

SESSION 2009

SECOND CONCOURS
ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

CHIMIE-PHYSIQUE

Durée : 4 heures

L'usage des calculatrices électroniques de poche à alimentation autonome, sans imprimante et sans document d'accompagnement, est autorisé. Cependant, une seule calculatrice à la fois est admise sur la table et le poste de travail. Aucun échange entre les candidats n'est permis.

L'énoncé comporte 11 pages, dont une page annexe, qui devra être complétée et sera impérativement rendue avec la copie.

L'épreuve comporte deux parties (chimie et physique) indépendantes.

Problème de chimie :

Dioxygène, dissolution dans l'eau, interaction avec la myoglobine et l'hémoglobine

Une première partie de ce problème sera consacrée à l'étude de la dissolution de gaz comme le dioxygène et le diazote dans l'eau dans différentes conditions. Dans une seconde partie, nous nous intéresserons à la fixation du dioxygène par les hémoprotéines que sont la myoglobine et l'hémoglobine. Pour une grande part, les deux parties sont indépendantes. Il est cependant conseillé de lire l'ensemble du problème. On justifiera les réponses faites et, lorsqu'un résultat numérique est demandé, on donnera une expression littérale puis l'application numérique en précisant clairement les unités.

Par mesure de simplicité, les pressions, sauf mention contraire, sont données en atmosphère (atm), bien que l'unité du système international soit le Pascal (Pa). On rappelle que $101,3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$. On précise que lorsqu'on a un mélange de deux gaz (gaz₁ et gaz₂) en nombre de moles respectif n_1 et n_2 ($n_{\text{total}} = n_1 + n_2$), chacun des gaz possède une pression partielle P_i avec : $P_i = P_{\text{total}} \cdot (n_i / n_{\text{total}})$.

I. Il y a des gaz dans l'eau

I.1. Composition de l'air

Lavoisier a étudié la composition de l'air atmosphérique. Pour cela, il a mis en place une expérience d'oxydation du mercure par l'oxygène de l'air. Elle est décrite ci-dessous en termes modernes.

« Dans un récipient fermé contenant de l'air, j'ai chauffé du mercure jusqu'à le faire bouillir et je l'ai laissé ainsi pendant 12 jours. Il ne s'est rien passé de remarquable pendant tout le premier jour. Le second jour, j'ai commencé à voir nager à la surface du mercure de petits grains rouges [il s'agit d'oxyde de mercure HgO] qui, pendant les quatre jours suivants, ont augmenté en nombre puis ont cessé de croître. Au bout de 12 jours, voyant que la calcination du mercure ne faisait plus aucun progrès, j'ai éteint le feu et j'ai laissé refroidir. Le volume de gaz contenu dans le récipient à la fin de l'expérience était réduit au 4/5 de son volume, le gaz restant n'étant plus propre ni à la respiration ni à la combustion [c'est le diazote]. J'ai refait plusieurs fois l'expérience avec des quantités croissantes de mercure et j'ai toujours obtenu la même quantité de grains rouges [Lavoisier les pèse] et le même volume final. »

Texte d'après *Traité élémentaire de chimie*, 1789

I.1.1. Ecrire la réaction d'oxydation du mercure Hg par le dioxygène.

I.1.2. Pourquoi Lavoisier refait-il l'expérience avec des quantités croissantes de mercure ?

I.1.3. On fera l'hypothèse que l'air est composé de dioxygène et de diazote. Que peut-on conclure de cette expérience quant à la composition de l'air ?

I.1.4. Pour une pression de 1 atm, au sein des poumons, la pression partielle en dioxygène P_{O_2} est d'environ 0,13 atm et celle de diazote P_{N_2} d'environ 0,5 atm. Pourquoi ?

Sauf mention contraire, pour simplifier, on considérera que, pour une pression atmosphérique de 1 atm, on a, au niveau des poumons : $P_{O_2} = 0,2 \text{ atm}$ et $P_{N_2} = 0,8 \text{ atm}$.

I.2. Solubilité d'un gaz dans l'eau

Considérons l'équilibre suivant :



Cet équilibre de dissolution est caractérisé par une constante d'équilibre qui s'exprime comme suit : $K_t = \frac{[O_2]_{\text{aq}}}{P_{O_2}}$ où P_{O_2} est la pression partielle en dioxygène, $[O_2]_{\text{aq}}$ la concentration en

dioxygène dissous dans l'eau lorsque la solution aqueuse est en équilibre avec un gaz de pression partielle en dioxygène P_{O_2} .

I.2.1. Comment varie la concentration en dioxygène dissous avec la pression partielle en dioxygène ?

I.2.2. On définit K_{H1} la constante dite de Henry molaire (qu'on appellera constante de Henry) du dioxygène dans l'eau :

$$K_{H1} = \frac{P_{O_2}}{[O_2]_{aq}} \text{ et on donne sa valeur à } 25^\circ\text{C} : K_{H1}(25^\circ\text{C}) = 756,7 \text{ atm mol}^{-1}\text{L}.$$

La loi, qui dit que la concentration un gaz dissous est proportionnelle à la pression partielle en ce gaz est appelée plus généralement loi de Henry.

Considérons de l'eau à 25°C en équilibre avec de l'air dans les conditions normales de pression ($P_{totale} = 1 \text{ atm}$).

I.2.2.a. Quelle est la concentration en dioxygène dissous dans la solution aqueuse ? Cette grandeur est la solubilité du dioxygène. On précisera les unités.

I.2.2.b. Quelle serait la solubilité du dioxygène dans l'eau à 25°C en équilibre sous 1 atm de dioxygène pur ?

I.2.3. Effet de la température

I.2.3.a. On donne ci-dessous la loi de van't Hoff, qui décrit l'influence de la température sur la constante d'un équilibre en fonction de $\Delta_r H^\circ$ (appelé enthalpie de la réaction).

$$\frac{d}{dT}(\ln K) = \frac{\Delta_r H^\circ}{RT^2}$$

α - Intégrer cette équation entre deux températures T_1 et T_2 .

β - L'enthalpie de la réaction de dissolution (1) $\Delta_r H^\circ_1$ est de $-11,7 \text{ kJ mol}^{-1}$. Calculer K_{H1} à 0°C et la solubilité du dioxygène à cette température.

I.2.3.b. Comment varie la solubilité du dioxygène quand la température augmente ? On précise qu'il en est de même pour la solubilité du diazote.

I.2.3.c. Quand on chauffe de l'eau, il apparaît des bulles nettement avant d'atteindre la température d'ébullition de l'eau. Que sont ces bulles (ou quelle est leur composition) ?

I.2.3.d. Des poissons introduits dans une eau préalablement portée à ébullition puis refroidie à température ambiante ne survivent pas. Pourquoi ?

I.2.4. Gaz dissous et plongée sous-marine. On ne fera pas de distinction entre eau pure et eau de mer.

La densité de l'eau est d'environ 1 kg L^{-1} . Nous allons calculer la quantité de diazote et dioxygène dissous dans le sang (environ 5 dm^3) d'un plongeur à 100 m de profondeur pour une pression atmosphérique de 1 atm en surface.

I.2.4.a. Quelle est, pour une pression atmosphérique de 1 atm, la pression à 100 m de profondeur ? Pour l'estimer, on déterminera la pression exercée par 100 m d'eau en kg m^{-2} que l'on convertira en N m^{-2} ou Pa. On rappelle que $g = 9,8 \text{ N kg}^{-1}$ et que $101,3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$.

I.2.4.b. La bouteille du plongeur contient de l'air liquide qui est délivré par l'intermédiaire d'un détendeur à la pression à laquelle se trouve le plongeur. On négligera l'effet de la température : on utilisera les constantes de Henry à 25°C. On précise que pour le diazote $K_{H_2}(25^\circ\text{C}) = 1600 \text{ atm mol}^{-1} \text{ L}$.

α - Calculer la quantité de diazote dissous et de dioxygène dissous dans le sang du plongeur à 100 m de profondeur.

β - Que peut-on dire de la concentration en dioxygène si l'on passe rapidement d'une profondeur de 100 m à la surface ? Quel serait le volume de diazote et dioxygène dégazé lors d'une remontée de 100 m à la surface où la pression vaut 1 atm et la température 25°C ?

γ - Pourquoi faut-il effectuer des paliers de décompression ?

δ - La quantité calculée en β est sous-estimée car on n'a pas considéré les volumes de gaz dissous dans les graisses. On précise que, dans le benzène, la constante de Henry du dioxygène est de $27,3 \text{ atm mol}^{-1} \text{ L}$ et celle du diazote de $42,8 \text{ atm mol}^{-1} \text{ L}$. D'après les valeurs des constantes de Henry dans l'eau et dans le benzène, le dioxygène et le diazote sont-ils plus solubles dans l'eau ou dans les graisses ? Comment peut-on justifier cette différence de solubilité du point de vue de la structure moléculaire ?

II. Myoglobine, hémoglobine et liaison réversible au dioxygène

La myoglobine et l'hémoglobine sont des protéines de stockage et de transport du dioxygène. Elles lient le dioxygène de manière réversible et le site d'interaction est le fer(II) d'un hème. La myoglobine est une protéine monomérique, qui possède un seul hème. En revanche, l'hémoglobine présente une structure quaternaire faisant interagir quatre chaînes polypeptidiques et possède quatre hèmes susceptibles de coordonner chacun un dioxygène.

II.1. Les globines

La famille des globines est une famille de protéines dont la structure tertiaire est très conservée.

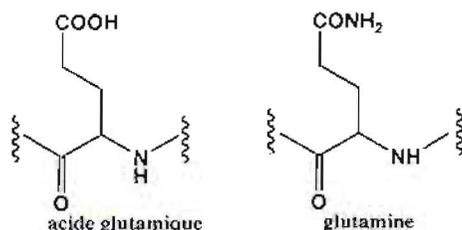
II.1.a. Rappeler les notions de structure primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire.

II.1.b. Pour connaître la nature des acides aminés constitutifs d'une protéine, une première étape consiste à hydrolyser totalement les liaisons amides de la chaîne peptidique. On peut procéder à une hydrolyse acide ou à une hydrolyse basique. Le mécanisme de ces hydrolyses est analogue à celui des hydrolyses acide et basique des esters.

II.1.b. α . Ecrire le bilan de l'hydrolyse acide d'un dipeptidique. Sachant que la première étape est une addition nucléophile de l'eau sur la fonction amide protonée sur le carbonyle, proposer un mécanisme pour cette transformation. Quel est le rôle du proton ?

II.1.b.β. Ecrire le bilan de l'hydrolyse basique d'un dipeptidique. Sachant que la première étape est une addition nucléophile de l'ion hydroxyde sur la fonction amide, proposer un mécanisme pour cette transformation.

II.1.c. Peut-on déterminer, après hydrolyse acide ou basique d'un polypeptide, le nombre d'acides aminés de type acide glutamique et le nombre d'acides aminés de type glutamine ? Justifier.



II.1.d. Après hydrolyse, comment peut-on identifier les acides aminés produits ?

II.2. Cas de la myoglobine

Considérons l'équilibre de dissociation de l'oxymyoglobine MbO_2 (2) :



II.2.1. Ecrire la constante de l'équilibre (2) K_{Mb}

II.2.2. Notons Y le pourcentage de saturation de la myoglobine :

$$Y = \frac{[MbO_2]}{[Mb] + [MbO_2]}$$

II.2.2.a. Exprimer Y en fonction de K_{Mb} et montrer qu'on peut réécrire cette équation sous la forme $Y = \frac{P_{O_2}}{P_{50} + P_{O_2}}$. On pensera à utiliser la loi de Henry présentée au I.

II.2.2.b. A quoi correspond P_{50} ?

II.2.4. Exprimer $\frac{Y}{1-Y}$. Montrer que $\text{Log}\left(\frac{Y}{1-Y}\right)$ en fonction de $\text{Log}(P_{O_2})$ est une droite. Que vaut la pente de cette droite ? Comment déterminer P_{50} ?

II.3. Cas de l'hémoglobine

L'hémoglobine a une structure quaternaire : c'est une protéine tétramérique. Elle est susceptible de lier quatre molécules de dioxygène. La courbe de Hill, consistant à représenter $\text{Log}\left(\frac{Y}{1-Y}\right)$ en fonction de $\text{Log}(P_{O_2})$, (voir figure 1) indique un comportement complexe.

On considère l'équilibre de dissociation suivant :



II.3.1. Comme précédemment, écrire la constante de cet équilibre (3) K_{Hb} et montrer qu'on peut écrire $\frac{Y}{1-Y} = \frac{P_{O_2}^n}{P_{50}^n}$ où Y est le pourcentage de saturation de l'hémoglobine.

II.3.2. On donne les points expérimentaux ci-dessous (figure 1).

II.3.2.a. Montrer qu'à basse pression en dioxygène ($P_{O_2} < 10^{-2}$ atm), les points expérimentaux indiquent la fixation d'une seule molécule de dioxygène. Déterminer alors la valeur du P_{50} de l'hémoglobine qu'on note P_{50-1} .

II.3.2.b. Montrer que pour des pressions supérieures à 4,2 atm, les points expérimentaux indiquent la fixation d'une seule molécule de dioxygène et calculer P_{50-2} .

II.3.2.c. Entre les deux valeurs de pression indiquées en a et b, que vaut n ?

II.3.2.d. Le phénomène observé ici est l'allostérie de l'hémoglobine. Un modèle d'interprétation, proposé par Monod, Wyman et Changeux (MWC) propose que l'hémoglobine présente deux formes : une forme dite tendue de faible affinité pour le dioxygène et une forme dite relâchée, de forte affinité pour le dioxygène. En utilisant les réponses aux questions a à c, décrire l'évolution de l'équilibre entre l'hémoglobine et O_2 lorsque la pression en dioxygène augmente.

Commenter l'importance physiologique de cette allostérie.

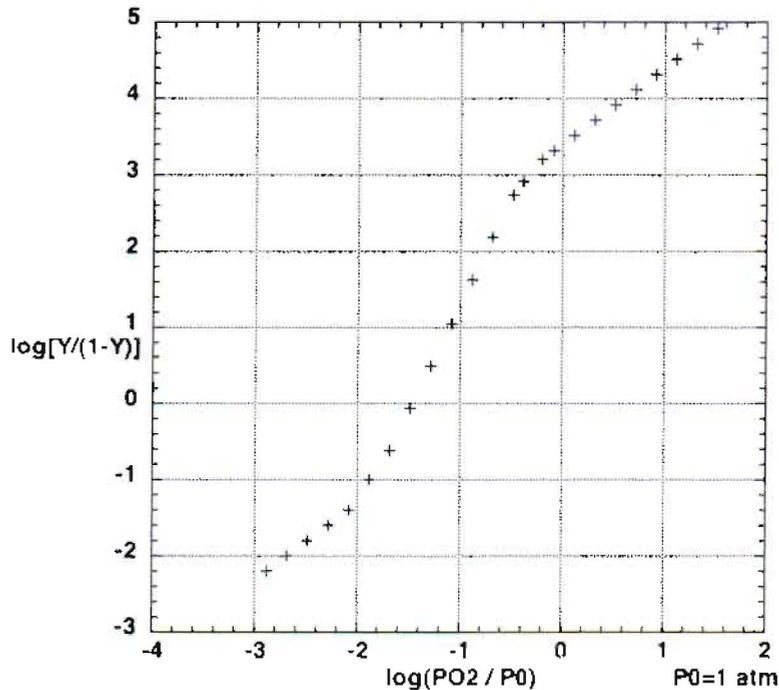


Figure 1 : Courbe de Hill pour l'hémoglobine.

Cette figure est fournie sur le document en annexe : il sera utilisé pour répondre aux questions II.3 et II.4. et rendu avec la copie

II.4 Comparaison entre l'hémoglobine et la myoglobine

II.4.1. La valeur du P_{50} de la myoglobine est de $1,25 \cdot 10^{-3}$ atm. Tracer la courbe de Hill correspondante sur la figure 1.

II.4.2. Comparer les courbes de la myoglobine et de l'hémoglobine. On précise que P_{O_2} (pulmonaire) = 0,12 atm et P_{O_2} (tissus) = $5 \cdot 10^{-2}$ atm. Commenter.

Données

$$R = 8,314 \text{ J K mol}^{-1}$$

On rappelle : $PV = nRT$ T en Kelvin, n en mol, R en J K mol^{-1} , V en m^3 , P en Pa

$$101,3 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$$

$$g = 9,8 \text{ N kg}^{-1}$$

Problème de physique : Mesures de la vitesse de la lumière

Les différentes parties peuvent être traitées séparément et, pour chacune, il existe de nombreuses questions indépendantes des précédentes. Il est cependant conseillé de lire le problème en entier. De manière générale, lorsque le calcul d'une grandeur est demandé, on proposera, lorsque c'est possible, une expression littérale avant de faire l'application numérique. On prendra soin d'indiquer clairement les unités. En fin d'énoncé, on trouvera des données nécessaires aux applications numériques.

De l'Antiquité au XVII^{ème} siècle, l'idée d'une propagation instantanée de la lumière domine. Galilée est l'un des premiers à tester expérimentalement le caractère fini ou infini de la vitesse de la lumière. Il propose une expérience (partie I) dont le principe est encore utilisé aujourd'hui. L'astronome Roemer est le premier à suggérer, à partir de l'irrégularité du rythme apparent des éclipses de Io, que la vitesse de la lumière c est finie. S'il ne propose pas d'estimation de c , ses mesures peuvent permettre de le faire (partie II). La première mesure terrestre (c'est-à-dire pour laquelle tous les instruments sont sur Terre) est réalisée par Fizeau en 1849 (partie III). Peu après, Foucault propose une expérience confirmant cette première mesure (partie IV).

I. Expérience de Galilée

Galilée propose en 1638 une méthode pour tenter de mettre en évidence le caractère fini de la vitesse de la lumière. Deux expérimentateurs, que nous nommerons Pierre et Jean, munis chacun d'une lanterne sont séparés d'une distance d . Le principe de la mesure est le suivant : à $t = 0$, Pierre découvre sa lanterne ; dès que Jean la voit, il découvre la sienne ; Pierre note la durée t écoulée entre l'instant où il a retiré sa main et celui où il voit la lanterne de Jean.

- I.1. Quelle est la distance parcourue par la lumière pendant la durée t ?
- I.2. La distance entre les deux expérimentateurs lors de l'expérience historique de Galilée en 1638 est de 1,5 km.
 - I.2.a. Que vaut t ?
 - I.2.b. La lumière de Jean apparaît à Pierre instantanément après la découverte de sa lanterne. Justifier.
 - I.2.c. Galilée conclut : « Je ne peux dire si la vitesse de la lumière est infinie ou non ; en tout cas, elle est extrêmement rapide ». Justifier.
 - I.2.d. Si l'on fait l'hypothèse que Pierre est capable de mesurer des durées supérieures à 10^{-1} s, que peut-on conclure de l'expérience de Galilée ? On attend une réponse qualitative et une réponse numérique.
 - I.2.e. Quelle est la distance minimale qu'il faudrait entre Pierre et Jean pour que l'expérience permette une mesure de c ?
- I.3. La distance Terre-Lune est de $3,891 \times 10^5$ km. L'observatoire du plateau de Calern, près de Grasse, possède un laser dirigé vers la Lune, et plus précisément vers des réflecteurs placés sur la Lune lors de la mission Apollo en juillet 1969. Ces réflecteurs sont conçus pour renvoyer la lumière dans la direction d'où elle provient (réflecteurs dits « en coins de cube »). La lumière réfléchie revient ainsi à l'observatoire où elle peut être détectée par un télescope pointé sur les réflecteurs. Cette technique, analogue à celle proposée par Galilée est dite technique de l'écho laser.
 - I.3.a. Sachant que la durée Δt entre l'émission et la réception est de 2,597 s, estimer c . On précisera le nombre de chiffres significatifs.

I.3.b. Cette méthode peut-être utilisée, si c est connue par ailleurs, pour déterminer la distance Terre-Lune. On constate que la Lune s'éloigne de 3,8 cm par an. Quel est l'écart sur Δt en un an ?

I.4. Un principe simple, mais une mesure difficile.

Le principe de la mesure par écho laser est simple et est utilisé aujourd'hui pour mesurer la distance Terre-Lune. Cependant, la réalisation peut en être délicate.

I.4.1. La vitesse de propagation de la lumière dans l'air est quasiment la même que dans le vide, mais elle est environ 75% plus faible dans l'eau. Quelle est la conséquence sur la mesure de la distance Terre-Lune ?

I.4.2. Le pointage du télescope doit rester très précis pendant la durée de l'expérience. Qu'est-ce qui peut interférer ?

I.4.3. La détection de la lumière laser réfléchie peut être difficile. Bien que le laser soit très directionnel, la tache sur la surface de la Lune peut atteindre 10 km de diamètre. La surface du réflecteur est de l'ordre de $0,3 \text{ m}^2$. On néglige ici l'absorption atmosphérique et on suppose que les miroirs réfléchissent toute la lumière reçue.

I.4.3.a. Quelle est la proportion de l'énergie initiale qui est renvoyée vers l'observatoire ?

I.4.3.b. En faisant l'hypothèse qu'on a le même rendement au retour (lié là encore à l'élargissement du faisceau et à la surface du détecteur sur le télescope), quelle est la proportion de l'énergie de départ qui arrive sur le télescope ?

I.4.3.c. On utilise un laser YAG de longueur d'onde $\lambda=532 \text{ nm}$. On envoie une impulsion d'énergie $E=0,40 \text{ J}$. Combien de photons reviennent sur le détecteur du télescope après réflexion sur la Lune ?

II. Roemer et les satellites de Jupiter

Au XVII^{ème} siècle, le mouvement des planètes est étudié par de nombreux scientifiques, dont Galilée et Kepler.

II.1. Galilée découvre les satellites de Jupiter en 1610, mettant ainsi en évidence que tout corps céleste ne tourne pas autour de la Terre. Quelle est l'importance de cette découverte ?

II.2. Kepler énonce trois lois du mouvement des planètes autour du Soleil. Ces lois sont aussi valables pour décrire le mouvement d'un satellite autour d'une planète. Nous allons démontrer la troisième loi de Kepler dans le cas de Io, un des quatre satellites de Jupiter. On fait l'hypothèse que le mouvement de Io est un mouvement circulaire uniforme. On rappelle que dans ce cas, le vecteur accélération a pour norme $a = \frac{v^2}{r}$ où v est la vitesse de Io et r le rayon de la trajectoire.

II.2.a. Dans quel référentiel doit-on se placer pour étudier le mouvement de Io autour de Jupiter ?

II.2.b. Exprimer la force exercée par Jupiter sur Io en fonction de M_J , la masse de Jupiter, de m_{Io} , la masse de Io, de G , la constante de gravitation universelle et de r , le rayon de la trajectoire de Io.

II.2.c. Appliquer la seconde loi de Newton (ou relation fondamentale de la dynamique) et exprimer v en fonction de M_J , G et r . On pensera à vérifier, par une analyse dimensionnelle qu'on indiquera, que la dimension de v est correcte.

II.2.d. Donner l'expression de la période de révolution T_{Io} de Io autour de Jupiter en fonction de r , G et M_J . Calculer T_{Io} . On donne en fin de problème les grandeurs nécessaires au calcul.

II.2.f. Montrer que dans le cas des satellites de Jupiter, $\frac{T_{\text{satellite}}^2}{r_{\text{satellite}}^3}$ est une constante. C'est la troisième loi de Kepler.

II.2.g. Montrer que cette loi est vérifiée dans le cas des trois satellites de Jupiter indiqués ci-dessous. Vérifier que le résultat de II.2.d. est en accord avec la loi expérimentale observée ici.

Satellite	Rayon de la trajectoire (km)	Période (jours)
Europe	671×10^3	3,55
Ganymède	1071×10^3	7,16
Callisto	1884×10^3	16,69

II.3. Lors de leurs rotations autour de Jupiter, il arrive que les satellites ne soient plus visibles de la Terre car ils se trouvent derrière Jupiter : on parle alors d'éclipse de ces satellites. En 1676, Roemer constate que le rythme apparent des éclipses de Io présente des irrégularités. Effectivement, on peut observer un décalage de 16 minutes et 42 secondes à 6 mois d'intervalle (c'est le décalage maximal).

II.3.a. Connaissant le rayon de l'orbite de la Terre autour du Soleil et le rayon de celle de Jupiter, calculer la période de révolution de Jupiter en utilisant la troisième loi de Kepler.

II.3.b. Quand la Terre fait une demi-révolution autour du Soleil, quel est l'angle parcouru par Jupiter sur son orbite ?

II.3.c. On fait l'hypothèse que la révolution de Jupiter peut être négligée lors de cette demi-révolution de la Terre.

II.3.c.α. Faire un schéma représentant la situation de l'éclipse à 6 mois d'intervalle, en prenant comme hypothèse que le Soleil, la Terre et Jupiter sont alignés. On représentera le Soleil, la Terre (2 positions), son orbite de révolution autour du Soleil, Jupiter, Io éclipsé depuis la Terre par Jupiter.

II.3.c.β. Roemer conclut que les irrégularités du rythme des éclipses de Io observées depuis la Terre sont liées au caractère fini de la vitesse de la lumière. Justifier.

II.3.c.γ. Quelle estimation de la vitesse de la lumière peut-on proposer connaissant le rayon de l'orbite terrestre et le décalage à 6 mois d'intervalle (voir ci-dessus) ?

Remarque : Roemer ne donne pas de valeur de la vitesse de la lumière. Au XVII^{ème} siècle, la question importante est celle du caractère fini ou infini de la vitesse de la lumière et la valeur, même estimée, ne présente pas d'intérêt pour les scientifiques.

III. Méthode de Fizeau

En 1849, Fizeau et Froment réalisent une expérience permettant la première mesure dite terrestre (par opposition aux mesures astronomiques) de la vitesse de la lumière. Ils déterminent la vitesse de propagation de la lumière entre le Mont Valérien à Suresnes et Montmartre. Ils utilisent pour cela une roue dentée qui peut, soit interposer une dent sur le trajet d'un faisceau lumineux, soit laisser passer ce faisceau. Un miroir réfléchit le faisceau lumineux et le renvoie vers la source où il est observé (voir schéma ci-dessous).

Voici un extrait de l'article de 1849 « L'expérience réussit très bien, et l'on observe que, suivant la vitesse plus ou moins grande de la rotation, le point lumineux brille avec éclat ou s'éclipse totalement. Dans les circonstances où l'expérience a été faite, la première éclipse se produit vers 12,6 tours par seconde [par première éclipse, on entend celle observée à la vitesse de rotation la plus petite]. [...] La roue dentée était placée à Suresnes et le miroir à Montmartre à une distance de 8633 mètres. La roue dentée portait 720 dents. »

III.1. Quel est l'angle (en degré) entre une dent et une échancrure consécutives ? On le notera α (voir figure 1).

III.2. Calculer la vitesse angulaire de la roue pour la première éclipse (ω en $^\circ\text{s}^{-1}$).

III.3. On donne le schéma suivant et on précise $d = 8633$ m. Donner l'expression de c en fonction de d , ω et α . Calculer c .

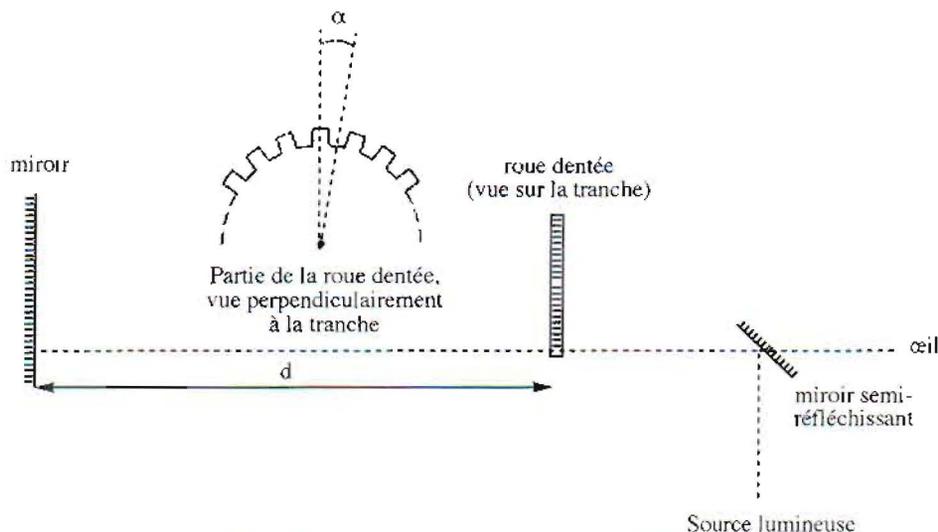


Figure 1 : Schéma de l'expérience de Fizeau

III.4. Qu'observe-t-on quand on augmente progressivement la vitesse de rotation de la roue de 12,6 tours par minute à $4 \times 12,6$ tours par minute ?

IV. Méthode de Foucault

En 1838, Arago propose un dispositif qui permettrait de comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Cette comparaison est importante car, selon les théories du XIX^{ème} siècle, elle devait permettre de trancher entre la théorie ondulatoire et la théorie corpusculaire de la lumière. Le dispositif est mis en place par Foucault et Froment en 1849 pour comparer la vitesse dans l'air et dans l'eau et ils l'utilisent en 1862 pour faire une mesure de la valeur absolue de la vitesse de la lumière. C'est cette seconde utilisation que nous allons décrire.

Dans cette partie IV, les angles seront exprimés en radians.

IV.1. Dans l'expérience de Foucault telle qu'on peut la reproduire aujourd'hui, le faisceau parallèle d'un laser est focalisé en un point S par une lentille L1. Une lentille L2, de focale f , est placée de telle sorte que l'image de S se forme sur le miroir sphérique M, après une réflexion sur un miroir plan m. Le miroir m est un miroir tournant.

IV.1. Sur le schéma ci-dessous (voir document annexe) indiquer quelle est la lentille L1 et quelle est lentille L2.

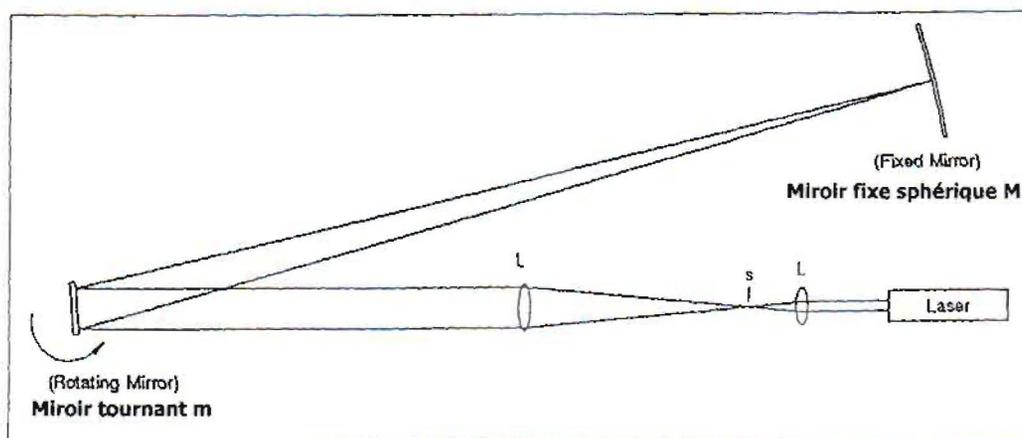


Figure 2 : Schéma d'une version contemporaine de l'expérience de Foucault

Cette figure est fournie sur le document en annexe : il sera utilisé pour répondre à la question IV.1 et rendu avec la copie

IV.2. Formation de l'image S' de S après réflexions sur m, M et à nouveau m.

IV.2.a. La distance L2-m-M est très grande devant la distance focale f . On peut considérer que $d(L2-S) = f$. Justifier.

IV.2.b. Soit r_1 , le rayon issu de S et passant au centre de la lentille. Notons α l'angle entre la normale au miroir m et r_1 (voir dessin). Sur le schéma ci-dessous, représenter le rayon réfléchi r_2 .

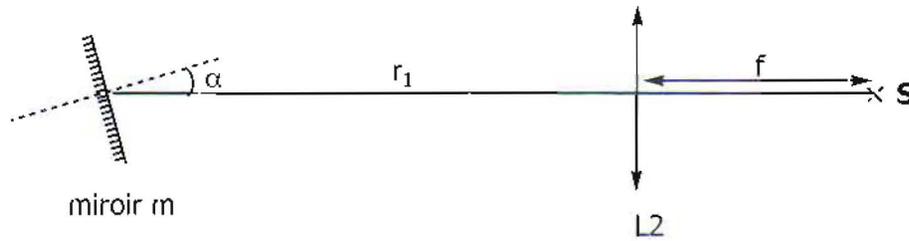


Figure 3 : Figure à reproduire sur la copie et à compléter par le rayon réfléchi r_2

IV.2.c. Ce rayon r_2 est réfléchi par le miroir sphérique M en un rayon r_3 confondu avec r_2 . Quand il vient frapper m, celui-ci a tourné d'un angle θ . Le rayon r_3 est réfléchi par m pour donner un rayon r_4 . Quel est l'angle β entre le rayon r_1 et le rayon r_4 ?

IV.2.d. Le faisceau correspondant au rayon r_4 forme une image sur l'écran en S' . Construire S' en complétant le schéma ci-dessous et exprimer la distance SS' en fonction de f et β (avec β en radian).

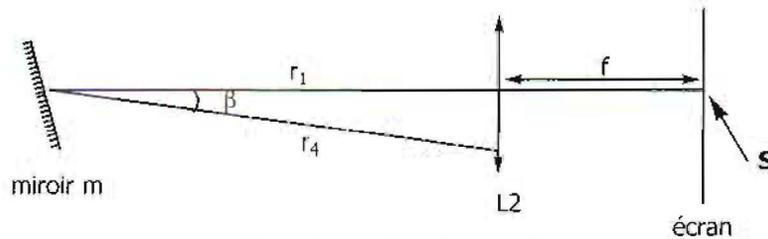


Figure 4 : Construction de S'

Cette figure est fournie sur le document en annexe : il sera utilisé pour répondre à la question IV.2.d. et rendu avec la copie

IV.3. Soit ω la vitesse de rotation (en rad s^{-1}) de m et Δt la durée du trajet de la lumière pour aller du miroir tournant m au miroir fixe M et revenir au miroir m (on notera ce trajet « trajet m-M-m »). Les questions IV.3.a, IV.3.b et IV.3.c concernent des expressions littérales et la question IV.3.d correspond à l'application numérique.

IV.3.a. Exprimer θ en fonction de ω et Δt .

IV.3.b. Notons L la distance m-M. Exprimer Δt en fonction de L et de c .

IV.3.c. Exprimer alors c en fonction de L , ω et θ , puis en fonction de L , ω , f et $d(SS')$.

IV.3.d. Pour une fréquence de rotation du miroir m de 1000 Hz (soit $\omega = 2000\pi \text{ rad s}^{-1}$), une distance M-m de 13 m et une distance focale de 25 cm, on mesure $d(SS') = 0,25 \text{ mm}$. On déterminera c .

Données

$r_T = 150 \times 10^6 \text{ km}$ (rayon de l'orbite de la Terre autour du Soleil)

$T_{\text{Terre}} = 365,25 \text{ jours}$ (période de rotation de la Terre autour du Soleil)

$r_J = 778 \times 10^6 \text{ km}$ (rayon de l'orbite de Jupiter autour du Soleil)

$M_J = 1,8987 \times 10^{27} \text{ kg}$ (masse de Jupiter)

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

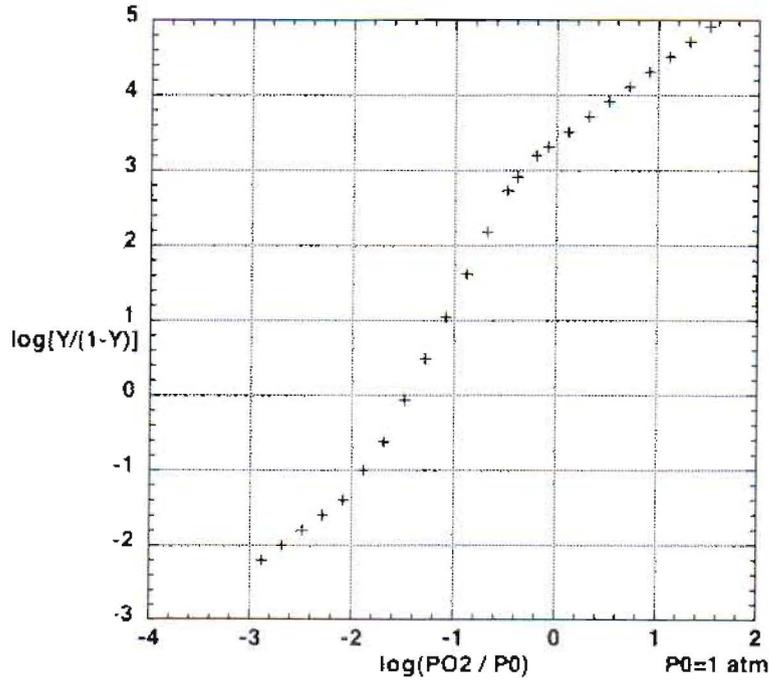
On donne un ordre de grandeur de c : $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$

On rappelle que, pour de petits angles, on peut considérer que $\tan \alpha = \sin \alpha = \alpha$ avec α en radians.

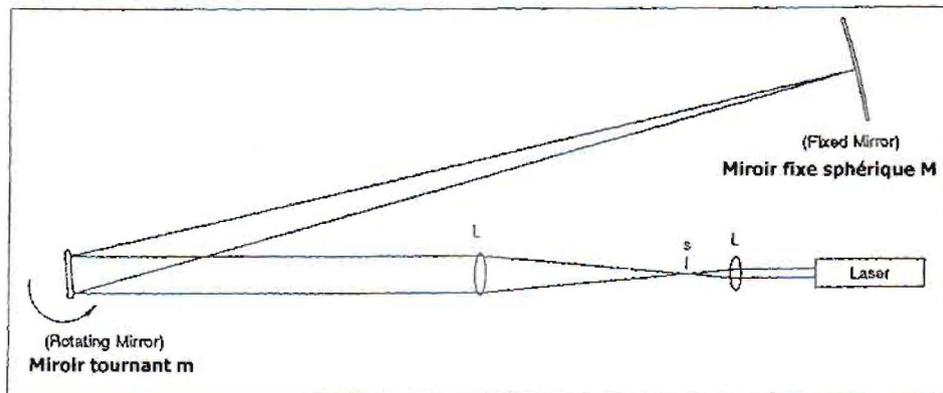
ANNEXE
DOCUMENT A RENDRE AVEC LA COPIE

EPREUVE DE CHIMIE

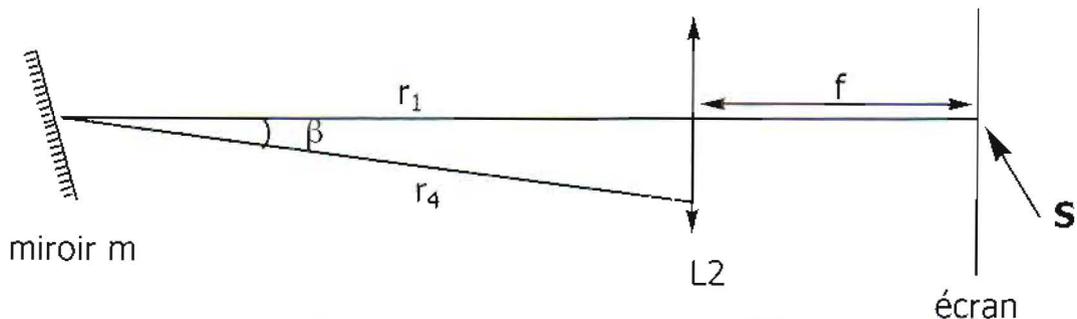


Problème de chimie, Figure 1. A utiliser pour répondre aux question II.3. et II.4. du problème de chimie.

EPREUVE DE PHYSIQUE



Problème de physique, Figure 2 : A compléter pour la question IV.1. (L_1 et L_2 à indiquer)



Problème de physique, Figure 4 : A compléter pour la question IV.2.d. (construction de S')