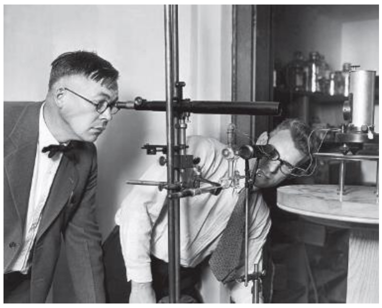
Bac Spécialité physique chimie Asie 2021 Correction © https://labolycee.org
EXERCICE C : PUISSANCE RAYONNÉE PAR LA LUNE (5 points)

Mots-clés : lunette astronomique ; évolution de la température d'un système

En 1939, les physiciens Pettit et Nicholson ont étudié la température de surface de la Lune à partir de la mesure de la puissance émise par la Lune lors de l'éclipse lunaire du 28 octobre 1939.
Cet exercice décrit une expérience menée au laboratoire pour déterminer la puissance lumineuse surfacique au niveau de la surface de la Terre lors d'une pleine Lune.

On s'intéresse d'abord à un dispositif de détection qui permet de capter la lumière issue de la Lune, puis on étudie un capteur thermique afin de déterminer la puissance lumineuse surfacique rayonnée lors d'une pleine Lune sur le sol terrestre.



Pettit & Nicholson 1926
(Archives Underwood)

1. Dispositif optique de détection

Pour déterminer la puissance émise par la Lune, Edison Pettit a placé un capteur de température au foyer du télescope du Mont Wilson.
On reproduit l'expérience de Pettit au laboratoire en utilisant une lunette afocale. La lumière diffusée par la Lune est ainsi concentrée sur un capteur de température fixé au foyer image de l'objectif de la lunette.
L'objectif de la lunette est modélisé par une lentille convergente de distance focale f_1' = 101 cm, l'oculaire est modélisé par une lentille convergente de distance focale f_2'.
Le capteur de température se présente sous la forme d'un petit carré noir de 0,8 mm de côté.

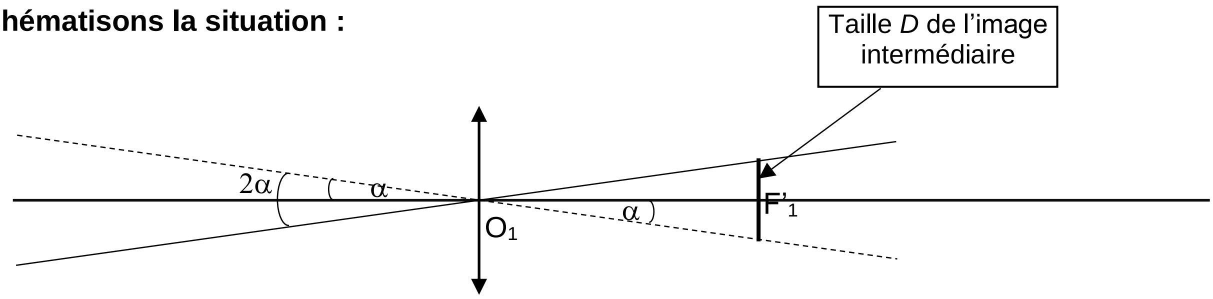
1.1. Énoncer la condition sur les positions du foyer image de l'objectif et du foyer objet de l'oculaire pour que la lunette soit afocale.
Une lunette afocale donne d'un objet à l'infini une image à l'infini. Pour cela, le foyer image F'_1 de l'objectif doit être confondu avec le foyer objet F_2 de l'oculaire.

1.2. Préciser sur le schéma de la lunette afocale, en **ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE,** la position du capteur de température.
Le capteur de température doit être centré sur le foyer image F'_1 de l'objectif.
F'_1 est le symétrique du foyer objet F_1 de l'objectif par rapport au centre optique O_1.

1.3. Représenter sur ce même schéma, en **ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE,** le faisceau émergent issu d'une région d'un astre lointain incliné d'un angle *α* par rapport à l'axe optique et traversant la lunette afocale.
Le rayon (2) en pointillés issu d'un point B de l'astre lointain et passant par le centre optique O_1 n'est pas dévié. Ce rayon coupe le plan focal image de l'objectif passant par F'_1 et perpendiculaire à l'axe optique, en un point B_1.
Les rayons (1) et (3) issus du même point B de l'astre lointain convergent vers le point B_1 après avoir traversé la lentille objectif.
F'_2 est le symétrique du foyer objet F_2 de l'oculaire par rapport au centre optique O_2.
Un rayon issu du point B_1 et parallèle à l'axe optique émerge de l'oculaire en passant par F'_2.
Les rayons (1) et (3) émergent de la lentille oculaire parallèles au rayon issu de B_1 et passant par O_2.

1.4. La « Mer » de la Tranquillité est une vaste plaine circulaire facilement repérable sur la Lune. L'axe de la lunette est pointé sur le centre de la « Mer » de la Tranquillité. L'angle sous lequel on voit cette région à l'œil nu depuis la Terre est $2\alpha = 2{,}3\times10^{-3}$ rad.
Pour optimiser la mesure, le capteur de température doit être au moins éclairé par l'image de la zone étudiée.
Déterminer si la taille de l'image intermédiaire permet une mesure optimale.

Schématisons la situation :



Pour de petits angles exprimés en radian : tan$\alpha \approx \alpha$

On a : $\tan\alpha = \dfrac{D/2}{O_1F_1'} = \dfrac{D}{2\times O_1F_1'} = \dfrac{D}{2\times f_1'}$.

En égalant les deux expressions : $\alpha = \dfrac{D}{2\times f_1'}$ soit $D = 2\times\alpha\times f_1'$

En laissant f'_1 en cm : $D = 2{,}3\times10^{-3}\times101 = 0{,}23$ cm = 2,3 mm.
La taille de l'image intermédiaire est supérieure à la taille du capteur qui est un carré de 0,8 mm de côté. La taille de l'image intermédiaire permet donc une mesure optimale.

2. Étude du capteur de température exposé au rayonnement du Soleil

On étudie maintenant un capteur de température de type « thermocouple » de capacité thermique C. La température indiquée par ce capteur peut être reliée à la puissance rayonnée qu'il reçoit.

Pour déterminer la résistance thermique R_{th} liée au transfert thermique entre le milieu extérieur et le capteur, on étudie le comportement au cours du temps du capteur exposé directement au rayonnement solaire (sans utiliser la lunette étudiée précédemment).

La température du milieu extérieur dans lequel se trouve le capteur est supposée constante et notée T_0 pendant toute la durée de l'expérience.

- L'étude est conduite entre t et $t + \Delta t$, Δt est supposé petit devant la durée typique de l'évolution de la température du thermocouple.
- À l'état initial t = 0 s, le capteur est dans l'obscurité et à l'équilibre thermique : sa température est égale à T_0.
- À t > 0 s, on expose le capteur à la lumière du Soleil ce qui fait augmenter sa température T. On note P_{lum} la puissance lumineuse reçue par le capteur, elle est supposée constante.

Il se produit alors un transfert thermique du capteur de température T vers le milieu extérieur de température T_0.
Dans la suite de l'exercice, le capteur est choisi comme système.

2.1. La puissance thermique échangée avec le milieu extérieur par le système a pour expression :

$$P_{th} = \frac{T_0 - T}{R_{th}}$$

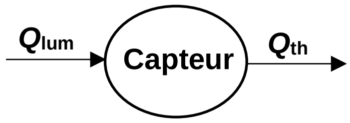
Commenter le signe de cette puissance.
Un transfert thermique a lieu du capteur de température T vers le milieu extérieur de température T_0. Ce transfert thermique se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid donc $T > T_0$.

Par conséquent comme R_{th} est positif $P_{th} = \dfrac{T_0 - T}{R_{th}}$ est négatif.

Le capteur thermique libère donc de la puissance thermique vers le milieu extérieur.

2.2. Exprimer la variation d'énergie interne du capteur ΔU en fonction de sa capacité thermique et de la variation ΔT de sa température au cours du temps Δt.
$\Delta U = C \,.\, \Delta T$

2.3. Relier la variation d'énergie interne ΔU du capteur à la puissance thermique P_{th} et à la puissance lumineuse reçue P_{lum} pendant une durée Δt.
Le capteur reçoit un transfert thermique par rayonnement Q_{lum} et libère un transfert thermique Q_{th}.



Le premier principe appliqué au capteur donne : $\Delta U = Q_{th} + Q_{lum}$

Avec : $P_{th} = \dfrac{Q}{\Delta t}$ et $P_{lum} = \dfrac{Q_{lum}}{\Delta t}$

En reportant ces deux expressions : $\Delta U = P_{th}.\Delta t + P_{lum}.\Delta t$

$$\Delta U = (P_{th} + P_{lum}).\Delta t$$

2.4. En déduire pour des durées Δt tendant vers 0 que la température $T(t)$ du capteur de température vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T(t)}{R_{th} \times C} = \frac{T_0}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C}$$

En égalant les deux expressions de ΔU :

$C \,.\, \Delta T = (P_{th} + P_{lum}).\Delta t$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_{th}}{C} + \frac{P_{lum}}{C}$$

En faisant tendre Δt vers zéro : $\lim\limits_{\Delta t \to 0}\left(\dfrac{\Delta T}{\Delta t}\right) = \dfrac{dT}{dt}$ et en reportant l'expression $P_{th} = \dfrac{T_0 - T}{R_{th}}$ il vient :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(T_0 - T)}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_0}{R_{th} \times C} - \frac{T}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C}$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_{th} \times C} = \frac{T_0}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C}$$

2.5. Lorsque la température finale est atteinte par le capteur au bout d'une durée suffisamment longue, l'expression de la puissance lumineuse est $P_{lum} = \dfrac{(T_\infty - T_0)}{R_{th}}$ avec T_∞ la température finale atteinte par le capteur.
Retrouver cette expression à partir de l'équation différentielle de la question **2.4.**
Au bout d'une durée suffisamment longue, la température du capteur est constante et vaut T_∞.

Ainsi $\dfrac{dT_\infty}{dt} = 0$ et l'équation différentielle de la question 2.4 devient :

$$\frac{dT_\infty}{dt} + \frac{T_\infty}{R_{th} \times C} = \frac{T_0}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C} \quad \textbf{soit} \quad \frac{T_\infty}{R_{th} \times C} = \frac{T_0}{R_{th} \times C} + \frac{P_{lum}}{C} \Leftrightarrow \frac{T_\infty}{R_{th}} = \frac{T_0}{R_{th}} + P_{lum}$$

$P_{lum} = \dfrac{T_\infty}{R_{th}} - \dfrac{T_0}{R_{th}}$ **et finalement : $P_{lum} = \dfrac{T_\infty - T_0}{R_{th}}$.**

On admet que l'étude expérimentale permet de déterminer la valeur de la résistance thermique :
$R_{th} = 3 \times 10^4$ K.W^{-1}

3. Mesure de la puissance surfacique au niveau du sol terrestre lors d'une pleine Lune

Pour déterminer la puissance surfacique φ_{lune} au niveau du sol terrestre lors d'une pleine Lune, on place ce capteur au foyer image de l'objectif d'une lunette.
La puissance P_{lum} reçue par le capteur est amplifiée d'un facteur 500 par la lunette utilisée.
On relève la température du capteur au cours du temps. La température se stabilise au bout de 250 s et on mesure alors $T_\infty - T_0 = 4{,}2\times10^{-2}$ K.

Question : sachant que la surface exposée du capteur utilisé lors de l'expérience est $S = 5{,}0\times10^{-7}$ m^2, évaluer la puissance surfacique φ_{lune} au niveau du sol terrestre.
Comparer ensuite la valeur expérimentale à la puissance surfacique moyenne obtenue au niveau du sol terrestre lors d'une pleine Lune : $\varphi_{lune} = 5$ mW·m^{-2}.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

La puissance surfacique φ_{lune} au niveau du sol terrestre s'écrit :

$$\varphi_{lune} = \frac{P'_{lum}}{S} = \frac{P_{lum}}{500\times S}$$

car la puissance P_{lum} reçue par le capteur est amplifiée d'un facteur 500 par la lunette utilisée.
En reportant l'expression de $P_{lum} = \frac{T_\infty - T_0}{R_{th}}$:

$$\varphi_{lune} = \frac{(T_\infty - T_0)}{500\times S\times R_{th}}$$

$\varphi_{lune} = \frac{4{,}2\times10^{-2}}{500\times5{,}0\times10^{-7}\times3\times10^{4}}$ **= 5,6×10^{-3} W·m^{-2} ≈ 6×10^{-3} W·m^{-2} = 6 mW·m^{-2}.**
On retrouve bien l'ordre de grandeur de la puissance surfacique moyenne obtenue au niveau du sol terrestre lors d'une pleine Lune soit $\varphi_{lune} = 5$ mW·m^{-2}.

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE