

Concours général des lycées

Épreuve de physique-chimie

Session 2023

Rapport du jury

1. Composition du jury

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

Mme Mélanie PERRIN, inspectrice d'académie, inspectrice pédagogique régionale, vice-présidente du jury

Mme Muriel COQUELIN, professeure agrégée, académie de Normandie

M. Boris DÉCAMPS, professeur agrégé, académie d'Amiens

M. Pierre JAMONNEAU, professeur agrégé, académie de Reims

Mme Patricia KESTER, professeure agrégée, académie de Versailles

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

Mme Élise PRALY, professeure agrégée, académie de Grenoble

Mme Muriel ROUX, professeure agrégée, académie de Versailles

M. Quentin ROVEILLO, professeur agrégé, académie de Lille

Mme Clara SCHATTNER, professeure agrégée, académie de Paris

Mme Christine SIMON, professeure agrégée, académie d'Orléans-Tours

M. Pierre TOGNETTI, professeur agrégé, académie de Paris

2. Statistiques

La session 2023 a vu concourir 2971 candidates et candidats, soit près de 97% des 3068 candidates et candidats inscrits. Ce taux élevé révèle l'engagement fort et remarquable des candidates et des candidats à préparer l'épreuve écrite de physique-chimie du concours général des lycées. Le jury se réjouit de l'augmentation du nombre de candidates et de candidats par rapport à la session 2022.

L'ensemble des inscrites et des inscrits à la session 2023 se répartissent comme suit selon leur genre et leur origine territoriale.

Académie	Garçons	Filles
Aix-Marseille	82	45
Amiens	29	22
Besançon	30	15
Bordeaux	77	35
Clermont-Ferrand	20	4
Corse	1	2
Créteil	151	90
Dijon	45	16
Grenoble	64	40
Guadeloupe	10	7
Lille	52	28
Limoges	14	8
Lyon	127	80
Martinique	18	17
Mayotte	0	1
Montpellier	71	31
Nancy-Metz	33	28
Nantes	77	33
Nice	68	33
Normandie	36	27
Orléans-Tours	43	13
Paris	172	77
Poitiers	39	15
Polynésie Française	5	4
Reims	12	10
Rennes	64	38
Réunion	27	19
Strasbourg	57	19
Toulouse	126	68
Versailles	249	159
Lycées français à l'étranger	165	119
Totaux	1965	1103

Les filles représentent près de 36% des inscrits, alors qu'elles représentent environ 47% des élèves qui suivent l'enseignement de spécialité physique-chimie en terminale générale à la rentrée 2022¹. Le jury réitère son vœu que davantage de filles soient présentées à l'épreuve de physique-chimie du concours général des lycées lors des sessions futures.

Les candidates et les candidats des lycées français à l'étranger représentent 47 pays différents. Ils se répartissent comme suit :

1. Note d'information de la DEPP n° 23.06, mars 2023.

Ambassade	Filles	Garçons
Ambassade de France en Afrique du Sed	1	1
Ambassade de France en Algérie	4	3
Ambassade de France en Allemagne	1	6
Ambassade de France en Arabie Saoudite	1	23
Ambassade de France en Australie	0	1
Ambassade de France en Autriche	0	4
Ambassade de France en Brésil	0	1
Ambassade de France au Canada	2	3
Ambassade de France en Chine	1	3
Ambassade de France en Colombie	1	1
Ambassade de France au Corée du Sud	0	1
Ambassade de France en Côte d'Ivoire	4	7
Ambassade de France au Danemark	2	1
Ambassade de France à Djibouti	2	0
Ambassade de France en Égypte	9	10
Ambassade de France aux Émirats Arabes Unis	1	0
Ambassade de France en Équateur	0	1
Ambassade de France en Espagne	5	2
Ambassade de France aux États-Unis	2	4
Ambassade de France au Gabon	2	0
Ambassade de France en Grèce	3	2
Ambassade de France au Honduras	0	1
Ambassade de France en Inde	0	1
Ambassade de France au Japon	0	3
Ambassade de France au Koweït	1	0
Ambassade de France au Liban	18	32
Ambassade de France au Luxembourg	0	3
Ambassade de France à Madagascar	0	3
Ambassade de France en Malaisie	0	2
Ambassade de France au Mali	0	2
Ambassade de France au Maroc	27	39
Ambassade de France à Maurice	0	1
Ambassade de France au Mexique	0	3
Ambassade de France à Monaco	3	0
Ambassade de France au Nigéria	1	0
Ambassade de France aux Philippines	1	0
Ambassade de France au Portugal	3	5
Ambassade de France en Roumanie	3	0
Ambassade de France au Royaume-Uni	2	1
Ambassade de France en Russie	1	0
Ambassade de France au Sénégal	3	1
Ambassade de France à Singapour	3	1
Ambassade de France en Suisse	1	2
Ambassade de France en République Tchèque	1	0
Ambassade de France en Tunisie	8	9
Ambassade de France en Turquie	0	1
Ambassade de France au Viet-Nâm	2	3

3. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve de la session 2023 illustre quelques effets d'une pollution au dioxyde de soufre atmosphérique sur la santé et le climat. Le sujet se compose de trois parties totalement indépendantes. La première décrit le comportement mécanique d'un ballon-sonde stratosphérique permettant la mesure, in-situ, des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère (condition de décollage, plafond atteint par le ballon, vitesse de croisière dans la troposphère) ainsi que le fonctionnement d'un capteur de dioxyde de soufre pouvant être embarqué à bord (détermination de la concentration en SO_2 grâce à la mesure de la différence de l'intensité du courant débité par deux piles ad-hoc). La seconde partie revient sur un épisode de pollution anthropique majeur au dioxyde de soufre, ayant eu lieu en 1952 dans la ville de Londres et ayant conduit à l'adoption de la première loi environnementale en Europe, le Clean Air Act visant à améliorer la qualité de l'air dans les villes britanniques. Cette partie décrit le détecteur qui a permis, à l'époque, les mesures de la teneur en dioxyde de soufre dans l'air et compare les données recueillies aux normes actuelles. La troisième partie revient sur un épisode de pollution naturelle : l'émission d'une quantité importante de dioxyde de soufre dans la stratosphère lors de l'éruption du volcan Tambora en Indonésie, en avril 1815 et ses conséquences climatiques. Cette partie propose un modèle pour évaluer l'albédo terrestre en présence d'une couche d'aérosols sulfatés, le forçage radiatif induit et la variation de température au sol attendu dans le cadre de ce modèle. Elle propose ensuite trois documents issus de publications scientifiques pour discuter de la force mais aussi des limites du modèle proposé.

De nombreux candidates et candidats ont abordé un nombre important de questions et sont ainsi parvenus à progresser de façon satisfaisante dans le sujet. Ils font preuve de compétences assurées en physique-chimie. Le jury leur adresse ses plus vives félicitations. Que leurs professeurs trouvent également ici une marque de reconnaissance du jury pour la qualité de leur travail de préparation des candidates et des candidats. Le jury constate en outre avec satisfaction que les questions ouvertes et la résolution de problème ont été abordées par de nombreux candidates et candidats, qui tirent ainsi profit de leur capacité à mettre en œuvre une démarche scientifique de façon autonome.

3.1 Remarques à propos des réponses apportées

Partie 1

3. À ce niveau d'études en physique-chimie, les membres du jury attendent que toute application numérique soit précédée d'un calcul littéral mené à terme. Le jury attendait une expression littérale de m_h avant de procéder à l'application numérique.
5. Un attendu du programme de terminale est de pouvoir expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Le jury attendait donc que les candidates et les candidats fassent le lien avec la résultante des forces pressantes qu'exerce l'air atmosphérique sur la surface du ballon. La notion de forces pressantes apparaît peu dans les copies. Le jury a trop souvent lu à la place une reformulation de l'expression littérale rappelée dans le sujet (« la poussée d'Archimède est l'opposée du poids du volume de fluide déplacé »).
6. Pour écrire la condition de décollage, il est trop souvent proposé une inégalité portant sur des vecteurs, ce qui est dénué de sens mathématique. Il convient plutôt de comparer entre elles les **normes** du poids et de la poussée d'Archimède. De nombreux candidates et candidats proposent une expression de V_0 en fonction de m_h mais oublient que m_h dépend lui-même de V_0 .
9. Attention, du fait de la dépendance en z du coefficient devant le terme de pression, l'équation différentielle ne peut pas être résolue comme pour un ordre 1 à coefficients constants ! Peu de candidates et de candidats parviennent à obtenir l'expression de α : la démarche est en général bien initiée mais la grande majorité n'arrive pas à simplifier l'expression et conserve une dépendance en z dans l'expression de α .
12. Le jury a souvent lu la solution générale correcte de l'équation différentielle obtenue à la question 11. Par contre, il fallait bien penser à raisonner en $z = z_1$ (et non $z = 0$) pour déterminer la valeur de la constante d'intégration.
13. Il était beaucoup plus simple de rechercher la dimension de H à partir de l'équation différentielle (il apparaît directement qu'elle est homogène à une longueur) plutôt que de raisonner sur son expression littérale $H = \frac{RT_1}{M_a g}$ (dans ce cas, beaucoup de candidates et de candidats ont eu du mal à arriver au bout des simplifications des unités et n'ont pas identifié qu'il s'agissait d'une longueur). Le jury attendait que la grandeur H apparaisse explicitement sur le graphe donnant la pression en fonction de l'altitude. Le jury a rarement eu l'occasion de voir explicité le lien entre H et l'équation différentielle de départ en interprétant H comme une distance caractéristique de variation de P .

16. Le jury attendait que soit précisé que le seul paramètre dépendant de z dans l'expression de V était la masse volumique de l'air. Le jury attendait ensuite une justification au fait que la masse volumique de l'air diminuait avec l'altitude (soit en faisant référence aux précédents calculs, soit en s'appuyant sur la figure 4).
17. Le sens de cette question n'a souvent pas été compris : la question faisait référence au volume maximal accessible au ballon-sonde (et défini dans le document 1) et non le volume le plus grand possible qu'il aurait pu prendre dans l'absolu.
19. Certains confondent vecteurs (norme+sens+direction), projection d'un vecteur suivant une direction (quantité scalaire algébrique) et norme d'un vecteur (scalaire systématiquement positif).
20. Dans de nombreuses copies, il a été omis que la masse d'hélium évoluait à présent du fait de son évacuation partielle par les manches d'évacuation.
21. L'écart relatif n'est pas un critère valable pour comparer une valeur de référence et une mesure associée à une incertitude-type. Le programme de terminale du lycée propose le recours au quotient $\frac{|m_{mes} - m_{ref}|}{u(m_{mes})}$. On parle souvent d'écart normalisé (nom donné dans les programmes du supérieur) ou z-score. Sa comparaison à 2 (valeur seuil à laquelle on peut donner une signification statistique) permet de dire si la mesure est compatible ou non avec la valeur de référence.
22. La confusion entre « mouvement uniforme » et « mouvement uniformément accéléré » apparaît parfois dans certaines copies.
23. Le bilan des forces est en général correct mais rares sont les copies où un raisonnement qualitatif a été proposé pour montrer que la vitesse tend vers une limite constante lorsque le poids et les frottements compensent exactement la poussée d'Archimède. De nombreux candidates et candidats n'ont pas vu que la poussée d'Archimède était constante.
27. Certaines demi-équations électroniques sont proposées sans qu'aucun électron n'y apparaisse. Équilibrer l'élément oxygène par ajout de O_2 ne constitue pas une procédure correcte.
38. La figure 8 a souvent fait l'objet d'une appropriation convaincante qui a conduit à la valeur de la concentration en SO_2 . Par contre, le jury relève des erreurs de conversion d'unité du débit volumique. Si l'application numérique de la différence d'intensité conduit généralement à une valeur correcte, l'unité associée est souvent erronée. L'intensité du courant s'exprime en A . L'unité $C \cdot min^{-1}$ est certes correcte mais relève d'une réponse inaboutie : la valeur de l'intensité doit être exprimée en $C \cdot s^{-1}$, c'est-à-dire en A .

Partie 2

39. Le jury constate que dans de nombreuses copies la grandeur portée en abscisses pour un diagramme de prédominance (ici le pH) n'est pas indiquée. Bien souvent, seule la première acidité de l'acide sulfureux n'y apparaît.
47. Les candidates et les candidats qui ont abordé cette question, ont mis en place des démarches de résolution intéressantes qui ont été valorisées. On note ici (ainsi qu'à la question 49) des raccourcis de vocabulaire en « borax » ou « borate » dans le raisonnement (au lieu de faire référence soit à l'ion borate, soit à l'acide borique ou sa base conjuguée).
48. La définition d'une solution tampon n'est parfois pas connue.
49. Cette question ouverte a été abordée dans de nombreuses copies. Le jury s'en réjouit et encourage les candidates et les candidats à expliciter clairement leur démarche pour qu'il puisse mieux suivre leur proposition. En particulier, lorsque l'on introduit de nouvelles notations, il convient de les définir dans sa copie.

Partie 3

Lorsqu'elle a été abordée, la partie 3 a été bien traitée.

52. La valeur du tableau à laquelle il fallait se référer n'a parfois pas été correctement identifiée : il s'agissait ici de la quantité de sulfates présents dans la stratosphère. Pour mener la comparaison, il fallait donc estimer la quantité de sulfates issus de la transformation de SO_2 rejeté dans la stratosphère lors de l'éruption volcanique. Le jury relève des erreurs lors de la conversion de la masse de SO_2 en masse de SO_4^{2-} .
54. Le coefficient β est rarement clairement explicité dans les copies.
58. Parfois le flux traversant la couche d'aérosols en direction du sol a été calculé, et non pas une proportion comme demandé par l'énoncé.
59. La figure 13 de l'énoncé a majoritairement été bien comprise conduisant généralement à des expressions correctes des flux.
61. Question souvent bien réussie pour le calcul ; la rédaction de la réponse est souvent rapide et la diminution probable de la température de surface trop rarement citée.

66. Il a généralement été fait une bonne lecture des documents proposés. Cette question valorisait néanmoins trois aspects : le jury attendait que soit indiqué ce qui semblait être en cohérence avec le modèle, puis ce qui ne l'était pas, et enfin que soient proposées des raisons pouvant expliquer ces écarts. Dans certaines copies, la focale n'était faite que sur un seul ou deux de ces aspects. En particulier, les critiques du modèle de l'énoncé sont restées timides, beaucoup de réponses se limitant à un unique point.

3.2 Conseils aux futurs candidates et candidats

Le jury attend des candidates et des candidats que la présentation de leurs copies soit soignée, et que leurs réponses soient claires, précises, et accompagnées, le cas échéant, de schémas explicites. Il importe que les affirmations soient justifiées au moyen du vocabulaire scientifique adapté. Les candidates et les candidats doivent se montrer attentifs au respect de l'homogénéité des relations littérales qu'ils établissent. Le jury rappelle qu'une expression non homogène est nécessairement erronée, mais qu'à l'inverse, une relation homogène n'est pas forcément juste. Chaque application numérique doit être précédée d'une relation exprimée sous forme littérale. Les valeurs numériques doivent toujours être accompagnées de l'unité correspondante. La résolution de certaines questions demande une prise d'initiative : toute démarche, même non aboutie, est systématiquement valorisée.

3.3 Proposition de corrigé

Le corrigé de l'épreuve écrite de physique-chimie de la session 2023 qui suit n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidates et candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

Partie 1 - Technique de sondage des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère par ballon stratosphérique ouvert et suivi de la concentration en SO_2 atmosphérique

I.1. Préparation et décollage du ballon-sonde stratosphérique (B.S.O.)

I.1.1. Question préliminaire

1. Équation d'état pour n moles de gaz parfait : $PV = nRT$.

Si l'on note m , la masse associée, il vient : $n = \frac{m}{M} = \frac{\rho V}{M}$.

En remplaçant dans l'équation d'état, on montre que :

$$P \cdot M = \rho \cdot RT$$

2. On écrit la relation précédente pour hélium et l'air, tous deux assimilés à des gaz parfait :

$$P_i \cdot M_h = \rho_h \cdot RT_i, \text{ où } P_i, T_i \text{ sont les pression et température intérieures au ballon}$$

$$P_{ext} \cdot M_a = \rho_a \cdot RT_{ext}, \text{ où } P_{ext}, T_{ext} \text{ sont les pression et température extérieures au ballon}$$

Or, l'équilibre thermique entre l'intérieur et l'extérieur est réalisé : $T_i = T_{ext}$.

De plus, l'énoncé indique qu'il y a aussi égalité des pressions : $P_i = P_{ext}$.

Les expressions précédentes peuvent se ré-écrire :

$$P_i \cdot M_h = \rho_h \cdot RT_i$$

$$P_i \cdot M_a = \rho_a \cdot RT_i$$

En faisant le rapport de ces deux expressions, il vient :

$$\frac{\rho_h}{\rho_a} = \frac{M_h}{M_a}$$

3. Masse d'hélium initialement présente dans le ballon : $m_h = \rho_h(z=0) \cdot V_0 = \rho_0 \frac{M_h}{M_a} V_0 = 1,83 \times 10^3 \text{ kg}$.

I.1.2. Condition de décollage du ballon-sonde

4. Poids : $\vec{P} = (m_b + m_h) \vec{g}$.

5. Poussée d'Archimède = résultante des forces pressantes qu'exerce l'air atmosphérique sur la surface du ballon.

6. Condition de décollage : $\|\vec{P}\| < \|\vec{\Pi}_a\|$.

En exprimant les deux forces, il vient : $(m_b + m_h) < \rho_0 V_0$.

D'après la question 3 : $m_h = \rho_0 \frac{M_h}{M_a} V_0$.

Finalement : $(m_b + \rho_0 \frac{M_h}{M_a} V_0) < \rho_0 V_0$.

En isolant V_0 , il vient :

$$V_0 > \frac{m_b}{\rho_0(1 - \frac{M_h}{M_a})}$$

Le volume minimum permettant le décollage vaut ainsi :

$$V_{0,min} = \frac{m_b}{\rho_0(1 - \frac{M_h}{M_a})}$$

7. Application numérique : $V_{0,min} = 1,13 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Le document 1 indique que le volume initial choisi, dans le cas du vol du BSO Spirale, était de $V_0 = 1,08 \times 10^4 \text{ m}^3$.

$V_0 > V_{0,min}$: le décollage a bien pu avoir lieu.

I.2. Modélisation des propriétés physiques de la troposphère et de la basse atmosphère

I.2.1. Modélisation de la troposphère

8. On reprend l'équation établie à la première question dans le cas de l'air assimilé à un gaz parfait : $\rho_a(z) = \frac{P(z)M_a}{RT(z)}$, avec $T(z) = T_0 - bz$.

On remplace cette expression dans l'équation locale de la statique des fluides rappelée par l'énoncé :

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{P(z)M_a}{R(T_0 - bz)}g$$

$$\frac{dP}{dz} + \frac{M_ag}{R(T_0 - bz)}P(z) = 0$$

9. On commence par calculer $\frac{dP}{dz}$ à partir de l'expression fournie par l'énoncé : $\frac{dP}{dz} = -\frac{b\alpha P_0}{T_0} \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^{\alpha-1}$.

On injecte l'expression de $P(z)$ dans l'équation différentielle de la question 7 :

$$-\frac{b\alpha P_0}{T_0} \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^{\alpha-1} + \frac{M_ag}{R(T_0 - bz)} P_0 \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^{\alpha} = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{b\alpha P_0}{T_0} + \frac{M_ag}{R(T_0 - bz)} P_0 \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right) = 0$$

$$\Rightarrow -\frac{b\alpha P_0}{T_0} + \frac{M_ag P_0}{RT_0} = 0$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{M_ag}{Rb}$$

10. D'après l'expression établie à la question 1 :

$$\begin{aligned} P(z)M_a &= \rho_a(z)RT(z) \\ \Rightarrow \rho_a(z) &= \frac{P(z)M_a}{RT(z)} = \frac{P_0\left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^\alpha M_a}{R(T_0 - bz)} \\ &= \frac{M_a P_0}{RT_0} \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^{\alpha-1} \\ &= \rho_0 \left(1 - \frac{b}{T_0}z\right)^{\alpha-1}. \end{aligned}$$

1.2.2. Modélisation de la basse stratosphère

11. On procède comme à la question 8 mais avec un profil de température différent :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= -\frac{P(z)M_a}{RT(z)}g \\ \frac{dP}{dz} + \frac{M_a g}{RT_1}P(z) &= 0 \end{aligned}$$

On pose $H = \frac{RT_1}{M_a g}$, il vient : $\frac{dP}{dz} + \frac{1}{H}P = 0$.

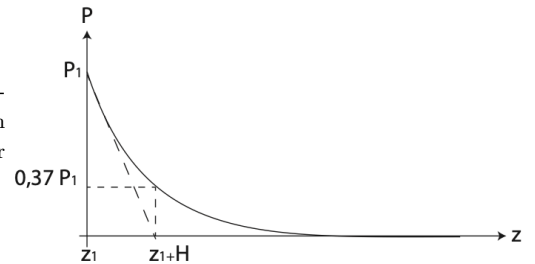
12. Les solutions de l'équation différentielle précédente sont de la forme : $P(z) = \lambda e^{-z/H}$.
Or, $P(z = z_1) = P_1 = \lambda e^{-z_1/H}$, on en déduit donc : $\lambda = P_1 e^{z_1/H}$.
Finalement :

$$P(z) = P_1 e^{-\frac{(z-z_1)}{H}}$$

13. En exploitant l'homogénéité de l'équation différentielle établie à la question 11, il vient : $\left[\frac{dP}{dz}\right] = \left[\frac{P}{H}\right]$.
Or : $\left[\frac{dP}{dz}\right] = \frac{[P]}{L}$ et $\left[\frac{P}{H}\right] = \frac{[P]}{[H]}$. On en déduit donc que :

$$[H] = L$$

H = Hauteur caractéristique sur laquelle on observe la décroissance exponentielle de la pression avec l'altitude. En particulier, pour une augmentation d'altitude de H depuis z_1 , on a une diminution de la pression de 63 % par rapport à P_1 .



14. D'après le résultat de la question 1 : $\rho_a(z) = \frac{P(z)M_a}{RT_1}$. En explicitant l'expression de $P(z)$ dans la basse stratosphère, il vient :

$$\rho_a(z) = \frac{P_1 M_a}{RT_1} \exp(-(z - z_1)/H)$$

I.3. Plafond atteint par le ballon-sonde

15. D'après la relation (1) établie à la question 2 : $\rho_h(z) = \frac{M_h}{M_a} \rho_a(z)$.

Tant que la masse d'hélium présente dans le ballon reste constante, on a : $\rho_h(z) = \frac{m_h}{V(z)}$, où m_h est la masse d'hélium initialement présente dans le ballon.

On utilise ces deux relations pour isoler $V(z)$ et obtenir finalement :
$$V(z) = \frac{m_h M_a}{M_h \rho_a(z)}$$

16. m_h, M_h, M_a sont constantes et $\rho_a(z)$ diminue avec z (d'après l'expression établie à la question 10) donc V **augmente** avec z .

17. On utilise la relation précédente à la limite haute de la troposphère : $V(z_1) = \frac{m_h M_a}{M_h \rho_a(z_1)}$.

Lecture graphique de $\rho_a(z_1)$: $\rho_a(z_1) = 0,33 \text{ kg.m}^{-3}$.

Il vient :

$$V(z_1) = 41 \times 10^3 \text{ m}^3$$

On observe que $V(z_1) < V_{max}$: le volume maximum n'est pas encore atteint, le ballon va poursuivre son ascension au-delà de la troposphère.

18. On suppose que le volume maximal est atteint à une altitude z_2 alors que la masse d'hélium contenue dans le ballon est restée constante. La relation établie à la question 15 est encore valide :

$$\rho_a(z_2) = \frac{m_h M_a}{M_h V_{max}}$$

Application numérique : $\rho_a(z_2) = 6,8 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^{-3}$.

On lit graphiquement : $z_2 = 21,5 \text{ km}$. On est encore dans la **stratosphère**.

19. $\|\vec{P}\| = (m_b + m_h)g = 3,0 \times 10^4 \text{ N}$ et $\|\vec{\Pi}(z_2)\| = \rho_a(z_2) \cdot g \cdot V_{max} = 1,3 \times 10^5 \text{ N}$. La poussée d'Archimède est encore plus importante que le poids, le ballon continue son ascension.

20. Lorsque le plafond est atteint, le ballon est à l'équilibre mécanique : la résultante des forces s'exerçant dessus est nulle :

$$\begin{aligned} \vec{P} + \vec{\Pi}_a(z_{max}) &= \vec{0} \\ \Rightarrow \rho_a(z_{max}) \cdot g \cdot V_{max} &= (m_b + m_h(z_{max}))g \end{aligned}$$

avec $m_h(z_{max}) = \rho_h(z_{max}) \cdot V_{max} = \rho_a(z_{max}) \frac{M_h}{M_a} \cdot V_{max}$.

Finalement :

$$\rho_a(z_{max}) = \frac{m_b M_a}{(M_a - M_h) V_{max}}$$

Application numérique : $\rho_a(z_{max}) = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^{-3}$.

21. On lit graphiquement $z_{max,ref} = 34,5 \text{ km}$.

Ecart normalisé : $\frac{|z_{max,mes} - z_{max,ref}|}{u(z_{max,mes})} = 1,3 < 2$: on peut donc en déduire que le modèle proposé est compatible avec la mesure expérimentale.

I.4. Vitesse de croisière dans la troposphère

22. Lecture du document 5 :

Dans la troposphère, l'altitude du ballon-sonde croît linéairement avec le temps. Ceci est confirmé par la courbe donnant la vitesse au cours du temps (voisine de 7 m.s^{-1}). Le ballon-sonde est en **mouvement de translation rectiligne et uniforme** selon la verticale ascendante.

23. Bilan des forces sur le ballon-sonde, dans le référentiel terrestre supposé galiléen :

- poids : $\vec{P} = (m_b + m_h) \vec{g}$,

- poussée d'Archimède : $\vec{\Pi}_A = -\rho_a(z).V(z) \vec{g}$

Or $\rho_a(z) = \frac{M_a}{M_h} \rho_h$, donc $\rho_a(z).V(z) = \frac{M_a}{M_h} m_h$ car la masse de l'hélium est constante dans la troposphère.

Finalement : $\vec{\Pi}_A = -\frac{M_a}{M_h} m_h \vec{g}$,

- force de frottements fluides : $\vec{F} = -k_0 v^2 \vec{u}_z$.

Le poids et la poussée d'Archimède contribuent ensemble à une résultante des forces, de norme constante, dirigée vers le haut (et permettant en particulier le décollage du ballon). On la note $\vec{F}_{haut} = \vec{P} + \vec{\Pi}_A$. La force de frottements fluides est une force qui s'oppose au mouvement et est dirigée vers le bas, son intensité dépend de la vitesse du ballon.

Lors du décollage, v est nulle donc il n'y a pas de force de frottements et le ballon est accéléré du fait de la résultante \vec{F}_{haut} . Le ballon va voir sa vitesse augmenter, ce qui va induire une force de frottement plus importante donc une accélération de moins en moins importante. Cela perdure jusqu'à ce que la force de frottement s'oppose totalement à la force \vec{F}_{haut} : à ce moment, la résultante de toutes les forces appliquée au ballon s'annule et l'accélération du ballon également : le ballon poursuit avec un mouvement de translation rectiligne et uniforme.

24. On applique la seconde loi de Newton au ballon-sonde, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, lorsque la vitesse limite est atteinte :

$$\vec{0} = \vec{P} + \vec{\Pi}_A + \vec{F}$$

Projection selon \vec{u}_z (vecteur unitaire ascendant) :

$$0 = -(m_b + m_h)g + \rho_a(z).V(z).g - k_0 v_{t,ref}^2$$

Or $\rho_a(z) = \frac{M_a}{M_h} \rho_h$, donc $\rho_a(z).V(z) = \frac{M_a}{M_h} m_h$ car la masse de l'hélium est constante dans la troposphère.

Finalement :

$$0 = \left[\left(\frac{M_a}{M_h} - 1 \right) m_h - m_b \right] g - k_0 v_{t,ref}^2$$

On isole la vitesse limite atteinte :

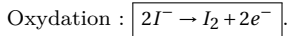
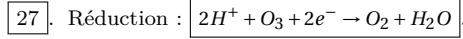
$$v_{t,ref} = \sqrt{\frac{g}{k_0} \left[\left(\frac{M_a}{M_h} - 1 \right) m_h - m_b \right]}$$

25. Application numérique : $v_{t,ref} = 7,0 \text{ m.s}^{-1}$.

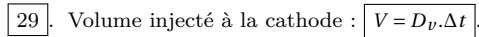
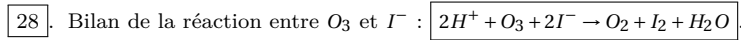
26. Ecart normalisé : $\frac{|v_{t,mes} - v_{t,ref}|}{u(v_{t,mes})} = 0,43 < 2$. La modélisation est compatible avec la valeur expérimentale.

I.5. Mesure du profil vertical de la concentration en $SO_2(g)$

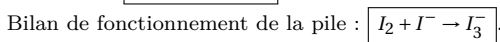
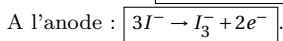
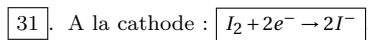
I.5.1. Réponse de la pile A (en l'absence de $SO_2(g)$ dans l'air atteignant la cathode)



Echange des électrons **directement** dans la solution à la cathode.



30. D'après la question précédente, on forme autant que I_2 que l'on consomme de O_3 d'où : $n_{I_2} = n_{O_3}$.

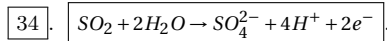


32. D'après la demi-équation à la cathode, deux électrons sont consommés pour chaque molécule de I_2 qui réagit donc : $n_{1,circuit} = 2n_{I_2} = 2n_{O_3}$.

33. Intensité du courant électrique i_1 : $i_1 = \frac{n_{1,circuit} \cdot \mathcal{F}}{\Delta t}$.

$$i_1 = \frac{2n_{O_3} \cdot \mathcal{F}}{\Delta t} = 2 \frac{C(O_3) \cdot V \cdot \mathcal{F}}{\Delta t} \Rightarrow i_1 = 2C(O_3) \cdot D_V \cdot \mathcal{F}.$$

I.5.2. Réponse de la pile B (en présence de $SO_2(g)$ dans l'air atteignant la cathode)



35. $n_{electron,total} = 2n_{I_2} = n_{2,circuit} + n_{2,direct} \Rightarrow n_{I_2} = \frac{1}{2}(n_{2,circuit} + n_{2,direct})$.

D'après la demi-équation traduisant l'oxydation de SO_2 en SO_4^{2-} : $n_{2,direct} = 2n_{SO_2}$.

De plus : $n_{I_2} = n_{O_3}$ d'après le bilan en solution de la réaction à la cathode entre O_3 et I^- .

Finalement : $n_{2,circuit} = 2(n_{O_3} - n_{SO_2})$.

36. Intensité du courant électrique i_2 :

$$i_2 = \frac{n_{2,circuit} \cdot \mathcal{F}}{\Delta t} = \frac{2(n_{O_3} - n_{SO_2}) \cdot \mathcal{F}}{\Delta t} = 2 \frac{(C(O_3) - C(SO_2)) \cdot V \cdot \mathcal{F}}{\Delta t}.$$

Donc $i_2 = 2(C(O_3) - C(SO_2)) \cdot D_V \cdot \mathcal{F}$.

37. On trouve par différence :

$$C(SO_2) = \frac{i_1 - i_2}{2D_V \mathcal{F}}$$

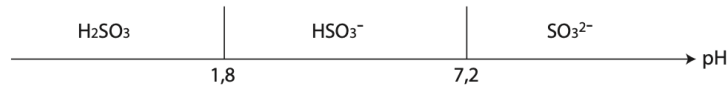
38. Lecture graphique $C(SO_2) = 67$ ppbv, soit $C(SO_2) = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ à l'aide de la conversion rappelée.

On en déduit : $i_1 - i_2 = 2D_V \mathcal{F} C(SO_2) = 1,8 \mu\text{A}$.

NB : $D_V = 3,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Partie 2 - Un exemple de pollution anthropique : épisode de pollution atmosphérique au $SO_2(g)$ de la ville de Londres en 1952 et conséquences sanitaires

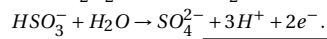
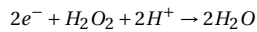
39. Diagramme de prédominance associé à H_2SO_3 :



La forme majoritaire à $pH = 4,5$ est HSO_3^- .

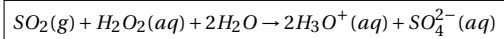
40. Bilan de la transformation : $H_2SO_3(aq) + H_2O = HSO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$ (Equation 2).

41. Deux demi-équations électroniques :



En les combinant : $H_2O_2(aq) + HSO_3^-(aq) \rightarrow SO_4^{2-}(aq) + H_3O^+(aq)$ (Equation 3).

42. En combinant les trois équations-bilan précédentes, on obtient :



43. $n_{SO_2} = \frac{n_{H_3O^+,p}}{2}$.

44. $n_{H_3O^+,total} = n_{H_3O^+,i} + n_{H_3O^+,p} = C^\circ \times 10^{-pH_i} \times V_0 + 2n_{SO_2}$ avec $C^\circ = 1 \text{ mol/L}$.

45. En l'absence de CO_2 dissout et après action de l'eau oxygénée, on est en présence d'une solution d'acide fort. Si on dose cet acide à l'aide d'une solution de soude, on s'attend à observer un saut de pH à $pH = 7$. Si du CO_2 a été dissous dans l'eau, lorsque le pH va augmenter au cours du dosage, CO_2 va pouvoir partiellement se transformer en HCO_3^- en libérant des H_3O^+ qui seront dosés. A $pH = 7$, une quantité non négligeable de CO_2 aura eu la possibilité de se transformer en HCO_3^- , libérant des H_3O^+ qui fausseront le dosage.

46. Equation de dissolution du borax : $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O \rightarrow 2Na^+(aq) + B_4O_7^{2-}(aq) + 10H_2O$.

47. $B_4O_7^{2-}(aq) + 7H_2O \rightarrow 2H_3BO_3(aq) + 2B(OH)_4^-(aq)$.

La solution contient, à l'équilibre, autant de la forme acide que de la forme basique de l'acide borique, on a donc :

$$pH = pK_a(H_3BO_3/B(OH)_4^-) + \log \frac{[B(OH)_4^-]}{[H_3BO_3]} = pK_a(H_3BO_3/B(OH)_4^-) = 9,2.$$

48. Propriétés d'une solution tampon :

- son pH varie peu par dilution,
- son pH varie peu par ajout d'une faible quantité d'acide ou de base.

49. Quantité de matière de borax introduit dans 1 L d'eau : $n_{borax} = \frac{m_{borax}}{M_{borax}} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

D'après la question 47 : $n(B(OH)_4^-) = 2n_{borax}$ Concentration en $B(OH)_4^-$ présents dans la solution de borax : $[B(OH)_4^-] = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$.

Quantité de matière de $B(OH)_4^-$ présents dans le volume $V = 9,4$ mL ajouté à la solution pour retrouver le pH de départ : $n_{B(OH)_4^-} = [B(OH)_4^-] \times V = 1,9 \times 10^{-6}$ mol.

Transformation observée entre $B(OH)_4^-$ et H_3O^+ conduisant à l'augmentation du pH : $B(OH)_4^- + H_3O^+ \rightarrow H_3BO_3 + 2H_2O$, on en déduit qu'une mole de $B(OH)_4^-$ réagit avec une mole de H_3O^+ .

Pour retrouver le pH de départ, il faut que $n(B(OH)_4^-) = n(H_3O^+, p)$, soit $n(B(OH)_4^-) = 2n_{SO_2}$.

On en déduit la quantité de SO_2 présent dans $V_0 = 100$ mL : $n_{SO_2} = 9,4 \times 10^{-7}$ mol.

Le volume d'air qui a barboté pendant 15 min vaut : $V_{air} = D_V \Delta t = 45$ L.

Concentration de SO_2 dans l'air : $C(SO_2) = 2,1 \times 10^{-8}$ mol.L $^{-1}$.

On multiplie la concentration précédente par la masse molaire de SO_2 pour la donner en $\mu\text{g.m}^{-3}$:

Concentration de SO_2 mesurée à Lambeth en 1952 en $\mu\text{g.m}^{-3}$: $C(SO_2) = 1,3 \times 10^{-9}$ kg.L $^{-1} = 1,3$ $\mu\text{g.L}^{-1} = 1,3 \times 10^3$ $\mu\text{g.m}^{-3}$.

50. Le niveau de pollution au SO_2 est resté au-delà de 2,6 fois le seuil d'alerte actuel durant au moins 6 jours consécutifs. Il s'agissait d'un très fort épisode de pollution...

Partie 3 - Un exemple de pollution naturelle : émission de $SO_2(g)$ stratosphérique suite à l'éruption du volcan Tambora en Indonésie en avril 1815 et conséquences climatiques.

3.1. Éjection de SO_2 suite à l'éruption du Mont Tambora en avril 1815

51. H entre 25 et 29 km. Il s'agit de la basse stratosphère.

52. Quantité de matière de SO_2 éjectés et atteignant la stratosphère : $n_{SO_2} = \frac{m_{SO_2}}{M_{SO_2}} = 8,58.10^{11}$ mol.

On $n_{SO_4^{2-}} = n_{SO_2}$ et $m_{SO_4^{2-}} = M_{SO_4^{2-}} \times n_{SO_4^{2-}} = 8,2 \times 10^{10}$ kg.

Ce chiffre est à comparer à la masse totale de sulfates dans la stratosphère : $m_{SO_4^{2-}, strato} = 5 \times 10^{11}$ kg.

L'épisode volcanique du Tambora a ajouté, sur une faible échelle de temps, $8,2 \times 10^{10}$ kg de sulfates supplémentaires, soit 16 % du stock total présent dans la stratosphère, ce qui est considérable.

3.2. Effet sur le climat

3.2.1. Albédo de la couche d'aérosols sulfatés stratosphérique

53. $F_s = F_t + F_u + F_d$.

54. D'après l'énoncé : $\beta = \frac{F_u}{F_u + F_d}$. On peut en tirer deux relations : $F_u = \frac{\beta}{1-\beta} F_d$ et $F_d = \frac{1-\beta}{\beta} F_u$.

On reprend la relation établie à la question 53 et on remplace F_u par $\frac{\beta}{1-\beta} F_d$, et F_t par $F_s \cdot e^{-\delta}$, il vient : $F_d = (1-\beta) F_s (1-e^{-\delta})$.

On reprend la relation établie à la question 53 et on remplace F_d par $\frac{1-\beta}{\beta} F_u$, et F_t par $F_s \cdot e^{-\delta}$, il vient : $F_u = F_s \beta (1-e^{-\delta})$.

55. $A^* = \frac{F_u}{F_s} = \frac{F_s \beta (1-e^{-\delta})}{F_s} \Rightarrow A^* = \beta (1-e^{-\delta})$.

56. On a $\beta = 0,17$ et on lit $\Delta m = 1,0 \Rightarrow \delta = 0,90$ pour l'été 1816 aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord, donc : $A^* = 0,10$.

57. $F_u = A^* F_s$ et $F_s e^{-\delta} + F_d = (1-A^*) F_s$.

58. Proportion du flux incident traversant la couche d'aérosols : $\frac{(1 - A^*)F_s}{F_s} = 1 - A^* = 90\%$.

3.2.2. Albédo terrestre en présence d'une éruption volcanique majeure

59. Flux :

$$F_3 = (1 - A^*)A_0F_s.$$

$$F_4 = (1 - A^*)^2A_0F_s.$$

$$F_5 = A^*(1 - A^*)A_0F_s.$$

$$F_6 = A^*(1 - A^*)A_0^2F_s.$$

$$F_7 = A^*(1 - A^*)^2A_0^2F_s.$$

$$F_8 = A^{*2}(1 - A^*)A_0^2F_s.$$

60. $A_T = \frac{F_1 + F_4 + F_7}{F_s}$.

61. $A_T = 0,36$.

L'albédo de la Terre est plus important en présence de la couche d'aérosols qu'en son absence. La part du flux solaire réfléchi est donc plus importante. Il en résulte que la part du flux absorbé par la Terre est diminuée. On s'attend donc à une diminution de la température de surface de la Terre (conforme à l'introduction de cette partie faisant référence à l'année 1816, comme étant l'année "sans été").

3.2.3. Effet de serre et forçage radiatif associé à la présence de la couche d'aérosols

62. A l'équilibre thermique et en l'absence de la couche d'aérosols (schéma A, figure 14), il y a égalité entre les flux arrivant sur Terre et les flux renvoyés en direction de l'espace :

$$F_s = A_0F_s + (1 - \frac{f}{2})\sigma T_T^4$$

On isole f : $f = 2 \left[1 - \frac{(1 - A_0)F_s}{\sigma T_T^4} \right]$.

Application numérique : $f = 0,79$.

63. En l'absence d'aérosols et à l'équilibre thermique (schéma A) : $F_{out} = A_0F_s + (1 - \frac{f}{2})\sigma T_T^4$.

En présence d'aérosols et hors équilibre thermique (schéma B) : $F_{out} - \Delta F = A_TF_s + (1 - \frac{f}{2})\sigma T_T^4$.

En faisant la différence entre ces deux expressions, il vient :

$$\Delta F = (A_0 - A_T)F_s$$

Application numérique : $\Delta F = -17 \text{ W.m}^{-2}$.

$\Delta F < 0$ donc $F_{out} - \Delta F > F_{out}$, c'est-à-dire que le flux renvoyé vers l'espace est plus important en présence de la couche d'aérosols et donc le **flux absorbé par la surface de la Terre est plus faible** en présence de la couche d'aérosols sulfatés. On s'attend à une **diminution de la température de la surface de la Terre** si le forçage radiatif se maintient.

64. Par définition du forçage radiatif (schéma B, figure 14) : $F_{out} - \Delta F = A_TF_s + (1 - \frac{f}{2})\sigma T_T^4$.

Lorsque l'équilibre thermique est atteint (schéma C de la figure 14) : $F_{out} = A_TF_s + (1 - \frac{f}{2})\sigma(T_T + \Delta T)^4$.

On fait la différence de ces deux expressions, en utilisant l'approximation $(T_T + \Delta T)^4 \approx T_T^4 + 4T_T^3\Delta T$, il vient :

$$-\Delta F = \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma \left(T_T^4 - (T_T^4 + 4T_T^3 \Delta T)\right)$$

Après simplification, on établit : $\Delta T = \frac{\Delta F}{4\sigma(1 - \frac{f}{2})T_T^3}$.

65. Application numérique : $\Delta T = -5,2^\circ \text{ C}$.

3.2.4. Comparaison aux données expérimentales et retour sur le modèle

66. Commentaires vis-à-vis de ces divers documents :

- Les mesures expérimentales de températures de surface pour l'hémisphère Nord concluent à une diminution de celles-ci durant l'été qui suit l'épisode volcanique de Tambora comme le prévoit le modèle (document 10).
- Sur les relevés de température à Genève durant l'été 1816, on observe effectivement une baisse de température à midi de l'ordre de $3,8^\circ \text{ C}$ (document 9).
- Sur les relevés moyennés sur des régions variées de l'hémisphère Nord, on est plutôt autour de $0,5^\circ \text{ C}$ de baisse (document 10).
- Plusieurs critiques de notre modèle pour comprendre en partie ces écarts :
 - on a fait l'hypothèse que la couche d'aérosols était uniformément répartie sur toute la surface de la Terre ce que réfute le document 11.
 - le calcul de l'albédo de la couche d'aérosols a été fait à partir de relevés faits aux latitudes où la couche d'aérosols est la plus importante (document 11 et figure 13) et à une date pour laquelle l'épaisseur optique de la couche était très importante. Ces deux points risquent de conduire à une sur-estimation de la diminution de la température.
 - on ne calcule que des variations moyennes. Tout indique qu'il va y avoir de fortes variations selon le lieu considéré (effet maximum là où les couches d'aérosols se concentrent), c'est-à-dire aux latitudes moyennes des deux hémisphères.
 - on ne prend pas en compte le fait que l'épaisseur de la couche d'aérosols varient également fortement avec le temps (la figure 13 montre en effet que la couche d'aérosols sulfatés aura un effet sur l'albédo terrestre que sur 4 ans environ).