Spécialité : Choix d'un matériau pour une mission sur Mars

Bac S 2014 Asie (ancien programme) · Exercice 4 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

P Résumer le principe et l'intérêt des protections thermiques des engins spatiaux, justifier le choix du PICA pour le bouclier de la mission MSL, puis valider par un calcul le terme « bouclier thermique » en comparant les flux thermiques avec et sans bouclier.

Données utiles $E_{c1} = 5{,}03 \times 10^{10}$ J ; $E_{c2} = 0{,}03 \times 10^{10}$ J ; $\Delta t = 200$ s ; $S \approx 20$ m^2 ; $e \approx 10$ cm ; $\lambda = 0{,}1$ W $\cdot$ m^{-1} $\cdot$ K^{-1} ; $T_1 = 10$ °C ; $T_2 = 2000$ °C ; part de ΔE_c mise en jeu : 20 %

1. Principe et intérêt d'une protection thermique.

Un engin qui pénètre dans une atmosphère y arrive à très grande vitesse (ici $18{,}3 \times 10^3$ km $\cdot$ h^{-1}). Les frottements du gaz le freinent : leur travail lui retire de l'énergie cinétique, dont une partie est cédée à la paroi sous forme de transfert thermique. La surface exposée peut ainsi atteindre 2000 °C, alors que les équipements embarqués doivent rester vers 10 °C.

La protection thermique est donc une couche placée à l'avant du véhicule, qui supporte ces températures et ne laisse passer vers l'intérieur qu'une très faible part de l'énergie reçue. Son intérêt est vital : sans elle, ou si elle est endommagée (fissure d'une tuile de Columbia en 2003), l'engin est détruit.

2. Pourquoi le PICA.

Le PICA est un composite de fibres de carbone imprégnées de résine phénolique (documents 1 et 4). Ses atouts :

- **isolant** : sa conductivité thermique est faible, $\lambda = 0{,}1$ W $\cdot$ m^{-1} $\cdot$ K^{-1}, donc la conduction vers l'intérieur est lente ;
- **ablatif** : en surface, la résine est pyrolysée et le carbone se sublime ; ces deux transformations absorbent de l'énergie, et les gaz de pyrolyse renvoient de l'énergie vers l'extérieur par convection ;
- **couche carbonisée poreuse**, encore plus isolante, et de forte émissivité (0,9) : elle évacue par rayonnement une grande partie du flux incident, mécanisme présenté comme prépondérant ;
- **léger** : densité 0,35, soit une masse volumique de 350 kg $\cdot$ m^{-3}, avantage décisif pour un engin spatial ;
- **durable** : l'ablation consomme $0{,}02$ mm $\cdot$ s^{-1} $\times$ 200 s $= 4$ mm, très peu devant les 10 cm disponibles ;
- **validé par les essais** : pour une surface à 1600 °C, la température se stabilise vers 1000 °C à 5 mm de profondeur et vers 400 °C à 15 mm ; elle chute donc très vite dans le matériau.

Le premier matériau retenu, le SLA561V, avait au contraire échoué aux tests de qualification.

3. Flux thermique sans bouclier.

Variation d'énergie cinétique pendant la décélération :

$$\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = 0{,}03 \times 10^{10} - 5{,}03 \times 10^{10} = -5{,}00 \times 10^{10} \text{ J}$$

Elle est négative et égale au travail W des frottements (document 2). L'énergie thermique mise en jeu vaut 20 % de sa valeur absolue :

$$Q = 0{,}20 \times |\Delta E_c| = 0{,}20 \times 5{,}00 \times 10^{10} = 1{,}0 \times 10^{10} \text{ J}$$

PIÈGE

Comparer φ_b en W $\cdot$ m^{-2} à une puissance en watts. Le flux du sujet est surfacique : il faut diviser l'énergie par la durée et par la surface. Convertir aussi e en mètres.

COMPRENDRE

Les données sont approximatives : φ_b se donne avec un chiffre significatif, φ_{th} avec deux au plus. Seul l'ordre de grandeur du rapport compte. Tous ces calculs se font à la main.

MÉTHODE

Synthèse avec calcul : suivre l'ordre de la consigne (principe, choix du matériau, calculs, critique), citer le document d'où vient chaque argument, et terminer par une comparaison chiffrée des deux flux.

Cette énergie traverse la surface S pendant la durée Δt ; le flux par unité de surface est :

$$\varphi_{th} = \frac{Q}{S \times \Delta t} = \frac{1{,}0 \times 10^{10}}{20 \times 200} = 2{,}5 \times 10^{6}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

soit $\varphi_{th} \approx 2{,}5 \times 10^{3}\ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

4. Flux thermique à travers le bouclier.

Un écart de température a la même valeur en kelvins et en degrés Celsius : $\Delta T = T_2 - T_1 = 2000 - 10 = 1990\ \text{K}$. Avec $e = 0{,}10$ m (document 3) :

$$\varphi_b = \frac{\Delta T \times \lambda}{e} = \frac{1990 \times 0{,}1}{0{,}10} = 1990\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \approx 2 \times 10^{3}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

soit $\varphi_b \approx 2\ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

5. Comparaison et regard critique.

$$\frac{\varphi_{th}}{\varphi_b} = \frac{2{,}5 \times 10^{6}}{2 \times 10^{3}} \approx 1 \times 10^{3}$$

Le bouclier divise le flux thermique par environ mille : moins de 0,1 % du flux théorique atteint l'intérieur. Le terme « bouclier thermique » est justifié, et le choix du PICA aussi.

Ces valeurs sont des ordres de grandeur : la surface, l'épaisseur et la part de 20 % sont données par « environ », λ n'a qu'un chiffre significatif, et φ_{th} est une moyenne sur 200 s alors que l'échauffement n'est pas uniforme dans le temps. L'épaisseur perd 4 mm par ablation, ce qui augmente φ_b de 4 % seulement : la conclusion ne change pas.

$\varphi_{th} \approx 2{,}5 \times 10^{3}\ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ sans bouclier ; $\varphi_b \approx 2\ \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ avec bouclier : flux divisé par environ 10^{3}.

À LA CALCULATRICE

