

Freiner un avion lancé à 300 km/h

Terminale spécialité Physique-Chimie · Thermodynamique et premier principe

1. De l'énergie mécanique à l'énergie interne

À l'échelle macroscopique, l'énergie cinétique de l'avion diminue pendant le freinage. Les actions de contact transfèrent une grande partie de cette énergie aux freins. À l'échelle microscopique, l'agitation des constituants des disques augmente : leur énergie interne augmente et leur température s'élève. Dans le modèle retenu, la composition chimique des freins ne change pas ; c'est surtout la contribution cinétique microscopique à l'énergie interne qui augmente.

2. Température moyenne après l'arrêt

La vitesse initiale en unités S.I. vaut

$$v = \frac{300}{3,6} = 83,3 \text{ m s}^{-1}.$$

L'énergie cinétique initiale de l'avion est

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 70,0 \times 10^3 \times (83,3)^2 = 2,43 \times 10^8 \text{ J}.$$

Les huit freins en reçoivent 90,0 % :

$$E_{\text{freins}} = 0,900 E_c = 2,19 \times 10^8 \text{ J}.$$

Pendant l'arrêt, les échanges thermiques sont négligés : $Q \simeq 0$. L'ensemble des huit freins reçoit un travail mécanique $W = E_{\text{freins}} > 0$. Le premier principe donne donc

$$\Delta U = W + Q \simeq W = 2,19 \times 10^8 \text{ J}.$$

Le système choisi est l'ensemble des huit masses thermiques équivalentes. Sa capacité thermique vaut

$$C = 8 \times 95,0 \times 710 = 5,40 \times 10^5 \text{ J K}^{-1}.$$

Dans le modèle d'une température uniforme, on a $\Delta U = C \Delta T$. Ainsi,

$$\Delta T = \frac{E_{\text{freins}}}{C} = \frac{2,19 \times 10^8}{5,40 \times 10^5} = 4,05 \times 10^2 \text{ K}.$$

La température moyenne finale estimée est donc

$$\theta_f = 35,0 + 405 \simeq 440 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Température moyenne et température de surface

Il n'y a pas contradiction entre une moyenne voisine de 440 °C et une température de surface pouvant atteindre 2 500 °C. L'énergie est d'abord déposée dans les zones de contact : la température n'est pas uniforme dans les disques pendant un arrêt très bref. La surface peut être beaucoup plus chaude que le cœur. Le modèle emploie en outre une capacité thermique moyenne constante et regroupe tout le frein dans une masse thermique équivalente ; il ne décrit pas les gradients locaux ni les variations des propriétés du carbone avec la température.

4. Refroidissement des freins

L'air et les pièces voisines sont plus froids que les freins. Le transfert thermique spontané se produit donc des freins vers leur environnement. Pour le système {freins}, $Q < 0$. Après l'arrêt, aucun travail mécanique significatif n'est reçu : $W \simeq 0$. Le premier principe donne alors

$$\Delta U = W + Q \simeq Q < 0.$$

L'énergie interne et la température moyenne des freins diminuent.

5. Étude des deux scénarios avec le script

a. Les trois lignes à écrire

La première est la capacité thermique du système choisi à la question 2, l'ensemble des huit freins. Les deux autres traduisent, pour chaque scénario, l'énergie cinétique de l'avion puis l'élévation de température tirée de $\Delta U = C \Delta T$, les freins recevant la fraction part de cette énergie :

```
C = n * m_frein * c
Ec = 0.5 * masses[i] * v**2
dT = part * Ec / C
```

La ligne de c est écrite **hors** de la boucle, sans indentation : la capacité thermique ne change pas d'un freinage à l'autre. Les deux autres conservent leur indentation de quatre espaces. Trois erreurs à éviter : utiliser vitesses[i] au lieu de v dans l'énergie cinétique, ce qui laisserait des km·h⁻¹ ; oublier le facteur part, ce qui attribuerait aux freins toute l'énergie cinétique ; oublier le facteur n, qui ramènerait le bilan à un frein unique et multiplierait l'élévation par huit.

b. Interprétation des deux lignes affichées

La variable c vaut $8 \times 95,0 \times 710 = 5,40 \times 10^5 \text{ J K}^{-1}$. La sortie fournie est :

```
440 conforme
547 conforme
```

La première ligne est cohérente avec la température de 440 °C calculée à la question 2 et indique que la limite opérationnelle n'est pas dépassée. Dans le second scénario, la température moyenne finale vaut 547 °C ; comme $547 < 650$, ce scénario est lui aussi déclaré conforme par le script.

c. La température initiale critique

L'élévation de température du second scénario ne dépend pas de la température de départ : elle vaut $\Delta T' = 237 \text{ K}$ quelles que soient les conditions initiales. Le script afficherait « dépassement » dès que

$$\theta'_i + 237 > 650, \quad \text{soit} \quad \boxed{\theta'_i > 4,1 \times 10^2 \text{ °C.}}$$

La température initiale doit donc rester inférieure ou égale à environ 413 °C pour que le script affiche « conforme ». La valeur 310 °C du scénario satisfait cette condition avec une marge d'une centaine de degrés.

6. Refroidissement après le second scénario

a. Variation d'énergie interne

La seconde ligne du script donne une température moyenne finale de 547 °C. Lors du retour à 310 °C, la variation d'énergie interne des huit freins vaut

$$\Delta U = C(\theta_f - \theta_i) = 5,40 \times 10^5 \times (310 - 547) = -1,28 \times 10^8 \text{ J.}$$

Le signe négatif traduit la diminution de l'énergie interne des freins.

b. Énergie transférée et puissance thermique moyenne

Pendant le refroidissement, le travail mécanique reçu est négligeable : $W \simeq 0$. Le premier principe donne

$$\Delta U = W + Q \simeq Q.$$

Ainsi, pour le système {freins},

$$Q \simeq -1,28 \times 10^8 \text{ J.}$$

Les freins cèdent donc $1,28 \times 10^8 \text{ J}$ à l'environnement. Sur $15 \text{ min} = 900 \text{ s}$, la puissance thermique moyenne transférée à l'environnement vaut

$$P_{\text{th}} = \frac{1,28 \times 10^8}{900} = 1,4 \times 10^5 \text{ W,}$$

soit environ 140 kW.

c. Comparaison avec l'énergie reçue pendant l'arrêt

Lors du freinage du second scénario, l'énergie reçue par les freins était

$$E_{\text{reçue}} = C(547 - 310) = 1,28 \times 10^8 \text{ J.}$$

L'énergie évacuée pendant le refroidissement a donc la même valeur que l'énergie reçue pendant l'arrêt, aux arrondis près. Les freins retrouvant leur température initiale, leur énergie interne retrouve aussi sa valeur initiale.