Parker Solar Probe

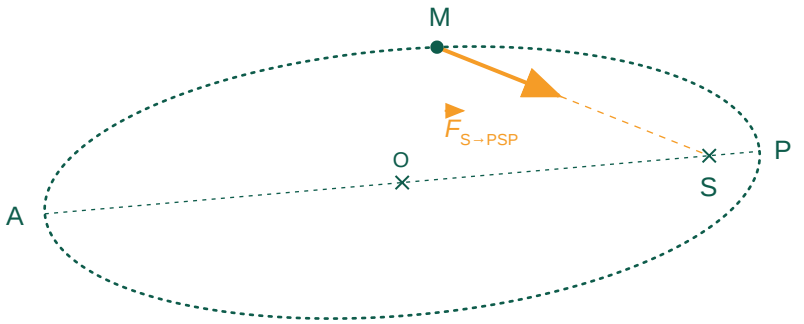
Bac 2021 Asie Sujet 1 · Exercice 1 **10 points** **Durée conseillée 1 h 45**

1.1 Représenter sur la figure 7 de l'annexe, sans souci d'échelle, la force d'attraction gravitationnelle $\overrightarrow{F}_{S\to PSP}$ exercée par le Soleil sur la sonde lorsqu'elle est au point M.

La force gravitationnelle est attractive : elle s'applique en M, sa direction est la droite (MS) et elle est orientée de M vers S.

$\overrightarrow{F}_{S\to PSP}$: flèche d'origine M, portée par (MS), dirigée vers le centre S du Soleil (voir la figure).

PIÈGE
Diriger la flèche vers le centre O de l'ellipse. Le Soleil occupe un foyer de l'ellipse, pas son centre : la force pointe vers S.



1.1 · Figure 7 de l'annexe complétée : la force est tracée en orange

1.2 En utilisant la deuxième loi de Kepler, comparer la vitesse v_P de la sonde au périhélie P à sa vitesse v_A à l'aphélie A.

Deuxième loi de Kepler (loi des aires) : le segment [SM] reliant le Soleil à la sonde balaie des aires égales pendant des durées égales.

Près de P, la sonde est proche du Soleil : le segment [SM] est court. Près de A, il est long. Pour balayer la même aire pendant la même durée Δt, la sonde doit parcourir un arc de trajectoire plus long au voisinage de P qu'au voisinage de A.

La vitesse étant la distance parcourue divisée par Δt :

$v_P > v_A$: la sonde est plus rapide au périhélie qu'à l'aphélie.

MÉTHODE
Pour comparer deux vitesses avec la loi des aires : même durée, donc même aire ; rayon court, donc arc long ; arc long, donc vitesse grande. La vitesse est maximale au point le plus proche de l'astre attracteur.

2.1 À l'aide de la deuxième loi de Newton, montrer que, pour une trajectoire circulaire, la vitesse v de la sonde est constante et vaut $v = \sqrt{\dfrac{G\,M_S}{r}}$.

Système {sonde PSP}, de masse m constante ; référentiel héliocentrique supposé galiléen ; seule force : l'attraction du Soleil, dirigée vers S, soit $\overrightarrow{F}_{S\to PSP} = \dfrac{G\,m\,M_S}{r^2}\,\vec{n}$.

Deuxième loi de Newton : $\sum \overrightarrow{F}_{\text{ext}} = m\,\vec{a}$, soit $\dfrac{G\,m\,M_S}{r^2}\,\vec{n} = m\,\vec{a}$, donc

$$\vec{a} = \frac{G\,M_S}{r^2}\,\vec{n} + 0\,\vec{t}$$

Or, dans le repère de Frenet, pour un mouvement circulaire de rayon r : $\vec{a} = \dfrac{v^2}{r}\,\vec{n} + \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\,\vec{t}$.

Par identification selon $\vec{t}$: $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 0$, donc la vitesse v est constante.

Par identification selon $\vec{n}$: $\dfrac{v^2}{r} = \dfrac{G\,M_S}{r^2}$, soit $v^2 = \dfrac{G\,M_S}{r}$.

$v = \sqrt{\dfrac{G\,M_S}{r}}$ et $\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 0$: le mouvement circulaire est uniforme.

PIÈGE
Oublier le système et le référentiel, ou affirmer « $\vec{a}$ est constant ». Le vecteur accélération tourne avec la sonde : c'est sa composante nulle selon $\vec{t}$ qui prouve que v ne varie pas.

COMPRENDRE
La masse m de la sonde se simplifie : la vitesse sur une orbite circulaire ne dépend que de l'astre attracteur et du rayon.

2.2 Calculer la valeur v de la vitesse de la sonde dans le cadre du modèle circulaire.

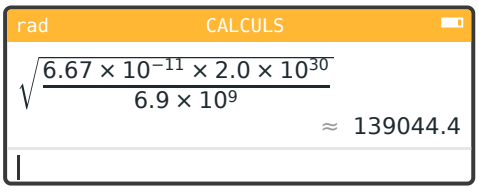
Données utiles $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$; $M_S = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg ; $r = 6{,}9 \times 10^{6}$ km

Conversion : $r = 6{,}9 \times 10^{6}\ \mathrm{km} = 6{,}9 \times 10^{9}\ \mathrm{m}$.

$$v = \sqrt{\frac{G\,M_S}{r}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 2{,}0 \times 10^{30}}{6{,}9 \times 10^{9}}} = 1{,}4 \times 10^{5}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

$v = 1{,}4 \times 10^{5}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} = 1{,}4 \times 10^{2}\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

À LA CALCULATRICE



PIÈGE
Laisser r en kilomètres : G est en unités SI, le rayon doit être en mètres. Sans la conversion, on trouve une vitesse environ 30 fois trop grande.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme M_S et r, les données les moins précises. La calculatrice affiche $139\,044$: on garde cette valeur pour la suite et on n'arrondit que le résultat écrit.

2.3 Conclure : la vitesse prévue par la NASA au point P a-t-elle été déterminée avec le modèle du mouvement circulaire ?

Données utiles $v_P = 192\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$, incertitude-type $u(v_P) = 5\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$; $v = 139\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ (2.2)

On compare l'écart entre les deux valeurs à l'incertitude-type :

$$\frac{|v_P - v|}{u(v_P)} = \frac{192 - 139}{5} \approx 11$$

L'écart représente une dizaine d'incertitudes-types, bien plus que 2 : les deux valeurs ne sont pas compatibles.

La valeur $192\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ n'a pas été obtenue avec le modèle circulaire : la NASA a utilisé un autre modèle (l'orbite elliptique).

COMPRENDRE
Cohérent avec la question 1.2 : sur l'ellipse, la sonde va plus vite en P que sur un cercle de même rayon.

MÉTHODE
Pour comparer une valeur calculée à une valeur de référence, calculer le quotient de l'écart par l'incertitude-type. Jusqu'à 2 environ, les valeurs sont compatibles ; au-delà, le modèle est à remettre en cause.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{192 - 139}{5}$

≈ 10.6

3 En utilisant la troisième loi de Kepler et les résultats du programme Python, déterminer la période de révolution T de la sonde autour du Soleil.

Données utiles $k = 3{,}983 \times 10^{-20}$ j$^2 \cdot$ km^{-3} (affichage du programme) ; $a = 58\,210 \times 10^3$ km

Troisième loi de Kepler : pour tous les objets en orbite autour du Soleil, le quotient $\frac{T^2}{a^3}$ a la même valeur.

Le programme modélise `T2` **en fonction de** `a` 3 par une fonction linéaire pour les huit planètes : $T^2 = k\,a^3$, avec T en jours et a en kilomètres. Cette relation vaut aussi pour la sonde, qui tourne autour du même astre :

$$T = \sqrt{k\,a^3} = \sqrt{3{,}983 \times 10^{-20} \times (5{,}8210 \times 10^7)^3} = 88{,}64 \text{ j}$$

$T = 88{,}64$ j, soit environ 89 jours.

PIÈGE
Le tableau donne a en milliers de kilomètres : $a = 5{,}8210 \times 10^7$ km. Inutile de convertir en mètres ou en secondes, k est exprimé en j$^2 \cdot$ km^{-3}.

COMPRENDRE
Vérification rapide : le demi-grand axe de la sonde est très proche de celui de Mercure ($57\,909 \times 10^3$ km), sa période aussi (87,96 j).

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\sqrt{3.983462498 \times 10^{-20} \times (5.8210 \times 10^7)^3}$

≈ 88.63939

4 Montrer que les radiateurs, de puissance maximale $P_{d,\max} = 6000$ W, peuvent dissiper la puissance thermique cédée par les panneaux à l'eau sous pression.

Données utiles $P_{\text{él}} = 340$ W ; $P_{th} = 13\,P_{\text{él}}$ bouclier bien orienté ; 35 % de plus pour une erreur d'inclinaison de 1°

Bouclier parfaitement orienté : $P_{th} = 13 \times P_{\text{él}} = 13 \times 340 = 4420$ W.

Avec une erreur d'inclinaison de 1° (cas critique), la puissance à évacuer augmente de 35 % :

$$P'_{th} = 1{,}35 \times P_{th} = 1{,}35 \times 13 \times 340 = 5{,}97 \times 10^3 \text{ W}$$

$P'_{th} = 5{,}97 \times 10^3$ W $< P_{d,\max} = 6000$ W : les radiateurs peuvent dissiper cette puissance, avec très peu de marge.

PIÈGE
Une hausse de 35 % se traduit par un facteur 1,35, pas 0,35. Et « 13 fois supérieure » signifie ici $13 \times P_{\text{él}}$.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$1.35 \times 13 \times 340$

≈ 5967

5 Donner l'expression de l'énergie thermique Q_R reçue par l'eau en fonction de $P_{th,\max}$ et Δt.

Une puissance est une énergie transférée par unité de temps.

$Q_R = P_{th,\max} \times \Delta t$, avec Q_R en joules, $P_{th,\max}$ en watts et Δt en secondes.

6 Déterminer la température $T_{\max}$ atteinte par l'eau et dire si le système de refroidissement risque ou non l'explosion.

Données utiles $P_{th,\max} = 6000$ W ; $\Delta t = 110$ h ; $V_{\text{eau}} = 7570$ L ; $\rho_{\text{eau}} = 0{,}958$ kg · L^{-1} ; $c_{\text{eau}} = 4185$ J · K^{-1} · kg^{-1} ; $T_{\min} = 50$ °C ; $T_{\text{éb}} = 150$ °C sous 5,0 bar

Durée en secondes : $\Delta t = 110 \times 3600 = 3{,}96 \times 10^5$ s.

Énergie reçue par l'eau (Q5) : $Q_R = P_{th,\max} \times \Delta t = 6000 \times 3{,}96 \times 10^5 = 2{,}38 \times 10^9$ J.

Masse d'eau : $m = \rho_{\text{eau}} \times V_{\text{eau}} = 0{,}958 \times 7570 = 7{,}25 \times 10^3$ kg.

L'eau reste liquide et toute l'énergie reçue sert à l'échauffer : $Q_R = m\, c_{\text{eau}}\, (T_{\max} - T_{\min})$, d'où

$$T_{\max} - T_{\min} = \frac{Q_R}{m\, c_{\text{eau}}} = \frac{2{,}376 \times 10^9}{7252 \times 4185} = 78\ ^\circ\text{C}$$

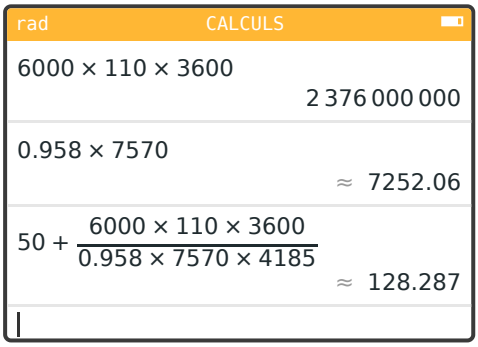
$T_{\max} = 50 + 78 = 128$ °C.

$T_{\max} = 128\ ^\circ\text{C} < T_{\text{éb}} = 150$ °C : l'eau ne bout pas, le circuit ne risque pas l'explosion.

PIÈGE
Laisser Δt en heures : des watts multipliés par des heures ne donnent pas des joules. La masse volumique est en kg · L^{-1} et le volume en litres : aucune conversion de ce côté.

COMPRENDRE
Un écart de température a la même valeur en kelvins et en degrés Celsius : on ajoute directement 78 à 50 °C. Si l'eau bouillait, la vapeur ferait monter brutalement la pression dans le circuit.

À LA CALCULATRICE



7 Caractériser le mode de transfert thermique entre le Soleil et la sonde.

Entre le Soleil et la sonde, l'espace est pratiquement vide : il n'y a pas de milieu matériel, donc ni conduction ni convection.

Le transfert thermique se fait par **rayonnement** (ondes électromagnétiques), seul mode possible dans le vide.

8 Justifier l'utilisation de la mousse de carbone à l'intérieur du bouclier thermique.

Données utiles conductivités thermiques en W · m^{-1} · K^{-1} : mousse de carbone 0,0262 ; PVC 0,17 ; alumine 37 ; métaux 20 à 400

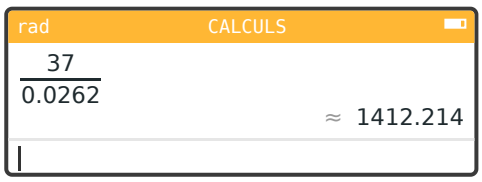
La mousse de carbone a la plus faible conductivité thermique du tableau : $0{,}0262$ W · m^{-1} · K^{-1}, environ 1400 fois moins que l'alumine.

Comme $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda\, S}$, une conductivité faible donne une résistance thermique élevée : pour un même écart de température, le flux thermique qui traverse le bouclier est faible.

La mousse de carbone est un très bon **isolant thermique** : elle limite le transfert par conduction vers l'arrière du bouclier.

COMPRENDRE
La mousse contient 97 % d'air emprisonné (figure 5) : c'est ce qui la rend isolante, et aussi très légère, un atout pour un engin spatial.

À LA CALCULATRICE



9 Déterminer la valeur du flux thermique total Φ vers l'arrière.

Données utiles $\varphi_{ar} = 1{,}55\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$; $S_b = 16{,}6\ \text{m}^2$

Le flux surfacique est le flux par unité de surface : le flux total à travers la surface S_b est

$$\Phi = \varphi_{ar} \times S_b = 1{,}55 \times 10^3 \times 16{,}6 = 2{,}57 \times 10^4\ \text{W}$$

$$\boxed{\Phi = 2{,}57 \times 10^4\ \text{W} = 25{,}7\ \text{kW}}$$

PIÈGE
Diviser par la surface au lieu de multiplier. Les unités tranchent : des $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ multipliés par des m^2 donnent des watts.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$1.55 \times 10^3 \times 16.6$

$\approx$ 25730

10 Déterminer l'écart de température $|\Delta T|$ entre les deux faces du bouclier thermique, puis la température T_{ar} à l'arrière du bouclier. Commenter.

Données utiles $\Phi = 2{,}573 \times 10^4$ W (Q9) ; $e = 11{,}4$ cm ; $\lambda = 0{,}140\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $S_b = 16{,}6\ \text{m}^2$; $T_{av} = 1700$ K

Résistance thermique du bouclier, avec $e = 0{,}114$ m : $R_{th} = \dfrac{e}{\lambda\, S_b} = \dfrac{0{,}114}{0{,}140 \times 16{,}6} = 4{,}91 \times 10^{-2}\ \text{K}\cdot\text{W}^{-1}$.

Écart de température : $\Phi = \dfrac{|\Delta T|}{R_{th}}$, donc

$$|\Delta T| = \Phi \times R_{th} = \frac{\Phi\, e}{\lambda\, S_b} = \frac{2{,}573 \times 10^4 \times 0{,}114}{0{,}140 \times 16{,}6} = 1{,}26 \times 10^3\ \text{K}$$

La face avant est la plus chaude : $T_{ar} = T_{av} - |\Delta T| = 1700 - 1262 = 438$ K, soit $438 - 273 = 165$ °C.

Commentaire : le bouclier fait chuter la température de près de 1300 K sur une épaisseur de 11,4 cm seulement. À l'arrière, 165 °C reste une température modérée comparée aux 1700 K de la face avant : les instruments, placés dans l'ombre du bouclier, sont protégés.

$$\boxed{|\Delta T| = 1{,}26 \times 10^3\ \text{K} \text{ et } T_{ar} = 438\ \text{K} \approx 165\ °\text{C}}$$

PIÈGE
Laisser l'épaisseur en centimètres ou le flux en kilowatts : il faut $e = 0{,}114$ m et Φ en watts. Ne pas confondre non plus l'écart $|\Delta T|$ avec la température arrière.

MÉTHODE
Paroi traversée par un flux : calculer R_{th}, puis $|\Delta T| = \Phi\, R_{th}$, puis retrancher l'écart à la température de la face chaude. La surface se simplifie : $|\Delta T| = \varphi_{ar}\, e/\lambda$.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\dfrac{0.114}{0.140 \times 16.6}$

$\approx$ 0.04905336

$\dfrac{2.573 \times 10^4 \times 0.114}{0.140 \times 16.6}$

$\approx$ 1262.143

$1700 - 1262$

438