

SESSION 2022

**CAPES
CONCOURS EXTERNE ET TROISIÈME CONCOURS
ET CAFEP ET CORRESPONDANTS**

SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE

**ÉPREUVE ÉCRITE DISCIPLINAIRE
PARTIE A COMPOSITION DE PHYSIQUE
PARTIE B COMPOSITION DE CHIMIE**

Durée : 5 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Le candidat rendra deux copies séparées pour chacune des deux parties de l'épreuve

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.

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 externe du CAPES de l'enseignement public :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBE	1500F	101A	9362

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBE	1500F	101B	9363

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBF	1500F	101A	9362

Épreuve à dominante chimie

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBF	1500F	101B	9363

► **Troisième concours du CAPES de l'enseignement public :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBV	1500F	101A	9362

Épreuve à dominante chimie

EBV	1500F	101B	9363
-----	-------	------	------

► **Troisième concours CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Épreuve à dominante physique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EBW	1500F	101A	9362

Épreuve à dominante chimie

EBW	1500F	101B	9363
-----	-------	------	------

PARTIE A : COMPOSITION DE PHYSIQUE

Dans l'optique d'un voyage : des ondes pour observer, voyager et se réchauffer

Données

- I. Au-delà de l'horizon
 1. Observation d'un muret au bord du lac du Bourget
 2. Voir au-delà de l'horizon
- II. Aller sur Mars
 1. Aller très vite sur Mars
 - a. Faisceau laser
 - b. Durée mise par la sonde pour aller sur Mars
 2. Aller sur Mars par l'orbite de Hohmann
- III. Communiquer avec la sonde spatiale
- IV. Comment déterminer la puissance surfacique du rayonnement solaire sur Terre avec un thermomètre et un cylindre d'aluminium ?

ANNEXE : Programme Python utilisé pour tracer la trajectoire des rayons lumineux dans un milieu à gradient d'indice

Données :

- la limite de résolution de l'œil est l'angle minimal α_0 en-dessous duquel deux points lumineux, séparés d'un angle $\alpha < \alpha_0$, ne peuvent être distingués, $\alpha_0 = 1,5'$;
- célérité d'une onde électromagnétique dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- permittivité diélectrique du vide : $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$;
- La perméabilité magnétique du vide est notée μ_0 et on a : $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$;
- constante gravitationnelle : $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- masse du Soleil : $M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$;
- distance Soleil - Mars : $R_{SM} = 2,3 \times 10^8 \text{ km}$;

- opérateur divergence en coordonnées cartésiennes : $\text{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$;
- opérateur gradient en coordonnées cartésiennes : $\overrightarrow{\text{grad}} U = \frac{\partial U}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{u}_z$;
- relation entre opérateurs vectoriels : $\overrightarrow{\text{rot}} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \overrightarrow{\text{grad}} (\text{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A}$.

La question intitulée « **Résolution de problème** » nécessite de l'initiative.

Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.

I. Au-delà de l'horizon

1. Observation d'un muret au bord du lac du Bourget

« Tout a commencé par une question apparemment élémentaire nous arrivant par courriel : « Comment se fait-il que la surface des océans est courbe alors que celle des lacs est plate ? Ne devrait-elle pas aussi être courbée ? » La réponse nous semblait évidente et nous avons donc répondu en substance : « Les lacs ont la même courbure que les océans : celle de la Terre. Mais comme ils sont bien moins étendus que les océans, leur courbure est difficile à percevoir. »

C'était sans compter sur la réponse très argumentée, relatant des observations précises, des mesures et des calculs numériques, qui nous est revenue quelques heures plus tard. Le promeneur, posté sur la rive du lac du Bourget avec un zoom, placé à 0,51 mètre de hauteur, avait observé un muret d'un port de plaisance situé à l'autre bout du lac, à 16,7 kilomètres de distance.

Ce muret était haut de 1,6 mètre, or les calculs montraient que, compte tenu de la courbure terrestre, il n'aurait dû voir que des structures dont la hauteur dépasse 15 mètres. Le promeneur en déduisait que le lac était plat. Manifestement, il avait vu quelque chose qu'il n'aurait pas dû voir : il avait vu au-delà de l'horizon ! »

Pour La Science N° 502 / Août 2019

Dans les questions Q1 à Q4, on considère que le lac est plat : on néglige donc la courbure de la Terre.

Q1. Le promeneur essaie de voir à l'œil nu le muret situé de l'autre côté du lac.

Cela est-il possible sans lunette d'observation ? Justifier précisément votre réponse.

Le promeneur a utilisé « un zoom ». On considère qu'il s'agit d'une lunette d'observation à l'infini modélisée par deux lentilles minces convergentes de centres O_1 et O_2 (voir figure 1).

La lentille L_1 a pour distance focale $f'_1 = 700$ mm, la lentille L_2 a pour distance focale $f'_2 = 25$ mm.

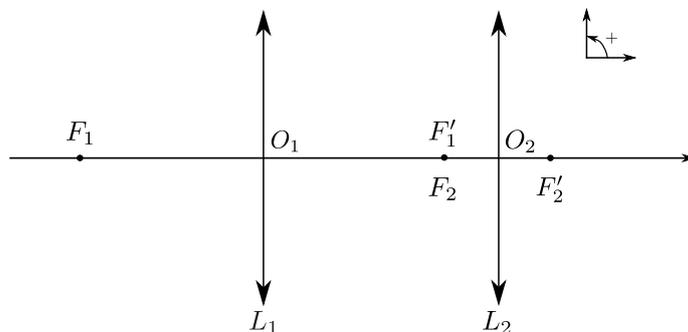


FIGURE 1 – Lunette (la figure n'est pas à l'échelle)

Q2. Expliquer pourquoi les foyers F'_1 et F_2 doivent être confondus pour une lunette destinée à l'observation d'objets situés « à l'infini », pour une observation sans accommodation par un œil normal (emmétrope). Comment appelle-t-on un tel système ?

Dans les questions Q3 et Q4, on considère que le muret est à l'infini. Il est délimité par les points objets A_∞ , B_∞ . On appelle θ l'angle orienté entre l'axe optique et la direction associée au point objet B_∞ (voir figure 2).

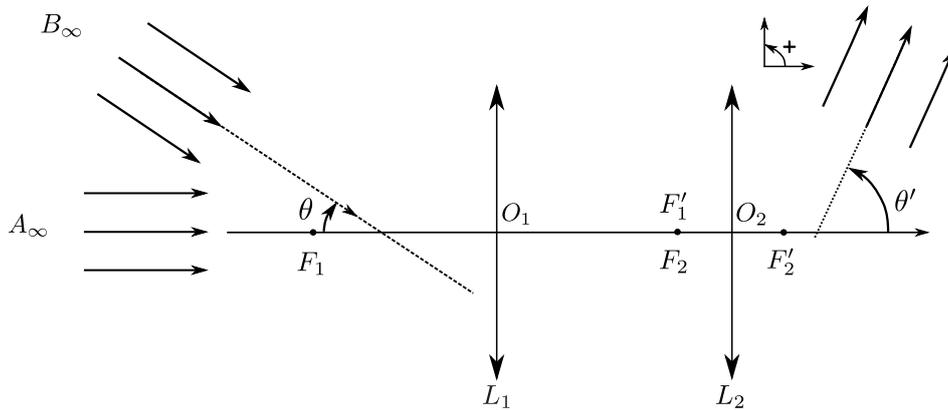


FIGURE 2

Q3. Réaliser une construction soignée avec tous les rayons nécessaires pour passer du point objet B_∞ à son image B' à travers la lunette. Justifier la construction réalisée. Identifier la lentille associée à l'oculaire et celle associée à l'objectif. Qualifier l'image formée par la lunette. Commenter.

Q4. On appelle θ' l'angle orienté entre l'axe optique et la direction associée au point image B' (voir figure 2).

Établir l'expression du grossissement de la lunette $G = \frac{\theta'}{\theta}$ en fonction de f'_1 et f'_2 .

Le muret peut-il bien être observé à travers la lunette ?

2. Voir au-delà de l'horizon

« [...] les calculs montraient que, compte tenu de la courbure terrestre, il n'aurait dû voir que des structures dont la hauteur dépasse 15 mètres. Le promeneur en déduisait que le lac était plat. Manifestement, il avait vu quelque chose qu'il n'aurait pas dû voir : il avait vu au-delà de l'horizon ! »

Q5. Dans cette question :

- l'indice de réfraction l'air est supposé uniforme ;
- la lunette de l'observateur est en L_2 (voir figure 3) ;
- le muret est maintenant repéré par les points A et B à distance finie de la lunette (voir figure 3).

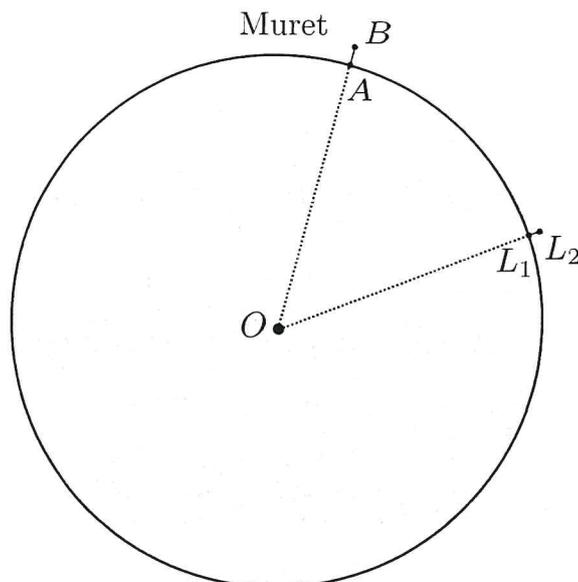


FIGURE 3 – Terre, position du muret, position de la lunette (le schéma n'est pas à l'échelle)

Du point L_2 , le promeneur n'aurait dû voir ni le bas, ni le haut du muret. Expliquer qualitativement cela à l'aide d'un schéma.

Le promeneur a pourtant bien vu le muret situé à 16,7 km.

À cause des variations de pression et de température, la densité de l'air peut dépendre de l'altitude, il en est donc de même de l'indice de réfraction de l'air.

Dans un modèle particulièrement simple, on peut considérer que l'indice de réfraction de l'air a une valeur n_0 uniforme jusqu'à une altitude e , puis que l'indice vaut n_1 .

On prendra les valeurs numériques suivantes :

- $e = 20 \text{ m}$;
- $n_0 - 1 = 29 \times 10^{-5}$;
- $n_1 - 1 = 26 \times 10^{-5}$.

Q6. Pour simplifier le problème, et se placer dans le cas le plus défavorable, on considère que le bas du muret (point A) est très bien vu de la lunette située au niveau du sol en L_1 (voir figure 3).

Expliquer qualitativement, à l'aide d'un schéma, comment cela peut être possible.

Valider cette explication par une application numérique, pour l'application numérique on pourra éventuellement effectuer une simplification du problème en négligeant la courbure de la Terre.

Q7. Dans un modèle plus élaboré, on considère qu'il existe un gradient d'indice au dessus du lac.

L'altitude est notée z , elle est comptée positivement à partir de $z = 0$ au niveau du sol.

L'indice de réfraction de l'air, $n(z)$, s'écrit donc : $n(z) = n_0 + Az$, avec $A = \frac{n_1 - n_0}{e}$.

L'équation de la trajectoire des rayons lumineux est donnée par la fonction $z(x)$ où x est l'abscisse repérant la position horizontale entre le mur et la lunette.

$z(x)$ est solution de l'équation différentielle :

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{A(n_0 + Az)}{(n_0 \sin i_0)^2}$$

i_0 est l'angle que fait le rayon avec la verticale en $z = 0$.

On résout cette équation par la méthode d'Euler. Le programme écrit en langage Python permettant de tracer la trajectoire des rayons lumineux est donné dans l'annexe, on y trouve également la trajectoire d'un rayon lumineux.

Dans ce programme `np.tan(x)` renvoie $\tan(x)$.

- Expliquer les lignes 19 et 20.
- Expliquer la signification et le rôle de l'instruction de la ligne 34.

Commenter l'allure de la courbe obtenue.

Nommer le phénomène décrit.

II. Aller sur Mars

1. Aller très vite sur Mars

Présentation :

Le NASA Institute for Advanced Concepts (NIAC) est un programme financé par la NASA. Son but est de recenser des propositions révolutionnaires en aéronautique et astronautique afin de tester des concepts utiles aux futures missions de la NASA.

En 2015, le programme NIAC a sélectionné l'étude du professeur Philip Lubin de l'Université de Californie à Santa Barbara sur la « propulsion énergétique dirigée pour explorer d'autres mondes ».

La propulsion dirigée étudiée par P. Lubin se ferait grâce à la force exercée par les photons issus d'un laser arrivant sur le réflecteur d'une sonde spatiale. Le laser « DE-STAR 4 » (Directed Energy System for Targeting of Asteroids and exPloRation) de l'étude de P. Lubin aurait une puissance moyenne de 70 GW. Il s'agirait en fait d'un réseau de plusieurs lasers constituant l'unique faisceau d'un « laser à phase asservie ». Ces lasers seraient répartis sur un carré de côté 10 km, ils seraient alimentés par un réseau de cellules photovoltaïques, approximativement de même taille que le réseau de lasers. Ces cellules photovoltaïques recevraient le rayonnement solaire.

Sources :

J. Bible, J. Bublitz, I. Johansson, G. Hughes, and P. Lubin, "Relativistic Propulsion Using Directed Energy," Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments VII, Proc. of SPIE 2013.

Rapport final du projet financé par la NASA :

<https://www.nasa.gov/feature/deep-in-directed-energy-propulsion-for-interstellar-exploration/>

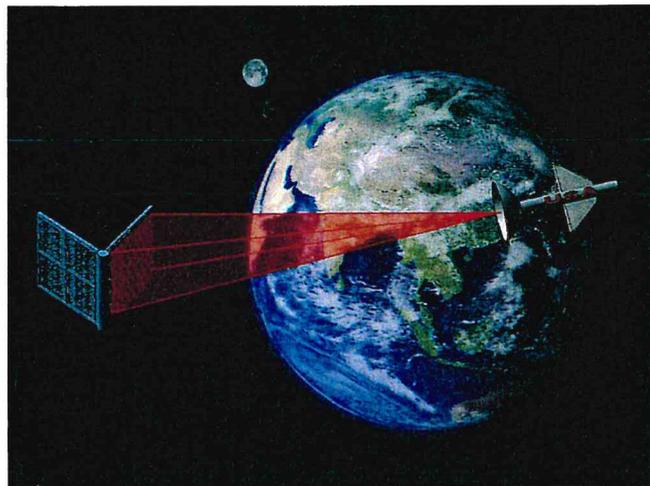


FIGURE 4 – Vue d'artiste de DE-STAR propulsant une sonde spatiale

Cette partie présente le projet de P. Lubin d'une sonde allant de la Terre à Mars par propulsion photonique.

a. Faisceau laser

On considère une zone de l'espace, assimilée à du vide, dans laquelle on modélise l'onde électromagnétique émise par le laser par une onde plane, progressive, et monochromatique.

Les champs électrique et magnétique sont notés respectivement \vec{E} et \vec{B} .

Le vecteur d'onde est noté \vec{k} .

La pulsation est notée ω .

Q8. Donner l'expression de \vec{B} en fonction de \vec{k} et \vec{E} et de ω .
De quelle équation de Maxwell cette relation se déduit-elle ?

Q9. Donner l'expression du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$.

Rappeler sa signification physique et son unité.

Le champ électrique s'écrit : $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x$.

Montrer que la moyenne temporelle de la puissance surfacique transportée par l'onde électromagnétique dans la direction \vec{u}_z est donnée par l'expression :

$$\left\| \langle \vec{\Pi} \rangle_t \right\| = \frac{\varepsilon_0 c E_0^2}{2}$$

La puissance moyenne totale du laser DE-STAR 4 est $P = 70$ GW. L'intégralité de la puissance émise par le laser est reçue par un réflecteur de diamètre $D = 30$ m situé sur la sonde spatiale.

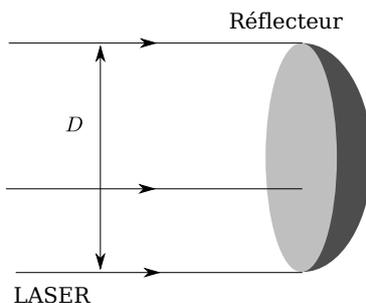


FIGURE 5 – Laser arrivant sur le réflecteur

Q10. On considère que, lorsque le faisceau laser arrive sur le réflecteur en incidence normale, le diamètre de ce faisceau est égal au diamètre D du réflecteur.

Déterminer l'amplitude E_0 du champ électrique du laser au niveau du réflecteur.

Comparer cette valeur à la valeur du champ électrique associé à l'onde lumineuse émise par les lasers utilisés dans les lycées, de puissance typique 1 mW. Pour cela, le candidat devra expliciter la ou les valeur(s) choisie(s) pour certaine(s) grandeur(s) physique(s).

Q11. L'existence des lasers est rendue possible par le phénomène d'émission stimulée. Expliquer succinctement ce que signifie « émission stimulée ».

b. Durée mise par la sonde pour aller sur Mars

Le réflecteur est assimilé à une surface plane parfaitement réfléchissante, orthogonale au vecteur unitaire \vec{u}_z (voir figure 6).

Dans le cadre d'un modèle corpusculaire, les photons associés à l'onde électromagnétique plane, progressive, monochromatique, produite par le laser, arrivent en incidence normale sur la surface du réflecteur. Les photons se réfléchissent sur cette surface et lui transfèrent ainsi de la quantité de mouvement.

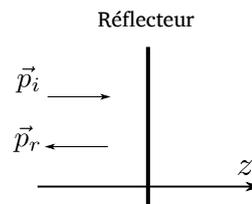


FIGURE 6 – Réflexion des photons sur le réflecteur

On admet que le vecteur d'onde associé à une onde électromagnétique plane progressive monochromatique est $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}$ où λ est la longueur d'onde, et \vec{u} le vecteur unitaire indiquant le sens de propagation de l'onde.

La quantité de mouvement d'un photon associé à une onde électromagnétique de vecteur d'onde \vec{k} est $\vec{p} = \hbar \vec{k}$, où \hbar est la constante de Planck réduite, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h étant la constante de Planck.

On note S l'aire de la surface du réflecteur illuminée par le laser.

On suppose que le réflecteur reçoit l'intégralité de la puissance P du laser en tout point de la trajectoire de la Terre à Mars.

On note n le nombre de photons par unité de volume dans le faisceau incident.

On note λ la longueur d'onde du laser.

On se place dans le cadre de la mécanique classique.

On ne prend pas en compte l'effet Doppler.

Q12. Montrer que le nombre de photons arrivant sur la surface S de réflecteur pendant une durée Δt est : $c n S \Delta t$.

Q13. Quelle est la quantité de mouvement \vec{p}_i d'un photon incident ?

Quelle est la quantité de mouvement \vec{p}_r d'un photon réfléchi ?

Montrer que la variation de la quantité de mouvement totale des photons arrivant pendant la durée Δt sur la surface S de réflecteur est :

$\Delta \vec{p} = -2 n S h \nu \Delta t \vec{u}_z$, où ν est la fréquence de l'onde.

Q14. En déduire que la force \vec{F} exercée par le laser sur la surface S de réflecteur s'écrit $\vec{F} = 2 n S h \nu \vec{u}_z$.

On rappelle que P est la puissance du laser couvrant la surface S de réflecteur. montrer que : $\vec{F} = 2 \frac{P}{c} \vec{u}_z$.

Q15. On suppose que la seule force exercée sur la sonde est celle exercée par le laser.

La distance Terre - Mars, notée L_{TM} varie dans le temps. On considère un intervalle de temps suffisamment court pour que cette distance varie peu : on prend $L_{TM} = 80 \times 10^9$ m.

La masse de la sonde que P. Lubin propose d'utiliser est de 100 kg.

Quelle serait la durée du voyage Terre - Mars si ce projet pouvait être réalisé ?

Commenter l'ensemble des hypothèses formulées, par exemple sous le prisme énergétique.

2. Aller sur Mars par l'orbite de Hohmann

« *Tianwen-1, Hope, Mars 2020, ...*

Le point commun à tous ces noms ? Il s'agit de missions spatiales à destination de Mars dont le lancement est prévu entre la mi-juillet et le début d'août 2020. Une accumulation temporelle qui n'est pas fortuite : ces missions profitent d'une fenêtre de lancement vers la Planète rouge qui ne s'ouvre que tous les 26 mois. Toutes ces sondes spatiales suivront la même trajectoire, grosso modo une demi-ellipse. Pourquoi cette fenêtre ? Et quelles trajectoires ces engins empruntent-ils ? »

Pour La Science N° 514 / Août 2020

Dans une approche simplifiée :

- les orbites terrestre et martienne sont considérées comme circulaires ;
- sauf indication contraire, on néglige l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur la sonde et l'attraction exercée par Mars sur la sonde. La sonde n'est donc soumise qu'à la force d'attraction gravitationnelle due au Soleil ;
- la sonde quitte l'orbite terrestre à l'instant t_1 et rejoint l'orbite martienne à l'instant t_2 , on note $\Delta t = t_2 - t_1$ la durée du transfert ;
- à l'instant t_1 , Mars est en M_1 (voir figure 7), la Terre est en T_1 et la sonde se trouve au voisinage de la Terre (à l'échelle considérée, elle se trouve quasiment en T_1) ; à cet instant t_1 , les propulseurs de la sonde sont allumés pendant une durée très courte devant Δt . Cela confère à la sonde un incrément de vitesse qui la place sur une orbite lui permettant de rejoindre Mars ;
- pendant le voyage de T_1 à M_2 (voir figure 7), la sonde n'utilise pas ses propulseurs. Elle se trouve sur une orbite de transfert elliptique ayant le point T_1 comme périhélie et le point M_2 comme aphélie. Cette trajectoire est appelée « orbite de Hohmann » ;
- à l'instant t_2 , la sonde arrive au voisinage de Mars (à cette échelle on considère qu'elle se trouve sur le point M_2 de l'orbite martienne), les propulseurs de la sonde sont à nouveau allumés pendant une durée très courte devant Δt . Cela confère à la sonde un incrément de vitesse qui la place sur l'orbite martienne.

Le Soleil est en S .

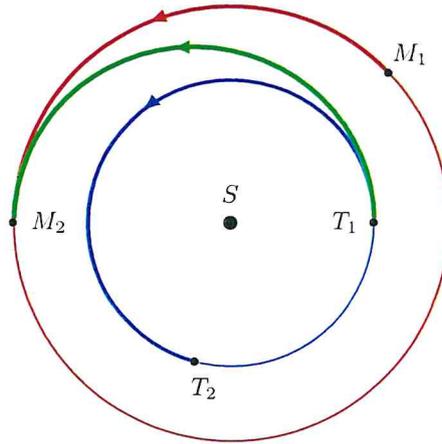


FIGURE 7 – Orbite terrestre, orbite martienne, et orbite de transfert de Hohmann

Q16. Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ?

Définir le référentiel héliocentrique, le référentiel géocentrique, et le référentiel terrestre.

Citer une manifestation du caractère non galiléen du référentiel géocentrique, et une manifestation du caractère non galiléen du référentiel terrestre.

Dans les questions suivantes, on se place dans le référentiel héliocentrique.

Q17. On considère une planète de période de révolution T autour du Soleil. Elle décrit un cercle de rayon a et de centre S .

La constante gravitationnelle est notée \mathcal{G} , la masse du Soleil est notée M_S .

Justifier que la trajectoire circulaire de la planète est nécessairement uniforme.

Démontrer la relation : $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mathcal{G}M_S}$.

Comment se nomme cette relation ?

On admet qu'elle se généralise à une trajectoire elliptique de demi-grand axe a .

Q18. La durée de l'année terrestre est considérée comme connue, elle sera notée T_T .

La distance Soleil - Terre sera notée R_{ST} , elle n'est volontairement pas fournie dans les données en début de sujet.

La distance Soleil - Mars est notée R_{SM} .

Estimer la durée du transfert de la Terre à Mars.

Une application numérique est attendue.

Q19. Résolution de problème.

Justifier la phrase : « ces missions profitent d'une fenêtre de lancement vers la Planète rouge qui ne s'ouvre que tous les 26 mois. »

L'objectif du système de propulsion spatiale de la sonde est d'accroître sa vitesse afin de la faire passer de l'orbite terrestre à l'orbite de Hohmann puis à l'orbite martienne. La masse de carburant consommé lors du passage d'une orbite à l'autre est liée à la variation (incrément) de vitesse nécessaire à ce changement d'orbite. Cela explique la nécessité de savoir déterminer les incréments de vitesse. L'orbite de Hohmann permet de minimiser les dépenses de carburant.

Q20. L'éjection de carburant par la fusée permet sa propulsion. Sur quel principe mécanique est basé ce phénomène ? Comment l'illustreriez-vous ?

Q21. Au départ, la vitesse v_{T_1} de la sonde est pratiquement égale à la vitesse de la Terre sur son orbite.

Montrer que la vitesse de la Terre sur son orbite est :

$$v_{T_1} = \left(\frac{2\pi M_S \mathcal{G}}{T_T} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Q22. On admet que l'énergie mécanique de la sonde de masse m sur l'orbite de Hohmann est $E_H = -\frac{1}{2} \frac{\mathcal{G}mM_S}{a_H}$, où a_H est le demi-grand axe de la trajectoire elliptique associée.

Déterminer v'_{T_1} , vitesse de la sonde sur l'orbite de Hohmann au point T_1 , juste après le transfert de la sonde de l'orbite terrestre à l'orbite de Hohmann.

Quel est l'incrément de vitesse permettant le passage de l'orbite terrestre à l'orbite de Hohmann ? On fera l'application numérique.

Avec ce modèle, l'incrément total de vitesse à donner pour le voyage aller est de $5,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

À quel autre moment de la trajectoire faut-il fournir un incrément de vitesse, et donc entraîner une consommation de carburant ?

Quelle interaction nécessitant une consommation de carburant supplémentaire n'a pas été prise en compte ?

III. Communiquer avec la sonde spatiale

Les communications entre la Terre et la sonde sur l'orbite de Hohmann se font avec des ondes électromagnétiques. On souhaite déterminer la gamme de longueurs d'onde pouvant être utilisée pour ces communications.

On note O , le point de la Terre où se trouve un centre spatial qui envoie des signaux vers la sonde. On considère, pour simplifier, que la sonde est sur l'axe Oz à la verticale de ce centre spatial.

L'atmosphère terrestre est assimilée au vide, sauf dans une zone située entre 80 km et 800 km d'altitude environ, appelée ionosphère (voir figure 8).

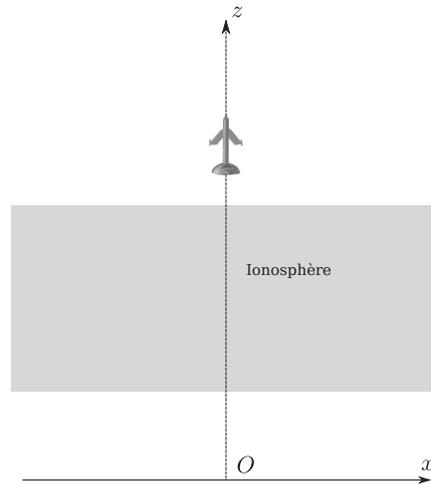


FIGURE 8 – Centre spatial sur Terre en O , ionosphère, sonde spatiale

L'ionosphère est constituée d'un gaz sous très faible pression et partiellement ionisé par le rayonnement solaire, c'est le plasma ionosphérique.

On envoie depuis le sol une onde plane progressive monochromatique vers la sonde.

On utilise la notation complexe avec $i^2 = -1$.

Dans l'ionosphère :

- le champ électrique est supposé transverse, il est noté : $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \vec{u}_x$, où k est éventuellement complexe ;
- la densité de courant volumique est : $\vec{j} = \underline{\sigma} \vec{E}$, avec $\underline{\sigma} = \frac{\epsilon_0 \omega_P^2}{i\omega}$, où ω_P est une pulsation caractéristique du plasma considéré, appelée pulsation plasma.

Q23. Écrire les équations de Maxwell en notation complexe.

Justifier que dans la situation considérée : $\text{div} \vec{E} = 0$. Commenter.

Montrer que la relation de dispersion est : $k^2 c^2 = \omega^2 - \omega_P^2$. Commenter cette relation.

La pulsation plasma dans l'ionosphère est $\omega_P = 56 \times 10^6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Q24. La figure 9 représente la courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre (opacité atmosphérique).
 Quelle partie de la courbe peut être expliquée par le modèle précédent ?
 Donner une gamme de fréquences des ondes à utiliser afin de communiquer avec la sonde.

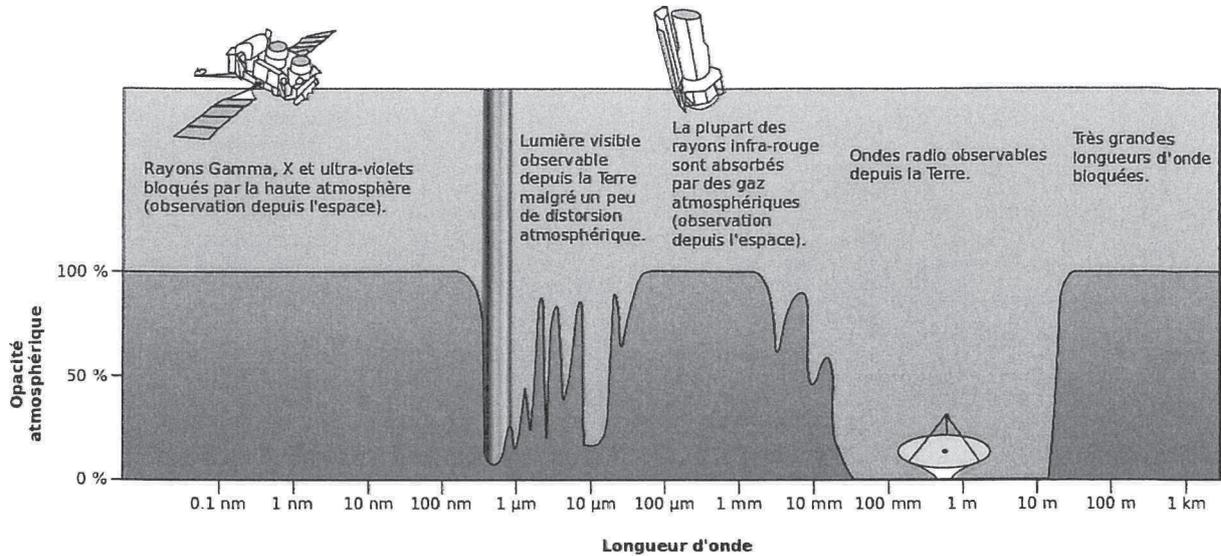


FIGURE 9 – Opacité atmosphérique en fonction de la longueur d'onde

Source : <https://eduscol.education.fr/1750/programmes-et-ressources-en-enseignement-scientifique-voie-gt>

IV. Comment déterminer la puissance surfacique du rayonnement solaire sur Terre avec un thermomètre et un cylindre d'aluminium ?

On s'intéresse à un dispositif expérimental destiné à mesurer la puissance surfacique moyenne du rayonnement solaire reçu sur Terre.

Expérience

Un cylindre plein, en aluminium, est exposé au Soleil de sorte que son axe de révolution soit dans la direction des rayons du Soleil (voir figure 10). La face du cylindre exposée au Soleil est teintée en noir mat.

Le cylindre en aluminium est inséré dans un isolant.

Un cache opaque comportant une ouverture circulaire, de même diamètre que celui du cylindre, empêche les rayons du Soleil de chauffer l'isolant.

Les mesures de la température du cylindre ont été réalisées toutes les minutes pendant une durée $\Delta t = 1 \text{ h } 43 \text{ minutes}$. La température initiale du cylindre est celle de l'air ambiant.

L'expérience s'est déroulée à Toulouse le vendredi 18 décembre 2020.

Hypothèses de la modélisation :

- la température du cylindre est supposée uniforme ;
- la température de l'air ambiant peut être considérée comme uniforme et constante : $T_{\text{air}} = 19,8 \text{ }^\circ\text{C}$;
- à tout instant, la puissance perdue par le cylindre est supposée proportionnelle à l'écart entre la température $T(t)$ du cylindre et celle de l'air, on peut modéliser cette puissance perdue par l'existence d'une résistance thermique R_{th} enveloppant le cylindre ;
- l'angle zénithal Z , entre la direction des rayons du Soleil et la verticale, est supposé constant et vaut 69° .

Schéma de l'expérience

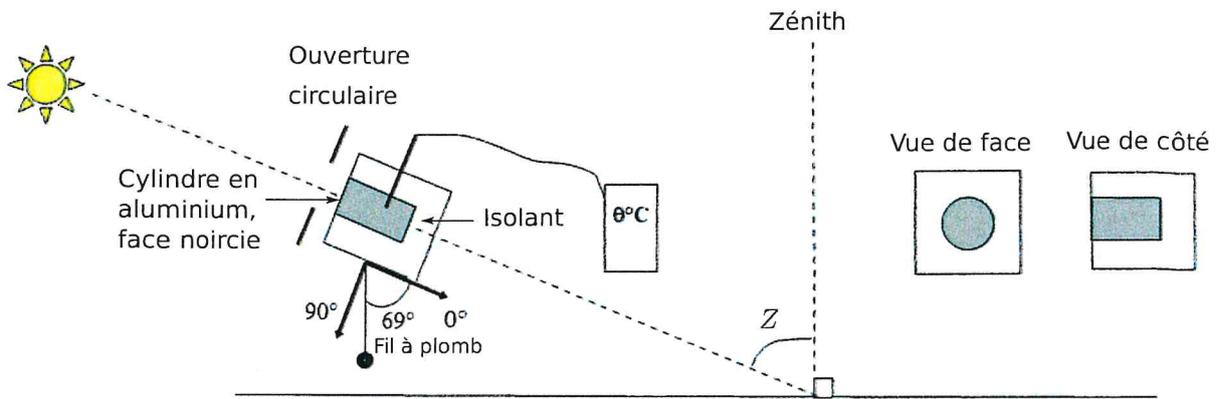


FIGURE 10 – Expérience

Résultats des mesures

La figure 11 reproduit l'évolution de la température en fonction du temps et la modélisation de la courbe obtenue.

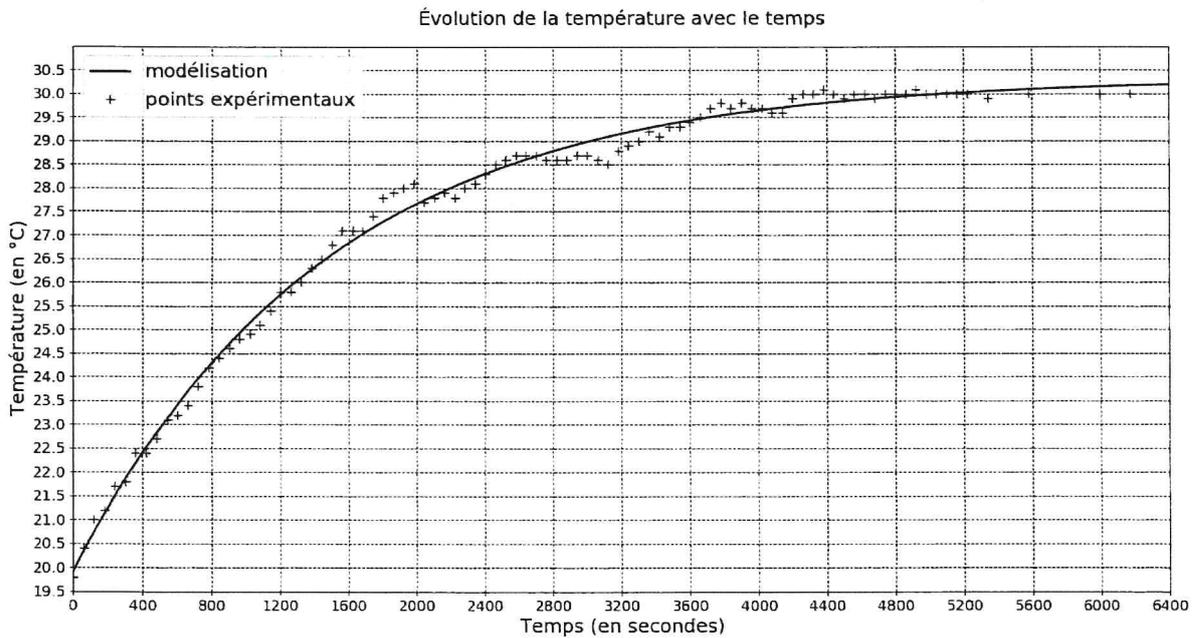


FIGURE 11

La modélisation des résultats expérimentaux utilise la fonction suivante pour la température : $T(t) = A + Be^{-Dt}$.

Les valeurs de A , B , et D sont :

$$A = 30,3 \text{ °C};$$

$$B = -10,4 \text{ °C};$$

$$D = 6,83 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}.$$

Pendant l'expérience, la puissance surfacique moyenne du rayonnement solaire reçu par la face du cylindre teintée en noir, est notée φ .

Caractéristiques du cylindre d'aluminium :

- capacité thermique massique de l'aluminium : $c = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- diamètre du cylindre : $d = 26 \text{ mm}$;
- longueur du cylindre : $L = 30 \text{ mm}$;
- masse du cylindre : $m_0 = 43 \text{ g}$.

Q25. Dans le cadre du modèle proposé, établir l'équation différentielle vérifiée par la température $T(t)$ du cylindre.

Q26. Dédire de cette équation :

- une estimation de la valeur de la résistance thermique R_{th} ;
- une estimation de φ (puissance surfacique moyenne du rayonnement solaire reçu par la face du cylindre teintée en noir).

Q27. Commenter ces deux valeurs.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Variables
5 R = 6371.e3
6 h1 = 0.51
7 l = 16.7e3
8
9 n0 = 1.+29e-5
10 n1 = 1.+26e-5
11
12 i0deg = 89.283
13 i0 = (i0deg/180)*np.pi
14
15 e = 20
16 A = (n1-n0)/e
17 C = n0*np.sin(i0)
18
19 z0 = 0
20 dzdx0 = 1/np.tan(i0)
21
22 num = 5000
23 dx = l/num
24
25 # Algorithme
26
27 def euler(F, x_ini, x_fin, z_0, dzdx_0, pas):
28     Z = np.array([z_0,dzdx_0])
29     x = x_ini
30     liste_Z = [Z]
31     liste_x = [x_ini]
32
33     while x+pas<=x_fin:
34         Z = Z+pas*F(Z)
35         liste_Z.append(Z)
36         x = x+pas
37         liste_x.append(x)
38
39     return liste_x,liste_Z
40
41
42 def fonc(Z):
43     z = Z[0]
44     dzdx = Z[1]
45     return np.array([dzdx, (A*z+n0)*A/C**2])
46
47
48 x,Z=euler(fonc, 0., l, z0, dzdx0, dx)
49
50 listezcourb = [Z[k][0] for k in range(len(x))]
51
52 # Courbes
53 plt.plot(x, listezcourb, 'black')
54 plt.show()
```

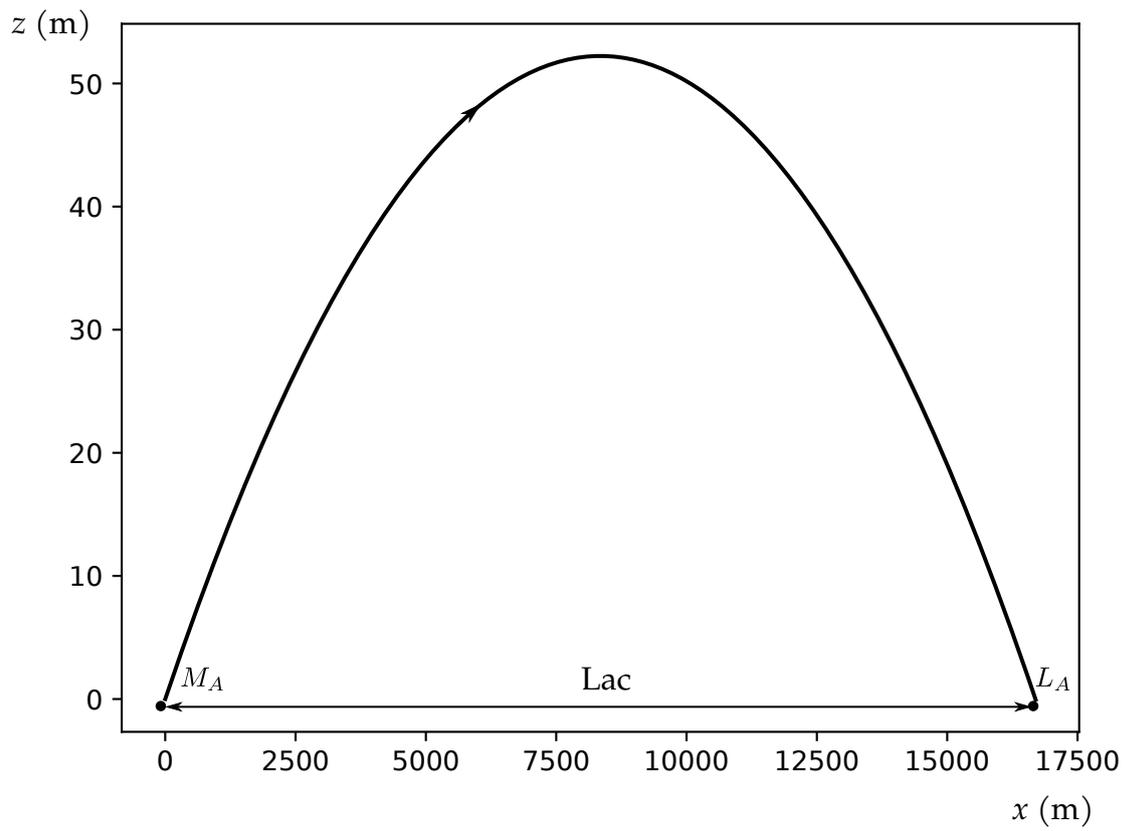


FIGURE 12 – Trajectoire des rayons lumineux - Modèle avec un gradient d'indice. Le schéma n'est pas à l'échelle.

PARTIE B : COMPOSITION DE CHIMIE**Les acides α -aminés****Données**

- I. Les acides aminés en solution aqueuse
- II. Les protéines
 - A. Synthèse peptidique : synthèse du dipeptide alanine-glycine
 - B. Protéines dans l'alimentation et apport calorique : Apport calorique du dipeptide phénylalanine - acide aspartique
- III. Production industrielle d'acides aminés – industrie pharmaceutique
 - A. Obtention de la (-)-cystéine par électrosynthèse
 - B. Propriétés antioxydantes de la cystéine

Documents annexes pour le sujet « Les acides α -aminés »

- Document 1.** Synthèse du dipeptide alanine-glycine, Ala-Gly
- Document 2.** Détermination de l'apport calorique des aliments

Les acides α -aminés

La glycine, un acide α -aminé présent dans les protéines, ingrédient essentiel à la vie sur Terre, a été détecté pour la première fois sur la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko par la sonde européenne Rosetta. Nous allons nous intéresser ici à l'étude de la glycine et des acides α -aminés en général. Nous étudierons leurs propriétés en solution aqueuse dans une première partie, les protéines et leur apport calorique dans une deuxième partie, et la production industrielle d'acides aminés dans la dernière partie.

Données

- **Structure chimique de quelques acides α -aminés**

Formule générale		$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{R} \end{array}$				
Nom de l'acide aminé	Glycine	Asparagine	Thréonine	Cystéine	Acide aspartique	Phénylalanine
Structure chimique du groupement R	H	CH ₂ -CONH ₂	CH(OH)CH ₃	CH ₂ SH	CH ₂ COOH	CH ₂ Ph

- **Numéros atomiques et masses molaires atomiques :**

Élément	H	C	N	O	S
Numéro atomique	1	6	7	8	16
Masses molaires atomiques (g.mol ⁻¹)	1,0	12,0	14,0	16,0	32,1

- **Constante des gaz parfaits :** $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- **Constante de Faraday :** $F = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
- **Grandeurs thermodynamiques (à 298 K)**

Autoprotolyse de l'eau : $pK_e = 14,0$

Propriétés acido-basiques de différents couples acide/base de Brønsted :

- Acide carboxylique (R-COOH/ R-COO⁻) : $pK_a \approx 4$
- Amine : (R - NH₃⁺/R - NH₂) : $pK_a \approx 10$
- Glycine : $pK_{a1} = 2,3$; $pK_{a2} = 9,6$
- Asparagine : $pK_{a1} = 2,2$; $pK_{a2} = 8,7$
- Thréonine : $pK_{a1} = 2,6$; $pK_{a2} = 10,4$
- Cystéine : $pK_{a1} = 1,7$; $pK_{a2} = 8,3$; $pK_{a3} = 10,8$

Enthalpies standard de formation à 298 K :

	Urée(s)	O ₂ (g)	CO ₂ (g)	H ₂ O(l)
$\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol ⁻¹)	- 333,1		- 393,5	- 285,8

Capacité thermique de l'eau liquide : $c_{eau} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Potentils standard à pH = 0 et à 298 K :

Couples	H ⁺ (aq) / H ₂ (g)	O ₂ (g) / H ₂ O(g)	RSSR(aq) / RSH(aq)
E° (V) / ESH	0,00	1,23	0,08

Conductivités limites molaires : la glycine est notée GH

ion	Na ⁺	HO ⁻	GH ₂ ⁺	G ⁻
λ_i° (mS.m ² .mol ⁻¹)	5,01	19,8	3,43	1,50

- **Incertitudes**

- Incertitude type sur les volumes V

$u(V)$	Burette graduée	Pipette de 25 mL		Fiole jaugée de 50 mL
		jaugée	graduée	
	0,1 mL	0,05 mL	0,2 mL	0,1 mL

Il est rappelé que l'incertitude type $u(A)$ de la grandeur $A = \frac{x \cdot y}{z}$ est déterminée par la relation

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(X)}{X}\right)^2 + \left(\frac{u(Y)}{Y}\right)^2 + \left(\frac{u(Z)}{Z}\right)^2}$$

I. Les acides aminés en solution aqueuse

Les acides α -aminés, de formule générale $R - CH(NH_2) - COOH$, sont les constituants des protéines, macromolécules naturelles aux fonctions biologiques multiples. Le plus simple d'entre eux est la glycine $H_2N - CH_2 - COOH$. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à ses propriétés. C'est un solide incolore, soluble dans l'eau.

- Q1.** Nommer les fonctions chimiques présentes dans les acides aminés. Donner le nom de la glycine en nomenclature IUPAC.
- Q2.** Donner la configuration électronique des atomes constituant la glycine. En déduire le schéma de Lewis de celle-ci.
- Q3.** La glycine présente des propriétés acido-basiques auxquelles on peut associer deux grandeurs notées pK_{a1} et pK_{a2} .
- Donner la définition de la grandeur K_a et de la grandeur pK_a associée pour un couple acide/base de Brønsted.
 - En analysant les valeurs pK_{a1} et pK_{a2} de la glycine, montrer que la forme moléculaire $H_2N - CH_2 - COOH$ est ultra-minoritaire dans l'eau devant la forme zwitterionique.
 - Établir un diagramme de prédominance de la glycine en précisant les représentations moléculaires des espèces majoritaires dans chaque domaine.

On s'intéresse à présent à l'électrophorèse, technique chromatographique mettant en jeu la migration de particules chargées sous l'action d'un champ électrique. Elle permet de séparer et d'analyser un mélange de plusieurs acides aminés.

L'échantillon à analyser (contenant le mélange d'acides aminés) est déposé au centre d'un support solide conducteur soumis à un champ électrique entre ses deux extrémités (**Figure 1**).

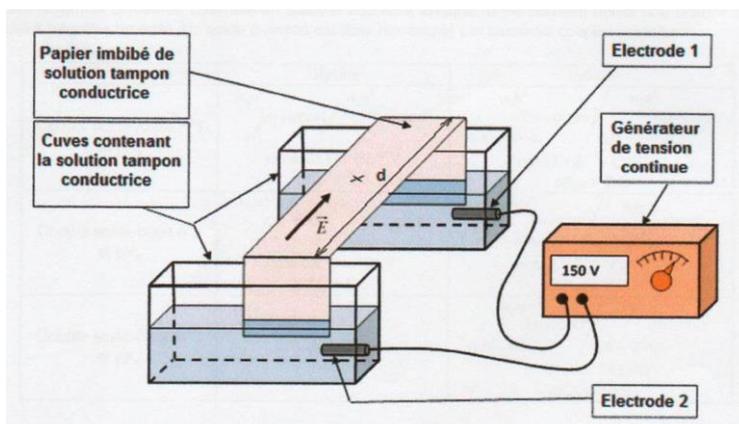


Figure 1 : Dispositif d'électrophorèse (Source : Bac S Nouvelle Calédonie 2016)

On appelle pH isoélectrique d'une espèce chimique, noté pI , le pH pour lequel cette espèce ne migre pas dans un champ électrique. On peut prévoir la valeur du pI en calculant le pH pour lequel la charge nette de l'espèce étudiée est nulle, à partir des valeurs pK_a associées aux propriétés acido-basiques des différents groupements ionisables de la molécule.

- Q4.** Démontrer que le pH isoélectrique de la glycine est égal à $pI = (pK_{a1} + pK_{a2})/2$.

Un mélange de trois acides aminés : glycine, asparagine et thréonine est déposé sur la ligne centrale. Le résultat de la **figure 2** est obtenu après l'établissement du champ électrique.

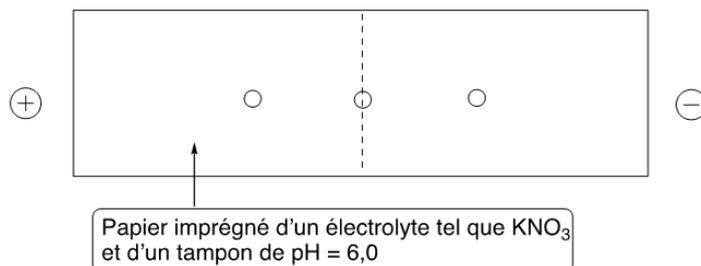


Figure 2 : Résultat de la séparation par électrophorèse d'un mélange de glycine, asparagine et thréonine

Q5. Détailler la démarche permettant d'identifier les trois acides aminés sur le résultat de l'électrophorèse, puis positionner qualitativement les trois acides aminés à la fin de l'expérience.

La glycine est un additif alimentaire, noté E640. Elle est également vendue comme complément alimentaire. On souhaite vérifier que ce complément est bien de la glycine pure comme indiqué sur l'étiquette. On prépare une solution (S) en dissolvant une masse $m = 0,10$ g de complément dans 25,0 mL d'eau. Cette solution (S) est complétée à $V_0 = 50$ mL par de l'eau distillée puis dosée par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $c_T = 0,100 \pm 0,001$ mol · L⁻¹. Le dosage est suivi par pH-métrie et conductimétrie. Les résultats obtenus sont reportés sur la **figure 3**.

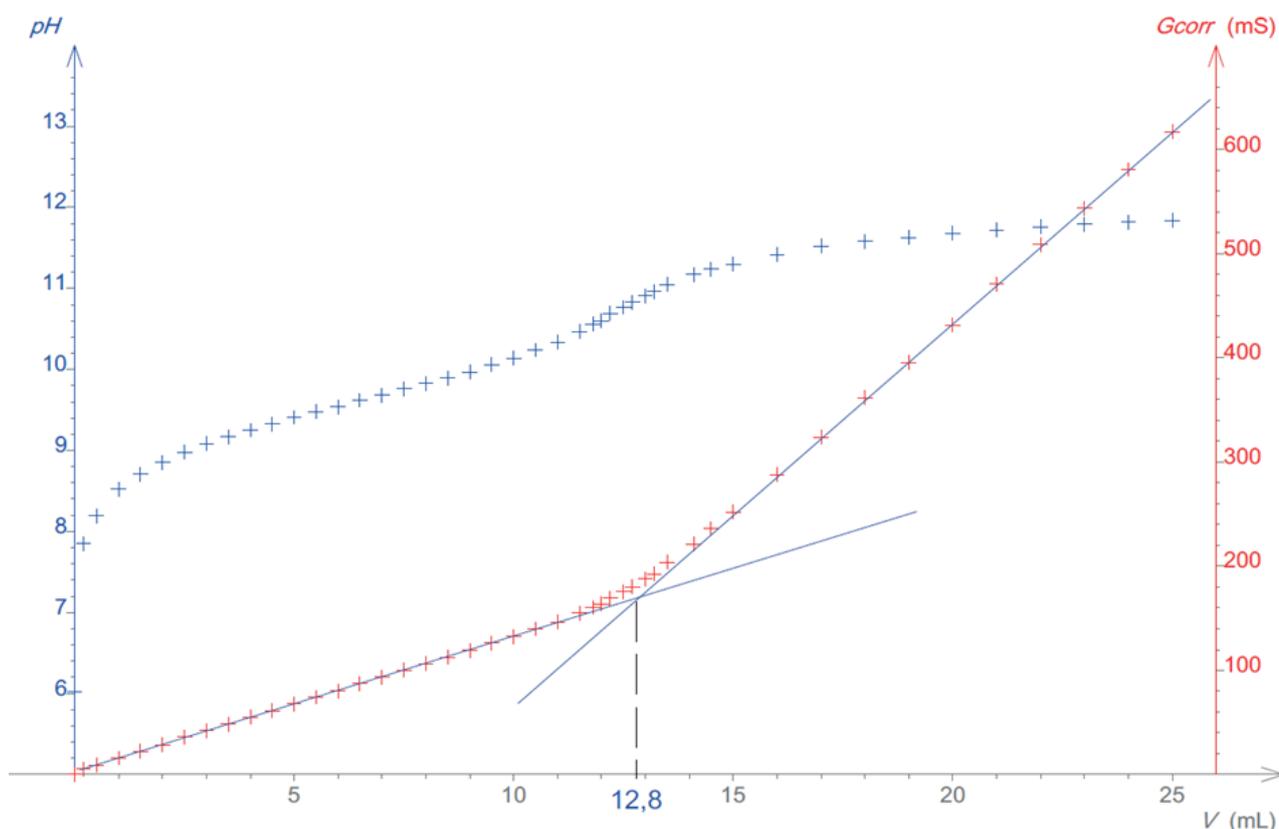


Figure 3 : Résultats de suivi pH-métrique et conductimétrique obtenus lors du dosage de la solution (S)

La conductance corrigée, G_{corr} , est définie à partir de la conductance G par la relation $G_{corr} = G \times \frac{V_0 + V}{V_0}$. Dans cette relation, V désigne le volume de titrant ajouté.

Q6. Rappeler la (les) grandeur(s) physique(s) mesurée(s) lors d'une mesure conductimétrique. Préciser le lien entre cette (ces) grandeur(s) et la conductivité.

Q7. Exploitation les résultats obtenus

- Ecrire l'équation de la réaction modélisant la transformation qui a lieu lors du dosage.
- Exploiter les résultats expérimentaux de la **figure 3** de manière à déterminer la masse de la glycine dans la solution (S).
- Calculer l'incertitude type $u(m)$ sur la masse.
- Le complément alimentaire est-il de la glycine pure ? Justifier.

Q8. Montrer, en justifiant la réponse, que l'exploitation d'une des courbes de la **figure 3** permet d'accéder à une grandeur thermodynamique caractéristique des couples acido-basiques.

II. Les protéines

A- Synthèse peptidique : synthèse du dipeptide alanine-glycine

Les protéines sont des chaînes d'acides aminés qui peuvent entrer dans la composition des muscles, de la peau, des ongles, des poils, du sang, etc. La synthèse peptidique est le processus consistant à faire réagir différents acides aminés afin de former des polypeptides ou des protéines. Dans la mesure où l'ordre

d'enchaînement de ces acides aminés est d'une importance cruciale, la synthèse peptidique nécessite la mise en œuvre d'une stratégie spécifique que l'on se propose d'illustrer ici sur l'exemple de la synthèse d'un dipeptide alanine-glycine dont la formule est donnée dans la **figure 4**. Le schéma de la synthèse est donné dans le **document 1 en annexe**.

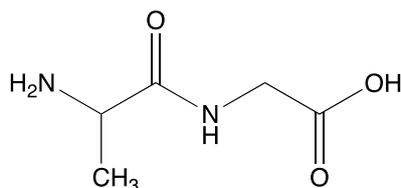


Figure 4 : Formule topologique du dipeptide alanine-glycine

- Q9.** Représenter les différents stéréoisomères de configuration de l'alanine. Préciser, en justifiant le classement, les configurations absolues du(des) atome(s) de carbone asymétrique(s) et indiquer la(les) relation(s) d'isomérisation qui les lient.
- Q10.** Identifier la fonction chimique créée lors de la formation du dipeptide.
- Q11.** Expliciter la (les) raison(s) pour laquelle ou lesquelles on ne fait pas directement réagir l'alanine avec la glycine.
- Q12.** Analyser le **document 1** en explicitant le rôle de chacune des étapes en termes de stratégie de synthèse.
- Q13.** Donner le mécanisme de l'étape 2 en assimilant le réactif **A** à un chlorure d'acide.
- Q14.** Identifier le produit **B** de l'étape 3.

B- Protéines dans l'alimentation et apport calorique : Apport calorique du dipeptide phénylalanine - acide aspartique

Les protéines alimentaires sont des macro-nutriments indispensables car non seulement elles constituent une source d'acides aminés naturels essentiels (au nombre de 8) qui ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme, mais elles fournissent également de l'énergie au même titre que les lipides et les glucides.

On se propose ici de déterminer l'apport calorique moyen, par gramme de protéine, en prenant comme modèle le dipeptide phénylalanine - acide aspartique. Le **document 2 en annexe** présente la méthode employée en thermochimie alimentaire.

- Q15.** Exploitation du **document 2**
- Écrire l'équation de la réaction qui modélise la combustion du dipeptide dans la bombe calorimétrique, sachant qu'à l'issue de la combustion, l'élément azote se retrouve sous forme de diazote gazeux et l'eau produite est à l'état liquide.
 - À l'aide des données thermodynamiques et des résultats expérimentaux présentés dans le **document 2**, évaluer le pouvoir calorifique PC du dipeptide exprimé en $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$.
 - Déduire de la question précédente l'enthalpie standard de combustion du dipeptide.

Les valeurs des apports caloriques des aliments protéinés indiqués sur les emballages diffèrent de celles que l'on peut déterminer par calorimétrie. La raison en est que, lors de la combustion, l'azote contenu dans les protéines conduit à la formation de diazote alors que lors de leur métabolisme, l'azote des aliments est converti en urée $(\text{NH}_2)_2\text{C} = \text{O}$.

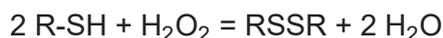
- Q16.** Modélisation de la métabolisation du dipeptide par l'organisme
- Écrire l'équation de la réaction qui modélise le métabolisme du dipeptide dans l'organisme.
 - À l'aide des données thermodynamiques, déterminer la valeur du pouvoir calorifique PC du dipeptide exprimé en $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$.
- Q17.** Commenter l'étiquette d'un complément alimentaire riche en protéines reproduite dans la **figure 5**.

B- Propriétés antioxydantes de la cystéine

En raison de leur capacité à piéger les espèces réactives de l'oxygène, les composés contenant des fonctions thiol peuvent être très efficaces comme antioxydants et ainsi permettre la stabilisation des produits pharmaceutiques. Cependant, cette propension à l'oxydation rend plus difficile la formulation de protéines et de peptides contenant des résidus cystéine libres. C'est la raison pour laquelle de nombreuses études s'intéressent à la cinétique d'oxydation de la cystéine en cystine par des dérivés de l'oxygène.

On étudie ici la réaction d'oxydation de la cystéine avec le peroxyde d'hydrogène, H_2O_2 , en milieu tamponné aqueux sur une large gamme de pH (allant de 4 à 13) et pour des rapports variables de concentrations initiales en réactif. La réaction est suivie par chromatographie liquide haute performance (CLHP) en phase inverse, technique qui permet de déterminer simultanément les concentrations en eau oxygénée, cystéine et produit.¹

L'équation de la réaction modélisant l'oxydation de la cystéine par le peroxyde d'hydrogène est la suivante :



Pour expliquer cette transformation à l'échelle microscopique le mécanisme présenté dans la **figure 8** est postulé. Dans ce mécanisme, les hypothèses suivantes, *i)* et *ii)*, sont considérées : *i)* les actes [1] et [-1] sont en pré-équilibre rapide ; *ii)* l'acte [3] est beaucoup plus facile que l'acte [2]. Les intermédiaires réactionnels sont $R-SOH$ et $R-S^-$. Le but de l'étude est de vérifier si le mécanisme modèle proposé est compatible avec les données expérimentales.

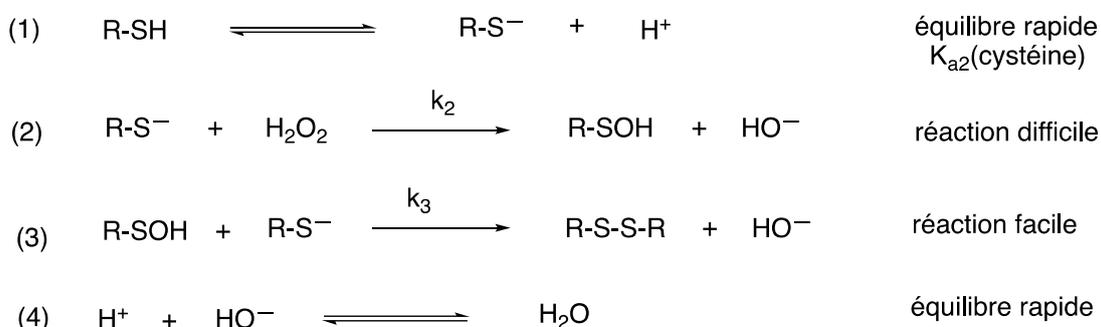


Figure 8. Mécanisme proposé pour la réaction d'oxydation de la cystéine par le peroxyde d'hydrogène

Q20. Expliquer l'Approximation des États Quasi Stationnaires (AEQS), puis indiquer en justifiant la réponse s'il est possible d'appliquer cette approximation à chacun des intermédiaires réactionnels.

Q21. Montrer en utilisant le mécanisme réactionnel de la **figure 8**, que dans le cas d'un milieu réactionnel tamponné, la loi de vitesse de la réaction s'écrit $v = k[RSH][H_2O_2]$, k étant une constante dont l'expression sera donnée.

L'étude expérimentale décrite ci-dessous est proposée, en regard de la modélisation proposée ci-dessus.

Expérience n°1 :

$[RSH]_0 = 40,0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; $[H_2O_2]_0 = 400 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH fixé par une solution tampon : $pH = 6,0$; $T = 25^\circ\text{C}$.

t (s)	0	5	10	15	20	40	60
$[RSH]$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	40,0	24,7	15,2	9,4	5,8	0,84	0,12

Expérience n°2 :

$[RSH]_0 = 40,0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; $[H_2O_2]_0 = 20,0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH fixé par une solution tampon : $pH = 6,0$; $T = 25^\circ\text{C}$.

t (s)	0	10	50	100	500	1000	2000
$[RSH]$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	40,0	38,1	32,2	27,0	11,7	6,9	3,7

Q22. Montrer que les expériences n°1 et n°2 mises en œuvre permettent de valider le mécanisme postulé. Déterminer, à partir de ces résultats expérimentaux, la valeur de k .

¹ Kinetics and Mechanism of the Reaction of Cysteine and Hydrogen Peroxide in Aqueous Solution. D. Luo et al. J. Pharm.Sciences, 2004, vol 92, n°2, p 304-316

