Le réfrigérateur

Bac 2025 Métropole Septembre Jour 2 · Exercice 3 **6 points** **Durée conseillée 1 h 03**

Q1 Caractériser qualitativement le phénomène de convection, un des modes de transfert thermique entre S et son environnement.

La convection est un transfert thermique qui s'accompagne d'un **déplacement de matière** : elle se produit dans les fluides (liquides ou gaz). Ici, l'air du réfrigérateur circule autour de la bouteille et emporte l'énergie qu'elle cède.

Convection : transfert thermique porté par le mouvement d'ensemble d'un fluide.

COMPRENDRE
Les deux autres modes : la conduction (de proche en proche, sans déplacement de matière) et le rayonnement (ondes électromagnétiques, possible dans le vide).

Q2 Indiquer, en justifiant, le sens du transfert thermique Q dans le cas étudié.

Un transfert thermique se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. La bouteille, à environ 20 °C, est plus chaude que l'air du réfrigérateur, à environ 7 °C.

Le transfert thermique a lieu de la bouteille S vers l'air intérieur du réfrigérateur : S cède de l'énergie, $Q < 0$.

COMPRENDRE
La loi de Newton le confirme : $\theta_{\text{réfri}} - \theta(t) < 0$, donc le flux Φ reçu par S est négatif.

Q3 Exprimer $\theta(t = 0)$ puis la limite de $\theta(t)$ quand $t \to +\infty$ en fonction de A et B. En déduire, à l'aide de la figure 1 de l'annexe, des valeurs de A et B avec leur unité.

Données utiles $\theta(t) = A\,e^{-t/\tau} + B$

À $t = 0$: $e^0 = 1$, donc $\theta(0) = A + B$.

Quand $t \to +\infty$: $e^{-t/\tau} \to 0$, donc $\lim\limits_{t \to +\infty} \theta(t) = B$.

Sur la figure 1 : la courbe part de $\theta(0) \approx 20{,}5$ °C et tend vers une asymptote horizontale à environ $7{,}0$ °C.

Donc $B \approx 7{,}0$ °C et $A = \theta(0) - B \approx 20{,}5 - 7{,}0 = 13{,}5$ °C.

$A \approx 13{,}5$ °C et $B \approx 7{,}0$ °C

COMPRENDRE
B est la température finale de la bouteille, celle de l'air du réfrigérateur ; A est l'écart initial entre la bouteille et cet air. L'exponentielle est sans unité : A et B ont l'unité de θ.

Q4 Montrer graphiquement, avec la construction sur la figure 1 de l'annexe, que la constante τ est de l'ordre de 12×10^3 s.

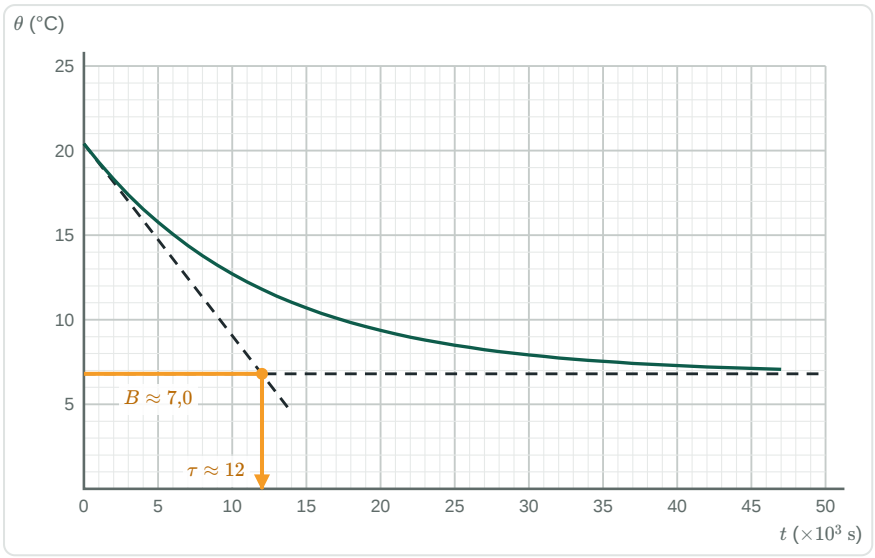
On trace la tangente à la courbe à l'instant $t = 0$, ainsi que l'asymptote horizontale $\theta = B$.

La tangente à l'origine coupe l'asymptote à l'instant $t = \tau$. On lit l'abscisse du point d'intersection sur la figure.

$\tau \approx 12 \times 10^3$ s : valeur lue conforme à la valeur attendue.

PIÈGE
L'axe des abscisses est gradué en 10^3 s : la lecture « 12 » signifie 12×10^3 s, soit plus de trois heures.

MÉTHODE
Vérification sans tangente : à $t = \tau$, l'écart à l'asymptote ne vaut plus que 37 % de A, soit $\theta(\tau) = 7{,}0 + 0{,}37 \times 13{,}5 \approx 12{,}0$ °C. La courbe passe par 12 °C vers $t = 12 \times 10^3$ s.



Q4 · Figure 1 de l'annexe : tangente à l'origine et asymptote

Q5 Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système S entre t et $t+\Delta t$ pour exprimer $\theta(t+\Delta t)-\theta(t)$ en fonction de Δt, ρ_S, V_S, c_S, α et $(\theta_{\text{réfri}}-\theta(t))$.

Données utiles $\Phi = \alpha\,(\theta_{\text{réfri}}-\theta(t))$

Système S {bouteille d'eau}, au repos, incompressible : il ne reçoit aucun travail, $W=0$.

Premier principe entre t et $t+\Delta t$: $\Delta U = W + Q = Q$.

Variation d'énergie interne, avec $m_S = \rho_S V_S$: $\Delta U = \rho_S V_S c_S \big(\theta(t+\Delta t)-\theta(t)\big)$.

Transfert thermique reçu pendant Δt : $Q = \Phi\,\Delta t = \alpha\,(\theta_{\text{réfri}}-\theta(t))\,\Delta t$.

En égalant les deux expressions :

$$\theta(t+\Delta t)-\theta(t) = \frac{\alpha\,(\theta_{\text{réfri}}-\theta(t))}{\rho_S V_S c_S}\,\Delta t$$

PIÈGE
Φ est une puissance (en W). L'énergie échangée pendant Δt est $Q = \Phi\,\Delta t$; écrire $\Delta U = \Phi$ n'est pas homogène.

COMPRENDRE
En divisant par Δt puis en faisant tendre Δt vers 0, le membre de gauche devient $\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$: on retrouve l'équation différentielle du sujet, avec $\tau = \dfrac{\rho_S V_S c_S}{\alpha}$.

Q6 Établir, en fonction de τ, θ_0, $\theta_{\text{réfri}}$ et $\theta_{\text{idéale}}$, l'expression de la durée $t_{\text{idéale}}$ nécessaire pour que S atteigne la température idéale de consommation.

Données utiles $\theta(t) = (\theta_0-\theta_{\text{réfri}})\,e^{-t/\tau}+\theta_{\text{réfri}}$

À l'instant $t_{\text{idéale}}$: $\theta_{\text{idéale}} = (\theta_0-\theta_{\text{réfri}})\,e^{-t_{\text{idéale}}/\tau}+\theta_{\text{réfri}}$

$$e^{-t_{\text{idéale}}/\tau} = \frac{\theta_{\text{idéale}}-\theta_{\text{réfri}}}{\theta_0-\theta_{\text{réfri}}}$$

On prend le logarithme népérien : $-\dfrac{t_{\text{idéale}}}{\tau} = \ln\left(\dfrac{\theta_{\text{idéale}}-\theta_{\text{réfri}}}{\theta_0-\theta_{\text{réfri}}}\right)$

$$t_{\text{idéale}} = \tau\,\ln\left(\frac{\theta_0-\theta_{\text{réfri}}}{\theta_{\text{idéale}}-\theta_{\text{réfri}}}\right)$$

MÉTHODE
Pour extraire t d'une exponentielle : isoler l'exponentielle seule dans un membre, puis appliquer $\ln$. Le signe « $-$ » disparaît en inversant le quotient, car $-\ln(a/b) = \ln(b/a)$.

Q7 Calculer la durée $t_{\text{idéale}}$ et indiquer si elle est cohérente avec le graphique de l'annexe. Une construction graphique est attendue.

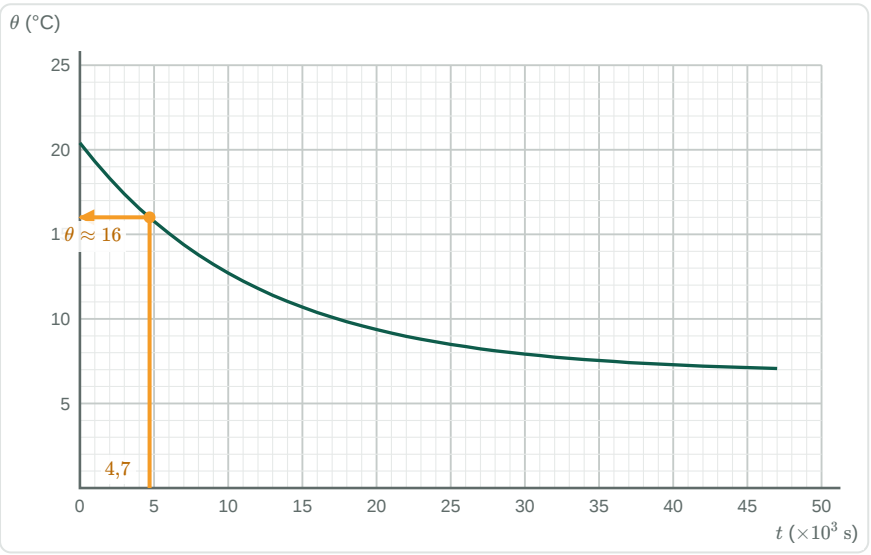
Données utiles $\tau = 12 \times 10^3$ s (Q4) ; $\theta_0 = 20{,}4$ °C ; $\theta_{\text{réfri}} = 6{,}8$ °C ; $\theta_{\text{idéale}} = 16$ °C

$$t_{\text{idéale}} = 12 \times 10^3 \times \ln\left(\frac{20{,}4 - 6{,}8}{16 - 6{,}8}\right) = 4{,}7 \times 10^3 \text{ s}$$

soit environ 1 h 18 min.

Sur la figure 1, on se place à l'abscisse $4{,}7 \times 10^3$ s, on rejoint la courbe puis l'axe des ordonnées : on lit $\theta \approx 16$ °C.

$t_{\text{idéale}} = 4{,}7 \times 10^3$ s : durée cohérente avec le graphique.



Q7 · Figure 1 de l'annexe : lecture de la température à $t_{\text{idéale}}$

PIÈGE
Une différence de températures a la même valeur en °C et en K : inutile de convertir. Convertir une seule des températures fausserait le quotient.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme τ et $\theta_{\text{idéale}}$. Avec $\tau = \frac{\rho_S V_S c_S}{\alpha} = 1{,}25 \times 10^4$ s, on obtient $4{,}9 \times 10^3$ s : même ordre de grandeur, également accepté.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$12 \times 10^3 \times \ln\left(\frac{20.4 - 6.8}{16 - 6.8}\right) \approx 4690.396$

Q8 Expliquer pourquoi, dans l'hypothèse d'un système fermé, le quotient $\frac{P}{T}$ peut être considéré constant lors du refroidissement de l'air du réfrigérateur.

Équation d'état du gaz parfait pour l'air intérieur : $P\,V_{\text{réfri}} = n\,R\,T$, soit $\frac{P}{T} = \frac{n\,R}{V_{\text{réfri}}}$.

Le système est fermé : la quantité de matière n d'air est constante. Le volume $V_{\text{réfri}}$ de l'enceinte est fixe et R est une constante.

$$\frac{P}{T} = \frac{n\,R}{V_{\text{réfri}}} = \text{constante}$$

Q9 Calculer, dans ce modèle, la pression P_{finale} de l'air à l'intérieur du réfrigérateur lorsque la température intérieure s'est stabilisée à 277 K.

Données utiles $P_0 = P_{\text{amb}} = 1009{,}1 \times 10^2$ Pa ; $T_0 = T_{\text{amb}} = 293$ K ; $T_{\text{finale}} = 277$ K

Comme $\frac{P}{T}$ est constant : $\frac{P_{\text{finale}}}{T_{\text{finale}}} = \frac{P_0}{T_0}$, donc $P_{\text{finale}} = P_0 \times \frac{T_{\text{finale}}}{T_0}$.

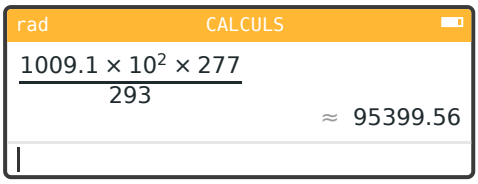
$$P_{\text{finale}} = 1009{,}1 \times 10^2 \times \frac{277}{293} = 9{,}54 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$P_{\text{finale}} = 9{,}54 \times 10^4$ Pa, soit 954×10^2 Pa

PIÈGE
Les températures doivent rester en kelvins : le rapport $\frac{T_{\text{finale}}}{T_0}$ calculé en degrés Celsius (4/20) donnerait un résultat absurde.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme les températures. La pression baisserait d'environ 55×10^2 Pa, soit 5 % : c'est considérable pour une porte.

À LA CALCULATRICE



Q10 Indiquer une raison possible de l'écart entre le résultat du calcul précédent et la pression réellement mesurée.

Données utiles $P_{\text{finale}} = 954 \times 10^2$ Pa (Q9) ; pression mesurée voisine de $1009{,}1 \times 10^2$ Pa

Le sujet renvoie à « la question Q8 » : le calcul concerné est celui de la question Q9.

La pression mesurée est restée égale à la pression ambiante, alors que le modèle prévoit une baisse. L'hypothèse du système fermé n'est donc pas vérifiée : la porte n'est pas parfaitement étanche. Pendant le refroidissement, lent, de l'air extérieur entre par les joints ; n augmente et la pression intérieure se rééquilibre avec la pression extérieure.

Le réfrigérateur n'est pas un système fermé : de l'air entre, la pression intérieure reste égale à P_{amb}.

COMPRENDRE
Erreur de renvoi dans l'énoncé : la question Q8 ne comporte aucun calcul. On le signale en une ligne et on répond sur la valeur trouvée en Q9.

Q11 À l'aide de la figure 2, justifier qu'il peut être difficile de rouvrir la porte du réfrigérateur après une durée $\Delta t = 3$ s.

Données utiles fermeture à $t_1 = 4476$ s ; avant la fermeture, $P = P_{\text{amb}} \approx 1009{,}1 \times 10^2$ Pa

Trois secondes après la fermeture : $t = t_1 + \Delta t = 4476 + 3 = 4479$ s.

Sur la figure 2, à cet instant, la pression intérieure est proche de son minimum : $P_{\text{int}} \approx 1008{,}55 \times 10^2$ Pa, inférieure à la pression extérieure $P_{\text{amb}} = 1009{,}1 \times 10^2$ Pa.

L'air extérieur appuie donc plus fort sur la porte que l'air intérieur : la porte est plaquée contre le réfrigérateur.

À $t = 4479$ s, $P_{\text{int}} < P_{\text{amb}}$: la porte est poussée vers l'intérieur, donc difficile à rouvrir.

COMPRENDRE
L'air chaud entré pendant l'ouverture se refroidit vite une fois la porte fermée : sa pression chute en quelques secondes, puis remonte lentement à mesure que de l'air s'infiltre par les joints.

Q12 En assimilant la porte à une plaque rectangulaire très fine de surface S_{plaque}, déterminer la valeur et la direction de la résultante $\vec{F}$ des forces pressantes sur la plaque après $\Delta t = 3$ s. Commenter.

Données utiles $S_{\text{plaque}} = 1{,}2\ \text{m}^2$; $P_{\text{amb}} = 1009{,}1 \times 10^2$ Pa ; $P_{\text{int}} = 1008{,}55 \times 10^2$ Pa (Q11) ; $g = 9{,}8\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$

Chaque face de la porte subit une force pressante perpendiculaire à la plaque, de valeur $F = P\,S$:

- air extérieur : $F_{\text{ext}} = P_{\text{amb}}\,S_{\text{plaque}}$, dirigée vers l'intérieur ;
- air intérieur : $F_{\text{int}} = P_{\text{int}}\,S_{\text{plaque}}$, dirigée vers l'extérieur.

Ces forces sont de sens opposés et $F_{\text{ext}} > F_{\text{int}}$: $F = (P_{\text{amb}} - P_{\text{int}})\,S_{\text{plaque}}$

$$F = (1009{,}1 \times 10^2 - 1008{,}55 \times 10^2) \times 1{,}2 = 66\ \text{N}$$

Commentaire : cette force équivaut au poids d'une masse $m = \dfrac{F}{g} = \dfrac{66}{9{,}8} \approx 6{,}7$ kg. Il faut vaincre cet effort supplémentaire pour tirer la porte : l'ouverture est nettement plus difficile.

$F \approx 66$ N, perpendiculaire à la porte, dirigée de l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur.

PIÈGE

Multiplier une seule pression par la surface donne plus de 10^5 N : c'est la force sur une face, pas la résultante. Seule la différence de pression compte, et le facteur 10^2 ne doit pas être oublié.

COMPRENDRE

L'écart de pression n'est que de 55 Pa, soit 0,05 % de la pression ambiante ; appliqué sur plus d'un mètre carré, il suffit pourtant à produire un effort sensible.

À LA CALCULATRICE

