

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SESSION 2017

PHYSIQUE-CHIMIE

Série S

Épreuve du mardi 30 mai

Durée de l'épreuve : 3 heures 30
Coefficient : 8

L'usage de la calculatrice est autorisé

Ce sujet ne nécessite pas de feuille de papier millimétré

Le sujet comporte trois exercices présentés sur 12 pages numérotées de 1/12 à 12/12, y compris celle-ci.

Le candidat doit traiter les trois exercices qui sont indépendants les uns des autres.

EXERCICE I - DIFFRACTION PAR UNE POUDRE DE CACAO (5 points)

On attribue la découverte de la diffraction à Francesco Grimaldi (1618-1663). Le but de l'exercice est d'étudier une application pratique de la diffraction : la détermination de la taille moyenne de poudre de cacao par granulométrie.

Les deux parties de l'exercice sont indépendantes.

Document 1 : Granulométrie laser de la poudre de cacao



L'appareil ci-contre permet de mesurer la taille de particules allant de 40 nm à 2500 μm tout en occupant un encombrement extrêmement réduit.

Le fabricant de l'appareil indique que deux diodes laser de longueurs d'onde 635 nm et 830 nm sont utilisées dans cet instrument de mesure.

Document 2 : Différents types de chocolat

Le succès du chocolat, auprès des consommateurs, est lié à des caractéristiques gustatives bien identifiées mais aussi à la granulométrie de chacun des constituants.

Cette dernière propriété représente un enjeu important du procédé de fabrication puisque des particules trop finement broyées rendront le chocolat collant alors que de trop grosses particules lui donneront un aspect granuleux à l'œil et en bouche.

La mesure de la taille des particules, par diffraction laser, est une technique simple et rapide, adaptée à la détermination de la distribution granulométrique de tous les types de chocolat comme les chocolats de couverture utilisés pour le nappage, les chocolats au lait ou les chocolats agglomérés utilisés pour les recettes instantanées.

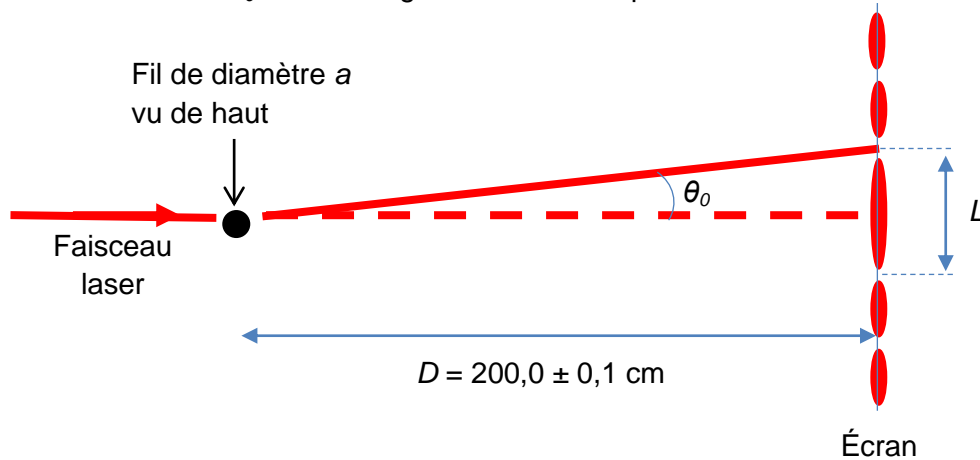
Type de chocolat	De couverture	Au lait	Aggloméré
$a^{(*)}$ en μm	10	30	300

(*) a représente le diamètre moyen recommandé de la poudre de cacao pour un type de chocolat.

D'après <http://www.es-france.com/pdf/010-Cacao.pdf>

Partie 1 : Vérification de la longueur d'onde d'une des diodes laser utilisées

L'objectif de cette partie est de vérifier la valeur de la longueur d'onde λ d'une des diodes laser utilisées dans l'appareil de granulométrie. Sur le trajet du faisceau laser, on intercale des fils de différents diamètres. Sur un écran placé à une distance D , on observe une figure de diffraction. L représente la largeur de la tache centrale et θ_0 le demi-angle au sommet exprimé en radian.



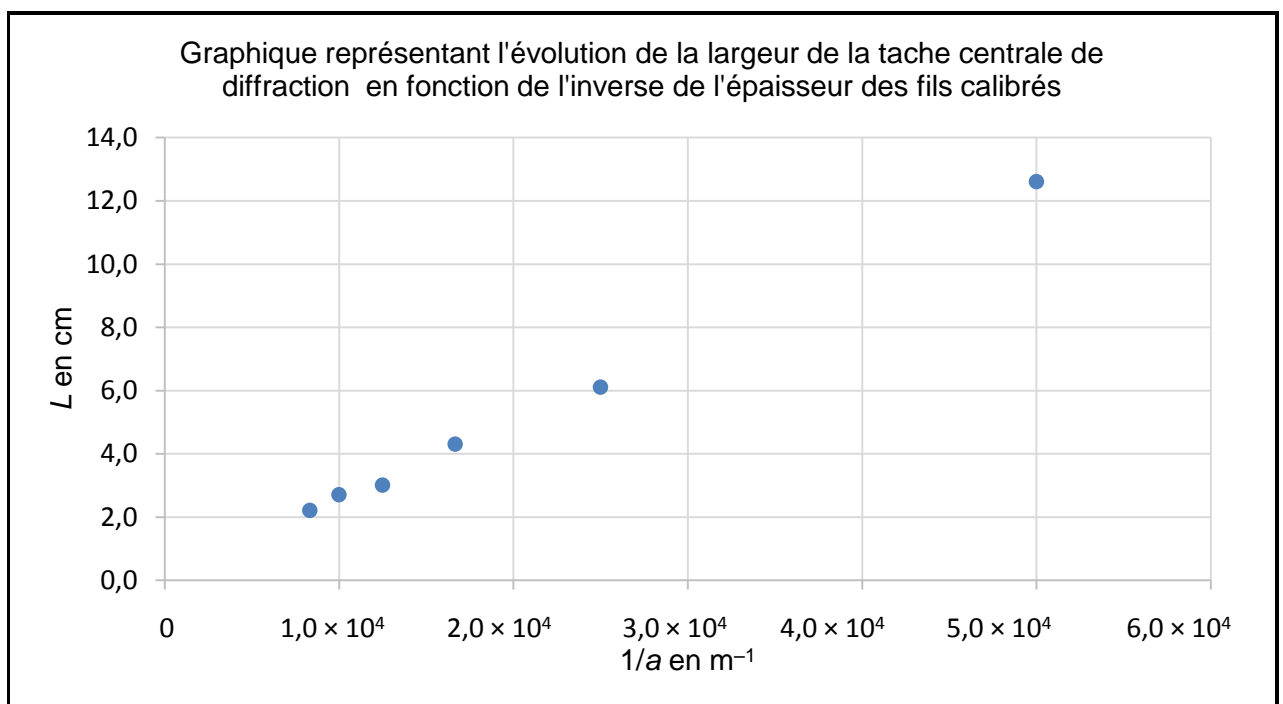
- 1.1. Rappeler les trois principales propriétés du faisceau d'un laser.
- 1.2. Pour une longueur d'onde donnée, décrire l'évolution du demi-angle θ_0 en fonction du diamètre a du fil. Donner la relation qui lie λ , θ_0 et a .
- 1.3. On fait l'hypothèse que l'angle θ_0 est petit. Dans ce cas, on peut écrire $\tan \theta_0 \approx \theta_0$ avec θ_0 en radian.

À l'aide du schéma, démontrer que la largeur de la tache centrale est donnée par l'expression:

$$L = k \cdot \frac{1}{a} \text{ avec } k = 2\lambda \cdot D$$

- 1.4. Expérimentalement, on mesure la largeur de la tache centrale L pour des fils calibrés de différentes valeurs de diamètre a . On porte les valeurs obtenues sur le graphique ci-dessous.

À partir du graphique, déterminer la longueur d'onde λ de la diode laser utilisée.



1.5. L'incertitude absolue sur la longueur d'onde λ , notée $\Delta\lambda$, peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2}$$

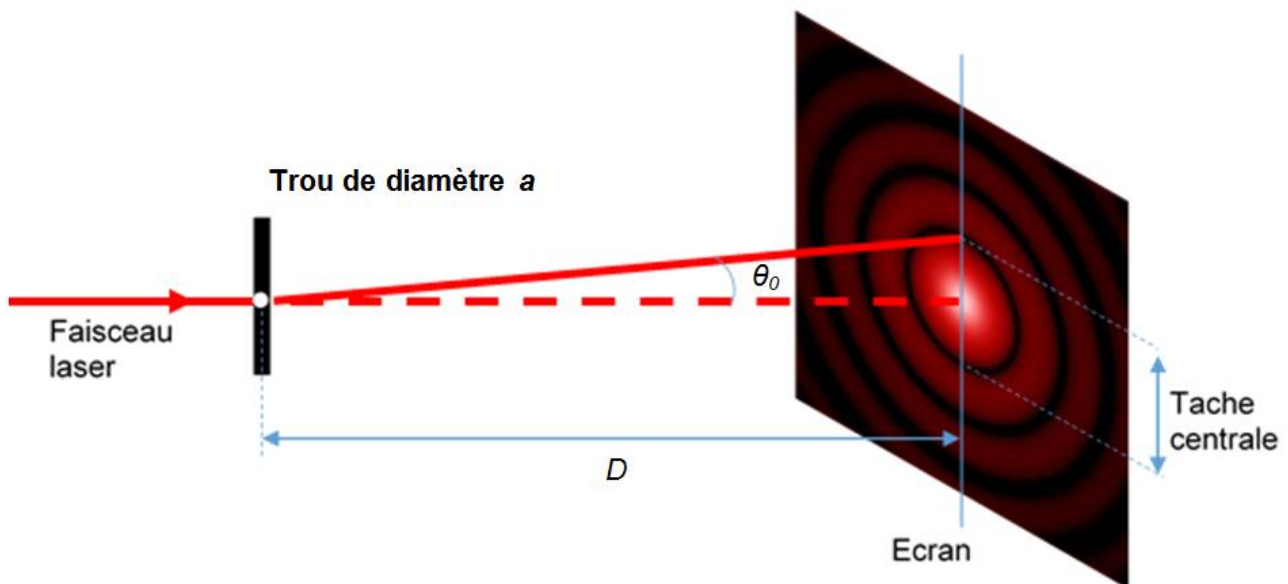
L'incertitude absolue sur la valeur du coefficient directeur est $\Delta k = 1,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$.

Exprimer la valeur de la longueur d'onde λ avec son incertitude. Confronter aux valeurs données par le fabricant de l'appareil ; conclure.

Partie 2 : Étude de la diffraction par la poudre de cacao

Dans cette partie, on considère que l'on peut déterminer le diamètre moyen des grains de cacao d'une poudre donnée en utilisant une figure de diffraction réalisée avec la diode laser de longueur d'onde $\lambda = 635 \text{ nm}$.

Donnée : Expérience de diffraction par un trou circulaire :



La figure de diffraction obtenue par un trou circulaire est constituée de cercles concentriques alternativement brillants et sombres avec :

$$\sin \theta_0 = \frac{1,22 \cdot \lambda}{a}$$

λ : longueur d'onde du faisceau laser, exprimée en mètre

a : diamètre du trou, exprimé en mètre

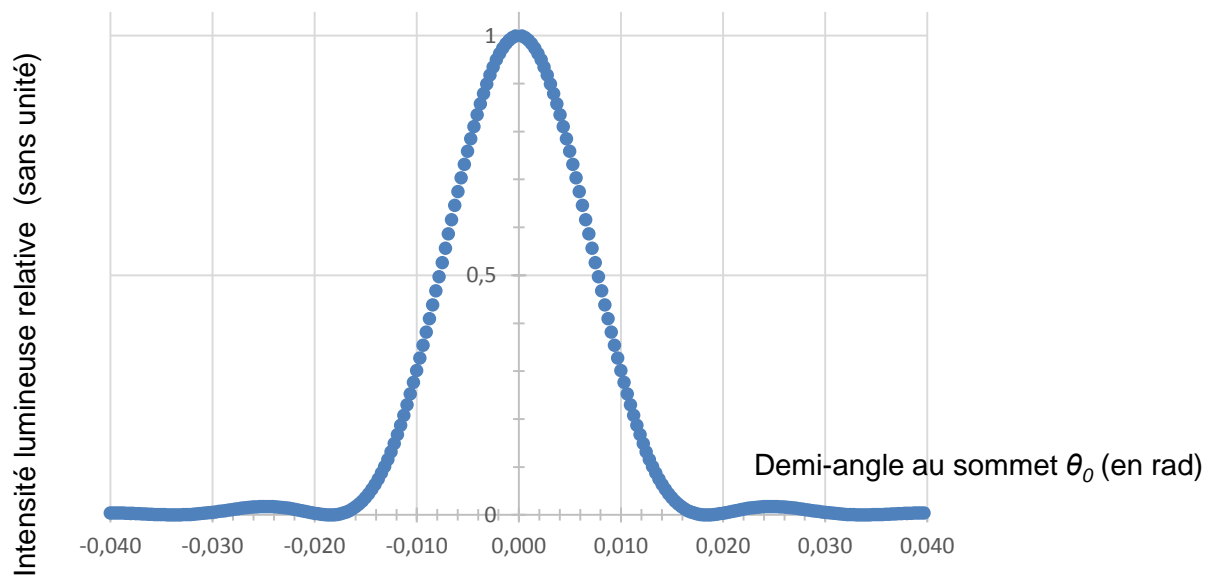
θ_0 : demi-angle au sommet, exprimé en radian

2.1. En utilisant un montage proche de celui donné ci-dessus, on réalise l'expérience sur un échantillon de poudre de cacao.

Sachant que les grains de cacao sont assimilés à des sphères, justifier le fait qu'on observe une figure de diffraction identique à celle obtenue avec un trou circulaire.

2.2. Après traitement informatique des résultats expérimentaux lors du contrôle d'un échantillon de poudre de cacao, on obtient le graphe ci-dessous donnant l'intensité lumineuse relative sur l'écran en fonction du demi-angle θ_0 . Peut-on utiliser cet échantillon pour un chocolat de couverture ?

Intensité lumineuse relative en fonction du demi-angle au sommet



EXERCICE II - LES SCIENCES AU SERVICE DE LA PERFORMANCE SPORTIVE (10 points)

Les sciences permettent d'analyser et de comprendre les performances des athlètes. Les scientifiques s'intéressent à la physique, à la biomécanique, à la physiologie et aux transformations chimiques intervenant lors des pratiques sportives.

Dans cet exercice, on s'intéresse à la pratique d'un sport d'endurance : le cyclisme.

L'exercice est constitué de deux parties indépendantes :

- partie 1 : Calcul des puissances développées par les cyclistes ;
- partie 2 : Étude de la physiologie de l'effort et régulation du pH sanguin.

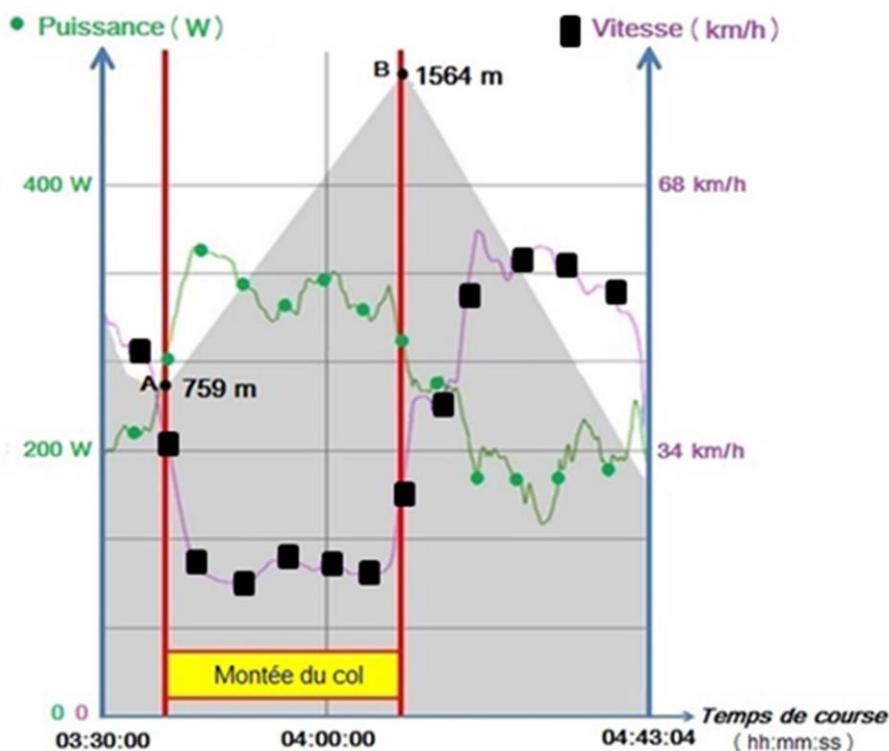
Partie 1 : Calcul des puissances développées par les cyclistes

Afin d'améliorer les performances des cyclistes, on utilise une méthode de calcul indirect des puissances qu'ils fournissent lors d'un effort. Cette méthode s'appuie sur un modèle qu'il faut valider en le comparant avec les données mesurées en temps réel pendant l'effort grâce à un capteur (boîtier SRM) placé sur le pédalier.

Dans cette partie, on s'intéresse à l'ascension par un cycliste du col pyrénéen de la Hourquette d'Ancizan. Il effectue cette montée, longue de 10,4 km, en 31 min et 51 s. Les données récupérées en direct par le boîtier SRM du cycliste sont représentées dans le document ci-dessous :



Document 1 : Extrait du fichier SRM du cycliste



D'après <http://www.srm.de/news/road-cycling/le-tour-de-france-stage-9/>

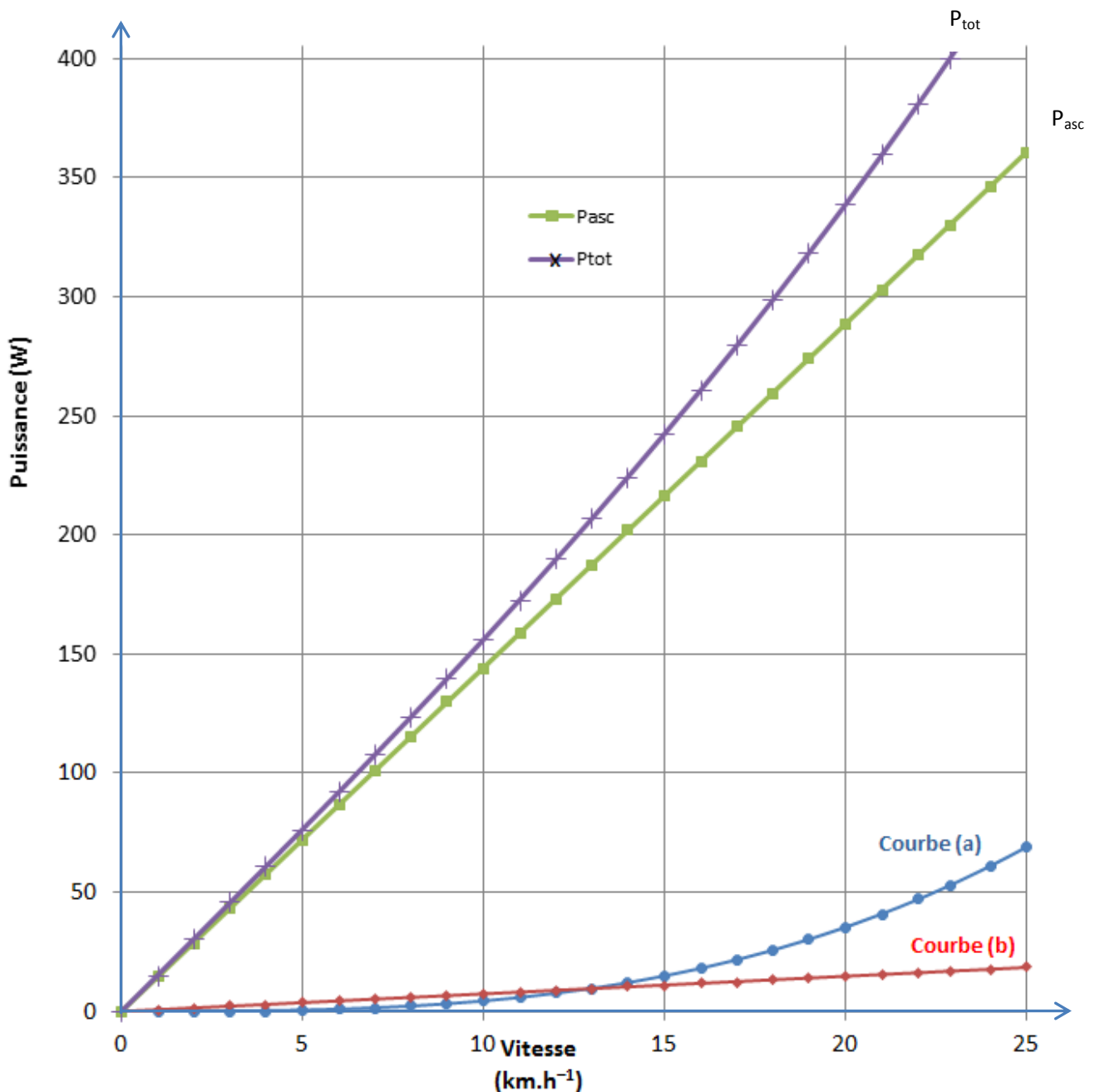
Dans le modèle théorique, on considère que la puissance totale P_{tot} développée par le cycliste, lors de la montée, va permettre de :

- vaincre les forces de pesanteur pour permettre l'ascension (P_{asc}) ;
- lutter contre les frottements mécaniques des roues sur le bitume ($P_{roulement}$) ;
- contrer les frottements de l'air (P_{air}).

Dans ce modèle, les puissances P_{asc} et $P_{roulement}$ sont proportionnelles à la vitesse du cycliste alors que P_{air} est proportionnelle au cube de cette vitesse.

Le modèle théorique utilisé permet de construire le graphique suivant qui donne les valeurs des différentes puissances en fonction de la valeur de la vitesse lors de l'ascension du col.

Graphique 1 : Modélisation des différentes puissances développées par le cycliste en fonction de sa vitesse dans les conditions de la montée du col (les courbes (a) et (b) seront identifiées dans le cadre de l'exercice)



Données :

- Intensité de la pesanteur $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.
- Pour une puissance constante sur la durée considérée, la variation d'énergie ΔE s'exprime par : $\Delta E = P \cdot \Delta t$, avec ΔE en joule, Δt en seconde et P en watt.

On étudie le système S {cycliste, équipement, vélo} de masse $m = 67,8 \text{ kg}$. On suppose que l'ascension se fait à vitesse v constante et à puissance P_{tot} constante.

1. Questions préliminaires

- 1.1. Dans quel référentiel sont effectuées les mesures ?
- 1.2. Montrer, sans utiliser le document 1, que la vitesse moyenne du cycliste, lors de l'ascension, vaut $v = 19,6 \text{ km.h}^{-1}$.
- 1.3. Définir l'énergie mécanique E_m d'un système. Que peut-on dire alors de l'évolution de cette énergie lors de l'ascension ?

2. Étude de l'ascension du col par le cycliste et validation du modèle de calcul de puissances

On cherche à valider le modèle proposé en utilisant les données du capteur SRM lors de l'ascension du col par le cycliste.

- 2.1. Donner l'expression littérale de la variation d'énergie potentielle de pesanteur ΔE_{pp} du système entre le pied et le sommet du col de la Hourquette d'Ancizan, en fonction de m , g et de Z_A et Z_B , (respectivement altitudes du pied et du sommet du col). Montrer que $\Delta E_{pp} = 5,3 \times 10^5 \text{ J}$.
- 2.2. À partir du résultat de la question 2.1, calculer la valeur de P_{asc} et vérifier sur le graphique 1 qu'elle correspond bien à celle du modèle proposé.
- 2.3. Parmi les courbes (a) et (b) du graphique 1, identifier, en explicitant votre raisonnement, celle qui représente $P_{roulement}$ et celle qui représente P_{air} .
En déduire les valeurs de $P_{roulement}$ et P_{air} , lors de l'ascension du col par le cycliste.
- 2.4. En utilisant le graphique 1, déterminer la puissance totale P_{tot} prédite par le modèle lors de l'ascension. Les mesures réalisées par le capteur SRM, placé sur le pédalier du cycliste, permettent-elles de valider le modèle ?

3. Prédiction de performances à partir du modèle

Un cycliste amateur développe une puissance totale constante $P_{tot} = 250 \text{ W}$ lors de la montée.

En utilisant le modèle étudié, donner une estimation de la durée de l'ascension du col par le cycliste.

Partie 2 : Étude de la physiologie de l'effort et régulation du pH sanguin

Lors des efforts physiques, des mécanismes biologiques ont pour conséquence la production d'acide lactique par l'organisme. Cet acide a été identifié comme responsable, puis témoin de la fatigue et il est aujourd'hui un indicateur de plus en plus utilisé pour évaluer l'impact d'un entraînement.

En effet, pendant un exercice, la concentration en ions lactate dans le sang augmente. Dès 1930, Owles définit un niveau métabolique critique, appelé « seuil lactique », par l'intensité d'exercice au-dessus de laquelle le taux de lactate dans le sang s'accroît rapidement alors que le taux de bicarbonate plasmique baisse.

D'après <http://www.volodalen.com>

Dans cette partie, on étudie les mécanismes de régulation qui interviennent lors de l'acidification de l'organisme au cours de la pratique d'un sport d'endurance comme le cyclisme.

pH et tampons dans l'organisme

Comme les protons sont en partie captés par les divers tampons cellulaires (composés phosphatés, protéines, acides aminés...) et sanguins (protéines plasmatiques, hémoglobine, bicarbonate...), le pH ne varie que très peu dans les cellules et dans le sang malgré de fortes sollicitations de la glycolyse. La glycolyse est le processus par lequel le glycogène présent dans le foie est transformé en glucose à destination du sang.

D'après Cazorla, Petibois, Bosquet, Léger ; « Lactate et exercices : mythes et réalités », STAPS

Données :

Valeurs normales dans le sang, à 37 °C et en l'absence d'efforts :

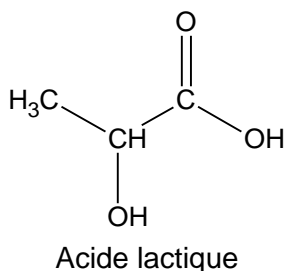
- pH sanguin = 7,4 (limites compatibles avec la vie : 7,0 à 7,8 unités de pH) ;
- le pH intramusculaire varie entre 7,1 et 6,1 ;
- concentration en ions hydrogénocarbonate (aussi appelés ions bicarbonate) :

$$[\text{HCO}_3^-]_0 = 25 \text{ mmol.L}^{-1};$$

- le CO₂ dissous dans le sang est sous la forme H₂CO_{3(aq)} ;
- concentration en CO₂ dissous dans le sang : [H₂CO₃]₀ = 0,9 mmol.L⁻¹.

1. L'acide lactique

L'acide lactique, dont la formule est donnée ci-dessous, est formé dans l'organisme à partir de l'acide pyruvique selon une réaction d'oxydoréduction catalysée par la LDH (lactate déshydrogénase).



- 1.1. Déterminer les groupes caractéristiques présents dans l'acide lactique et associer à chacun d'eux la famille chimique correspondante.
- 1.2. En utilisant la représentation de CRAM, donner les différents stéréoisomères de configuration de l'acide lactique en précisant la relation de stéréoisomérisation qui existe entre eux.

2. Influence de la production d'acide lactique sur le pH sanguin

Le « seuil lactique », facteur déterminant de la performance en course longue telle que la course cycliste, est utilisé dans le suivi des cyclistes.

Il correspond à la concentration en ions lactate à ne pas dépasser pour optimiser les performances et limiter la fatigue. On fixera la valeur de ce « seuil lactique » à 3,0 mmol.L⁻¹.

On s'intéresse à la formation d'acide lactique par l'organisme, en l'absence de régulation de pH.

- 2.1. L'ion lactate est la base conjuguée de l'acide lactique. Représenter la formule semi-développée de l'ion lactate en faisant apparaître les doublets libres.

Pour la suite de l'exercice on notera AH l'acide lactique et A⁻ l'ion lactate.

- 2.2. Écrire l'équation de la réaction chimique entre l'acide lactique et l'eau (réaction 1).
- 2.3. Comparer les quantités de matière en ions oxonium H₃O⁺_(aq) et en ions lactate produites lors de la réaction 1.
- 2.4. En déduire quel serait le pH du sang quand le « seuil lactique » est atteint, lors d'un effort, en absence de régulation. En déduire si une régulation du pH sanguin est nécessaire.

3. Régulation du pH sanguin

On s'intéresse à la régulation par le système « tampon bicarbonate » faisant intervenir le couple H₂CO_{3(aq)} / HCO_{3(aq)}⁻. On raisonnera en l'absence de toute autre réaction acido-basique.

- 3.1. Écrire l'équation de la réaction entre l'acide lactique et les ions hydrogénocarbonate, réaction considérée comme totale (réaction 2).

Expliquer alors la phrase : « le taux de lactate dans le sang s'accroît alors que le taux de bicarbonate plasmique baisse ».

- 3.2. Montrer que lorsqu'on atteint le « seuil lactique », et si seule la réaction (2) contribue à former du H₂CO₃, la valeur de la concentration de H₂CO₃ à l'état final a augmenté par rapport à sa valeur normale et vaut [H₂CO₃]_f = 3,9 mmol.L⁻¹.
- 3.3. Si on ne considère que cette réaction (2), le pH du sang peut être calculé grâce à l'équation de Henderson-Hasselbalch :

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_f}{[\text{H}_2\text{CO}_3]_f}$$

Montrer que $\frac{[\text{HCO}_3^-]_f}{[\text{H}_2\text{CO}_3]_f} = 5,6$ à l'atteinte du seuil lactique. Cette régulation du pH sanguin est-elle efficace ?

- 3.4. Expliquer pourquoi d'autres systèmes tampons jouent forcément un rôle dans la régulation du pH de l'organisme.
- 3.5. Les poumons interviennent en second lieu, après la régulation par les systèmes tampons. Expliquer quel peut être leur rôle.

EXERCICE III - LA POLLUTION PAR LES NITRATES (5 points)

Les ions nitrate (NO_3^-) sont présents naturellement dans les eaux souterraines et superficielles en faibles quantités, généralement inférieures à 1 mg.L^{-1} . Ils participent à l'équilibre de l'écosystème en intervenant notamment dans le développement de certaines plantes et microorganismes.

Cependant, leur utilisation massive comme engrais dans les cultures et leur rejet par les élevages entraînent aujourd'hui une forte augmentation de leur concentration dans les nappes phréatiques et les cours d'eau environnants. Les ions nitrate contenus dans le sol constituent désormais la cause majeure de pollution des grands réservoirs d'eaux souterraines du globe terrestre.

Les dangers sont réels pour l'environnement et la santé. L'Organisation Mondiale de la Santé préconise, pour une personne, de ne pas consommer plus de 3,65 mg d'ions nitrate par kilogramme de masse corporelle et par jour. La législation française impose donc une teneur inférieure à 50 mg.L^{-1} dans les eaux de consommation.

Les eaux présentant un taux d'ions nitrate supérieur à la norme nécessitent donc un traitement spécifique pour pouvoir être consommées. Pour lutter contre cette pollution, on utilise des bactéries dénitrifiantes ou des résines échangeuses d'ions (REC).

Fonctionnement des résines échangeuses d'ions (REC)

La résine échangeuse d'ions utilisée comporte des petites billes poreuses, de diamètre 0,6 mm, saturées en ions échangeables (soit des ions chlorure, soit des ions hydrogencarbonate). Au contact de cette résine, les ions nitrate présents dans une eau polluée vont s'échanger avec les ions chlorure et prendre leur place sur la résine, ce qui permet d'éliminer la majeure partie des ions nitrate dans l'eau en les remplaçant par des ions chlorure.

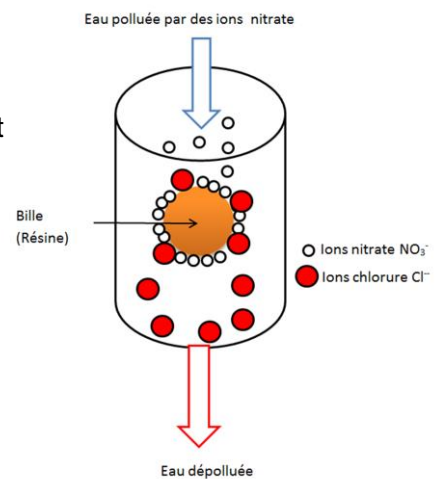


Schéma : dénitration d'une eau par une résine contenant des ions chlorure

L'objectif de l'étude est de vérifier si le traitement, par une résine échangeuse d'ions d'une eau polluée par les nitrates a permis de rendre cette eau potable. Pour cela on met en oeuvre le protocole suivant :

Titration des ions nitrate présents dans une eau après traitement sur une REC :

Étape 1 :

- Introduire un volume $V_{EAU} = 50$ mL d'eau à analyser dans un erlenmeyer.
- Ajouter un volume de 10 mL d'acide sulfurique ($2H^+_{(aq)} + SO_4^{2-}_{(aq)}$) pour acidifier le mélange réactionnel.
- Ajouter un volume $V_1 = 100$ mL d'une solution aqueuse de sel de Mohr de concentration molaire $C_1 = 1,00$ mmol.L⁻¹ de manière à apporter une quantité de matière initiale d'ions fer (II) n_i (Fe^{2+}) en excès.
- Chauffer le mélange au bain-marie pendant 45 min ; ce qui permet de rendre totale la transformation des ions nitrate de l'eau en monoxyde d'azote $NO_{(g)}$.
- On refroidit le mélange.

Étape 2 :

- On introduit dans une burette une solution aqueuse de permanganate de potassium ($K^+_{(aq)} + MnO_4^-_{(aq)}$) de concentration molaire $C_2 = 3,0 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹.
- On titre les ions fer (II) restant, $n_{restant}(Fe^{2+})$ dans l'erlenmeyer en versant la solution de permanganate de potassium.
- On repère l'équivalence grâce à un changement de couleur du mélange réactionnel.
- On trouve un volume à l'équivalence de $V_E = 11,3$ mL pour l'eau analysée.

Données :

- masses molaires atomiques en g.mol⁻¹ : $M(N) = 14,0$; $M(O) = 16,0$;
- les couples oxydant / réducteur mis en jeu sont les suivants :
 $NO_3^-_{(aq)} / NO_{(g)}$; $Fe^{3+}_{(aq)} / Fe^{2+}_{(aq)}$; $MnO_4^-_{(aq)} / Mn^{2+}_{(aq)}$
- équations des réactions chimiques intervenant dans le protocole :
 $NO_3^-_{(aq)} + 3 Fe^{2+}_{(aq)} + 4 H^+_{(aq)} \rightarrow NO_{(g)} + 2 H_2O_{(l)} + 3 Fe^{3+}_{(aq)}$
 $5 Fe^{2+}_{(aq)} + MnO_4^-_{(aq)} + 8 H^+_{(aq)} \rightarrow 5 Fe^{3+}_{(aq)} + Mn^{2+}_{(aq)} + 4 H_2O_{(l)}$
- formule du sel de Mohr : $Fe(SO_4)_2(NH_4)_2, 6H_2O$

Questions préliminaires:

- 1- Identifier la réaction chimique mise en œuvre lors de la première étape du protocole. Justifier.
- 2- Préciser les ions majoritairement présents dans l'erlenmeyer lors de cette première étape :
 - avant l'ajout de la solution aqueuse de sel de Mohr ;
 - au bout des 45 min de chauffage au bain-marie.
- 3- À partir des demi-équations électroniques, vérifier l'équation de la réaction chimique correspondant à la deuxième étape du protocole. Schématiser et légendier le montage utilisé dans cette étape.

Problème :

Peut-on considérer que la technique de dénitrification utilisée est suffisamment efficace pour que l'eau initialement polluée soit considérée comme potable ? Quelle quantité maximale de cette eau un enfant de 35 kg peut-il boire sans conséquences néfastes pour sa santé ?

L'analyse des données ainsi que la démarche suivie sont évaluées et nécessitent d'être correctement présentées. Les calculs numériques seront menés à leur terme. Il est aussi nécessaire d'apporter un regard critique sur le résultat.