemment, le flux de l'ensemble du ciel s'écrit

$$\Phi_T^{\text{IR}} = C_{\text{opaque}}(2,1 T_{\text{opaque}} - 331) + C_{\text{fin}}(\varepsilon_{\text{fin}}(2,1 T_{\text{fin}} - 331) + (1 - \varepsilon_{\text{fin}}) \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}) + C_{\text{clair}} \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}.$$

En notant que $C_{\text{fin}} + C_{\text{opaque}} + C_{\text{clair}} = 1$, on a

$$\Phi_T^{\text{IR}} = C_{\text{opaque}}(2,1 T_{\text{opaque}} - 331 - \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}) + \varepsilon_{\text{fin}} C_{\text{fin}}(2,1 T_{\text{fin}} - 331 - \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}) + \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}}.$$

Finalement, l'expression du CRE devient

$$\text{CRE} = C_{\text{opaque}}(331 + \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}} - 2,1 T_{\text{opaque}}) + \varepsilon_{\text{fin}} C_{\text{fin}}(331 + \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}} - 2,1 T_{\text{fin}}).$$

- 64) Les contributions des nuages opaques et fins au CRE sont

$$\text{CRE}_{\text{opaque}} = C_{\text{opaque}}(331 + \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}} - 2,1 T_{\text{opaque}}).$$

$$\text{CRE}_{\text{fin}} = \varepsilon_{\text{fin}} C_{\text{fin}}(331 + \Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}} - 2,1 T_{\text{fin}}).$$

- 65) - La contribution des nuages opaques est maximale aux moyennes latitudes entre 30°C et 60°C. En effet, dans cette zone, la couverture des nuages opaques est importante et la température des nuages est faible.
- La contribution des nuages fins est maximale au niveau de l'équateur. En effet, aux faibles latitudes, il y a un maximum d'émissivité et de couverture alors que la température des nuages est faible.
- 66) On demande une évaluation en moyenne sur l'ensemble du globe de $\text{CRE}_{\text{opaque}}$ et CRE_{fin} , commençons par les moyennes des différentes quantités

$$\bar{C}_{\text{opaque}} \approx 35\% ; \quad \bar{C}_{\text{fin}} \approx 36\% ; \quad \bar{T}_{\text{fin}} \approx -15^\circ\text{C} ; \quad \bar{T}_{\text{opaque}} \approx -15^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad \bar{\varepsilon}_{\text{fin}} \approx 35\%.$$

On en déduit la valeur moyenne des CRE

$$\overline{\text{CRE}}_{\text{opaque}} = 21 \text{ W m}^{-2} \quad \text{et} \quad \overline{\text{CRE}}_{\text{fin}} = 8 \text{ W m}^{-2}.$$

On remarque que ce sont les nuages opaques qui contribuent de manière la plus importante au CRE total de la Terre.

- 67) Le CRE total moyen est donc

$$\overline{\text{CRE}} = \overline{\text{CRE}}_{\text{opaque}} + \overline{\text{CRE}}_{\text{fin}} = 28 \text{ W m}^{-2}.$$

- 68) Le résultat du calcul donne $\text{CRE} > 0$, c'est-à-dire $\Phi_{\text{clair}}^{\text{IR}} > \Phi_T^{\text{IR}}$. Il y a donc un flux surfacique infrarouge plus important qui part vers l'espace par un ciel clair que par un ciel nuageux. Les nuages contribuent donc à confiner le flux tellurique et augmentent donc l'effet de serre.