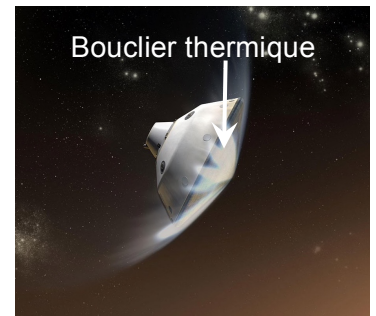


## Document 1 : Une arrivée à grande vitesse

L'atterrissage du rover Perseverance aura lieu le 18 février 2021. Le véhicule de rentrée transportant le rover entrera dans l'atmosphère martienne à la vitesse de 20 000 km/h. Le freinage atmosphérique, d'une durée de 200 secondes, réduira fortement la vitesse du vaisseau jusqu'à 1600 km/h. Lors de ce freinage, la température externe du véhicule atteindra 1300°C. Un bouclier thermique protège l'intérieur du véhicule en le maintenant à une température d'environ 10°C.



Masse totale du véhicule de rentrée : 3650 kg

Caractéristique du bouclier thermique :

- Surface : 20 m<sup>2</sup>
- Epaisseur : environ 10 cm
- Composition : PICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablator), fibres de carbone imprégnées de résine phénolique
- Conductivité thermique : 0,108 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

## Document 2 : Travail des forces de frottement et transfert thermique

Lors de l'entrée dans l'atmosphère martienne à une altitude de 70 km et jusqu'à 20 km d'altitude, le véhicule transportant Perseverance est ralenti par les forces de frottement du bouclier thermique. Un parachute prend ensuite le relais. D'après le théorème de l'énergie cinétique, la variation d'énergie cinétique du véhicule lors du freinage atmosphérique est égale à la somme des travaux des forces appliquées sur le véhicule :

$$\Delta E_{C_{AB}} = E_{C_B} - E_{C_A} = \sum W_{AB}(\vec{F}_{ext}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{f})$$

Au cours du freinage atmosphérique, le travail du poids  $\vec{P}$  du véhicule de rentrée est négligeable devant le travail des forces de frottement  $\vec{f}$ . On a donc :  $\Delta E_{C_{AB}} = W_{AB}(\vec{f})$ .

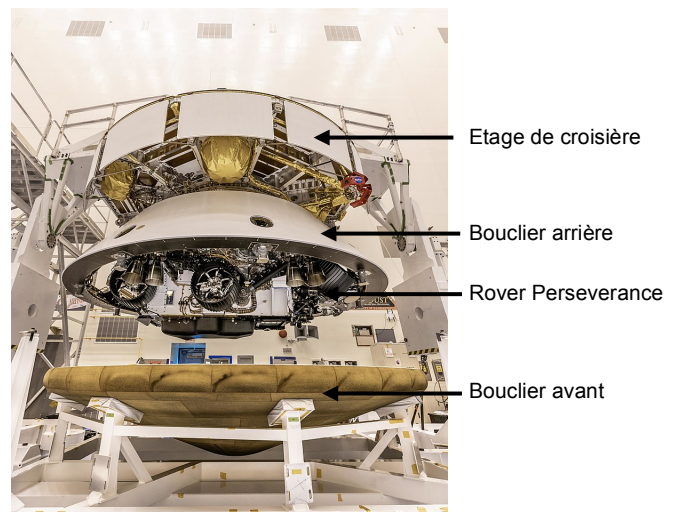
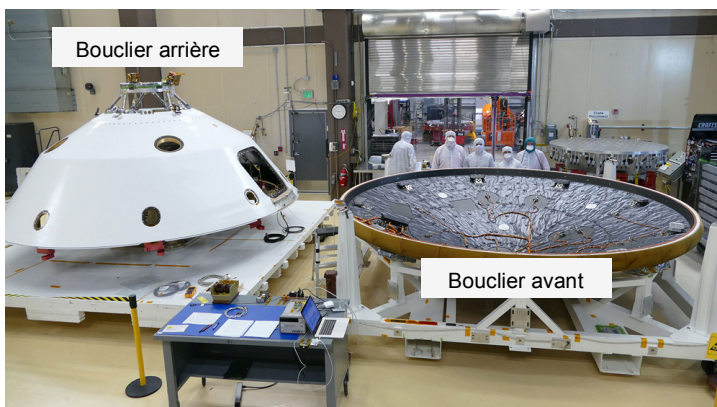
Grâce au bouclier thermique, seulement 0,010% du travail des forces de frottement est transféré à l'intérieur du véhicule de rentrée. En notant Q le transfert thermique à travers la paroi du bouclier, on a :

$$Q = 0,010\% \times |\Delta E_{C_{AB}}|$$

A l'aide des documents 1 et 2, vérifier que le bouclier thermique permet de maintenir l'intérieur du véhicule de rentrée à une température de l'ordre de 10°C.

**Bonus** : vérifier l'affirmation du document 2 : « Au cours du freinage atmosphérique, le travail du poids  $\vec{P}$  du véhicule de rentrée est négligeable devant le travail des forces de frottement  $\vec{f}$ . »

Donnée : intensité de pesanteur martienne :  $g_{Mars} = 3,71 \text{ m.s}^{-2}$



**Document 3 : Données sur le PICA**

Source : NASA & Key Laboratory of Science and Technology for Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China

Caractéristiques physiques :

Densité	Conductivité thermique ( W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Pourcentage en volume de fibre de carbone	Pourcentage en volume de résine phénolique	Emissivité* du substrat de carbone au cours de l'ablation
0,35	0,108	12,5 %	11,1 %	0,9

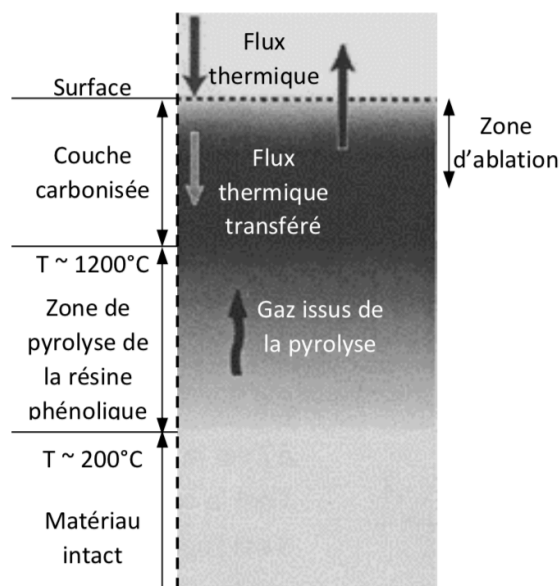
\* nombre variant entre 0 et 1 qui rend compte de la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie par rayonnement.

Mécanisme d'ablation :

Du fait de la température de surface très élevée sous l'effet des forces de frottement, la résine phénolique est pyrolysée\*\* et les fibres de carbone commencent à se sublimer\*\*\* dans la zone d'ablation si bien que l'épaisseur du matériau diminue. Ces deux phénomènes de sublimation et pyrolyse absorbent une partie de l'énergie reçue.

Le carbone formé par pyrolyse de la résine phénolique est très poreux et forme une couche très isolante. Le PICA ayant déjà une faible conductivité thermique, le flux thermique est rejeté vers la surface par convection plutôt que d'être diffusé vers l'intérieur par conduction.

D'autre part, la couche de carbone formée dissipe une grande partie du flux d'énergie incident par radiation du fait de sa forte émissivité. Ce mécanisme semble être prépondérant dans le phénomène de dissipation de l'énergie thermique.

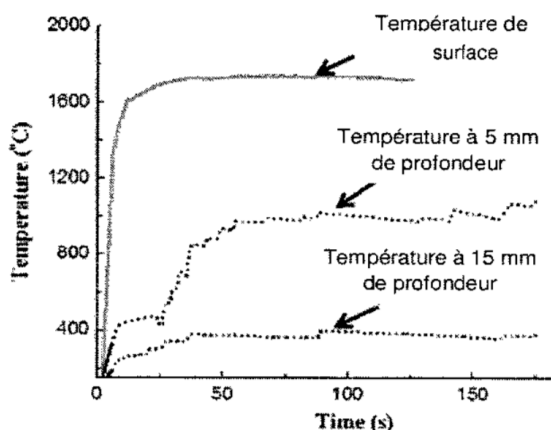


Pour une durée d'ablation de l'ordre de 200 s, la variation d'épaisseur du matériau à la température de 2000°C est de 0,02 mm.s<sup>-1</sup>.

\*\*Pyrolyse : décomposition d'un composé organique sous l'effet d'une température élevée (entre 200°C et 1000°C).

\*\*\*Sublimation : passage de l'état solide à l'état gazeux.

Température intérieure du matériau : (tests en laboratoire, température de surface de 1600°C)



Notions, contenus et compétences associées dans le BO de Première Spécialité Physique-Chimie

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p>Energie cinétique d'un système modélisé par un point matériel. Travail d'une force. Expression du travail dans le cas d'une force constante. Théorème de l'énergie cinétique.</p> <p>Forces conservatives. Energie potentielle. Cas du champ de pesanteur terrestre.</p> <p>Forces non-conservatives : exemples des frottements.</p> <p>Energie mécanique. Conservation et non conservation de l'énergie mécanique. Gain ou dissipation d'énergie.</p>	<p>Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un système modélisé par un point matériel.</p> <p>Utiliser l'expression du travail <math>W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}</math> dans le cas de forces constantes. Enoncer et exploiter le théorème de l'énergie cinétique.</p> <p>Etablir et utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur pour un système au voisinage de la surface de la Terre.</p> <p>Calculer le travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.</p> <p>Identifier des situations de conservation et de non conservation de l'énergie mécanique.</p>

Notions, contenus et compétences associées dans le BO de Terminale Spécialité Physique-Chimie

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p>Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.</p> <p>Modes de transfert thermique.</p> <p>Flux thermique. Résistance thermique.</p>	<p>Prévoir le sens d'un transfert thermique.</p> <p>Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.</p> <p>Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.</p>

## Correction de l'activité

On calcule tout d'abord la résistance thermique du bouclier thermique :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{10 \times 10^{-2}}{0,108 \times 20} \approx 4,6 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Or  $\phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_{ext} - T}{R_{th}}$  avec T la température sur la paroi interne du bouclier thermique donc à l'intérieur du vaisseau et  $T_{ext} = 1300^\circ\text{C}$ .

On doit donc calculer la valeur du flux thermique  $\Phi$  à travers la paroi du bouclier thermique.

Or  $\phi = \frac{Q}{\Delta t}$  avec  $\Delta t$  la durée du transfert thermique. C'est ici la durée du freinage atmosphérique :  $\Delta t = 200 \text{ s}$ .

Par ailleurs, on sait que le transfert thermique Q est de l'ordre de 0,03% de la variation d'énergie cinétique du vaisseau lors du freinage atmosphérique.

On calcule l'énergie cinétique  $E_{c_i}$  du vaisseau à l'entrée dans l'atmosphère :

$$E_{c_i} = \frac{1}{2} m \cdot v_i^2 = 0,5 \times 3650 \times \left( \frac{20000}{3,6} \right)^2 \approx 5,6 \times 10^{10} \text{ J}$$

Puis on calcule l'énergie cinétique  $E_{c_f}$  du vaisseau à la fin du freinage atmosphérique :

$$E_{c_f} = \frac{1}{2} m \cdot v_f^2 = 0,5 \times 3650 \times \left( \frac{1600}{3,6} \right)^2 \approx 3,6 \times 10^8 \text{ J}$$

$$Q = 0,010 \% \times |\Delta E_c| = 0,010 \times 10^{-2} \times |(E_{c_f} - E_{c_i})| = 1,0 \times 10^{-4} \times (5,6 \times 10^{10} - 3,6 \times 10^8) \approx 5,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{5,6 \times 10^6}{200} \approx 2,8 \times 10^4 \text{ W}$$

$$T_{ext} - T = \Phi \times R_{th} \text{ donc } T = T_{ext} - \Phi \times R_{th} = 1300 - 2,8 \times 10^4 \times 4,6 \times 10^{-2} = 12^\circ\text{C}$$

La température à l'intérieur du vaisseau spatial est de l'ordre  $12^\circ\text{C}$ . C'est proche de la valeur indiquée dans le document.

Bonus : on calcule le travail du poids :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \times g(\text{Mars}) \times \Delta z = 3650 \times 3,71 \times (70 \times 10^3 - 20 \times 10^3) \approx 6,8 \times 10^8 \text{ J}$$

La variation d'énergie cinétique est  $\Delta E_{c_{AB}} = E_{c_B} - E_{c_A} = 3,6 \times 10^8 - 5,6 \times 10^{10} \approx -5,6 \times 10^{10} \text{ J}$

D'après le théorème de l'énergie cinétique,  $\Delta E_{c_{AB}} = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{f})$

$$\text{Donc } W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_{c_{AB}} - W_{AB}(\vec{P}) \approx -5,5 \times 10^{10} \text{ J}$$

En valeur absolue, le travail des forces de frottement est environ 2 ordres de grandeur plus grand que le travail du poids. Donc le travail du poids est négligeable devant le travail des forces de frottement.

Par ailleurs, on remarque que le travail du poids est positif, donc moteur, tandis que le travail des forces de frottement sont négatives, donc résistant.