

Lors de son retour sur Terre, une capsule spatiale pénètre dans les couches denses de l'atmosphère. Les frottements de l'air à très haute vitesse provoquent une dissipation massive de l'énergie mécanique, qui se transforme en énergie thermique. L'objectif de cet exercice est d'estimer l'échauffement du bouclier thermique par application du premier principe.



Données :

- Masse totale de la capsule (incluant le bouclier) : $M = 3,00 \cdot 10^3$ kg
- Masse initiale du bouclier thermique : $m_b = 400$ kg
- Altitude initiale de rentrée : $z_i = 100$ km
- Vitesse initiale de la capsule : $v_i = 7,8$ km·s⁻¹
- Altitude d'ouverture des parachutes (fin de la phase de freinage aérodynamique) : $z_f = 10$ km
- Vitesse à l'ouverture des parachutes : $v_f = 200$ m·s⁻¹
- Durée de la phase de freinage : $\Delta t = 5,0$ min
- Accélération de la pesanteur (supposée constante) : $g = 9,8$ m·s⁻²
- Capacité thermique massique du matériau du bouclier (carbone-phénolique) : $c_b = 1,5 \cdot 10^3$ J·kg⁻¹·K⁻¹
- Température de sublimation du matériau du bouclier : $T_{sub} \approx 3,9 \cdot 10^3$ K
- Energie massique de sublimation du bouclier : $L_{sub} = 30$ MJ·kg⁻¹

1. Exprimer puis calculer la variation d'énergie mécanique E_m de la capsule entre l'altitude de rentrée z_i et l'altitude d'ouverture des parachutes z_f (on prendra $E_p(z = 0) = 0$). Que représente physiquement cette variation ?
2. Écrire le premier principe de la thermodynamique pour le système {capsule} (supposé indéformable) dans le référentiel terrestre. Et montrer qu'il se simplifie en $\Delta U = Q$.

Sous l'effet des frottements, l'air ambiant est chauffé et se transforme en un plasma incandescent. Ce plasma transfère en retour de l'énergie thermique à la capsule. On estime que la capsule reçoit un transfert thermique équivalent à $\alpha = 10\%$ de l'énergie mécanique totale dissipée : $Q = \alpha |\Delta E_m|$. Le bouclier étant situé entre le plasma et le reste de la capsule, on va supposer d'autre part qu'il absorbe à lui seul ce transfert thermique.

3. Calculer l'élévation de température ΔT que subirait le bouclier s'il restait à l'état solide. Conclure sur la viabilité de ce modèle.

En réalité, pour protéger l'habitacle, le bouclier est conçu pour s'éroder : l'énergie thermique absorbée est consommée pour sublimer le matériau de surface.

Données :

- Température de sublimation du matériau du bouclier : $T_{sub} \approx 3,9 \cdot 10^3$ K
- Energie massique de sublimation du bouclier : $L_{sub} = 30$ MJ·kg⁻¹

4. En négligeant l'énergie thermique nécessaire pour porter la surface à la température de sublimation devant l'énergie de changement d'état, estimer la masse de bouclier consommée lors de la rentrée. Ce résultat vous semble-t-il cohérent avec les données du problème ?

Rq 1 : On parle en réalité plutôt d'ablation que de sublimation du matériau du bouclier pour tenir compte qu'une partie de l'énergie absorbée vient de la pyrolyse (rupture chimique des liaisons au sein des molécules du matériaux) et non seulement de la sublimation (rupture physique des liaisons entre molécules).

Rq 2 : Les gaz dégagés lors de l'ablation participe à la protection thermique car ils sont produits à une température bien plus basse que le plasma environnant et ils le repoussent.

Rq 3 : Le plasma qui entoure la capsule est un conducteur électrique et interagit donc fortement avec les ondes électromagnétiques. Cela crée la fameuse cage de Faraday responsable de la perte de communication radio (le "blackout") pendant quelques minutes.

Pendant la phase d'ablation, la surface externe du bouclier est maintenue à sa température de sublimation. La chaleur diffuse alors par conduction à travers l'épaisseur restante du bouclier vers l'intérieur de la capsule, maintenu à $T_i = 300$ K.

On se place dans le cas critique où l'épaisseur du bouclier atteint sa marge de sécurité $e = 5,0$ cm.

Données :

- Surface du bouclier : $S = 10$ m²
- Conductivité thermique du matériau du bouclier (type PICA) : $\lambda = 0,020$ W·m⁻¹·K⁻¹
- Formule de la résistance thermique d'une paroi plane : $R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$
- Capacité maximale d'extraction de chaleur du système de climatisation interne de la capsule : $P_{clim} = 15$ kW

5. Déterminer le flux thermique Φ qui pénètre par conduction à l'intérieur de la cabine. Le système de refroidissement de bord est-il suffisant pour maintenir la température à T_i à cet instant critique ?

Rq 4 : C'est la trajectoire de rentrée moins verticale et sa plus grande surface qui permet à une navette spatiale d'utiliser un bouclier non ablatif à base de silice qui ne pourrait pas supporter les températures que subit la capsule.

