

SESSION 2023

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : PHYSIQUE CHIMIE

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique (y compris la calculatrice) est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	101	0385

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	101	0385

Terre!

La Terre est un magnifique terrain d'expérimentation pour les physiciens, qui peuvent mettre à l'épreuve leurs théories et proposer des modèles des phénomènes naturels.

Ce sujet aborde diverses thématiques en lien avec la physique de la Terre au travers de quatre parties indépendantes. La partie I explore des questions relatives à l'application des lois de la mécanique dans le référentiel terrestre. La partie II s'intéresse à la question du magnétisme terrestre. La partie III s'intéresse aux rais sismiques, analogues aux rayons lumineux de l'optique. Enfin, la partie IV propose une approche basée sur un moteur thermique pour estimer la puissance fournie aux courants atmosphériques.

De nombreuses questions sont posées à l'aide d'un ou plusieurs verbes d'action **en gras**. L'évaluation tient compte du respect de chacune des consignes ainsi formulées.

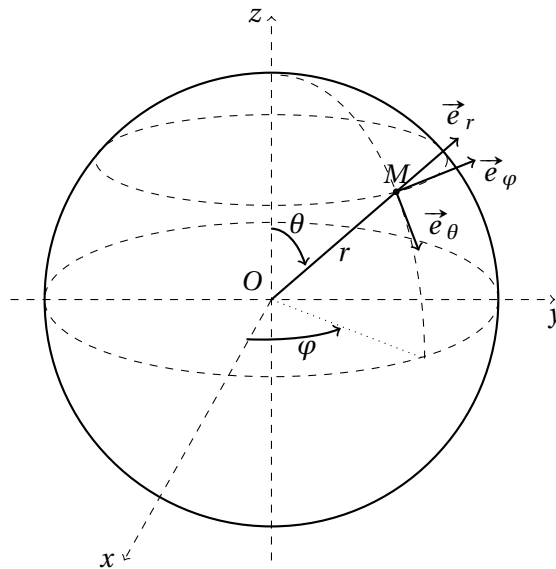
Des questions pédagogiques et didactiques reliées aux concepts abordés dans les différentes parties sont insérées dans le corps du texte. Elles sont signalées par l'indication « QP » et représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Contenu du sujet	Page
I Mécanique terrestre	3
I.1 Gravitation et pesanteur	3
I.2 Aplatissement de la Terre	4
I.3 Déviation vers l'est	5
I.4 Cas pratique : la planète de l'allumeur de réverbère	6
II Magnétisme terrestre	7
III Rais sismiques	10
IV L'atmosphère, une machine thermique?	13
IV.1 Enseigner la thermodynamique en classe de terminale	13
IV.2 Généralités sur les moteurs thermiques dithermes	14
IV.3 Modèle de Curzon et Ahlborn	15
IV.4 Application	16
Annexe 1	17
Annexe 2	19
Annexe 3	20
Annexe 4	23
Annexe 5	25
Annexe 6	27
Annexe 7	28

Formulaire et données

Consignes pour les applications numériques : les résultats des applications numériques seront donnés sous une forme identique à celle des données ci-dessous :

- Constante de gravitation universelle : $\mathcal{G} = 7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
- Rayon moyen de la Terre : $R_T = 6 \times 10^3 \text{ km}$
- Masse de la Terre $M_T = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$
- Vitesse angulaire du référentiel terrestre par rapport au référentiel géocentrique galiléen $\omega_T = 7 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- Masse volumique moyenne de l'eau de mer $\rho_{\text{mer}} = 1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Perméabilité magnétique du vide $\frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
- Schéma définissant les coordonnées sphériques ainsi que les vecteurs unitaires associés.



- Expression du gradient en coordonnées sphériques

$$\overrightarrow{\text{grad}}(V) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi$$

I Mécanique terrestre

I.1 Gravitation et pesanteur

Q1. Soient deux points matériels M_1 et M_2 , de masses m_1 et m_2 . **Exprimer** la force de gravitation que M_1 exerce sur M_2 , en fonction en particulier de la distance $r = ||\overrightarrow{M_1 M_2}||$ (**faire** un schéma de la situation pour préciser les notations). **Nommer** le physicien à qui l'on doit cette loi. **Indiquer** à quel siècle cette loi a été formulée.

Q2. Dans cette sous-partie I.1, on considère la Terre comme parfaitement sphérique et homogène, de rayon moyen R_T et de masse M_T . **Donner, sans calculs et en la justifiant**, l'expression du champ gravitationnel créé par une distribution de masse à symétrie sphérique à l'extérieur de celle-ci.

Estimer la valeur numérique de l'intensité du champ gravitationnel G_0 à la surface de la Terre.

Q3. La Terre tourne autour de l'axe des pôles, dans le référentiel géocentrique considéré comme galiléen. On suppose cette rotation uniforme de vitesse angulaire ω_T . **Préciser** si le référentiel terrestre est galiléen. **Nommer** chacune des forces supplémentaires qu'il faut rajouter dans l'application du principe fondamental de la dynamique à un point matériel, de masse m et de vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel terrestre, pour utiliser les lois de la mécanique dans ce référentiel. **Donner** les expressions de ces forces **sans les établir**.

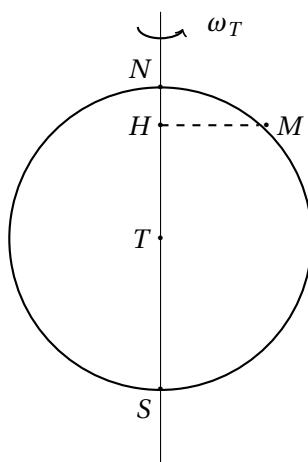


FIGURE 1 – Terre sphérique en rotation autour de l'axe des pôles

Q4. **Donner** la définition « expérimentale » du poids d'un corps ponctuel M de masse m , i.e. à l'aide d'un pendule en équilibre dans le référentiel terrestre. **En déduire** que le champ de pesanteur terrestre en un point M est donné par

$$\vec{g}(M) = -\frac{\mathcal{G}M_T}{||\overrightarrow{TM}||^3} \overrightarrow{TM} + \omega_T^2 \overrightarrow{HM},$$

T étant le centre de la Terre et H le projeté orthogonal de M sur l'axe des pôles (cf. figure 1).

Q5. **Calculer** la valeur numérique de $\Delta g = ||\vec{g}(N)|| - ||\vec{g}(E)||$, différence des intensités de la pesanteur au pôle nord N et en un point E de l'équateur.

Un professeur de collège propose à une classe de 3^{ème} une évaluation sommative constituée de quatre parties dont une étudie deux actions exercées sur un objet. Les réponses de quatre élèves à cette partie sont données en Annexe 1.

Vos réponses aux questions suivantes QP6, QP7 et QP8 doivent prendre appui sur les réponses des élèves (Annexe 1) et sur l'extrait du programme du cycle 4 en Annexe 2.

QP6. **Préciser** les notions du programme du cycle 4 qui semblent acquises par ces élèves.

QP7. En vous appuyant également sur les extraits des programmes de la classe de 2^{de} en physique-chimie et en mathématiques fournis en Annexe 3, **donner** trois arguments qui légitiment la représentation de la force par un vecteur seulement à partir de la classe de 2^{de}.

QP8. Certaines représentations premières des élèves sont des obstacles à l'acquisition des notions. Dans le cadre de cette évaluation, les représentations des forces par les élèves A et D (voir Annexe 1) peuvent traduire une confusion que les élèves de lycée font généralement.

Identifier cette confusion. **Suggérer** (en cinq lignes maximum) une activité en classe de seconde (programme en Annexe 3) dont l'objectif est de prendre en charge cet obstacle. **Justifier** votre proposition.

I.2 Aplatissement de la Terre

La force à l'origine de la distinction entre gravitation et pesanteur a pour conséquence un aplatissement de la Terre, que l'on se propose d'estimer à l'aide d'un modèle simple.

Q9. Établir que la résultante des forces de pression s'exerçant sur un volume mésoscopique $d\tau$ d'un fluide est donnée par $-\text{grad}(P) d\tau$, où P désigne la pression du fluide pouvant dépendre du point étudié.

Soient ρ la masse volumique du fluide et $\vec{g}$ le champ de pesanteur en ce point. **En déduire** que l'équation de la statique des fluides dans un référentiel galiléen s'écrit

$$\vec{\text{grad}}(P) = \rho \vec{g}$$

Q10. On suppose l'eau de mer incompressible, de masse volumique moyenne ρ_{mer} . À la surface règne une pression $P_0 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$. **Calculer** la valeur numérique du facteur par lequel il faut multiplier cette pression pour obtenir la pression au fond de la fosse des Mariannes (profonde de $H = 1 \times 10^4 \text{ m}$). Le champ de pesanteur est supposé uniforme, de valeur $g = 1 \times 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Q11. On prend en compte la faible compressibilité de l'eau. **Prédire** qualitativement si la pression au fond de la fosse des Mariannes est augmentée ou diminuée par rapport au calcul précédent.

On modélise la Terre par un fluide incompressible, de masse volumique $\rho_T = \frac{3M_T}{4\pi R_T^3}$ en équilibre dans le référentiel terrestre, en rotation uniforme autour de l'axe des pôles fixe dans le référentiel géocentrique galiléen. Cette rotation fait que la Terre prend la forme d'un ellipsoïde de révolution. On note a le rayon terrestre au niveau de l'équateur et b au niveau des pôles (cf. figure 2, où l'aplatissement est représenté de manière exagérée). On définit l'aplatissement f de la Terre par $f = \frac{a-b}{a}$.

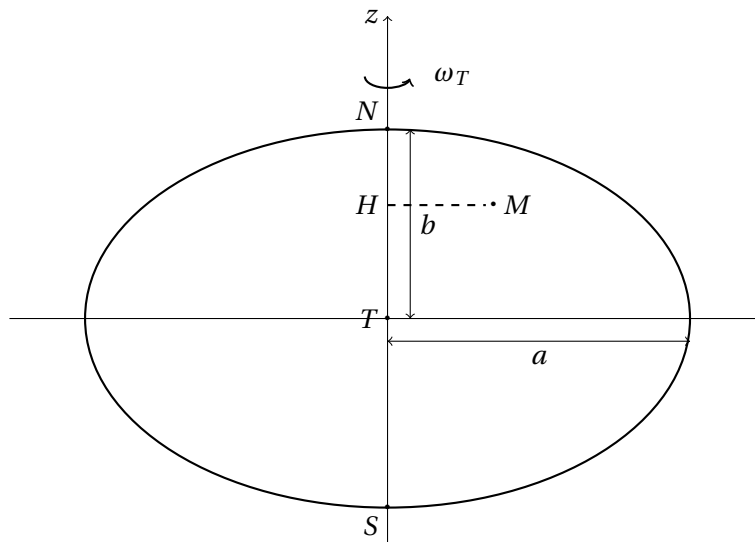


FIGURE 2 – Terre ellipsoïdale

Q12. On définit la quantité ε par la relation

$$\varepsilon = \frac{\omega_T^2 R_T^3}{\mathcal{G} M_T}$$

En l'écrivant sous la forme du rapport de deux forces par unité de masse, **donner** la signification physique de cette quantité. **Estimer** sa valeur numérique.

On admet que l'application de la loi de la statique des fluides dans le référentiel terrestre non galiléen se traduit par l'équation

$$\overrightarrow{\text{grad}}(P) = -\frac{4}{3}\pi\mathcal{G}\rho_T^2\overrightarrow{TM} + \rho_T\omega_T^2\overrightarrow{HM},$$

H étant le projeté orthogonal de M sur l'axe de rotation. On travaille en coordonnées cartésiennes avec pour axe Tz l'axe des pôles.

Q13. Établir que le champ de pression P vérifie les trois équations aux dérivées partielles

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x} = -K_1 x \\ \frac{\partial P}{\partial y} = -K_1 y \\ \frac{\partial P}{\partial z} = -K_2 z \end{array} \right.$$

Exprimer les constantes K_1 et K_2 en fonction de constantes prises parmi ω_T , $\mathcal{G}$, ρ_T .

Q14. Résoudre ce système sans chercher à expliciter une éventuelle constante d'intégration apparaissant dans le calcul. **Montrer** que l'équation de la surface libre du fluide modélisant la Terre se met sous la forme $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$, équation d'un ellipsoïde de révolution.

Q15. En déduire l'expression de l'aplatissement f de la terre en fonction de K_1 et K_2 , puis de ε . **Réaliser** l'application numérique.

Q16. La valeur admise pour l'aplatissement est approximativement le double de la valeur numérique calculée dans la question précédente. **Donner** deux limites du modèle permettant d'expliquer cette différence de valeur.

I.3 Déviation vers l'est

Une expérience de chute libre dans le référentiel terrestre permet de mettre en évidence la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles par rapport au référentiel géocentrique. On peut citer par exemple l'expérience réalisée par Ferdinand Reich, en 1832, dans un puits de mine à Freiberg, au cours de laquelle des billes étaient lâchées avec une vitesse initiale nulle et dont le point de chute moyen n'était pas à la verticale du point de lâcher.

Q17. Citer une autre expérience mettant en évidence la rotation de la Terre. **Nommer** le concepteur de cette expérience et **préciser** au cours de quel siècle elle a été réalisée.

On travaille dans le référentiel terrestre, dans lequel on étudie la chute d'une bille lâchée avec une vitesse initiale nulle d'une hauteur h au dessus du sol, l'expérience ayant lieu à l'équateur. On prend comme repère (O, x, y, z) , O étant à la surface terrestre, à la verticale du point L du lâcher, (Ox) étant dirigé vers l'est, (Oy) vers le nord et (Oz) suivant la verticale ascendante (voir figure 3). On note $\vec{\omega}_T$ le vecteur rotation de la Terre par rapport au référentiel géocentrique, g l'intensité du champ de pesanteur supposé uniforme et m la masse d'une bille. On néglige tout frottement.

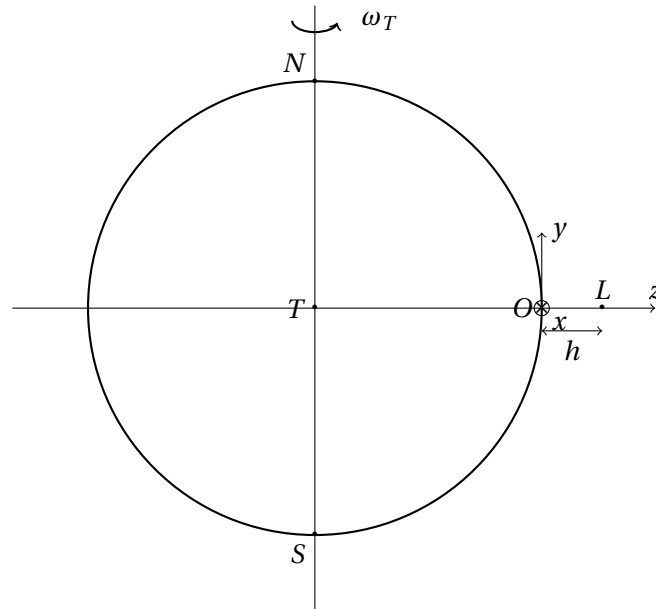


FIGURE 3 – Expérience de chute dans le référentiel terrestre

Q18. En analysant les phénomènes en cause et en vous appuyant sur les équations qui les régissent, **établir** que l'expression de la distance $\Delta\ell$ qui sépare le point de chute de la bille du point O, et qui est due à la force de Coriolis, est donnée par (sans se soucier d'éventuels facteurs numériques) : $\Delta\ell = \omega_T \frac{h^{3/2}}{\sqrt{g}}$.

Q19. **Calculer** la valeur numérique de $\Delta\ell$ pour $h = 1 \times 10^2$ m et $g = 1 \times 10^1$ m · s⁻².

On étudie cette même expérience dans le référentiel géocentrique supposé galiléen (une approche d'ailleurs suivie par Newton). La durée de l'expérience étant très faible devant la période de rotation propre de la Terre, on néglige la rotondité de la Terre. Le champ gravitationnel est supposé uniforme, de norme g_0 . On note O' le point fixe du référentiel géocentrique confondu avec O à l'instant du lâcher de la bille.

Q20. **Préciser** quelles sont, dans le référentiel géocentrique, les natures des mouvements et des trajectoires de la bille et du point O. **Représenter** ces dernières sur un schéma clair et annoté. **Justifier** que pour un observateur terrestre la déviation a bien lieu vers l'est.

Q21. **Calculer** l'expression de la distance $\Delta\ell'$ entre le point de chute de la bille et le point O.

Q22. Ce modèle ne donne pas un résultat entièrement satisfaisant car on a supposé le champ gravitationnel uniforme. **Indiquer** quelle serait la nature de la trajectoire de la bille dans le référentiel géocentrique en prenant pour champ gravitationnel celui de la question Q2.

I.4 Cas pratique : la planète de l'allumeur de réverbère

Dans le chapitre XIV du Petit Prince d'Antoine de Saint-Exupéry, on trouve la description de la cinquième planète visitée par le héros, la planète de l'allumeur de réverbère (astéroïde A329). Une illustration très fidèle de la situation est donnée par la figure 4.

Extrait :

La cinquième planète était très curieuse. C'était la plus petite de toutes. Il y avait là juste assez de place pour loger un réverbère et un allumeur de réverbères.

[...]

Le petit prince le regarda et il aima cet allumeur qui était tellement fidèle à la consigne. Il se souvint des couchers de soleil que lui-même allait autrefois chercher, en tirant sa chaise. Il voulut aider son ami :

– Tu sais... je connais un moyen de te reposer quand tu voudras...

– Je veux toujours, dit l'allumeur.

Car on peut être, à la fois, fidèle et paresseux.

Le petit prince poursuivit :

- Ta planète est tellement petite que tu en fais le tour en trois enjambées. Tu n’as qu’à marcher assez lentement pour rester toujours au soleil. Quand tu voudras te reposer tu marcheras... et le jour durera aussi longtemps que tu voudras.
- Ça ne m’avance pas à grand’chose, dit l’allumeur. Ce que j’aime dans la vie, c’est dormir.
- Ce n’est pas de chance, dit le petit prince.
- Ce n’est pas de chance, dit l’allumeur.

[...]

Ce que le petit prince n’osait pas s’avouer, c’est qu’il regrettait cette planète bénie à cause, surtout, des mille quatre cent quarante couchers de soleil par vingt-quatre heures.

Par ailleurs le petit prince ne semble pas s’être plaint d’une pesanteur ou trop forte ou trop faible sur la planète.



FIGURE 4 – Cinquième planète de l’allumeur de réverbère (issu du Petit Prince de Saint-Exupéry)

L’évaluation des réponses aux deux questions suivantes Q23 et Q24, repérées par une barre noire dans la marge gauche, porte tout particulièrement sur l’analyse physique des situations, la qualité de la rédaction et la mise en place d’une démarche de résolution.

Q23. À partir des informations que l’on peut tirer de l’extrait du récit précédent, **estimer** les valeurs numériques de la masse M de la planète et de l’altitude H_s d’un satellite A329-stationnaire.

Q24. **Estimer** la valeur numérique de la taille maximale du réverbère si l’on suppose qu’il est juste posé verticalement sur le sol, à l’équateur de la planète (**s’appuyer** sur une modélisation simple du réverbère).

II Magnétisme terrestre

On s’intéresse dans cette partie à la description du champ magnétique terrestre. On considère une distribution de courants stationnaires $\mathcal{D}$ étudiée dans l’approximation dipolaire.

Q25. Préciser ce qu’est l’approximation dipolaire.

La distribution $\mathcal{D}$ est ici une spire circulaire de centre O et de rayon R , d’axe Oz , parcourue par un courant d’intensité I . Le sens positif pour compter l’intensité est précisé sur la figure 5 par une flèche.

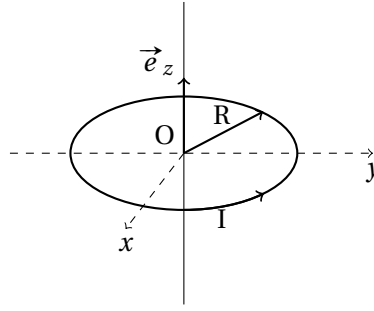


FIGURE 5 – Spire circulaire

Q26. Définir le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ d'une distribution filiforme quelconque, puis **expliquer** son expression dans le cas de la distribution $\mathcal{D}$. **Indiquer** son unité.

Q27. Justifier que les lignes de champ du champ magnétique créé par la distribution $\mathcal{D}$ sont contenues dans des plans contenant l'axe Oz . **Tracer** l'allure des lignes de champ dans un tel plan dans le cadre de l'approximation dipolaire.

On rappelle qu'un dipôle magnétique $\vec{\mathcal{M}} = \mathcal{M} \vec{e}_z$ crée, en un point M de coordonnées (r, θ, φ) dans un système de coordonnées sphériques d'axe Oz , un champ magnétique dont les composantes sont données par :

$$B_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mathcal{M} \cos \theta}{r^3}, \quad B_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathcal{M} \sin \theta}{r^3} \quad \text{et} \quad B_\varphi = 0.$$

Q28. Une modélisation grossière du champ magnétique terrestre consiste en un dipôle magnétique placé au centre de la Terre, aligné sur l'axe des pôles. En vous appuyant sur le fonctionnement d'une boussole, **préciser** le sens du dipôle magnétique. En vous appuyant sur vos connaissances relatives au magnétisme terrestre, **estimer** la valeur numérique du moment magnétique de ce dipôle.

Q29. On se place dans une zone de l'espace non parcourue par des courants. **Écrire** les deux équations de Maxwell vérifiées par le champ magnétique en régime stationnaire dans ce cas.

Q30. En déduire que, dans une zone non parcourue par des courants, le champ magnétique dérive d'un potentiel magnétique scalaire $V(M)$ (i.e. $\vec{B} = -\text{grad}(V)$). Par un calcul ou par une analogie à **expliquer**, **exprimer** ce potentiel dans le cas du champ magnétique créé par un dipôle magnétique.

Une équipe internationale de scientifiques sous les auspices de l'IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) maintient un modèle du champ magnétique terrestre (IGRF International Geomagnetic Reference Field), qu'il remet régulièrement à jour pour suivre ses variations temporelles. Ce modèle propose un potentiel magnétique scalaire en coordonnées sphériques dont l'expression est la suivante :

$$V(r, \theta, \varphi) = R_T \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_T}{r} \right)^{n+1} [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] P_n^m(\cos \theta),$$

r étant la distance au centre de la Terre, θ la colatitude et φ la longitude. Les coefficients g_n^m et h_n^m sont des coefficients exprimés en nT. Les fonctions $P_n^m(X)$ sont des polynômes, appelés polynômes associés de Legendre de degré n et d'ordre m , dont les premières expressions sont données dans le tableau suivant (n.d. signifie non défini).

$n \backslash m$	0	1	2	3
0	1	n.d.	n.d.	n.d.
1	x	$-(1-x^2)^{1/2}$	n.d.	n.d.
2	$\frac{1}{2}(3x^2-1)$	$-3x(1-x^2)^{1/2}$	$3(1-x^2)$	n.d.
3	$\frac{1}{2}(5x^3-3x)$	$-\frac{3}{2}(5x^2-1)(1-x^2)^{1/2}$	$15x(1-x^2)$	$-15(1-x^2)^{3/2}$

Il s'agit d'une décomposition du type « harmoniques sphériques » que l'on rencontre dans de nombreux domaines de la physique. La décomposition est tronquée à l'ordre $N = 13$ dans l'IGRF.

Q31. Citer un autre type de décomposition d'une fonction en fonctions élémentaires.

Q32. On s'intéresse au terme $n = 1$, $m = 0$ de la décomposition. **Indiquer** à quel type de « source » ce champ magnétique correspond.

Le code python suivant est une tentative d'écriture d'une fonction permettant de calculer le potentiel magnétique en un point de coordonnées sphériques (r, θ, φ) . On suppose disposer des tableaux de coefficients g et h sous la forme de tableaux à deux dimensions, en variables globales. Ainsi $g[i][j]$ renvoie le coefficient g_i^j . On dispose également de la constante R_T par l'identifiant R_T . Enfin la fonction $P(n, m, X)$ permet de calculer $P_n^m(X)$.

```
1 from ... import ...
2
3 def V(r, theta, phi):
4     N = 13
5     res = 0
6
7     for n in range(1, ...):
8         for m in range(...):
9             res = ...
10
11     return res
```

Q33. Compléter les lignes 1, 7, 8 et 9.

Dans les articles qui définissent l'IGRF¹, l'inclinaison I est l'angle que fait le champ magnétique avec le plan horizontal. Elle est positive si le champ magnétique pointe vers le sol.

Q34. On reprend le modèle grossier de la question Q28. **Expliquer** quelle propriété présenterait I le long d'un cercle parallèle (i.e. à $\theta = \text{Cte}$). **Donner** ses valeurs à l'équateur et non loin du pôle nord géographique. **Commenter** alors la simulation correspondante obtenue par utilisation de l'IGRF donnée dans la figure 6 ci-dessous.

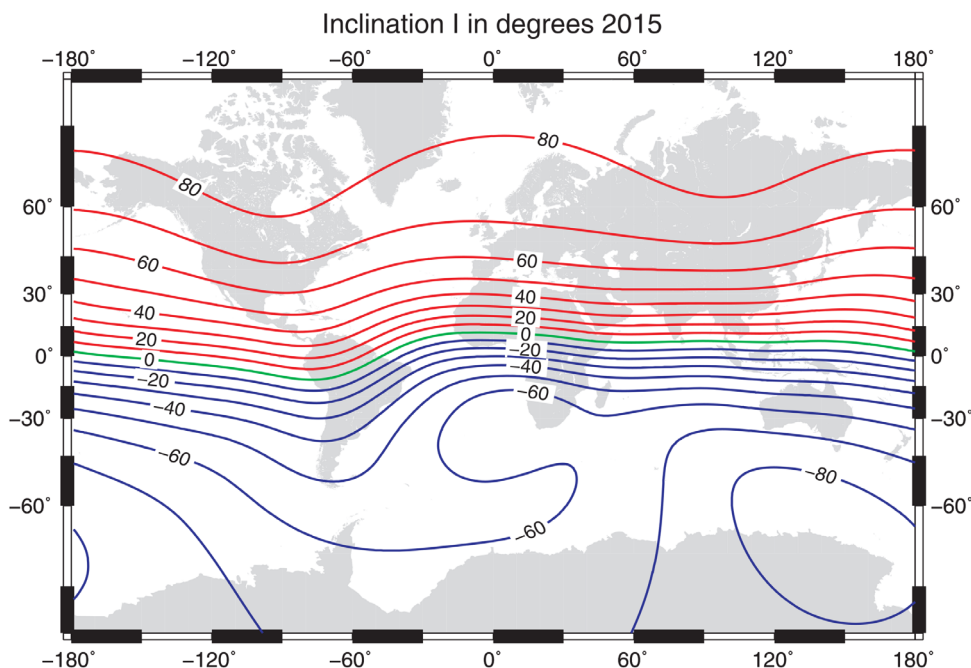


FIGURE 6 – Simulation des courbes d'égale inclinaison I (en degrés), longitude (degrés) en abscisse, latitude (degrés) en ordonnée.

1. Par exemple : Thébaud, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D. et al. « International Geomagnetic Reference Field : the 12th generation », *Earth Planet Sp* 67, 79 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>

III Rais sismiques

Dans cette partie on s'intéresse aux rais sismiques, qui sont les directions de propagation de l'énergie des ondes sismiques. On les étudie ici par analogie avec les rayons lumineux de l'optique.

Q35. Rappeler les lois de Descartes de la réflexion et de la réfraction, dans le cadre de l'optique géométrique, lorsqu'un rayon incident arrive sur un dioptré séparant un milieu d'indice n_1 , d'un milieu d'indice n_2 . **Illustrer** ces relations par un schéma.

On peut retrouver la loi de la réfraction en s'appuyant sur le principe de Fermat résumé ici en disant que le trajet suivi par la lumière entre deux points A et B a une durée minimale (est stationnaire serait plus correct). On considère la situation suivante dans laquelle un rayon lumineux issu de A , de coordonnées $(0, a)$ dans un milieu d'indice optique homogène n_1 arrive sur le dioptré en un point I d'abscisse x , avant de partir en direction de B , de coordonnées $(L, -b)$ dans un milieu homogène d'indice n_2 (cf. figure 7).

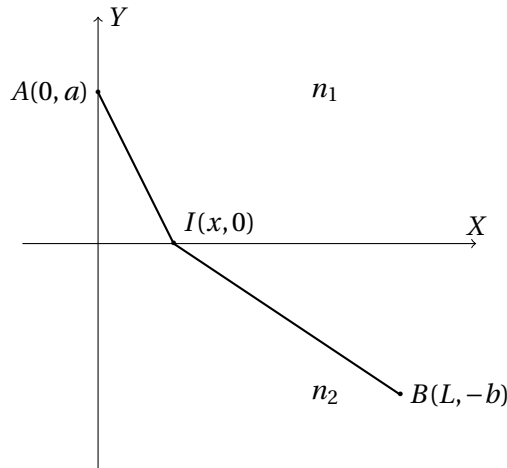


FIGURE 7 – Réfraction et principe de Fermat

Q36. Exprimer la durée de parcours $\tau(x)$ de la lumière en fonction de a, b, c, n_1, n_2, L et x (c désigne la vitesse de la lumière dans le vide).

Q37. Vérifier que minimiser la durée de parcours $\tau(x)$ permet de retrouver la loi de Descartes de la réfraction.

Des ondes mécaniques de compression ou de cisaillement peuvent se propager dans la Terre. En notant u la grandeur qui se propage, elle vérifie, selon le cas, l'équation d'onde

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \text{ pour une onde de compression et,}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\mu} \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \text{ pour une onde de cisaillement,}$$

dans lesquelles ρ est la masse volumique du milieu, λ et μ les coefficients de Lamé (positifs) qui caractérisent le milieu.

Q38. Donner le nom propre qu'on associe à ces équations de propagation. **Indiquer** à quelle grandeur physique les coefficients de Lamé sont homogènes. Dans le cas où ρ, λ et μ sont des constantes, **préciser** si la propagation est dispersive ou non. **Préciser** également la nature longitudinale ou transversale de ces ondes.

Q39. Lors de l'observation d'un séisme, ces deux types d'ondes n'arrivent pas en même temps. **Déterminer** l'ordre d'arrivée de l'onde de compression, appelée aussi onde P , et de l'onde de cisaillement, appelée aussi onde S .

On considère un dioptré horizontal séparant deux milieux de caractéristiques ρ_1, λ_1, μ_1 et ρ_2, λ_2, μ_2 . On notera V_{1P}, V_{2P}, V_{1S} et V_{2S} les célérités respectivement des ondes P et S dans les milieux respectivement 1 et 2.

Une onde incidente se propage dans le milieu 1. Le plan de la figure est le plan vertical d'incidence.

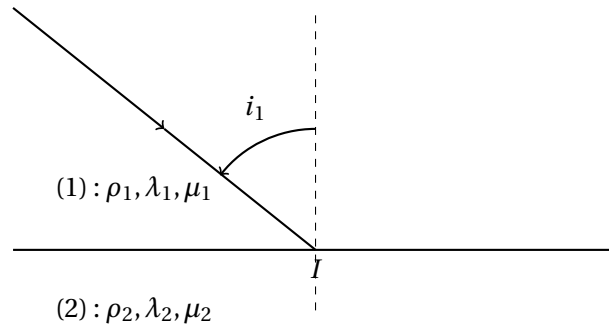


FIGURE 8 – Onde incidente arrivant sur un dioptré horizontal

On est amené à détailler trois types d'ondes :

- Onde de compression P avec un mouvement de la matière perpendiculaire au front d'onde.
- Onde de cisaillement S , avec mouvement de la matière parallèle au front d'onde, et situé dans le plan d'incidence. Elle sera notée $S_{\parallel}$.
- Onde de cisaillement S , avec mouvement de la matière parallèle au front d'onde, et perpendiculaire au plan d'incidence. Elle sera notée $S_{\perp}$.

Remarque : il existe également des ondes de surface auxquelles nous ne nous intéressons pas ici.

Q40. Nommer le concept qui, en électromagnétisme, permet de distinguer les deux directions de vibration d'une onde vibrant parallèlement au plan d'onde.

Les conséquences, en termes d'ondes réfléchies et transmises, dépendent de la nature de l'onde incidente, et offrent des situations plus riches qu'en optique géométrique.

Q41. Les deux figures 9 et 10 correspondent à l'arrivée d'une onde incidente, sous une incidence i_1 , soit d'une onde P , soit d'une onde $S_{\perp}$. **Identifier**, en justifiant, quelle figure correspond à quelle situation. **Reproduire** très rapidement ces figures et les **compléter** en indiquant la direction de vibration de la matière, ainsi que la nature de chaque onde (P , $S_{\perp}$ ou $S_{\parallel}$ selon les cas). **Donner** les relations permettant de calculer les différents angles des ondes réfléchies ou réfractées.

On suppose que $V_{2P} > V_{2S} > V_{1P} > V_{1S}$.

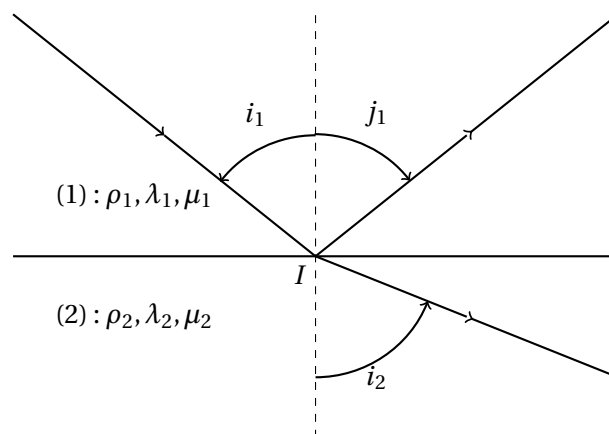


FIGURE 9 – Onde incidente donnant naissance à une onde réfléchie et une onde transmise

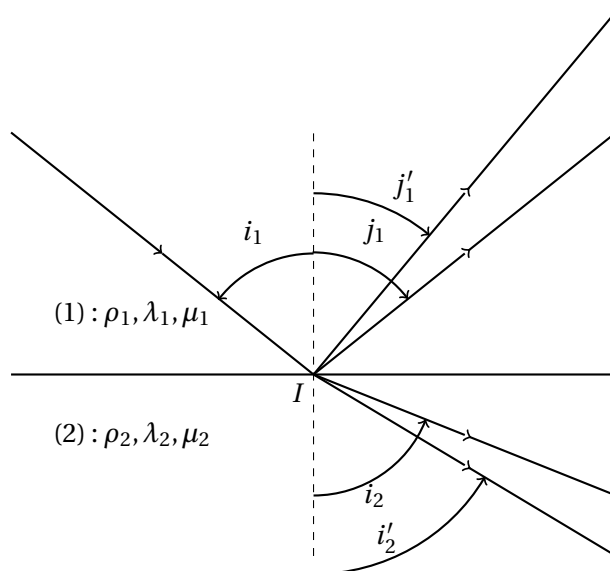


FIGURE 10 – Onde incidente donnant naissance à deux ondes réfléchies et deux ondes transmises

Le document en Annexe 4 présente une activité relative à la mesure d'un indice de réfraction. Elle est proposée par un enseignant à une classe de terminale STL en spécialité sciences physiques et chimiques en laboratoire (SPCL) (programme en Annexe 5).

QP42. Expliciter les prérequis nécessaires pour aborder cette activité. **Définir** quels sont les objectifs en termes d'apprentissage.

QP43. Définir l'incertitude-type associée à la valeur mesurée d'une grandeur physique.

Un groupe d'élèves saisit ses mesures (voir Annexe 4) dans un fichier (de type tableur) fourni par le professeur. À partir de ces mesures, le fichier calcule et affiche les valeurs suivantes de n et de son incertitude-type $u(n)$:

—Pour la méthode 1 : $n = 1,461\,902\,022$ et $u(n) = 0,082\,869\,284$.

—Pour la méthode 2 : $n = 1,466\,276\,426$ et $u(n) = 0,054\,886\,664$.

QP44. Pour chacune des deux méthodes, **écrire** le résultat attendu pour la mesure de n .

QP45. Préciser si les deux valeurs mesurées de n sont compatibles. **Justifier** la réponse.

QP46. Proposer une mise en œuvre alternative de cette activité expérimentale qui permettrait aux élèves d'évaluer également une incertitude-type par une approche statistique (type A) – entre 5 et 10 lignes. **Donner** au moins un argument en faveur de cette proposition alternative.

On considère un séisme ayant lieu en O à la surface de la Terre. On s'intéresse uniquement à la propagation des ondes P dans la Terre émise par la source O dans toutes les directions.

Q47. Si l'on fait l'hypothèse que la Terre est homogène, **indiquer** quelle est alors la nature géométrique des rais sismiques dans la Terre.

En réalité, de manière générale, la vitesse de propagation des ondes sismiques augmente avec la profondeur.

Q48. Proposer une situation analogue dans le cadre de l'optique géométrique correspondant à l'étude des trajectoires des rais sismiques.

Pour simplifier, on étudie les phénomènes dans un plan vertical xOz , l'axe Oz étant pris vertical descendant, au voisinage de la surface, supposée localement plane. On cherche donc à mettre en équation la trajectoire $z(x)$ d'un rai sismique se propageant dans le sens des x croissants.

On commence par considérer un milieu stratifié constitué de couches indicées par k dans lesquelles la vitesse des ondes sismiques V_k est une constante. On note i_k l'angle que fait le rai sismique avec la normale dans la couche k comme sur la figure 11 (page 13).

Q49. Expliciter ce que l'on peut dire de remarquable de la quantité $\frac{\sin i_k}{V_k}$ le long d'un rai sismique. **Justifier** la concavité de la trajectoire du rai sismique représenté sur la figure 11 (page 13).

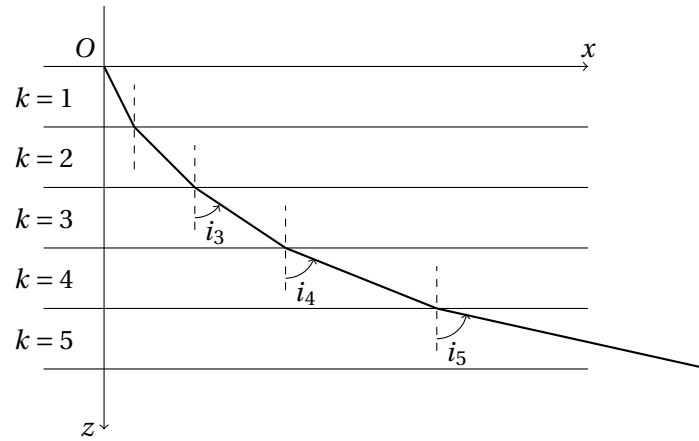


FIGURE 11 – Propagation dans un milieu stratifié

On considère maintenant un milieu dans lequel la vitesse des ondes varie continûment avec z : $V(z)$. On note alors de même $i(z)$ l'angle que fait la tangente au rai à la profondeur z avec la verticale descendante.

Q50. Écrire ce que devient alors la relation écrite dans la question Q49.

Q51. À un rai donné on associe la quantité $\frac{1}{V(h)}$. **Donner** une interprétation de la quantité h ainsi définie.

Q52. Établir que $\sin(i(z)) = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dz^2}}$ et **en déduire** l'équation différentielle suivante, vérifiée par la fonction $z(x)$:

$$\frac{dz}{dx} = \pm \sqrt{\left(\frac{V(h)}{V(z)}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

Expliquer ce que traduit la présence du symbole $\pm$ dans cette équation différentielle.

On suppose que la vitesse V varie peu au voisinage de la surface et en particulier dans la partie parcourue par le rai, ce qui permet d'écrire $V(z) = V(0) \left(1 + \gamma z\right)$, avec $\gamma > 0$ et $\gamma h \ll 1$.

Q53. Simplifier le terme de droite de l'équation différentielle (1) en exploitant $\gamma h \ll 1$, puis **intégrer** l'équation différentielle simplifiée sur la première moitié de la trajectoire du rai sismique pour obtenir :

$$z(x) = h - \left(\sqrt{h} - x\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\right)^2.$$

Cette solution est également valable sur la seconde moitié de la trajectoire.

Q54. Expliciter la nature géométrique de cette trajectoire et la **représenter** qualitativement dans le plan xOz en choisissant un angle $i(z=0)$ en O voisin de 60° . **Préciser** l'expression littérale des coordonnées des points remarquables de ce rai sismique.

IV L'atmosphère, une machine thermique?

Dans cette partie on jette un regard thermodynamique sur les mouvements des courants atmosphériques.

IV.1 Enseigner la thermodynamique en classe de terminale

Le programme de l'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de terminale – voie générale – auquel se réfère cette partie figure en Annexe 6.

Un enseignant distribue à ses élèves de terminale – voie générale – le document en Annexe 7 intitulé « Plan de travail relatif au chapitre 15 ». Ce plan de travail décrit les tâches à réaliser par les élèves en amont d'une

séance au cours de laquelle les notions et capacités exigibles du chapitre 15 seront (re)travaillées et synthétisées. En s'appuyant sur un document vidéo, les élèves doivent répondre à un questionnaire. Le fil conducteur de la ressource vidéo est la détermination de l'évolution temporelle de la température d'un système constitué d'une tasse et du café qu'elle contient, au contact de l'air ambiant (thermostat).

QP55. En une dizaine de lignes, **présenter** quelques avantages du plan de travail pour les élèves.

QP56. Tracer le graphe donnant l'évolution temporelle de la température du système {tasse+café}. **Donner** la réponse attendue des élèves à la question suivante posée dans le questionnaire : « Décrire rigoureusement la courbe expérimentale. Pourquoi y a-t-il, initialement, une forte diminution de la température du système? »

QP57. Proposer une définition d'un système thermodynamique que l'on peut donner aux élèves.

Pour répondre à la question « Écrire le premier principe de la thermodynamique. Définir tous les termes. », les élèves peuvent s'appuyer sur la diapositive ci-dessous proposée dans la vidéo :

 **Modélisation : Rappels sur le premier principe de la thermodynamique, bilan d'énergie**

- L'énergie est une grandeur conservative.
- La variation d'énergie interne d'un système fermé entre un état initial et un état final est égale à l'énergie qu'il a reçue entre ces 2 états sous forme de travail et sous forme de transfert thermique:

$$\Delta U = W + Q$$

- W : travail algébrique des forces extérieures reçu par le système, en J.
- Q : transfert thermique algébrique reçu par le système, en J.

QP58. « L'énergie est une grandeur conservative ». **Écrire** ce qu'on peut dire aux élèves de la classe pour leur faire comprendre la signification de cette phrase.

QP59. Préciser l'information supplémentaire, concernant le système, donnée oralement dans la vidéo afin de justifier l'écriture $\Delta U = W + Q$.

QP60. En accord avec le programme de la classe de terminale, **définir** l'énergie interne d'un système.

Williams souligne dans son étude sur l'impact de la sémantique dans l'enseignement de la physique, que les difficultés linguistiques ont inévitablement des répercussions dans l'enseignement² : « *les raisons pour lesquelles la physique est universellement considérée comme « dure » vont au-delà de l'inévitable difficulté de ses concepts et de son association avec les mathématiques. Une partie de la difficulté, voire même une grande partie, se trouve dans le langage et la façon dont nous l'utilisons et l'enseignons.* »

QP61. Expliquer pourquoi il est parfois conseillé de ne plus parler aux élèves de corps chaud et de corps froid au début des apprentissages en thermodynamique. Une réponse succincte – en 5 lignes au maximum – est attendue.

QP62. Pour préciser le sens spontané d'un transfert thermique, **proposer** une phrase, que les élèves de terminale pourraient écrire dans leur cahier, et qui prenne en compte le conseil de la question précédente.

IV.2 Généralités sur les moteurs thermiques dithermes

On considère une machine thermique ditherme dans laquelle un fluide parcourt de manière cyclique différents organes (compresseur, détenteur, etc). Il n'échange du transfert thermique qu'au contact de deux thermostats de températures T_c (source chaude) et T_f (source froide), avec $T_c > T_f$. On note W le travail reçu par le fluide sur un cycle, Q_c et Q_f les transferts thermiques reçus de la part respectivement de la source chaude et de la source froide.

Q63. Établir une relation entre W , Q_c et Q_f .

Q64. Par un bilan d'entropie, **établir** l'inégalité de Carnot-Clausius.

2. H. Thomas Williams, « Semantics in teaching introductory physics », *American Journal of Physics* 67, 670-680 (1999)

On ne s'intéresse dans la suite qu'à des machines motrices.

Q65. On considère un moteur ditherme réversible. **Indiquer** quelles sont nécessairement les natures des transformations suivies par le fluide. **Définir** et **établir** l'expression du rendement η_C (rendement de Carnot) d'une telle machine motrice en fonction de T_c et T_f .

Q66. On considère maintenant une machine motrice non réversible. **Montrer** que son rendement est majoré par le rendement de Carnot.

IV.3 Modèle de Curzon et Ahlborn

Dans un article de 1975, Curzon et Ahlborn³ ont proposé un modèle de machine thermique ditherme permettant de prendre en compte la limitation du rendement liée à la vitesse à laquelle les transferts thermiques avec les sources peuvent prendre place.

Pour cela on introduit deux résistances thermiques R_{th} identiques entre les sources et le fluide. On note T_1 , respectivement T_2 , la température du fluide au contact de la source chaude (de température T_c), respectivement froide (de température T_f), par l'intermédiaire de la résistance thermique R_{th} (cf. figure 12).

Le cycle décrit par le fluide est constitué de deux transformations adiabatiques et deux transformations isothermes (aux températures T_1 et T_2). On suppose que chaque transformation isotherme a une durée τ , et que les durées des transformations adiabatiques sont négligeables devant τ .

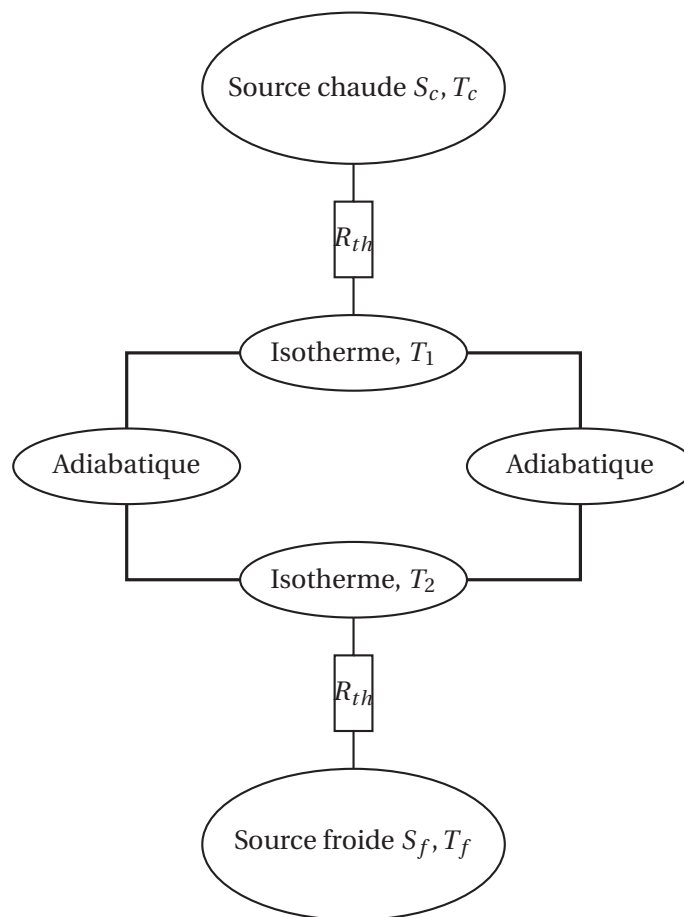


FIGURE 12 – Modèle de machine thermique selon le modèle de Curzon et Ahlborn

Q67. **Exprimer** en fonction de T_1 , T_2 , T_c , T_f , R_{th} et τ les transferts thermiques Q_c et Q_f reçus par le fluide de la part de la source chaude et de la source froide au cours d'un cycle.

Q68. **Exprimer** en fonction de T_1 , T_2 , T_c , T_f et R_{th} la puissance mécanique $\mathcal{P}_m$ fournie par la machine thermique.

3. F. L. Curzon and B. Ahlborn, « Efficiency of a Carnot engine at maximum power output », *American Journal of Physics* 43, 22 (1975)

On admet que le rendement est maximal lorsque la condition $\frac{T_c - T_1}{T_1} + \frac{T_f - T_2}{T_2} = 0$ est satisfaite. On pose $\alpha = \frac{T_1}{T_c}$ et $\beta = \frac{T_f}{T_c}$ et on admet que $\alpha > \frac{1}{2}$.

Q69. Établir la relation $\mathcal{P}_m = \frac{T_c}{2R_{th}} \left(1 - \alpha + \beta - \frac{\beta}{2 - \frac{1}{\alpha}} \right)$.

On raisonne en général à températures T_f et T_c des sources fixées.

Q70. Déterminer dans ces conditions la valeur numérique du rapport α permettant d'avoir la plus grande puissance motrice.

Dans ces conditions on montre alors que la puissance motrice maximale correspondante est donnée par :

$$\mathcal{P}_{m,\max} = \frac{T_c}{4R_{th}} (1 - \sqrt{\beta})^2$$

Q71. Établir alors que, dans les conditions optimales, le rendement du système vaut $1 - \sqrt{\beta}$. **Commenter.**

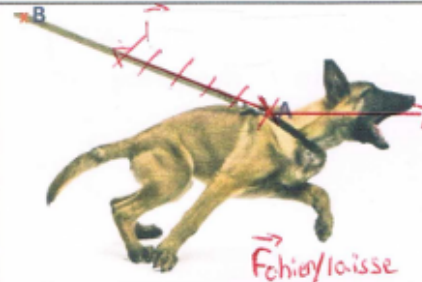
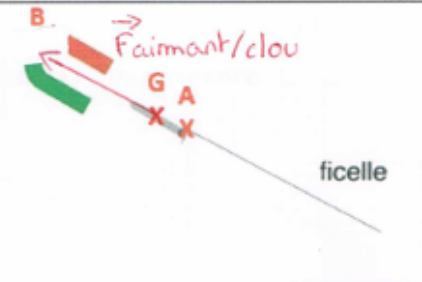
IV.4 Application

On modélise l'atmosphère comme un moteur thermique fournissant de la puissance mécanique aux vents. La source chaude est constituée par le rayonnement solaire dont la puissance surfacique moyenne, également répartie sur toute la surface terrestre, est de l'ordre de $2 \times 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Les températures moyennes valent : 290 K au niveau du sol et 220 K au sommet de l'atmosphère.

Q72. Estimer la puissance mécanique maximale susceptible d'être fournie aux masses atmosphériques. Aide numérique : $\sqrt{\frac{22}{29}} = 9 \times 10^{-1}$.

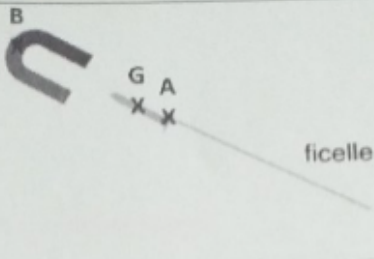
❖
❖ FIN DES QUESTIONS ❖
❖

	Situation 1 : Action exercée par le chien sur la laisse.	Situation 2 : Action exercée par l'aimant sur le clou
		
Possibilités à placer : tout n'y est pas.	« A » ; « B », « vers la droite », « vers la gauche » ; « horizontale » ; « verticale », « la droite (AB) » ; « le chien » ; « la laisse »	« A » ; « B », « G » « vers le haut », « vers le bas » ; « horizontale » ; « verticale », « celle de la laisse » ; « le clou » ; « l'aimant »
Acteur	Le chien	l'aimant
Receveur	la laisse	clou
Type d'action	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse
Point d'application	A	G
Direction	horizontal	horizontal
Sens	droite	gauche
Force	Représenter la force correspondante sur la photo sans souci d'échelle.	Représenter la force correspondante sur le dessin sans souci d'échelle.

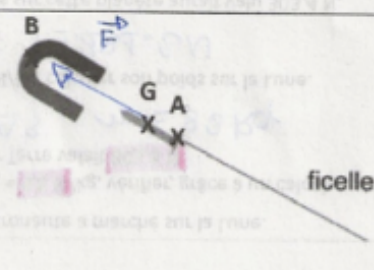
Copie de l'élève A

	Situation 1 : Action exercée par le chien sur la laisse.	Situation 2 : Action exercée par l'aimant sur le clou
		
Possibilités à placer : tout n'y est pas.	« A » ; « B », « vers la droite », « vers la gauche » ; « horizontale » ; « verticale », « la droite (AB) » ; « le chien » ; « la laisse »	« A » ; « B », « G » « vers le haut », « vers le bas » ; « horizontale » ; « verticale », « celle de la laisse » ; « le clou » ; « l'aimant »
Acteur	Chien	l'aimant
Receveur	laisse	le clou
Type d'action	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse
Point d'application	A	G
Direction	la droite (AB)	horizontale
Sens	vers la droite	vers le haut
Force	Représenter la force correspondante sur la photo sans souci d'échelle.	Représenter la force correspondante sur le dessin sans souci d'échelle.

Copie de l'élève B

	Situation 1 : Action exercée par le chien sur la laisse.	Situation 2 : Action exercée par l'aimant sur le clou
		
Possibilités à placer : tout n'y est pas.	« A » ; « B », « vers la droite », « vers la gauche » ; « horizontale » ; « verticale », « la droite (AB) » ; « le chien » ; « la laisse »	« A » ; « B », « G » « vers le haut », « vers le bas » ; « horizontale » ; « verticale », « celle de la laisse » ; « le clou » ; « l'aimant »
Acteur	chien	aimant
Receveur	laisse	clou
Type d'action	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse
Point d'application	A (le chien)	B (l'aimant)
Direction	horizontale	verticale
Sens	Vers la droite	vers le haut
Force	Représenter la force correspondante sur la photo sans souci d'échelle.	Représenter la force correspondante sur le dessin sans souci d'échelle.

Copie de l'élève C

III/ Etude de deux actions mécaniques		
	Situation 1 : Action exercée par le chien sur la laisse.	Situation 2 : Action exercée par l'aimant sur le clou
		
Possibilités à placer : tout n'y est pas.	« A » ; « B », « vers la droite », « vers la gauche » ; « horizontale » ; « verticale », « la droite (AB) » ; « le chien » ; « la laisse »	« A » ; « B », « G » « vers le haut », « vers le bas » ; « horizontale » ; « verticale », « celle de la laisse » ; « le clou » ; « l'aimant »
Acteur	le chien	l'aimant
Receveur	la laisse	le clou
Type d'action	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse	Action de contact / Action à distance Entourez la bonne réponse
Point d'application	A	G
Direction	la droite (AB)	celle de la laisse
Sens	vers la droite	vers le haut
Force	Représenter la force correspondante sur la photo sans souci d'échelle.	Représenter la force correspondante sur le dessin sans souci d'échelle.

Copie de l'élève D

Annexe 2

Extrait du programme de physique-chimie du cycle 4

Mouvement et interactions

Attendus de fin de cycle	
•Caractériser un mouvement •Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par une direction, un sens et une valeur	
Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme. ➤ Vitesse : direction, sens et valeur. ➤ Mouvements rectilignes et circulaires. ➤ Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur. ➤ Relativité du mouvement dans des cas simples.	L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques. Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante. Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.
Modéliser une action exercée sur un objet par une force caractérisée par une direction, un sens et une valeur	
Identifier les actions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Exploiter l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle, la loi étant fournie. ➤ Action de contact et à distance. ➤ Force : direction, sens et valeur. ➤ Force de pesanteur et son expression $P = mg$.	L'étude mécanique d'un système peut être l'occasion d'utiliser les diagrammes objet-interaction. Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, muscle). L'étude de la loi de gravitation est l'occasion d'aborder qualitativement la notion d'interaction. Pesanteur sur Terre et sur la Lune, différence entre poids et masse (unités). L'impesanteur n'est abordée que qualitativement.

Annexe 3

Extraits du programme de physique-chimie de la classe de 2^{de}

Mouvements et interactions

Notions abordées au collège (cycle 4) Vitesse (direction, sens, valeur), mouvements uniformes, rectilignes, circulaires, relativité des mouvements, interactions, forces, expression scalaire de la loi de gravitation universelle, force de pesanteur.	
Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
1. Décrire un mouvement	
Système. Échelles caractéristiques d'un système. Référentiel et relativité du mouvement.	Identifier les échelles temporelles et spatiales pertinentes de description d'un mouvement. Choisir un référentiel pour décrire le mouvement d'un système. Expliquer, dans le cas de la translation, l'influence du choix du référentiel sur la description du mouvement d'un système.
Description du mouvement d'un système par celui d'un point. Position. Trajectoire d'un point.	Décrire le mouvement d'un système par celui d'un point et caractériser cette modélisation en termes de perte d'informations. Caractériser différentes trajectoires. Capacité numérique : représenter les positions successives d'un système modélisé par un point lors d'une évolution unidimensionnelle ou bidimensionnelle à l'aide d'un langage de programmation.
Vecteur déplacement d'un point. Vecteur vitesse moyenne d'un point. Vecteur vitesse d'un point. Mouvement rectiligne.	Définir le vecteur vitesse moyenne d'un point. Approcher le vecteur vitesse d'un point à l'aide du vecteur déplacement $\overrightarrow{MM'}$, où M et M' sont les positions successives à des instants voisins séparés de Δt ; le représenter. Caractériser un mouvement rectiligne uniforme ou non uniforme. Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système en mouvement et représenter des vecteurs vitesse; décrire la variation du vecteur vitesse. Capacité numérique : représenter des vecteurs vitesse d'un système modélisé par un point lors d'un mouvement à l'aide d'un langage de programmation. Capacités mathématiques : représenter des vecteurs. Utiliser des grandeurs algébriques.

2. Modéliser une action sur un système	
Modélisation d'une action par une force. Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton).	Modéliser l'action d'un système extérieur sur le système étudié par une force. Représenter une force par un vecteur ayant une norme, une direction, un sens. Exploiter le principe des actions réciproques.
Caractéristiques d'une force. Exemples de forces : — force d'interaction gravitationnelle; — poids; — force exercée par un support et par un fil.	Distinguer actions à distance et actions de contact. Identifier les actions modélisées par des forces dont les expressions mathématiques sont connues a priori. Utiliser l'expression vectorielle de la force d'interaction gravitationnelle. Utiliser l'expression vectorielle du poids d'un objet, approché par la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant sur cet objet à la surface d'une planète. Représenter qualitativement la force modélisant l'action d'un support dans des cas simples relevant de la statique.
3. Principe d'inertie	
Modèle du point matériel. Principe d'inertie. Cas de situations d'immobilité et de mouvements rectilignes uniformes. Cas de la chute libre à une dimension.	Exploiter le principe d'inertie ou sa contraposée pour en déduire des informations soit sur la nature du mouvement d'un système modélisé par un point matériel, soit sur les forces. Relier la variation entre deux instants voisins du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel à l'existence d'actions extérieures modélisées par des forces dont la somme est non nulle, en particulier dans le cas d'un mouvement de chute libre à une dimension (avec ou sans vitesse initiale).

Extraits du programme de mathématiques de la classe de 2^{de}

Géométrie

Objectifs

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- consolider les notions sur les configurations géométriques abordées au collège et prolonger leur étude;
- introduire les vecteurs du plan comme outil permettant d'étudier des problèmes issus des mathématiques et des autres disciplines, en particulier de la physique;
- poursuivre l'étude de la géométrie repérée, qui relie nombres, calculs algébriques, fonctions et géométrie et constitue un outil utile à d'autres disciplines. En particulier, introduire la notion d'ensemble de points du plan décrit par une équation, en explicitant le cas des équations de droites.

Les élèves découvrent les vecteurs, qui sont un outil efficace pour démontrer en géométrie et pour modéliser en physique. Ils les manipulent dans le plan muni d'un repère orthonormé. Ils approfondissent leurs connaissances sur les configurations du plan, disposent de nouveaux outils pour analyser des figures géométriques, résoudre des problèmes. Ils étudient les équations de droite, font le lien entre représentations géométrique, algébrique, et fonctionnelle.

La géométrie développe des capacités de représentation. Il importe de s'appuyer sur des figures, selon des modalités diverses (tracé à main levée, schéma, figure soignée, utilisation de logiciels). Dans le cadre de la résolution de problèmes, l'utilisation d'un logiciel de géométrie dynamique par les élèves leur donne une plus grande autonomie et encourage leur prise d'initiative.

Le programme se place dans le cadre de la géométrie plane. Cependant, le professeur peut proposer des activités mobilisant les notions de géométrie dans l'espace vues au collège (sections, aires, volumes) enrichies de celles étudiées en seconde (vecteurs).

Il convient de mettre en valeur l'intervention de la géométrie dans les autres parties du programme, notamment « Nombres et calculs » et « Fonctions ».

Annexe 4

Activité proposée par un professeur à une classe de terminale STL-SPCL et résultats expérimentaux d'un groupe d'élèves

•ACTIVITÉ : mesurer un indice de réfraction, comparaison de deux méthodes

L'objectif de cette activité est de mesurer l'indice n du plexiglas à l'aide de deux méthodes, que nous comparerons l'une à l'autre. Le matériel utilisé est une source de lumière émettant un faisceau directif et un demi-cylindre en plexiglas placé sur un plateau tournant gradué en degré.

1^{ère} partie : exploitation du phénomène de réfraction

1. On admet dans cette activité que l'indice de réfraction de l'air vaut 1. Dans les cas d'une réfraction air→plexiglas, rappeler l'énoncé de la loi de Snell-Descartes sur la réfraction et retrouver l'expression de n donnée dans le document 1.
2. Rédiger un protocole expérimental permettant de déterminer l'indice de réfraction du plexiglas en exploitant la réfraction air-plexiglas et la première relation du document 1 ci-dessous.
3. Avec l'accord de l'enseignant, réaliser le protocole précédent et calculer la valeur n de l'indice de réfraction du plexiglas.
4. Estimer les incertitudes-types des deux angles mesurés $u(i)$ et $u(r)$ et les exprimer en radians. En déduire la valeur de l'incertitude-type de l'indice de réfraction n du plexiglas, en appliquant la relation donnée dans le document 1. En conclusion, écrire la valeur de n avec un nombre de chiffres significatifs cohérent.

Document 1 : mesure d'un indice à l'aide du phénomène de réfraction

•Expression de l'indice de réfraction :

Lors d'une réfraction air-plexiglas, si l'angle d'incidence vaut i et l'angle de réfraction vaut r , l'indice de réfraction du plexiglas vaut :

$$n = \frac{\sin(i)}{\sin(r)}$$

•Calcul de l'incertitude-type :

L'incertitude-type de l'indice de réfraction vaut :

$$u(n) = \sqrt{\left(\frac{\cos(i)}{\sin(r)}\right)^2 u^2(i) + \left(\frac{\cos(r) \times \sin(i)}{\sin^2(r)}\right)^2 u^2(r)}$$

Attention : $u(i)$ et $u(r)$ désignent les incertitudes-types sur les angles, **exprimées en radian**.

2^{ème} partie : exploitation du phénomène de réflexion totale

1. Rédiger un protocole expérimental permettant de déterminer l'indice de réfraction du plexiglas par exploitation de la relation donnée dans le document 2. On détaillera précisément les étapes à suivre.
2. Avec l'accord de l'enseignant, appliquer le protocole précédent et en déduire la valeur (notée n') de l'indice de réfraction recherché.
3. Estimer l'incertitude-type de l'angle mesuré $u(i_{\text{lim}})$ et l'exprimer en radian. En déduire la valeur de l'incertitude-type de l'indice de réfraction n' du plexiglas obtenu par cette méthode. En conclusion, écrire la valeur de n' avec un nombre de chiffres significatifs cohérent.

Document 2 : mesure d'un indice à l'aide du phénomène de réflexion totale

•Mesure d'un indice à l'aide de la réflexion totale :

Si l'angle limite de réflexion totale à l'interface plexiglas/air vaut i_{lim} l'indice de réfraction du plexiglas vaut :

$$n = \frac{1}{\sin(i_{\text{lim}})}$$

•Calcul de l'incertitude-type :

L'incertitude-type de l'indice de réfraction vaut :

$$u(n) = \frac{\cos(i_{\text{lim}})}{\sin^2(i_{\text{lim}})} u(i_{\text{lim}})$$

$u(i_{\text{lim}})$ étant l'incertitude-type de l'angle limite, **exprimée en radian**.

3^{ème} partie : comparaison des deux méthodes

1. Lequel des deux protocoles suivis dans cette activité donne la meilleure valeur de l'indice de réfraction ? Justifier en citant les résultats pertinents obtenus dans les deux parties précédentes.
2. Dresser la liste des sources d'erreur de ces deux mesures. Rédiger quelques lignes expliquant la raison pour laquelle l'un des deux protocoles est meilleur que l'autre.

•RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX D'UN GROUPE D'ÉLÈVES

Pour la méthode 1 - exploitation du phénomène de réfraction :

Valeurs mesurées : $i = 30^\circ$, $r = 20^\circ$. Le groupe estime l'incertitude-type associée aux mesures de i et r à $1,0^\circ$.

Pour la méthode 2 - exploitation du phénomène de réflexion totale :

Valeur mesurée de l'angle limite de réflexion totale : $i_{\text{lim}} = 43^\circ$. Le groupe estime l'incertitude-type associée à la mesure de i_{lim} à $2,0^\circ$.

Annexe 5

Extraits du programme de l'enseignement de spécialité SPCL de terminale de la série STL

Des ondes pour mesurer

Cette partie propose une utilisation concrète et expérimentale des ondes pour construire les concepts et modèles associés : réfraction et mesure d'indice de réfraction, polarisation et mesure de concentration, diffraction et mesure de la taille d'un objet, interférométrie et mesure de longueurs d'onde ou du pas d'un réseau, effet Doppler et mesure de vitesse. Elle permet de mobiliser les capacités liées à la mesure et aux incertitudes.

Certaines notions permettent de tisser des liens avec les autres thèmes de ce programme, notamment la polarimétrie et la spectroscopie exploitées dans le thème « Chimie et développement durable ».

L'étude des interférences se fait à partir des retards de propagation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Indice de réfraction. Lois de Snell-Descartes. Réfraction, réfraction limite et réflexion totale.	Définir l'indice de réfraction d'un milieu. Citer et exploiter les lois de Snell-Descartes. Établir et exploiter la relation entre l'angle de réfraction limite et les indices des milieux. Établir et exploiter les conditions de réflexion totale. Capacité expérimentale : Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour mesurer l'indice de réfraction d'un milieu.

Mesure et incertitudes

La pratique de laboratoire conduit à confronter les élèves à la conception, la mise en œuvre et l'analyse critique de protocoles de mesure. Évaluer l'incertitude d'une mesure, caractériser la fiabilité et la validité d'un protocole, sont des éléments essentiels de la formation dans la série sciences et technologies de laboratoire. Le professeur aborde ces notions, transversales au programme de physique-chimie, en prenant appui sur le contenu de chacun des thèmes des enseignements de spécialité du programme du cycle terminal.

En classe de première, les élèves ont été sensibilisés à la variabilité de la mesure qui a été quantifiée par l'incertitude-type évaluée soit de manière statistique (type A), soit à partir d'une seule mesure (type B). La compatibilité entre le résultat d'une mesure et la valeur de référence, si elle existe, est appréciée en exploitant les incertitudes-types. La comparaison de deux protocoles de mesure permet d'analyser la dispersion des résultats en termes de justesse et de fidélité. En classe terminale, en prenant appui sur les notions travaillées en classe de première, les élèves identifient les principales sources d'erreurs dans un protocole, comparent leur poids à l'aide d'une méthode fournie, proposent des améliorations au protocole et estiment l'incertitude-type de la mesure finale.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dispersion des mesures, incertitude-type sur une série de mesures. Incertitude-type sur une mesure unique. Sources d'erreurs. Expression du résultat. Valeur de référence Justesse et fidélité	Procéder à une évaluation de type A d'une incertitude-type. Procéder à une évaluation de type B d'une incertitude-type pour une source d'erreur en exploitant une relation fournie et/ou les notices constructeurs. Identifier qualitativement les principales sources d'erreurs lors d'une mesure. Comparer le poids des différentes sources d'erreurs à l'aide d'une méthode fournie. Identifier le matériel adapté à la précision attendue. Proposer des améliorations dans un protocole afin de diminuer l'incertitude sur la mesure. Évaluer, à l'aide d'une relation fournie ou d'un logiciel, l'incertitude-type d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs. Exprimer un résultat de mesure avec le nombre de chiffres significatifs adaptés et l'incertitude-type associée. Valider un résultat en évaluant la différence entre le résultat d'une mesure et la valeur de référence en fonction de l'incertitude-type. Exploiter la dispersion de séries de mesures indépendantes pour comparer plusieurs protocoles de mesure d'une grandeur physique en termes de justesse et de fidélité. Capacités numériques : Utiliser un tableur, un logiciel ou un programme informatique pour : — traiter des données expérimentales, — représenter les histogrammes associés à des séries de mesures, — évaluer l'incertitude-type finale d'une mesure.

Annexe 6

Extrait du programme de l'enseignement de spécialité physique-chimie de terminale de la voie générale

L'énergie : conversions et transferts

La validité d'un modèle est à nouveau interrogée à travers le modèle du gaz parfait qui prolonge et généralise la loi de Mariotte étudiée en classe de première.

Dans la continuité des classes précédentes, du collège comme du lycée, l'objectif central du thème *énergie : conversions et transferts* est désormais de procéder à des bilans d'énergie en s'appuyant sur le premier principe de la thermodynamique. Il s'agit, une fois le système clairement défini, d'identifier les transferts d'énergie, de prévoir leur sens et de procéder à un bilan entre un état initial et un état final de ce système dans le cadre d'une démarche à adapter en fonction des informations disponibles. Les situations étudiées permettent de réinvestir, dans un cadre théorique cohérent, les connaissances des élèves relatives au travail, à l'énergie mécanique et aux effets énergétiques des transformations physiques, chimiques et nucléaires ; une approche simplifiée du bilan thermique du système Terre-atmosphère est proposée. L'étude de l'évolution temporelle de la température d'un système au contact d'un thermostat est l'occasion de proposer une modélisation par une équation différentielle du premier ordre et d'introduire la notion de temps caractéristique. Ce thème peut prendre appui sur un ensemble varié de domaines (transport, habitat, espace, santé et vivant) et permettre de sensibiliser les élèves à la problématique des économies d'énergie par une approche rationnelle. Il peut également être l'occasion d'enrichir les notions étudiées dans le cadre de l'enseignement scientifique relatives aux aspects énergétiques du vivant, au bilan thermique du système Terre-atmosphère en lien avec l'évolution du climat, etc.

Notions abordées en classe de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique) :

Énergie cinétique, travail d'une force, énergie potentielle, théorème de l'énergie cinétique, conservation et non conservation de l'énergie mécanique, bilan de puissance dans un circuit, effet joule, rendement d'un convertisseur, énergie molaire de réaction, pouvoir calorifique massique, énergie libérée lors d'une combustion, énergie de liaison, rayonnement solaire, bilan radiatif terrestre, bilan thermique du corps humain.

1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait.	Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques.	Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	Prévoir le sens d'un transfert thermique. Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

Annexe 7

Plan de travail relatif au chapitre 15

Chapitre 15 : la thermodynamique		
Notions	Capacités exigibles	Capacité mathématique
— Modèle du gaz parfait, masse volumique, température thermodynamique, pression. — Équation d'état du gaz parfait. — Énergie interne d'un système. Aspect microscopique. [...]	— Je sais relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. — Je sais exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. [...]	— Je sais résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

Temps 1 :
travail individuel
en autonomie
Des révisions
de 1ère spé-
cialité PC

Réaliser le QCM
interactif du livre
...page 426 afin
de vous auto-
évaluer

Réviser page 428
du livre

Faire les exer-
cices 1 à 10 page
429

Temps 2 :
travail à la maison par
groupe de 4 élèves
Une activité préli-
minaire pour ini-
tier le chapitre 15

Visionner la vidéo
« Évolution de la tem-
pérature d'un système
au contact d'un ther-
mostat » disponible sur
Lumni (France Télévi-
sions) en amont de la
séance

Répondre au question-
naire (travail en groupe
– ceux formés par l'en-
seignante)

Temps 3 : synthèse – appui sur le travail réalisé durant les temps 1 et 2

Le modèle du gaz parfait (rappels)

1. Qu'appelle-t-on gaz parfait?

Un exemple de gaz parfait :

2. Équation d'état du gaz parfait

Appliquons :

Déterminer le volume d'une mole de gaz parfait sous la pression de 1013 hPa et à la température de 25°C.

Premier principe de la thermodynamique

1. Le système en thermodynamique

Voir correction de la réponse à la question 5 du questionnaire associé à la vidéo « Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat », vidéo disponible sur Lumni.

2. Énoncé du premier principe de la thermodynamique

Voir correction de la réponse à la question 13 du questionnaire associé à la vidéo « Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat », vidéo disponible sur Lumni.

Transfert thermique

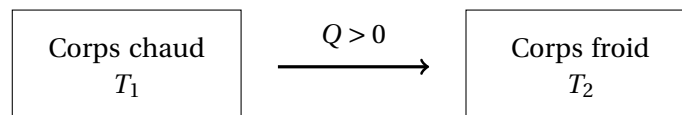
1. Les trois modes de transfert thermique

Conduction thermique?

Convection?

Rayonnement?

1. Sens spontané d'un transfert thermique



Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat

1. Flux thermique

Compléter :

2. Résistance thermique

3. Loi phénoménologique de Newton

Voir correction de la réponse à la question 14 du questionnaire associé à la vidéo « Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat », vidéo disponible sur Lumni.

4. Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat

Voir correction de la réponse à la question 16 du questionnaire associé à la vidéo « Évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat », vidéo disponible sur Lumni.

Temps 4	
Pour vérifier en autonomie les capacités exigibles du cours	Pour vous préparer au DS8
[...]-clic.fr/pct440 (schéma animé sur « l'essentiel du cours ») QCM interactif : [...]-clic.fr/pct441	— exercice résolu à chercher page 442 (bilan thermique dans une véranda) — exercice résolu à chercher pages 444 et 445 (étude d'une capsule spatiale) — exercice à chercher page 452 (survie en milieu marin : résolution de problème) et corrigé [...]-clic.fr/pct452 — exercice à chercher page 453 (briser la convection pour mieux s'isoler) — exercice à chercher page 454 (gestion des pertes en calorimétrie)