

est supposé ponctuel.

Deux mesures sont effectuées, la première avec un filtre qui absorbe l'infrarouge, et la seconde sans filtre. La différence entre les deux mesures permet d'estimer la température superficielle de la région lunaire étudiée.

❑ 1* – Expliquer en quoi le site astronomique où est situé le télescope doit être « privilégié », ou pourquoi ce dernier est placé dans un satellite.

❑ 2* – Où doit-on placer le détecteur ?

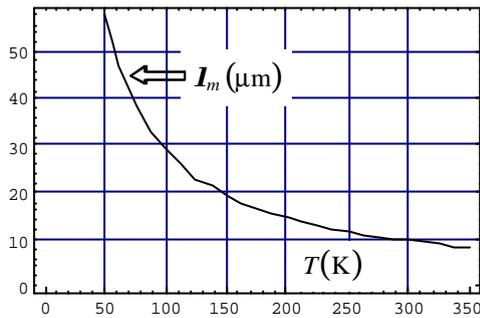


Fig. 2 : Maximum d'émission

❑ 3* – Admettons ceci : la puissance lumineuse émise à la température T par un objet en équilibre thermodynamique est maximale pour la longueur d'onde $I_m(T)$, qui dépend de la température comme représenté en Fig. 2. Justifier la nécessité de refroidir les télescopes terrestres (par exemple à la température de l'azote liquide, soit environ 77 K) ?

❑ 4* – Le diamètre d'ouverture, a , des télescopes observant la surface lunaire est de l'ordre du mètre. Estimer la résolution de la mesure effectuée depuis un télescope terrestre ou en orbite terrestre. On rappelle que la résolution angulaire d'un télescope correspond au rayon angulaire de la tâche d'Airy, soit $1,22 \frac{\lambda}{a}$.

Interprétation des résultats

Les températures maximales du sol lunaire sont d'environ 120°C et les températures minimales, lors de la nuit lunaire, d'environ -200 °C. On attribue cette grande variation à la durée de la nuit lunaire et à l'absence d'atmosphère lunaire.

❑ 5 – Déterminer la durée d'une nuit lunaire.

❑ 6 – Décrivez sur un schéma les zones de pénombre et d'ombre relativement au Soleil et à la Terre, lorsque la Terre éclipse le Soleil. Évaluer les durées respectives de pénombre et d'ombre.

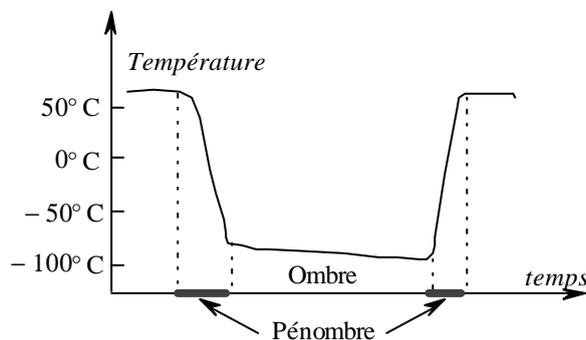


Fig. 3 ; cycle de température lunaire qualitatif entre la courbe et le modèle.

❑ 7* – Des mesures sont effectuées lors d'une éclipse totale ; l'allure des résultats est représentée dans la fig. 3. On en rend compte par un modèle à deux couches pour la croûte lunaire : une couche supérieure, pulvérulente, très fine (épaisseur de l'ordre du millimètre), de densité faible et de conductivité thermique très faible, et une couche inférieure plus compacte de propriétés physiques proches de celles de la roche ordinaire (silicates). Justifier l'accord

II Le sol lunaire

Modélisations

Le sol lunaire est bombardé et réduit en poussière par les météorites et le vent solaire, constitué essentiellement de protons et d'électrons. La composition du sol lunaire est proche de celle des silicates, dont quelques caractéristiques physiques sont indiquées page 6. La couche supérieure, très fine, peut être représentée par un empilement compact de sphères de silicates, de rayon R_{Sil} et de température uniforme (Fig. 4). Le contact entre les sphères est supposé ponctuel. On note c la distance verticale minimale entre deux sphères en positions

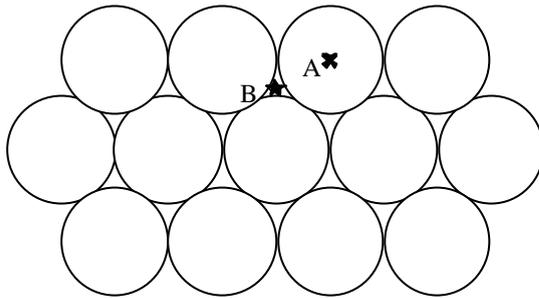


Fig. 4 : Le plan inférieur de l'empilement compact est constitué de sphères dont les centres sont notés A. Une couche identique de sphères, dont les centres sont à l'apex des points de type B, est superposée à ce plan. Les centres des sphères de la troisième couche sont en sites de type A, et ainsi de suite (empilement de type ABAB ...).

semblables

$$c = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} R_{Sil} \approx 1,633 R_{Sil}.$$

Dans une telle structure compacte, le volume occupé par les sphères est de l'ordre de 74 % du volume de l'empilement..

□ 8* – Justifier qu'avec un tel modèle les échanges thermiques entre les sphères doivent se faire par un autre processus que la conduction ou la convection.

□ 9* – L'empilement précédent est maintenant modélisé par un ensemble de plans parallèles opa-

ques, placés dans le vide, séparés par la distance $c/2$. Que pensez-vous de ce modèle ?

□ 10 – On peut caractériser un tel milieu par un coefficient de conductivité thermique dépendant de la température de la forme $I(T) = aT^3$, avec $a = 1,55 \times 10^{-6}$ SI. Comparer l'ordre de grandeur de $I(T)$ obtenu avec ce modèle à la valeur expérimentale de la conductivité des silicates à la température ambiante : $K_{Sil} \approx 1,11 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$,

□ 11 – Comparer la densité d et la capacité calorifique massique c de la couche supérieure avec d_{Sil} et c_{Sil} .

□ 12* – Il est généralement admis que ce sont les couches les plus profondes qui ont les caractéristiques physiques les plus voisines de celles des modèles ci-dessus. Pourquoi ?

Influence de l'impact des météorites

On admet que les météorites heurtant la surface lunaire ont même composition que le sol lunaire. On rappelle que le référentiel de Copernic, ou référentiel héliocentrique, est lié au centre de masse du système solaire et que ses axes pointent vers des étoiles réputées fixes. Le référentiel de Copernic est supposé galiléen.

□ 13 – Vérifier que la vitesse d'impact d'une météorite frappant la surface lunaire et de vitesse négligeable dans le référentiel de Copernic est de l'ordre de $3 \times 10^4 \text{ m.s}^{-1}$.

□ 14 – Montrer que l'impact d'une météorite de masse m_1 peut dégager une énergie suffisante pour porter à l'état liquide une masse m_2 de la surface de la Lune. Déterminer puis calculer le rapport m_2/m_1 .

□ 15* – La solidification du matériau en fusion n'est pas sans effet sur la nature des transferts thermiques ultérieurs. Vers quelle valeur se rapproche alors la conductivité thermique calculée précédemment ?

III Atmosphère lunaire.

Absence d'atmosphère gazeuse

Un gaz parfait, possédant par unité de volume n molécules de masse m , exerce sur une surface une pression P . Les molécules de ce gaz sont homocinétiques, c'est-à-dire de vecteur vitesse \mathbf{v} de norme \mathbf{u} constante, mais d'orientation aléatoire. Les molécules de gaz subissent des chocs élastiques sur la surface. Il s'en déduit l'expression $P = \frac{1}{3}nm\mathbf{u}^2$.

□ 16 – L'atmosphère lunaire est majoritairement composée d'atomes d'argon, libéré lors des réactions nucléaires au sein des roches lunaires. Sachant que la masse molaire M de ce gaz vaut 40 g, et en utilisant l'équation des gaz parfaits, calculer \mathbf{u} pour $T = 300$ K.

□ 17 – On note \mathbf{u}_1 la vitesse de libération lunaire ; c'est la vitesse minimale d'un objet pouvant échapper à l'attraction gravitationnelle lunaire. Exprimer puis calculer la vitesse de libération lunaire. En déduire qu'une atmosphère lunaire ne saurait subsister.

Étude d'une atmosphère « ionique ». Méthode de l'occultation

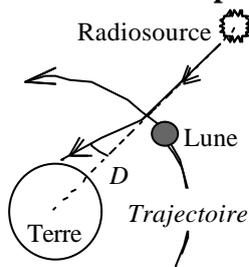


Fig. 5 : Déviation d'un rayon lumineux près de l'occultation

On suit depuis un radiotélescope terrestre le rayonnement émis par une radiosource monochromatique lointaine, supposée immobile par rapport à la Terre, et située dans le plan de l'orbite lunaire. Cette source peut être occultée provisoirement par la Lune (Fig. 5). La durée mesurée de l'occultation est supérieure à la valeur attendue pour une Lune qui ne posséderait pas d'atmosphère. L'écart Δt entre ces deux valeurs vaut 24 secondes. En l'absence d'atmosphère gazeuse, on examine ici l'hypothèse d'une atmosphère dite *ionique*, quoique constituée essentiellement d'électrons. La

figure 6 représente le détail d'une déviation, notée D dans la figure 5.

La courbure du rayon lumineux est attribuée à une variation continue de l'indice n avec l'altitude ; cette variation d'indice, à son tour, est due à une variation de la concentration électronique de l'atmosphère avec l'altitude. On note n_L la valeur de l'indice à la surface de la Lune pour la fréquence d'émission de la radiosource et i l'angle de la tangente au rayon avec la verticale locale. On ne tient pas compte de la courbure du sol lunaire et l'on suppose que, en tout point du rayon, le produit $n \sin(i)$ est constant. On note i_0 l'angle d'incidence du rayon non dévié (Fig. 6).

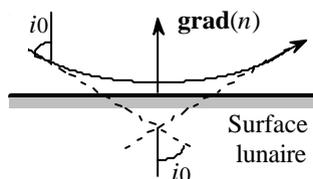


Fig. 6 Détail de la déviation

□ 18* – Justifier, en considérant la courbure du rayon lumineux, que la variation de l'indice avec l'altitude a bien le sens indiqué dans la figure 6. Quelle est, en admettant, (comme indiqué Fig. 6) que le rayon rase la surface lunaire, la relation entre $\sin(i_0)$ et n_L ? Quel phénomène terrestre vous suggère cette déviation lumineuse due à un gradient d'indice ?

□ 19 – Soit $P_{TL} \approx 27,25$ jours la période de révolution de la Lune dans son mouvement circulaire autour de la Terre. Établir la relation $\frac{\Delta t}{P_{TL}} = \frac{2D}{2p}$. Quelle est la signification de l'angle α défini par $\alpha = 2D$? Calculer sa valeur numérique.

□ 20 – Établir la relation $D = 2 \left(\frac{p}{2} - i_0 \right)$ et justifier la relation approchée $n_l \approx 1 - \frac{D^2}{8}$.

□ 21 – Dans le domaine hertzien, l'indice d'une atmosphère ionique, constituée d'électrons de charge $(-e)$, de masse m et de concentration n_e suffisamment faible s'écrit

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}, \text{ où } \epsilon_0 \text{ est la permittivité électrique du vide et où } \omega_p^2 = \frac{n_e e^2}{m \epsilon_0} \text{ est le carré}$$

de la *pulsation de plasma*. Déterminer la valeur numérique de la pulsation de plasma pour la Lune, sachant que la fréquence de la radiosource est $f = 0,5$ GHz .

□ 22 – Pour la Terre, $(\omega_p)_T = 5,65 \times 10^7 \text{ rad.s}^{-1}$ $(n_e)_T = 10^{12} \text{ m}^{-3}$. Déterminer la densité volumique $(n_e)_L$ de l'atmosphère lunaire. On a coutume d'assimiler ces électrons à un gaz parfait ; est-ce légitime ?

□ 23* – Comparer la durée de l'occultation dans le domaine du visible et dans le domaine des ondes radio. Pourquoi utilise-t-on préférentiellement le domaine radio pour étudier l'atmosphère lunaire ?

□ 24* – La relation admise à la question 21 montre que l'indice est inférieur à 1. Si l'on définit la vitesse du rayonnement de la radiosource dans ce milieu par $V(\omega) = \frac{c}{n(\omega)}$ on obtient une vitesse supérieure à c . Que représente V en réalité ?

□ 25 – À partir de la définition de la norme du vecteur d'onde $k(\omega) = \frac{\omega n(\omega)}{c}$ et de l'expression, admise plus haut, $n^2(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ établir l'expression de la vitesse de groupe $V_g(\omega)$ dans ce milieu, en fonction uniquement de c et de $n(\omega)$. Trouver le lien, très simple, entre $V(\omega)$ et $V_g(\omega)$; conclure.

Fin du problème

Données numériques

Soleil

- Rayon $R_S \approx 7 \times 10^5$ km
- Température de surface $T_S \approx 5800$ K

Terre

- Rayon terrestre $R_T \approx 6,38 \times 10^3$ km
- Distance Terre-Soleil $D_{ST} \approx 1,5 \times 10^8$ km
- Masse terrestre $M_T \approx 6 \times 10^{24}$ kg
- Période du mouvement circulaire autour du Soleil $P_{ST} \approx 365,25$ jours

Lune

- Rayon lunaire $R_L = 1740$ km
- Masse lunaire $M_L = 7,4 \times 10^{22}$ kg
- Distance Terre-Lune $D_{LT} \approx 3,84 \times 10^5$ km
- Période du mouvement circulaire autour de la Terre $P_{TL} \approx 27,25$ jours (en restant dans le plan de l'orbite terrestre)
- Période de rotation propre de la Lune $P_L = P_{TL} \approx 27,25$ jours . La Lune présente ainsi toujours la même face à la Terre.

Silicates

- Densité $d_{sil} \approx 2,51$
- Conductivité thermique $K_{sil} = 1,11 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Chaleur spécifique $c_{sile} = 860 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Ordre de grandeur du rayon $R_{sil} \approx 100 \text{ }\mu\text{m}$
- Température de fusion du silicate $T_f = 1500$ K
- Chaleur latente de fusion $L_f = 130 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Constantes physiques

- Célérité de la lumière dans le vide $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Constante de la gravitation $G \approx 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$
- Constante de Planck $h \approx 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ $\left(\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 10^{-34} \text{ J.s} \right)$
- Constante de Boltzmann $k_B \approx 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
- Charge électrique élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Masse de l'électron $m_e \approx 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- Nombre d'Avogadro $N \approx 6,02 \times 10^{23}$
- Permittivité du vide $\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits $R = Nk_B \approx 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$