

Problème III - Le manchot empereur

Source : Gilbert C. *et al.*, Energy saving processes in huddling emperor penguins : from experiments to theory, *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, 2008, p. 1-8.

Le manchot empereur *Aptenodytes forsteri* est la plus grande espèce de manchots, avec en moyenne une taille de 1,2 m et une masse corporelle de 30 kg. Ce manchot est capable d'affronter sur de longues durées les conditions climatiques extrêmes de l'Antarctique, caractérisées par des températures moyennes de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ lors des longues nuits polaires du mois de juin et des températures ressenties atteignant les $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque le blizzard souffle au plus fort. Le secret de cette exceptionnelle capacité d'isolation thermique réside dans toute une série d'adaptations, en particulier physiologiques et comportementales.

Du point de vue des échanges thermiques, on modélise un manchot par un cylindre d'axe (O, \vec{u}_z) , de rayon $R = 10\text{ cm}$, de longueur $\ell = 1,2\text{ m}$, recouvert successivement :

- d'une couche de graisse d'épaisseur $e_g = 2,0\text{ cm}$ et de conductivité thermique $\lambda_g = 0,20\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- d'une couche de filaments duveteux enfermant une épaisseur $e_a = 1,0\text{ cm}$ d'air de conductivité thermique $\lambda_a = 0,026\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- d'une couche très dense de plumes courtes et raides, disposées en diagonale et imbriquées les unes dans les autres pour former un véritable « coupe-vent » imperméable à l'eau, d'épaisseur $e_p = 2,0\text{ cm}$ et de conductivité thermique $\lambda_p = 0,035\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

En régime stationnaire, le métabolisme de l'animal fournit une puissance \mathcal{P}_m permettant de maintenir sa température interne T_i constante.

II.1 - Généralités

On considère deux cylindres de même axe (O, \vec{u}_z) , de longueur ℓ et de rayons R_1 et R_2 , de surfaces latérales isothermes portées aux températures respectives T_1 et $T_2 < T_1$ (**figure 4**).

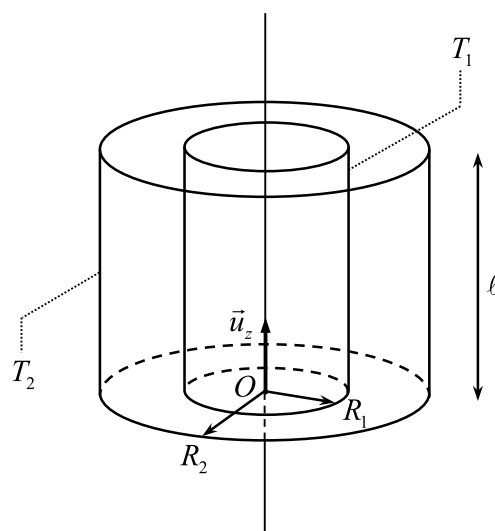


Figure 4 - Conducteur thermique à symétrie cylindrique

Le milieu séparant ces deux surfaces, homogène, isotrope, de conductivité thermique λ , est le siège d'un phénomène de transfert thermique uniquement radial en négligeant tout effet de bord. On suppose le régime stationnaire atteint. En tout point M du milieu, repéré par ses coordonnées cylindriques dans le repère $(O, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$, la température y est donc fonction uniquement de la distance ρ à l'axe (O, \vec{u}_z) : $T(M) = T(\rho)$.

Q10. Le vecteur associé au flux thermique Φ_{th} est le vecteur densité de courant thermique \vec{j}_{th} .

Que représente physiquement la norme de ce vecteur ? Préciser son unité.

Q11. Justifier que $\vec{j}_{th} = -\lambda \frac{dT}{d\rho} \vec{u}_\rho$. Justifier physiquement le signe moins.

Q12. Effectuer en régime stationnaire un bilan thermique, entre les instants t et $t + dt$, pour la portion du milieu comprise entre les cylindres d'axe (O, \vec{u}_z) , de longueur ℓ , de rayons ρ et $\rho + d\rho$ ($R_1 < \rho < R_2$). En déduire que l'expression du champ de température $T(\rho)$ en tout

point M du milieu est :
$$T(\rho) = \frac{T_1 - T_2}{\ln(R_1 / R_2)} \ln(\rho / R_1) + T_1.$$

Q13. Définir la résistance thermique R_{th} du milieu. Montrer qu'elle s'écrit : $R_{th} = \frac{1}{2\pi\lambda\ell} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$.

II.2 - Détermination du métabolisme d'un manchot

Q14. Retrouver l'ordre de grandeur de la valeur adoptée du rayon R du cylindre modélisant un manchot supposé uniquement constitué d'eau.

Q15. En régime stationnaire, justifier que le flux thermique Φ_{th} dégagé par un manchot est égal à la puissance \mathcal{P}_m due à son métabolisme.

Q16. Comment sont associées les résistances thermiques de chacune des couches recouvrant un manchot ? Justifier. À partir du résultat de **Q13**, donner l'expression de la résistance thermique $R_{th,1}$ équivalente à cette association en fonction notamment des conductivités thermiques et des épaisseurs des différentes couches. Calculer la valeur de $R_{th,1}$.

Q17. Les transferts thermiques entre la face extérieure du plumage du manchot à la température T_p et l'air extérieur à la température T_e sont modélisés par une densité de courant thermique conducto-convectif : $\vec{j}_{th,cc} = h(T_p - T_e)\vec{u}_\rho$ où h est le coefficient de transfert conducto-convectif. En se limitant à la surface latérale du cylindre d'aire S modélisant le manchot, exprimer en fonction de h et S la résistance thermique $R_{th,cc}$ associée à ce transfert.

Q18. En considérant que le manchot et l'atmosphère rayonnent comme des corps noirs de températures respectives T_p et T_e très proches, on admet que le flux radiatif surfacique φ_r émis par le manchot, s'écrit : $\varphi_r \cong 4\sigma T_e^3(T_p - T_e)$ où σ est la constante de Stefan.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Exprimer, en fonction de σ , T_e et S , la résistance thermique R_r associée à ce transfert si on se limite ici aussi à la surface latérale du cylindre modélisant le manchot.

Q19. Comment sont associées les résistances thermiques correspondant aux transferts conducto-convectifs et radiatifs ? Justifier. Donner l'expression de la résistance thermique $R_{th,2}$ équivalente à cette association en fonction de σ , T_e , h et S . Calculer la valeur de $R_{th,2}$ lorsque le manchot se trouve dans un environnement à la température $T_e = -17\text{ °C}$ en présence d'un vent de vitesse $V = 5,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. On admettra que le coefficient de transfert conducto-convectif s'écrit : $h = 5,7 + 3,5\cdot V$ où V est exprimé en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et h en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Q20. Donner l'expression en la justifiant de la résistance thermique totale $R_{th,tot}$ du manchot en fonction de $R_{th,1}$ et $R_{th,2}$. En déduire la valeur de la puissance \mathcal{P}_m due au métabolisme nécessaire à un manchot pour maintenir une température interne $T_i = 37,7\text{ °C}$ dans un environnement à la température $T_e = -17\text{ °C}$ et en présence d'un vent de vitesse $V = 5,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vérifier que la puissance \mathcal{P}_m est de l'ordre de 50 W.

En plus de ses exceptionnelles capacités d'isolation thermique, le manchot empereur a développé une ultime stratégie pour réduire ses déperditions de chaleur : la thermorégulation sociale consistant à s'assembler en très grands groupes compacts de plusieurs centaines d'individus.

Des travaux de recherche menés en 2007 par l'équipe française de Caroline Gilbert ont évalué expérimentalement les bénéfices de ce comportement. Ils ont pour cela mesuré la puissance \mathcal{P}_m due au métabolisme sur trois groupes de manchots, à partir de leur perte de poids en fonction du temps. Les premiers étaient seuls, isolés dans des enclos. Les seconds étaient parqués dans des enclos par petits groupes de 5 à 10 individus. Les troisièmes étaient libres de se déplacer et pouvaient s'assembler en très grands groupes. Les trois populations étaient soumises aux mêmes conditions d'environnement : température extérieure moyenne de -17 °C et un vent moyen de $5,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le tableau suivant rassemble leurs observations (**tableau 1**).

	Isolé	Petits groupes	Grands groupes
\mathcal{P}_m (W)	85	52	43

Tableau 1 - Puissance due au métabolisme dans trois groupes de manchots différents

Q21. À la lumière des résultats de l'équipe de recherche de Caroline Gilbert, discuter la modélisation effectuée dans cette partie. Expliquer brièvement pourquoi les grands rassemblements de manchots réduisent la puissance due à leur métabolisme.