

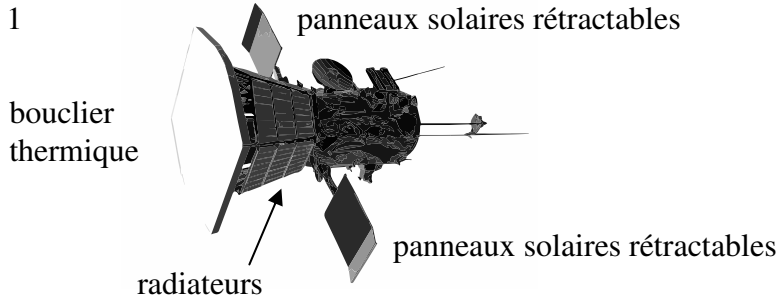
**Parker solar probe**

Le 12 août 2018, la NASA, l'agence spatiale américaine, a lancé en direction du Soleil une sonde spatiale, PSP (Parker Solar Probe), dont la mission est d'étudier la couronne solaire.

La sonde PSP doit relever de nombreux défis, notamment :

- atteindre une orbite permettant d'approcher le Soleil de très près ;
- protéger les instruments de mesure des rayonnements intenses.

figure 1



les instruments de mesure fixés sur le corps de la sonde restent dans le cône d'ombre produit par le bouclier thermique

Les caractéristiques orbitales de la sonde (partie 1)

Depuis son lancement le 12 août 2018, la sonde PSP subit des modifications successives de son orbite autour du Soleil du fait de l'assistance gravitationnelle de la planète Vénus. Elle rejoint ainsi progressivement son orbite optimale qui lui permettra de passer au plus près du Soleil début 2025. La sonde effectuera alors quatre passages au périhélie P et pourra enregistrer un maximum de données expérimentales (figure 2 et figure 7 ci-dessous).

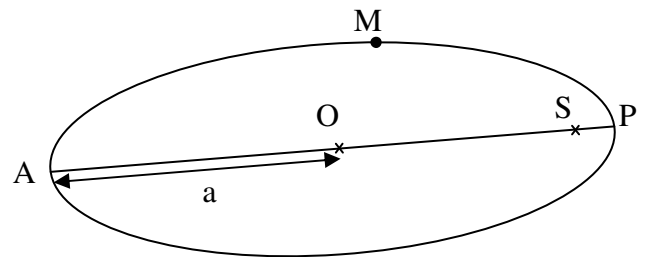
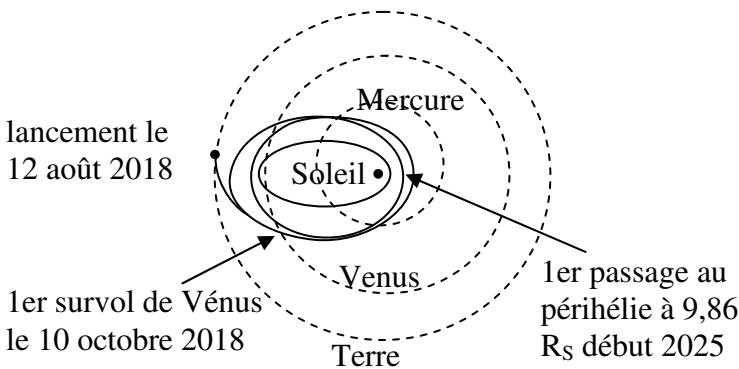


figure 7

orbite elliptique de la sonde PSP en 2025

figure 2 parcours de la sonde PSP

Données

- masse du Soleil :  $M_S = 2,0 \cdot 10^{30}$  kg
- constante gravitationnelle :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>

- 1 Sur la figure 7, on a représenté l'orbite elliptique que la sonde PSP décrira autour du Soleil en 2025. Les points A et P sont respectivement l'aphélie et le périhélie. Le point S représente le centre du Soleil.
  - 1.1 Représenter sur la figure 7 sans souci d'échelle, la force d'attraction gravitationnelle, notée  $\vec{F}_{S/PSP}$  modélisant l'action exercée par le Soleil sur la sonde PSP lorsqu'elle est au point M.
  - 1.2 En utilisant la 2ème loi de Kepler, comparer la valeur  $v_P$  de la vitesse de la sonde au point P à la valeur  $v_A$  de la vitesse de la sonde au point A.
- 2 La NASA prévoit que la valeur  $v_P$  de la vitesse de la sonde au point P sera de 192 km.s<sup>-1</sup> avec une

incertitude-type de l'ordre de  $5 \text{ km.s}^{-1}$ .

On souhaite savoir si cette valeur de la vitesse a été déterminée à l'aide du modèle du mouvement circulaire pour la sonde PSP sur son orbite autour du soleil ou si un autre modèle a été utilisé. On se propose donc de déterminer la valeur  $v$  de la vitesse de la sonde PSP en supposant que son mouvement est circulaire, de rayon  $r = SP = 6,9.10^6 \text{ km}$ , afin de la comparer à celle prévue par la NASA (figure 3). Le référentiel héliocentrique est considéré comme galiléen.

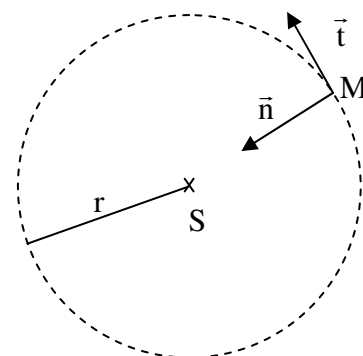


figure 3  
modèle du mouvement circulaire de la sonde PSP et repère de Frenet

- 2.1 A l'aide de la 2e loi de Newton, montrer que, dans le cas d'une trajectoire circulaire, la vitesse  $v$  de la sonde PSP est constante et a pour expression :

$$v = \sqrt{\frac{G * M_S}{r}}$$

avec  $M_S$  la masse du Soleil et  $r$  le rayon de la trajectoire circulaire.

- 2.2 Calculer la valeur  $v$  de la vitesse de la sonde PSP dans le cadre de ce modèle.  
2.3 Apporter une conclusion à la problématique posée dans cette question 2.

La 3ème loi de Kepler lie le demi-grand axe orbital et la période de révolution des systèmes (planète, sonde) en orbite autour du Soleil. On peut ainsi déterminer la période de révolution de la sonde PSP autour du Soleil à partir de la mesure du demi-grand axe de sa trajectoire elliptique.

- 3 En utilisant la 3ème loi de Kepler et après analyse du programme Python figurant ci-après et de ses résultats, déterminer la période de révolution  $T$  de la sonde PSP autour du Soleil.

caractéristiques des orbites des planètes et de la sonde PSP autour du soleil

planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Sonde PSP
demi-grand axe orbital (* $10^3 \text{ km}$ )	57909,23	108209,5	149597,8875	227944	778340	1426700	2870700	4498400	$a = 58210$
période de révolution (jour)	87,95565	224,667	365,2564	686,885	4332,01	10754	30698	60216,8	$T$

Le programme Python ci-dessous a été écrit à partir des caractéristiques des orbites des planètes.

```

1 import numpy as np
2 import statsmodels.api as sm
3
4 # Périodes T (en j)
5 T = np.array([ 87.95565, 224.667, 365.256363, 686.885, 4332.01,
6 10754, 30698, 60216.8 ])
7
8 # Demi-grands axes a (en km)
9 a = np.array([ 57909230, 108209500, 149597887.5, 227944000,
10 778340000, 1426700000, 2870700000, 4498400000 ])
11
12 # sm.OLS(y, x) définit un modèle linéaire de la forme y = kx
13 model = sm.OLS(T**2, a**3)

```

```

14
15 # model.fit() calcule le coefficient k
16 results = model.fit()
17
18 print("--- Résultats de la modélisation ---\n")
19
20 # Affiche la valeur du coefficient k
21 print(" k=", results.params[0], (" j**2 * km**-3"))

```

Affichage des résultats du programme à l'écran :

```

--- Résultats de la modélisation ---
k = 3.983462498345611e-20 j**2 * km**-3      (remarque : la notation e-20 signifie 10-20)

```

### Les panneaux photovoltaïques (partie 2)

Durant la mission, les panneaux photovoltaïques de la sonde PSP servent à fournir l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des instruments de mesure embarqués. Ils permettent d'obtenir une puissance électrique utile  $P_{el} = 340 \text{ W}$ .

En 2025, au plus près du Soleil, ils devront être refroidis. Une puissance thermique  $P_{th}$  devra alors être évacuée grâce à de l'eau sous pression circulant entre les panneaux photovoltaïques et des radiateurs (figure 4). Lorsque le bouclier sera parfaitement orienté vers le Soleil, la puissance thermique à évacuer  $P_{th}$  sera 13 fois supérieure à la puissance électrique utile ; une erreur d'inclinaison du bouclier thermique de  $1^\circ$  entrainera une puissance thermique supplémentaire à dissiper de 35%.

Dans les questions suivantes, on se place dans le cas critique d'une erreur de  $1^\circ$  d'inclinaison du bouclier thermique.

### Données

- masse volumique de l'eau liquide dans les conditions de pression et de température de la sonde PSP :  $\rho \text{ (eau)} = 0,958 \text{ kg.L}^{-1}$
- durée du passage à proximité du Soleil :  $\Delta t = 110 \text{ h}$
- pression de l'eau dans le circuit : 5 bar
- température d'ébullition de l'eau sous 5,0 bar :  $T_{éb} = 150^\circ\text{C}$
- capacité thermique massique de l'eau :  $C \text{ (eau)} = 4\,185 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

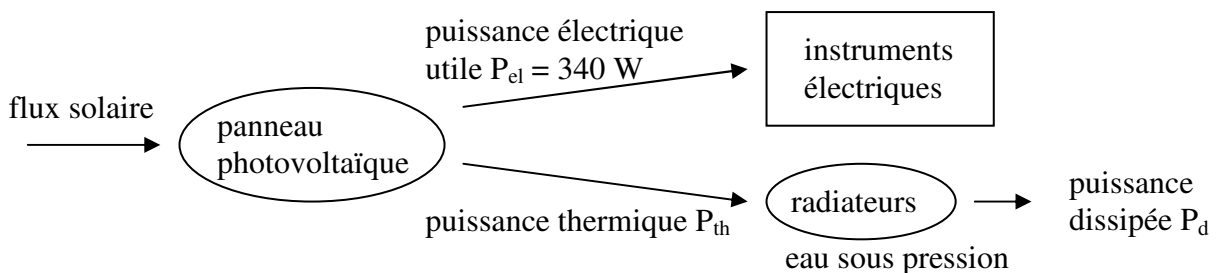


figure 4 diagramme énergétique de l'alimentation électrique de la sonde PSP

4 Sachant que les radiateurs peuvent dissiper une puissance maximale  $P_{d \max} = 6000 \text{ W}$ , montrer que ces radiateurs peuvent effectivement dissiper la puissance thermique cédée par les panneaux photovoltaïques à l'eau sous pression.

Pendant la durée  $\Delta t$  du passage à proximité du Soleil, l'équivalent d'un volume d'eau  $V_{\text{eau}} = 7\,570 \text{ L}$  va circuler pour refroidir les panneaux solaires. La température de ce volume d'eau va passer de la valeur  $T_{\min} = 50^\circ\text{C}$  à une valeur maximale  $T_{\max}$  que l'on cherche à déterminer.

On considère ici que la puissance thermique reçue par ce volume d'eau est  $P_{th\ max} = 6\ 000\ W$ .

5 Donner l'expression de l'énergie thermique  $Q_R$  reçue par l'eau en fonction de  $P_{th\ max}$  et  $\Delta t$ .

6 En supposant que l'élévation de température du volume total d'eau est uniquement due aux panneaux solaires, déterminer la température  $T_{max}$  atteinte et déterminer si le système de refroidissement risque ou non l'explosion.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à exposer sa démarche même si elle n'est pas complètement aboutie.

### Le bouclier thermique (partie 3)

La sonde PSP est protégée des rayonnements solaires par un bouclier thermique de surface  $S_b$  et d'épaisseur  $e$  (figures 1 et 5). Constamment tourné vers le Soleil, ce bouclier thermique permet de garder l'ensemble du corps de la sonde à une température convenable pour ne pas endommager les instruments embarqués.

Le bouclier thermique est composé d'un revêtement externe à base d'alumine, capable d'endurer de hautes températures jusqu'à 1 900 K. Derrière ce revêtement, se trouve de la mousse de carbone, prise entre deux couches rigides en fibre de carbone, très résistantes à la température et à la déformation (figure 5).

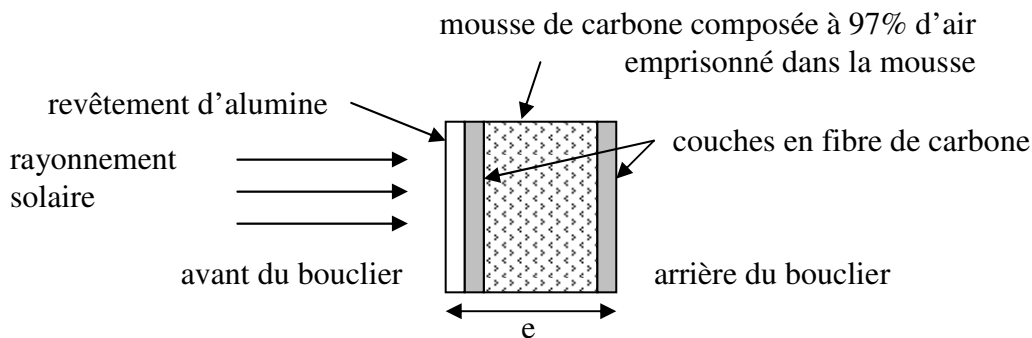


figure 5  
schéma simplifié du bouclier thermique vu en coupe

Soumis à l'intense rayonnement du Soleil, la température à l'avant du bouclier atteint une valeur  $T_{av} = 1\ 700\ K$  et rayonne un flux thermique surfacique important  $\phi_{av}$ . Par ailleurs, un flux thermique surfacique  $\phi_{ar} = 1,55\ kW.m^{-2}$  traverse la surface  $S_b$  du bouclier vers l'arrière (figure 6). Pour permettre le bon fonctionnement de la sonde, il est impératif de limiter l'élévation de température à l'arrière du bouclier thermique en dépit de ce flux thermique surfacique élevé.

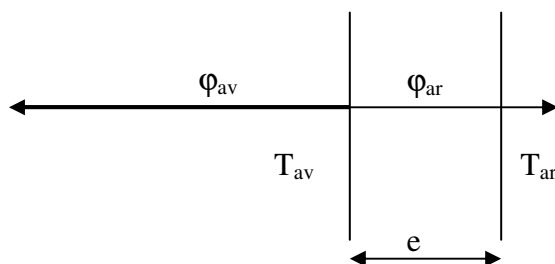


figure 6  
flux thermiques au niveau du bouclier thermique

### Données

conductivités thermiques de quelques matériaux :

matériau	mousse de carbone	alumine	métaux	pvc
conductivité thermique ( $w.m^{-1}.K^{-1}$ )	0,0262	37	20 à 400	0,17

Caractéristiques du bouclier thermique :

- surface :  $S_b = 16,6\ m^2$
- épaisseur :  $e = 11,4\ cm$
- conductivité thermique du bouclier thermique :  $\lambda = 0,140\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi de surface  $S$ , d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$  :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda * S} \quad (\text{en K.W}^{-1})$$

Flux thermique  $\Phi$  traversant une paroi de résistance thermique  $R_{th}$  et soumise à une différence de température  $|\Delta T|$  :

$$\Phi = \frac{|\Delta T|}{R_{th}}$$

- 7 Caractériser le mode de transfert thermique entre le Soleil et la sonde PSP.
- 8 Justifier l'utilisation de la mousse de carbone à l'intérieur du bouclier thermique.
- 9 Déterminer la valeur du flux thermique total vers l'arrière  $\Phi$ .
- 10 A l'aide des caractéristiques du bouclier thermique et des données, déterminer l'écart de température  $|\Delta T|$  entre les deux faces du bouclier thermique ainsi que la température  $T_{ar}$  à l'arrière du bouclier. Commenter  
Le candidat est invité à prendre des initiatives et à exposer sa démarche même si elle n'est pas complètement aboutie.

# Corrigé

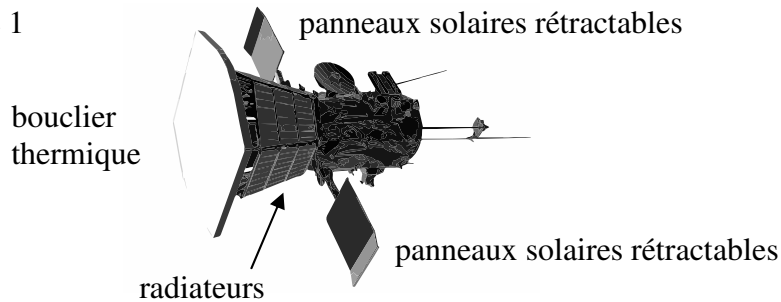
## Parker solar probe

Le 12 août 2018, la NASA, l'agence spatiale américaine, a lancé en direction du Soleil une sonde spatiale, PSP (Parker Solar Probe), dont la mission est d'étudier la couronne solaire.

La sonde PSP doit relever de nombreux défis, notamment :

- atteindre une orbite permettant d'approcher le Soleil de très près ;
- protéger les instruments de mesure des rayonnements intenses.

figure 1



les instruments de mesure fixés sur le corps de la sonde restent dans le cône d'ombre produit par le bouclier thermique

## Les caractéristiques orbitales de la sonde (partie 1)

Depuis son lancement le 12 août 2018, la sonde PSP subit des modifications successives de son orbite autour du Soleil du fait de l'assistance gravitationnelle de la planète Vénus. Elle rejoint ainsi progressivement son orbite optimale qui lui permettra de passer au plus près du Soleil début 2025. La sonde effectuera alors quatre passages au périhélie P et pourra enregistrer un maximum de données expérimentales (figure 2 et figure 7 ci-dessous).

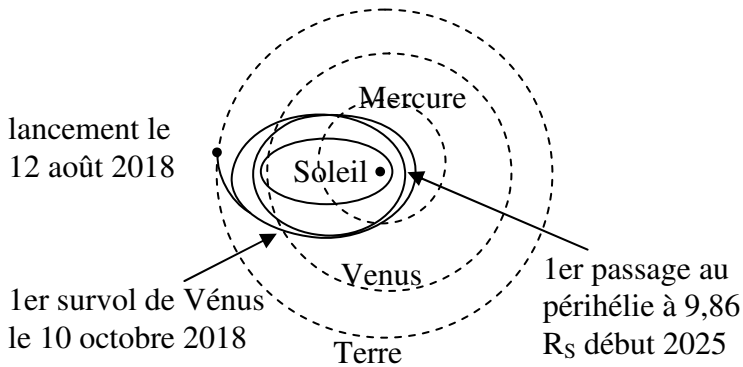


figure 2 parcours de la sonde PSP

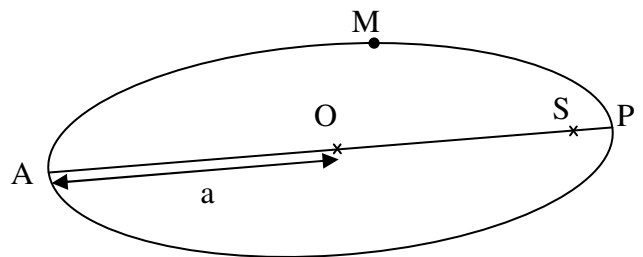


figure 7

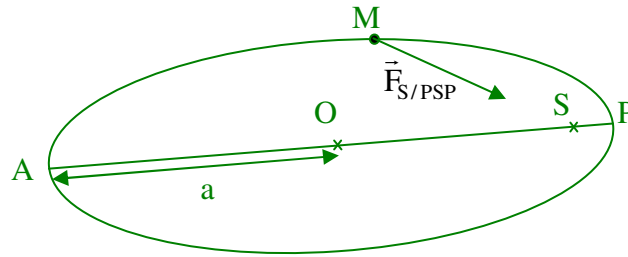
orbite elliptique de la sonde PSP en 2025

## Données

- masse du Soleil :  $M_S = 2,0 \cdot 10^{30}$  kg
- constante gravitationnelle :  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>

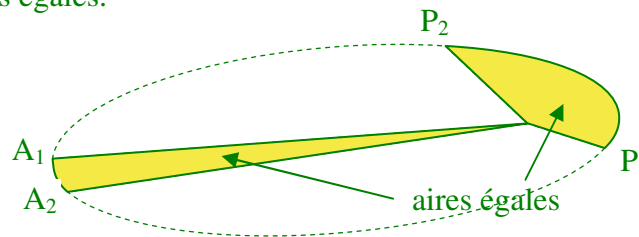
1 Sur la figure 7, on a représenté l'orbite elliptique que la sonde PSP décrira autour du Soleil en 2025. Les points A et P sont respectivement l'aphélie et le périhélie. Le point S représente le centre du Soleil.

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



1.2 En utilisant la 2ème loi de Kepler, comparer la valeur  $v_P$  de la vitesse de la sonde au point P à la valeur  $v_A$  de la vitesse de la sonde au point A.

2ème loi : (loi des aires) le segment de droite reliant le soleil à une planète balaie des aires égales pendant des durées égales.



l'arc  $P_1P_2$  a une longueur supérieure à l'arc  $A_1A_2$   
 les arcs  $P_1P_2$  et  $A_1A_2$  sont parcourus par la sonde pendant des durées égales  
 la vitesse de parcours de l'arc  $P_1P_2$  est donc  $>$  la vitesse de parcours de l'arc  $A_1A_2$   
 $v_P > v_A$

2 La NASA prévoit que la valeur  $v_P$  de la vitesse de la sonde au point P sera de  $192 \text{ km.s}^{-1}$  avec une incertitude-type de l'ordre de  $5 \text{ km.s}^{-1}$ .

On souhaite savoir si cette valeur de la vitesse a été déterminée à l'aide du modèle du mouvement circulaire pour la sonde PSP sur son orbite autour du soleil ou si un autre modèle a été utilisé. On se propose donc de déterminer la valeur  $v$  de la vitesse de la sonde PSP en supposant que son mouvement est circulaire, de rayon  $r = SP = 6,9.10^6 \text{ km}$ , afin de la comparer à celle prévue par la NASA (figure 3). Le référentiel héliocentrique est considéré comme galiléen.

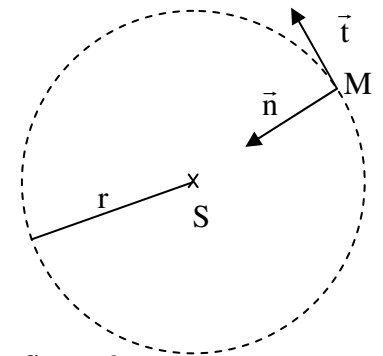


figure 3  
 modèle du mouvement circulaire de la sonde PSP et repère de Frenet

2.1 A l'aide de la 2e loi de Newton, montrer que, dans le cas d'une trajectoire circulaire, la vitesse  $v$  de la sonde PSP est constante et a pour expression :

$$v = \sqrt{\frac{G * M_s}{r}}$$

avec  $M_s$  la masse du Soleil et  $r$  le rayon de la trajectoire circulaire.

expression du vecteur accélération dans le repère de Frenet dans le cadre de l'approximation d'une orbite circulaire

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} * \vec{t} + \frac{v^2}{r} * \vec{n} \quad (1)$$

deuxième loi de Newton dans le référentiel d'étude héliocentrique supposé galiléen

$$\vec{F}_{S/PSP} = m_{\text{sonde}} * \vec{a}$$

$$G * \frac{M_S * m_{\text{sonde}}}{r^2} * \vec{n} = m_{\text{sonde}} * \vec{a}$$

$$\vec{a} = G * \frac{M_S}{r^2} * \vec{n} \quad (2)$$

(1) et (2) :  $G * \frac{M_S}{r^2} = \frac{v^2}{r}$

$$\frac{G * M_S}{r} = v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{G * M_S}{r}}$$

2.2 Calculer la valeur v de la vitesse de la sonde PSP dans le cadre de ce modèle.

$$v = \sqrt{\frac{G * M_S}{r}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} * 2,0 \cdot 10^{30}}{6,9 \cdot 10^9}} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ m.s}^{-1} (= 140 \text{ km.s}^{-1})$$

2.3 Apporter une conclusion à la problématique posée dans cette question 2.

la NASA prévoit que  $v_P \approx 192 \text{ km.s}^{-1}$  (avec une incertitude-type de l'ordre de  $5 \text{ km.s}^{-1}$ )

$v \ll v_P$  : le modèle de l'orbite circulaire est à rejeter

La 3ème loi de Kepler lie le demi-grand axe orbital et la période de révolution des systèmes (planète, sonde) en orbite autour du Soleil. On peut ainsi déterminer la période de révolution de la sonde PSP autour du Soleil à partir de la mesure du demi-grand axe de sa trajectoire elliptique.

3 En utilisant la 3ème loi de Kepler et après analyse du programme Python figurant ci-après et de ses résultats, déterminer la période de révolution T de la sonde PSP autour du Soleil.

caractéristiques des orbites des planètes et de la sonde PSP autour du soleil

planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Sonde PSP
demi-grand axe orbital (* $10^3$ km)	57909,23	108209,5	149597,8875	227944	778340	1426700	2870700	4498400	a = 58210
période de révolution (jour)	87,95565	224,667	365,2564	686,885	4332,01	10754	30698	60216,8	T

Le programme Python ci-dessous a été écrit à partir des caractéristiques des orbites des planètes.

```

1 import numpy as np
2 import statsmodels.api as sm
3
4 # Périodes T (en j)
5 T = np.array([ 87.95565, 224.667, 365.256363, 686.885, 4332.01,
6 10754, 30698, 60216.8 ])
7
8 # Demi-grands axes a (en km)

```



```

9     a = np.array([ 57909230, 108209500, 149597887.5, 227944000,
10    778340000, 1426700000, 2870700000, 4498400000 ])
11
12    # sm.OLS(y, x) définit un modèle linéaire de la forme y = kx
13    model = sm.OLS(T**2, a**3)
14
15    # model.fit() calcule le coefficient k
16    results = model.fit()
17
18    print("--- Résultats de la modélisation ---\n")
19
20    # Affiche la valeur du coefficient k
21    print(" k=", results.params[0], (" j**2 * km**-3"))

```

Affichage des résultats du programme à l'écran :

--- Résultats de la modélisation ---

k = 3.983462498345611e-20 j\*\*2 \* km\*\*-3 (remarque : la notation e-20 signifie  $10^{-20}$ )

k est identique pour tous les objets en orbite autour du Soleil

$$k = \frac{T^2}{a^3}$$

$$T = \sqrt{k * a^3} = \sqrt{3,983.10^{-20} * (58210.10^3)^3} = 88,6 \text{ j}$$

Les panneaux photovoltaïques (partie 2)

Durant la mission, les panneaux photovoltaïques de la sonde PSP servent à fournir l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des instruments de mesure embarqués. Ils permettent d'obtenir une puissance électrique utile  $P_{el} = 340 \text{ W}$ .

En 2025, au plus près du Soleil, ils devront être refroidis. Une puissance thermique  $P_{th}$  devra alors être évacuée grâce à de l'eau sous pression circulant entre les panneaux photovoltaïques et des radiateurs (figure 4). Lorsque le bouclier sera parfaitement orienté vers le Soleil, la puissance thermique à évacuer  $P_{th}$  sera 13 fois supérieure à la puissance électrique utile ; une erreur d'inclinaison du bouclier thermique de  $1^\circ$  entrainera une puissance thermique supplémentaire à dissiper de 35%.

Dans les questions suivantes, on se place dans le cas critique d'une erreur de  $1^\circ$  d'inclinaison du bouclier thermique.

### Données

- masse volumique de l'eau liquide dans les conditions de pression et de température de la sonde PSP :  $\rho \text{ (eau)} = 0,958 \text{ kg.L}^{-1}$
- durée du passage à proximité du Soleil :  $\Delta t = 110 \text{ h}$
- pression de l'eau dans le circuit : 5 bar
- température d'ébullition de l'eau sous 5,0 bar :  $T_{éb} = 150^\circ\text{C}$
- capacité thermique massique de l'eau :  $C \text{ (eau)} = 4 \text{ 185 J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

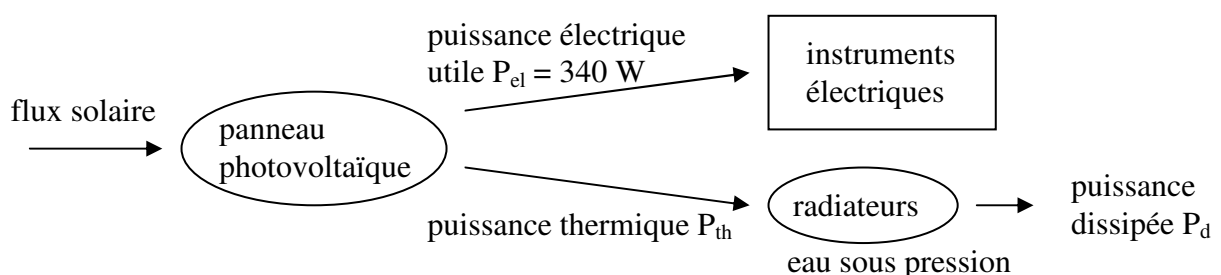


figure 4 diagramme énergétique de l'alimentation électrique de la sonde PSP

- 4 Sachant que les radiateurs peuvent dissiper une puissance maximale  $P_{d \max} = 6000 \text{ W}$ , montrer que ces radiateurs peuvent effectivement dissiper la puissance thermique cédée par les panneaux photovoltaïques à l'eau sous pression.

énoncé : lorsque le bouclier sera parfaitement orienté vers le Soleil, la puissance thermique à évacuer  $P_{th}$  sera 13 fois supérieure à  $P_{el}$  ( $= 340 \text{ W}$ )

énoncé : une erreur d'inclinaison du bouclier thermique de  $1^\circ$  entrainera une puissance thermique supplémentaire à dissiper de 35%.

$$P_{th} = 13 * P_{el} * 1,35 = 13 * 340 * 1,35 = 6,0.10^4 \text{ W}$$

dans le cas d'une erreur de  $1^\circ$  d'inclinaison du bouclier thermique, les radiateurs peuvent tout juste dissiper la puissance thermique cédée par les panneaux photovoltaïques

Pendant la durée  $\Delta t$  du passage à proximité du Soleil, l'équivalent d'un volume d'eau  $V_{eau} = 7\,570 \text{ L}$  va circuler pour refroidir les panneaux solaires. La température de ce volume d'eau va passer de la valeur  $T_{\min} = 50^\circ\text{C}$  à une valeur maximale  $T_{\max}$  que l'on cherche à déterminer.

On considère ici que la puissance thermique reçue par ce volume d'eau est  $P_{th \max} = 6\,000 \text{ W}$ .

- 5 Donner l'expression de l'énergie thermique  $Q_R$  reçue par l'eau en fonction de  $P_{th \max}$  et  $\Delta t$ .

$$Q_R = P_{th \max} * \Delta t$$

- 6 En supposant que l'élévation de température du volume total d'eau est uniquement due aux panneaux solaires, déterminer la température  $T_{\max}$  atteinte et déterminer si le système de refroidissement risque ou non l'explosion.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à exposer sa démarche même si elle n'est pas complètement aboutie.

énergie thermique  $Q_R$  reçue par l'eau

$$Q_R = 6000 * 110 * 3\,600 = 2,38.10^9 \text{ J}$$

masse d'eau

$$m_{eau} = V_{eau} * \rho_{eau} = 7\,570 * 0,958 = 7,25.10^3 \text{ kg}$$

l'énergie thermique  $Q_R$  reçue par l'eau va élever sa température (pas de changement d'état)

$$Q_R = m * C(\text{eau}) * \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = Q_R / (m_{eau} * C(\text{eau})) = 2,38.10^9 / (7,25.10^3 * 4\,185) = 78,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = T_{\max} - T_{\min}$$

$$T_{\max} = T_{\min} + \Delta\theta = 50 + 78,4 = 128 \text{ }^\circ\text{C}$$

$T_{\max} < T_{éb}$  : l'eau ne va pas bouillir (il n'y a pas de risque d'explosion)

Le bouclier thermique (partie 3)

La sonde PSP est protégée des rayonnements solaires par un bouclier thermique de surface  $S_b$  et d'épaisseur  $e$  (figures 1 et 5). Constamment tourné vers le Soleil, ce bouclier thermique permet de garder l'ensemble du corps de la sonde à une température convenable pour ne pas endommager les instruments embarqués.

Le bouclier thermique est composé d'un revêtement externe à base d'alumine, capable d'endurer de hautes températures jusqu'à 1 900 K. Derrière ce revêtement, se trouve de la mousse de carbone, prise entre deux couches rigides en fibre de carbone, très résistantes à la température et à la déformation (figure 5).

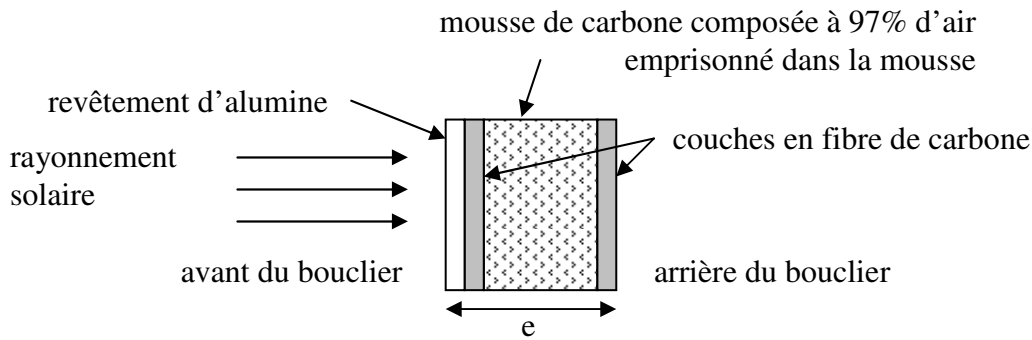


figure 5

schéma simplifié du bouclier thermique vu en coupe

Soumis à l'intense rayonnement du Soleil, la température à l'avant du bouclier atteint une valeur  $T_{av} = 1700$  K et rayonne un flux thermique surfacique important  $\phi_{av}$ . Par ailleurs, un flux thermique surfacique  $\phi_{ar} = 1,55 \text{ kW.m}^{-2}$  traverse la surface  $S_b$  du bouclier vers l'arrière (figure 6). Pour permettre le bon fonctionnement de la sonde, il est impératif de limiter l'élévation de température à l'arrière du bouclier thermique en dépit de ce flux thermique surfacique élevé.

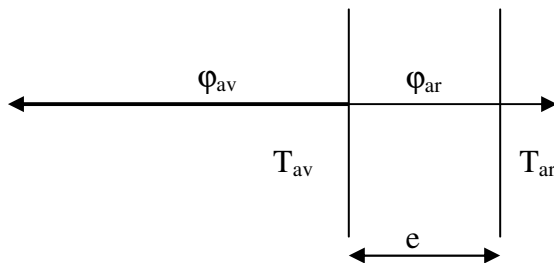


figure 6

flux thermiques au niveau du bouclier thermique

### Données

conductivités thermiques de quelques matériaux :

matériau	mousse de carbone	alumine	métaux	pvc
conductivité thermique ( $\text{w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	0,0262	37	20 à 400	0,17

Caractéristiques du bouclier thermique :

- surface :  $S_b = 16,6 \text{ m}^2$
- épaisseur :  $e = 11,4 \text{ cm}$
- conductivité thermique du bouclier thermique :  $\lambda = 0,140 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi de surface  $S$ , d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$  :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda * S} \quad (\text{en } \text{K.W}^{-1})$$

Flux thermique  $\Phi$  traversant une paroi de résistance thermique  $R_{th}$  et soumise à une différence de température  $|\Delta T|$  :

$$\Phi = \frac{|\Delta T|}{R_{th}}$$

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

*c'est le vide entre le Soleil et PSP : le transfert thermique ne se fera que par rayonnement*

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

*la conductivité thermique de la mousse de carbone est la plus faible (c'est un bon isolant)*

9 Déterminer la valeur du flux thermique total vers l'arrière  $\Phi$ .

$$\Phi = \varphi_{ar} * S_b = 1,55 * 16,6 = 25,7 \text{ kW}$$

- 10 A l'aide des caractéristiques du bouclier thermique et des données, déterminer l'écart de température  $|\Delta T|$  entre les deux faces du bouclier thermique ainsi que la température  $T_{ar}$  à l'arrière du bouclier. Commenter

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à exposer sa démarche même si elle n'est pas complètement aboutie.

$$\text{énoncé : } \Phi = \frac{|\Delta T|}{R_{th}} \text{ et } R_{th} = \frac{e}{\lambda * S}$$

$$|\Delta T| = \Phi * R_{th} = \Phi * \frac{e}{\lambda * S_b} = 25,7.10^3 * \frac{11,4.10^{-2}}{0,140 * 16,6} = 1,26.10^3 \text{ K}$$

$$|\Delta T| = T_{av} - T_{ar}$$

$$T_{ar} = T_{av} - |\Delta T| = 1\ 700 - 1\ 260 = 440 \text{ K} (= 167 \text{ °C})$$

un système de refroidissement supplémentaire sera nécessaire (peut-être avec les radiateurs)