

Lycée Baimbridge, MP 2025-2026

à rendre pour le 3 novembre 2025

Physique Chimie

DM 6

Proxima du Centaure (Adapté de Centrale MP 2020 et PSI 2022)

Ce problème est une invitation à regarder vers les étoiles, et tout particulièrement l'étoile la plus proche de la planète Terre après le Soleil: Proxima du Centaure aussi appelée *Proxima Centauri*.

Il est constitué de 3 parties totalement indépendantes. La première partie étudie une caractéristique de l'atmosphère terrestre qui a permis le développement de la vie sur Terre et peut-être un jour sur une exoplanète. La deuxième partie est relative à l'observation de Proxima du Centaure et à la détermination de sa distance et de sa taille. La troisième partie s'intéresse à la découverte d'une exoplanète.

Certaines données numériques sont regroupées en fin d'énoncé ; d'autres relèvent de l'initiative du candidat.

1 Ozone et atmosphère

La figure suivante présente la répartition de l'ozone (O_3) dans l'atmosphère terrestre. Sa concentration varie avec l'altitude, et l'objectif de cette partie est de comprendre pourquoi on a une couche d'ozone autour de 30 km d'altitude et pourquoi cette couche est essentielle à la vie sur Terre.

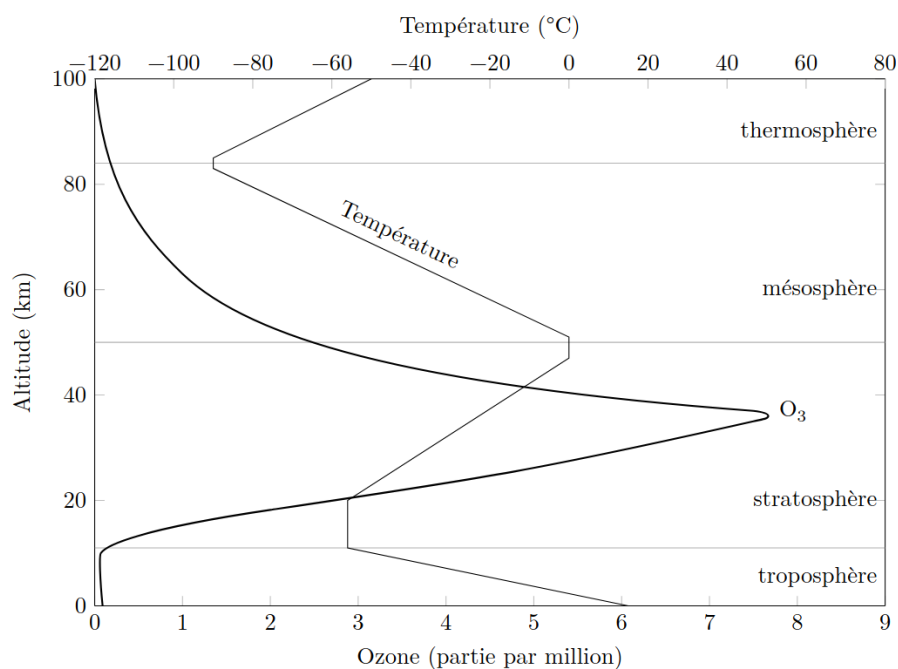


Figure 1: Répartition de l'ozone et température aux latitudes moyennes dans l'atmosphère terrestre

1.1 Étude structurale de l'oxygène et de l'ozone (*)

Le numéro atomique de l'élément oxygène est $Z = 8$.

□ **1** – Donner la configuration électronique attendue de l'atome d'oxygène dans son état fondamental. Distinguer et dénombrer les électrons de valence et les électrons de cœur.

□ **2** – Indiquer la période de la classification périodique à laquelle cet élément appartient.

L'oxygène existe sous trois isotopes stables de nombres de masse respectifs 16, 17 et 18.

□ **3** – Rappeler la définition du terme "isotope" et préciser la composition du noyau de chacun des isotopes de l'oxygène. Justifier que les propriétés chimiques de deux isotopes sont identiques.

□ 4 – La masse molaire moyenne de l'oxygène est $15,9994 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Sachant que l'abondance de l'isotope ^{17}O est de 0,037 %, déterminer les abondances des isotopes ^{16}O et ^{18}O de l'oxygène.

□ 5 – Donner le schéma de Lewis de la molécule de O_2 .

□ 6 – Proposer une représentation de Lewis de la molécule d'ozone sachant qu'elle n'est pas cyclique.

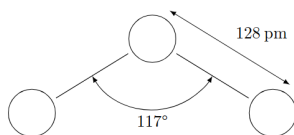


Figure 2: Schématisation d'une molécule d'ozone où chaque sphère représente un atome d'oxygène

□ 7 – La molécule d'ozone a la structure spatiale présentée sur la figure ci-dessus. Justifier l'existence d'un moment dipolaire et le représenter sur un schéma de la molécule.

1.2 Thermodynamique de la formation de l'ozone (*)

Nous étudions l'équilibre



□ 8 – Calculer la constante de cet équilibre à 25°C à l'aide des données fournies en fin d'énoncé.

□ 9 – Calculer la pression partielle en ozone dans l'atmosphère terrestre au niveau du sol.

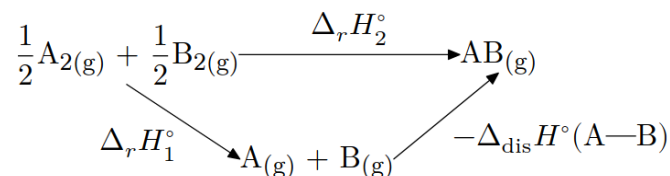
□ 10 – Dans quel sens est déplacé cet équilibre lorsqu'on s'élève dans la troposphère ? Que peut-on en dire dans la stratosphère ? Un raisonnement qualitatif argumenté est attendu. On rappelle que dans l'atmosphère, la pression est une fonction décroissante de l'altitude.

1.3 Importance de la couche d'ozone (**)

La liaison chimique A–B (simple ou multiple) entre les deux entités A et B (A et B sont des atomes, des molécules, des radicaux libres ou des ions), peut se rompre pour fournir A et B séparément. La réaction de dissociation de liaison est la réaction où le réactif est le composé AB gazeux, dans son état standard à la température T , tandis que les produits sont les entités A et B séparées, gazeuses, à la pression standard $P^\circ = 1 \text{ bar}$, à la même température T : $\text{AB}(\text{g}) = \text{A}(\text{g}) + \text{B}(\text{g})$.

Par définition, l'enthalpie standard de dissociation de liaison à la température T est l'enthalpie standard de réaction associée à l'équation bilan précédente. Elle est aussi appelée enthalpie de liaison ou énergie de liaison (par unité de quantité de matière). On la note $E_{\text{liaison}} = \Delta_{\text{diss}} H^\circ(\text{A-B})$

On peut exprimer l'énergie de liaison d'un corps gazeux diatomique AB en utilisant un cycle passant par un état hypothétique formé des atomes libres A et B gazeux comme décrit figure suivante :



□ **11** – Exprimer $\Delta_r H_1^\circ$ en fonction de $\Delta_{\text{dis}} H^\circ(\text{A-A})$ et $\Delta_{\text{dis}} H^\circ(\text{B-B})$, puis en déduire l'énergie de liaison de AB en fonction de $\Delta_r H_2^\circ$, $\Delta_{\text{dis}} H^\circ(\text{A-A})$ et $\Delta_{\text{dis}} H^\circ(\text{B-B})$.

On envisage, pour déterminer l'énergie de liaison de O_2 , la réaction standard de formation de $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$.

□ **12** – Ecrire cette réaction standard de formation.

□ **13** – En s'inspirant de ce qui précède, déterminer l'expression de l'énergie de liaison de la molécule de $\text{O}_2(\text{g})$. Effectuer l'application numérique.

Sous l'influence du rayonnement solaire, le dioxygène présent dans les hautes couches de l'atmosphère peut se dissocier pour donner deux oxygènes libres présentant un électron célibataire, notés $\text{O}^\bullet$, suivant la réaction $\text{O}_2 \longrightarrow \text{O}^\bullet + \text{O}^\bullet$. Les oxygènes libres sont extrêmement réactifs, ils vont permettre de produire de l'ozone (ce que nous étudierons plus loin). On recherche ici la longueur d'onde limite des photons permettant de briser la liaison entre les deux oxygènes de la molécule de O_2 .

□ **14** – Rappeler la relation de Planck-Einstein liant la fréquence ν et l'énergie du photon.

□ **15** – Déduire des deux questions précédentes la longueur d'onde recherchée. Indiquer le domaine du spectre électromagnétique qui lui est associé.

La figure suivante montre le flux solaire ultra-violet reçu au sommet de l'atmosphère et le flux résiduel à la surface de la Terre. La différence est due à l'absorption du rayonnement ultra-violet par la couche d'ozone. Le graphique précise l'absorption moyenne pour chaque bande du rayonnement ultra-violet.

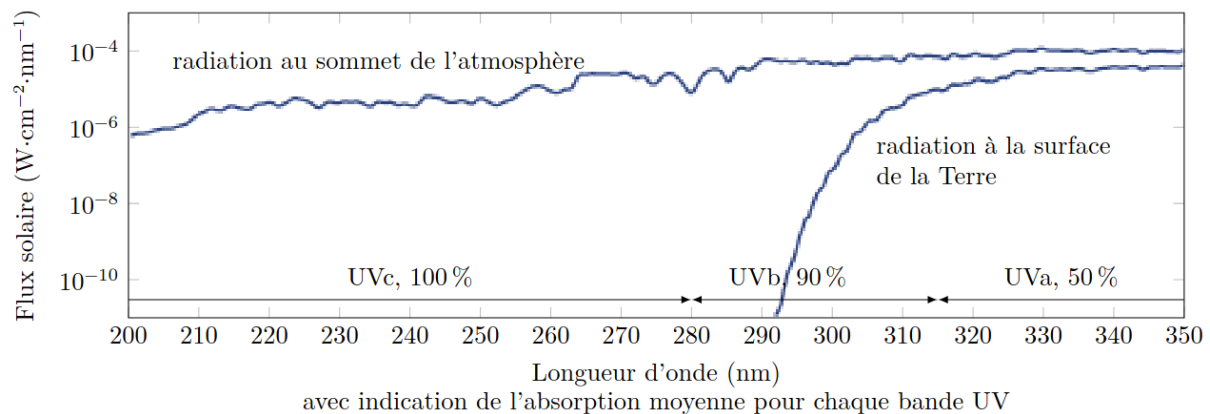


Figure 3: Absorption du rayonnement solaire par la couche d'ozone – d'après NASA Ozone Watch

□ **16** – Dans quelle partie du spectre l'absorption est la plus importante ? Expliquer ce phénomène à partir du résultat de la question précédente.

□ **17** – Comment la dangerosité du rayonnement évolue-t-elle en fonction de la longueur d'onde ? Expliquer l'importance de la couche d'ozone dans la protection de la vie terrestre.

1.4 La couche d'ozone (***)

Cette sous-partie constitue un problème peu guidé contenant essentiellement une question qualitative puis une question quantitative s'appuyant sur les deux documents de l'annexe A. Au-delà des réponses aux questions, il convient de vérifier la cohérence des réponses à l'aide des informations données dans les documents ainsi que la validité des hypothèses formulées, quand cela est possible.

Le but de cette sous-partie est de comprendre l'origine de l'existence d'une zone présentant un maximum de la concentration d'ozone vers le milieu de la stratosphère (couche d'ozone).

□ **18** – Par une approche purement qualitative mais argumentée, tracer l'allure du graphe de k_1 en fonction de l'altitude z , puis justifier qualitativement l'existence d'un maximum pour n_{O_3} à une certaine altitude.

Au prix de quelques approximations dans le modèle de Chapman, on peut établir que :

$$I(z) = I_{\infty} \exp \left(-H n_0 \sigma_{O_2} \exp \left(-\frac{z}{H} \right) \right) \quad (2)$$

I_{∞} étant une constante, H une hauteur caractéristique déjà introduite dans le document A et σ_{O_2} la section efficace d'absorption du dioxygène.

□ **19** – En utilisant les moyens à votre disposition, en particulier numériques, déterminer l'altitude du maximum de la concentration en ozone n_{O_3} , ainsi que l'ordre de grandeur de cette concentration maximale.

On donne : $n_0 = 9.3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, $\sigma_{O_2} = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$, $H = 7 \text{ km}$ et $k_1(z = 50 \text{ km}) = 3 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$.

□ **20** – Comparer quantitativement ces résultats à la figure 1. On donne l'évolution de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$) :

Altitude z (km)	0	5	10	15	20	25	30	40
Pression p (hPa)	1013	540	265	121	55	25	12	3

Table 1: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

2 Découverte de Proxima du Centaure

2.1 Première observation de l'étoile (*)

L'étoile *Proxima Centauri* a été découverte en 1915 par l'astronome britannique Robert Innes, alors directeur de l'observatoire de l'Union à Johannesburg en Afrique du Sud.

C'est une étoile de type naine rouge, de masse $M_E = 2.44 \times 10^{29} \text{ kg}$ et de rayon $R_E = 9.81 \times 10^4 \text{ km}$. Elle est située à $D_E = 3.99 \times 10^{13} \text{ km}$ soit 4,22 années-lumière du Soleil.

Dans la suite du sujet, toutes les applications numériques seront faites à la longueur d'onde moyenne du visible $\lambda_{\text{obs}} = 600 \text{ nm}$.

□ **21** – Justifier, par un argument d'ordre de grandeur, que la distance entre la Terre et Proxima du Centaure peut être approximée à 4,22 années-lumière.

Pour voir l'étoile *Proxima Centauri*, un instrument d'optique est utilisé. Il est modélisé dans la suite par deux lentilles:

- une lentille convergente L_1 objectif, de centre optique O_1 , de foyer principal objet F_1 , de foyer principal image F'_1 et de distance focale image $f'_1 = 8 \text{ m}$;
- une lentille divergente L_2 de projection, de centre optique O_2 , de foyer principal objet F_2 , de foyer principal image F'_2 et de distance focale image $f'_2 = -0.02 \text{ m}$.

Si le point objet A et le point image A' sont conjugués par la lentille L de focale f' et de centre O , d'après la formule de Descartes on a

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad (3)$$

et le grandissement transversal est

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}. \quad (4)$$

L'instrument d'optique est pointé vers l'étoile *Proxima Centauri*.

□ **22** – Où est située l'image de l'étoile par la lentille L_1 , appelée image intermédiaire A_1B_1 ? Illustrer cette situation par un schéma.

□ **23** – Déterminer l'expression de la taille de cette image intermédiaire A_1B_1 (non algébrique) en fonction du rayon R_E de l'étoile et des caractéristiques de la lentille objectif L_1 .

□ **24** – La lentille de projection L_2 , divergente, sert à faire de l'image intermédiaire A_1B_1 une image définitive $A'B'$, réelle, non inversée et agrandie d'un facteur 4. Calculer la distance O_1O_2 pour respecter ces contraintes.

□ **25** – Illustrer par un schéma la position de A_1B_1 , de $A'B'$ et de L_2 (sans représenter L_1).

□ **26** – En 1915, l'image définitive $A'B'$ de l'étoile se formait sur une plaque photographique de dimension 24×36 mm, composée de cristaux de $10 \mu\text{m}$ de chlorure d'argent, précipité blanc qui noircit à la lumière. L'image définitive de l'étoile *Proxima Centauri* est-elle vue comme ponctuelle ou étendue sur la plaque photo ?

□ **27** – À l'occasion du centenaire de la découverte de Proxima du Centaure, en 2015, la photo de l'étoile a été reprise avec l'instrument d'optique de l'époque mais la plaque photographique a été remplacée par un capteur CCD (Charge Coupled Device) de 100 millions de pixels, de taille identique à la plaque photo originelle. L'image définitive de l'étoile *Proxima Centauri* est-elle vue comme ponctuelle ou étendue sur le capteur photosensible ?

2.2 Mesure de la distance entre la Terre et l'étoile (**)

La parallaxe est l'effet du changement de position de l'observateur sur ce qu'il perçoit. La parallaxe annuelle est, par définition, l'angle qui mesure le déplacement, au cours de l'année, de la position apparente, perçue depuis la Terre, d'une étoile proche par rapport aux étoiles lointaines. Sur la figure ci-dessus, deux instants d'observation sont représentés par O_1 et O_2 .

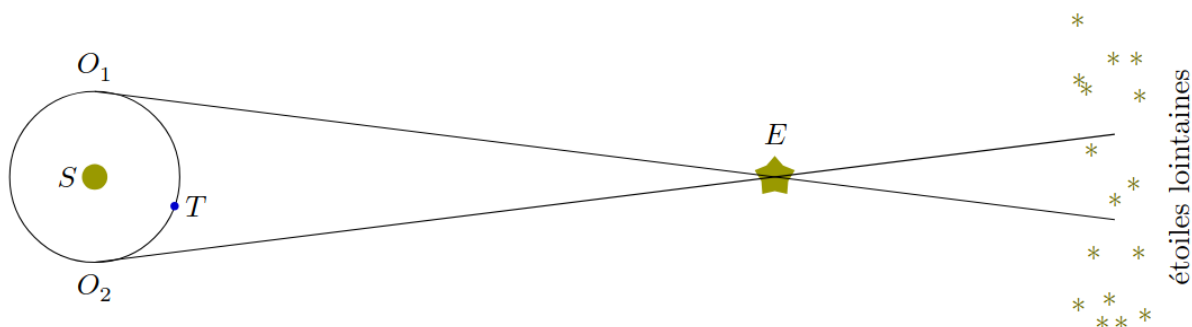


Figure 4: Schéma explicatif de la mesure de parallaxe solaire

Le satellite Hipparcos (High Precision Parallax Collection Satellite) a mesuré la parallaxe de $P_E = 1545$ millisecondes d'arc pour *Proxima Centauri*.

□ **28** – Calculer, à partir de cette valeur de la parallaxe P_E , la distance séparant l'étoile *Proxima Centauri* du système solaire et comparer à la valeur donnée au début de cette partie.

□ **29** – Pourquoi la distance entre la Terre et le Soleil varie-t-elle au cours de l'année?

3 Une exoplanète: *Proxima Centauri b*

Le 24 août 2016, l'observatoire européen austral annonce en conférence de presse la découverte de *Proxima Centauri b*, une planète *super Terre* rocheuse de masse M_P d'environ 1,3 masse terrestre, en orbite à une distance de 7 millions de kilomètres de *Proxima Centauri* (soit dans la zone habitable). Cette exo-planète a été détectée, de manière indirecte, par la méthode des vitesses radiales.

3.1 Étude du mouvement du système {étoile + planète} (***)

La détection de la planète repose sur le fait que le centre de masse G du système {étoile + planète} n'est pas confondu avec le centre de l'étoile. L'étoile E et la planète P tournent toutes les deux autour du centre de masse G du système complet.

Le centre de masse G est défini par l'une des deux relations

$$(M_E + M_P)\vec{AG} = M_E \vec{AE} + M_P \vec{AP} \quad \text{pour tout point } A \quad (5)$$

$$M_E \vec{GE} + M_P \vec{GP} = \vec{0} \quad (6)$$

Toutes les forces autres que la force d'interaction gravitationnelle entre la planète et l'étoile sont négligées. On suppose que le référentiel d'étude, de centre G dont les 3 axes pointent vers trois étoiles lointaines est galiléen.

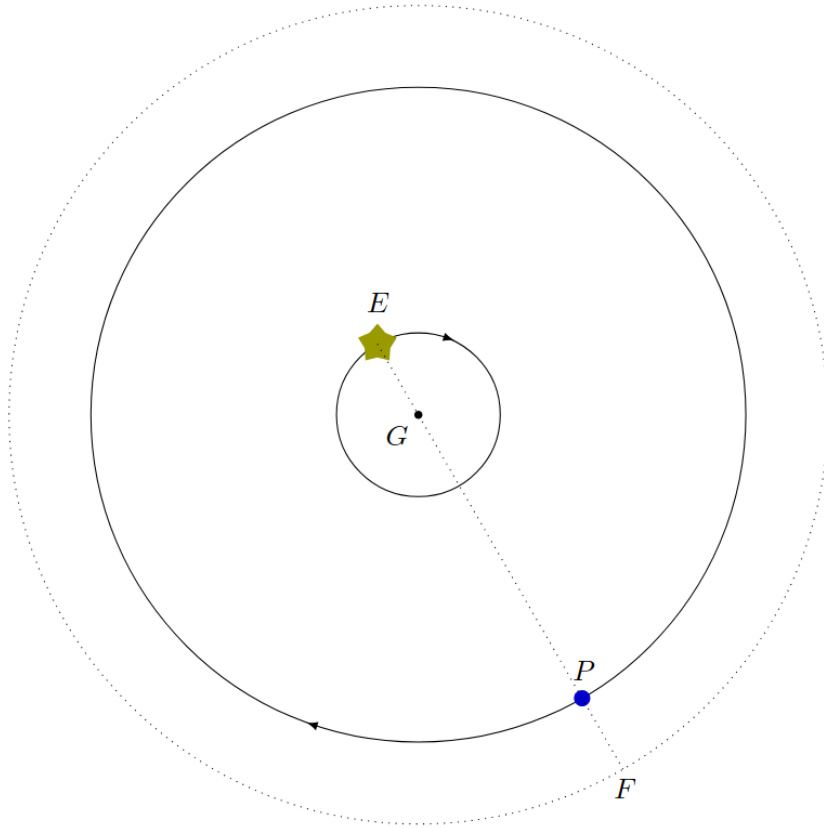


Figure 5: Schéma représentant l'étoile E et la planète P en rotation autour du point G , centre de masse du système étoile + planète ; le point F est un point utilisé pour étudier le mouvement de E et P autour de G .

□ **30** – Établir la relation $\vec{GP} = \frac{M_E}{M_E + M_P} \vec{EP}$. Contrôler la pertinence de cette expression en étudiant des cas limites.

On note pour la suite $\vec{r} = \vec{EP}$ et $\|\vec{r}\| = r$.

□ **31** – En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la planète P dans le référentiel d'étude, établir l'équation différentielle vérifiée par $\vec{r}$.

On considère le point F défini par $\vec{r} = \vec{GF}$. Ce point est en mouvement circulaire, de période T , autour de G .

□ **32** – Établir la relation

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{\mathcal{G}(M_E + M_P)}{4\pi^2} \quad (7)$$

Quel nom porte cette loi ?

□ **33** – Justifier que E a un mouvement circulaire uniforme autour de G et établir l'expression de sa vitesse de révolution en fonction de M_P , M_E , r et T .

3.2 Résultats ayant conduit à la découverte de la planète *Proxima Centauri b* (****)

Dans le cas le plus favorable à l'observation, la Terre est dans le plan des trajectoires de E et P , l'étoile E possède alors un mouvement apparent oscillant et la mesure de sa composante V de vitesse selon l'axe de visée depuis la Terre est possible par effet Doppler-Fizeau, qui entraîne un décalage des raies spectrales de l'étoile par rapport à leur position mesurée sur Terre, selon la relation

$$\frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{em}}}{f_{\text{em}}} = \frac{V}{c} \quad (8)$$

où f_{em} et f_{obs} représentent respectivement la fréquence à l'émission et la fréquence observée sur Terre.

Le professeur Bouchy de l'observatoire astronomique de Provence propose, en 2005, dans son intervention sur les exoplanètes la formule suivante pour le décalage Doppler lors de la détection indirecte d'exoplanètes par la méthode des vitesses radiales

$$\frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{em}}}{f_{\text{em}}} = - \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} \frac{M_P \sin i}{(M_P + M_E)^{2/3}} \frac{1}{c\sqrt{1 - e^2}} \quad (9)$$

où M_P et M_E sont respectivement les masses de la planète et de l'étoile, T la période de la planète, e l'excentricité de l'orbite et i l'angle entre la ligne de visée et la perpendiculaire au plan orbital du système. L'excentricité e vérifie $0 \leq e < 1$, avec $e = 0$ pour une orbite circulaire.

□ **34** — En utilisant les résultats de la sous-partie précédente, établir une formule analogue à la formule proposée par le professeur Bouchy. Commenter les différences.

□ **35** — Connaissant la masse de *Proxima Centauri*, $M_E = 2,44 \times 10^{29}$ kilogram déterminée grâce à l'analyse de son rayonnement, exploiter les données expérimentales de la figure suivante pour déterminer la masse de la planète *Proxima Centauri b*.

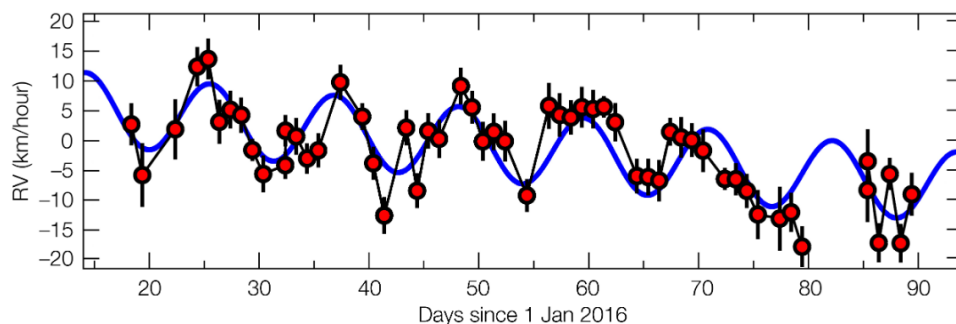


Figure 6: Variations de la vitesse radiale de l'étoile *Proxima Centauri* au cours du premier trimestre 2016 — Source : European Southern Observatory, Guillem Anglada-Escudé

Données

- Constante d'Avogadro $\mathcal{N}_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Constante de Boltzmann $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits $R = 8.314 \text{ J}\cdot\text{K}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Constante de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Vitesse de la lumière dans le vide $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Constante universelle de la gravitation $\mathcal{G} = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
- Rayon moyen de la Terre $R_T = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$
- Distance Terre-Soleil $D_{TS} = 1.50 \times 10^8 \text{ km}$
- Masse de la Terre $M_T = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$
- Rayon du Soleil $R_S = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$
- Masse du Soleil $M_S = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
- Numéro atomique de l'oxygène $Z = 8$
- Masse molaire atomique de l'oxygène $M_O = 15.9994 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Masse molaire atomique de l'oxygène 16 $M_{16O} = 15.99491 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Masse molaire atomique de l'oxygène 17 $M_{17O} = 16.99914 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Masse molaire atomique de l'oxygène 18 $M_{18O} = 17.99916 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Masse molaire de l'air $M_{air} = 29.0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Enthalpie molaire standard de formation de $\text{O}_3(\text{g})$: $141.9 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Enthalpie molaire standard de formation de $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$: $-243 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Enthalpie molaire standard de dissociation de $\text{O}-\text{H}$: $\Delta_{dis}(\text{O}-\text{H}) = 463 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Enthalpie molaire standard de dissociation de $\text{H}-\text{H}$: $\Delta_{dis}(\text{H}-\text{H}) = 435 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Entropie molaire standard de O_2 : $205 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Entropie molaire standard de O_3 : $239 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Un Debye : $1 \text{ D} = 3.33 \times 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$.

Annexe A

— Document A1 — Structure de l'atmosphère —

D'après wikipedia

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches d'importance variable : leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude. De bas en haut, on rencontre

- la troposphère : l'épaisseur de cette couche varie entre 13 et 16 km à l'équateur, mais entre 7 et 8 km aux pôles. Elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, etc.) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents) ;
- la stratosphère : de 8-15 km d'altitude à 50 km d'altitude ; elle abrite une bonne partie de la couche d'ozone ;
- la mésosphère : de 50 km d'altitude à 80 km d'altitude ;
- la thermosphère : de 80 km d'altitude à 350-800 km d'altitude ;
- l'exosphère : de 350-800 km d'altitude à 50 000 km d'altitude.

— Document A2 — Couche d'ozone —

D'après wikipedia

La couche d'ozone ou ozonosphère désigne la partie de la stratosphère contenant une quantité relativement importante d'ozone (concentration de l'ordre de un pour cent mille). Son existence est démontrée en 1913 par les physiciens français Henri Buisson et Charles Fabry grâce à son interféromètre optique. Cet ozone est produit par l'action des rayons ultra-violets (UV) du rayonnement solaire, sur les molécules de dioxygène à haute altitude.

Sydney Chapman propose le mécanisme cinétique de formation suivant en 1930

- Réaction 1 : $\text{O}_2 \xrightarrow{k_1} \text{O}^\bullet + \text{O}^\bullet$, constante de vitesse k_1
- Réaction 2 : $\text{O}^\bullet + \text{O}_2 \xrightarrow{k_2} \text{O}_3$, constante de vitesse $k_2 = 5 \times 10^6 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Réaction 3 : $\text{O}_3 \xrightarrow{k_3} \text{O}_2 + \text{O}^\bullet$, constante de vitesse $k_3 = 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Réaction 4 : $\text{O}_3 + \text{O}^\bullet \xrightarrow{k_4} 2\text{O}_2$, constante de vitesse $k_4 = 9 \times 10^4 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

L'exploitation de ce modèle en régime stationnaire permet d'établir la relation suivante entre la concentration en dioxygène n_{O_2} et en ozone n_{O_3} :

$$n_{\text{O}_3} = \sqrt{\frac{k_1 k_2}{k_3 k_4}} n_{\text{O}_2}.$$

Compte tenu du mécanisme de la première réaction (photolyse), la constante de vitesse $k_1(z)$ est proportionnelle à l'intensité $I(z)$ de la partie ultra-violette du rayonnement venant du Soleil à l'altitude z . Cette intensité $I(z)$ du rayonnement diminue au fur et à mesure que celui-ci traverse des couches gazeuses contenant O_2 , et ce d'autant plus que la concentration en O_2 est importante (on considère que seul O_2 peut absorber le rayonnement ultra-violet). Au niveau du sol, $I(0)$ est quasiment nul.

On peut considérer enfin que le profil de concentration en O_2 , $n_{\text{O}_2}(z) = n_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$ (avec $n_0 = 9,3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, $H = 7 \text{ km}$), n'est pas modifié par la production d'ozone, ce qui fait qu'à partir du sommet de la stratosphère la concentration en O_2 est quasiment nulle.