

Examen de Phénomènes de Transport.
133^è promotion
Régulation thermique des étourneaux sansonnets.
Thermal regulation of starlings.

Seuls documents autorisés : notes de cours.

Les calculatrices sont autorisées

Les plumes des oiseaux procurent une excellente isolation thermique contre le froid, mais cette isolation pourrait conduire à une hyperthermie pendant le vol prolongé. En effet pendant le vol, l'activité métabolique est 10 à 20 fois plus grande qu'au repos et seuls 10 à 20 % de l'énergie produite est effectivement utilisée pour la propulsion. Les 90 à 80 % restants sont dissipés en chaleur. Les oiseaux doivent donc évacuer efficacement cette chaleur afin de voler pendant des périodes prolongées. Ce transfert de chaleur a été étudié systématiquement chez l'étourneau sansonnet (*sturnus vulgaris*) une espèce qui se prête à des études en soufflerie. Dans un article paru dans Journal of Experimental Biology en 1999, S. Ward et collègues ont calculé les flux de chaleur sur une quinzaine d'oiseaux entraînés pour voler dans une soufflerie à des vitesses U variant entre 6 et 14 m/s.

La température de surface des oiseaux est mesurée grâce à une caméra infra-rouge sensible dans la gamme de longueur d'onde de 6 à 12 μm . Deux exemples de thermographies infrarouge sont représentées sur la fig. 1.

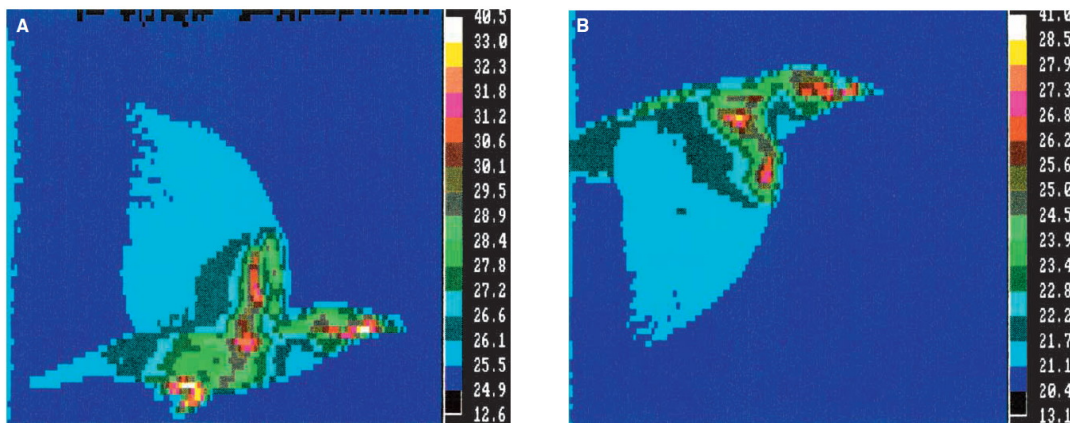


FIGURE 1 – Thermographie infrarouge d'étourneaux en vol. A gauche, aile en position haute, température de l'air $T_a=25^\circ\text{C}$. A droite, aile en position basse, température de l'air $T_a=20,5^\circ\text{C}$. Infrared imaging of flying starlings. Left, wing in uppermost position, air temperature $T_a=25^\circ\text{C}$. Right, wing in lowermost position, air temperature $T_a=20,5^\circ\text{C}$

Nous cherchons ici à reproduire les calculs permettant de calculer le flux de chaleur échangé entre les oiseaux et l'air.

Les caractéristiques géométriques moyennes des oiseaux sont les suivantes : la surface totale du corps est de l'ordre de 500 cm^2 , les ailes contribuant pour 330 cm^2 . S. Ward et al. ont divisé la surface des oiseaux en 14 parties différentes représentées sur la fig. 2, parties qui présentent des température de surface T_s différentes. Nous allons considérer ici un modèle simplifié prenant en compte seulement 3 parties : A les pattes, B la partie brachiale des ailes, C le reste du corps et des ailes. Les deux premières parties sont peu ou pas couvertes par des plumes et ont des température de surface plus élevées que le reste du corps. La surface de chacune des ces parties et la différence de température de surface avec celle de l'air ambiant T_a sont données dans le tableau 1. Du point de vue de l'écoulement d'air, la partie brachiale des ailes et le reste du corps sont assimilées à des plaques planes de rapport d'aspect W/L égal à 4, W étant la largeur (perpendiculairement à

l'écoulement) et L la longueur dans la direction de l'écoulement ; les pattes sont assimilées à des cylindres de longueur moyenne $L_p = 4$ cm et de diamètre moyen $D_p = 0,3$ cm.

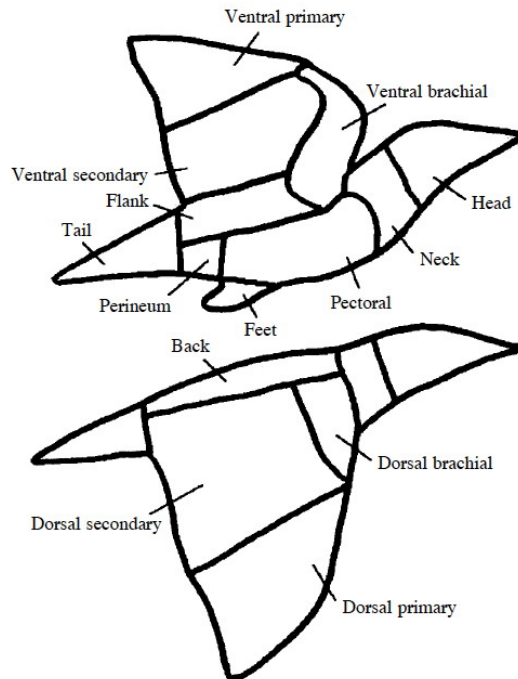


FIGURE 2 – Différentes parties du corps des oiseaux considérées par S. Ward et al. Different parts of the bird body considered by S. Ward et al.

TABLE 1 – Caractéristiques des différentes parties du modèle simplifié. Characteristics of the different parts of the simplified model.

	surface (cm ²)	$T_s - T_a$ (°C)
A pattes legs	S_A 8	δT_A 7
B partie brachiale des ailes brachial part of wings	S_B 80	δT_B 5,5
C reste du corps other body parts	S_C 400	δT_C 3

1 Transfert radiatif

1. Justifier la gamme de longueur d'onde utilisée pour mesurer la température de surface des oiseaux.

2. La caméra infra-rouge mesure le flux électromagnétique rayonné par une surface. Compte tenu de la gamme de longueur d'onde à laquelle est sensible le capteur de la caméra, comment faut-il modifier la loi de Stefan pour convertir le flux mesuré en température (on ne demande pas le calcul explicite de la correction mais seulement sa forme analytique) ? Le flux électromagnétique varie-t-il avec la température de la même façon que dans la loi de Stefan ?

TABLE 2 – Propriétés physiques de l’air. Physical properties of air.

masse volumique (kg/m ³) density	viscosité cinématique (m ² /s) kinematic viscosity
1,3	$1,5 \times 10^{-5}$
diffusivité thermique (m ² /s) thermal diffusivity	conductivité thermique (W/m.K) thermal conductivity
$2,1 \times 10^{-5}$	0.025

3. La température des parois de la soufflerie est égale à 20°C et on considère que l’air est à la même température. L’émissivité ϵ du corps des oiseaux est estimée à 0,95. En négligeant le rayonnement de l’air ambiant et en ne considérant pas les facteurs géométriques d’échange entre la surface de l’oiseau et la soufflerie, estimer le flux de chaleur radiatif pour chacune des parties A, B, C et le flux total échangé pour l’ensemble de l’oiseau.

2 Transfert diffusif et convectif

4. Donner un ordre de grandeur des paramètres sans dimension pertinents qui caractérisent l’écoulement dans l’air autour de l’oiseau et le transfert de chaleur. On prendra $U = 10$ m/s.

5. Faut-il prendre en compte le transport par diffusion pure ?

6. En effectuant une analyse dimensionnelle de l’équation de transport de la chaleur, donner une expression du flux de chaleur local à la surface de l’oiseau aussi bien pour les parties du corps B et C assimilées à des plaques planes que pour les pattes.

7. Donner une expression en loi d’échelle du nombre de Nusselt pour les parties B et C et pour les pattes.

8. Estimer le flux de chaleur de total dû à l’écoulement d’air autour de l’oiseau. Les physiologistes ont noté que les oiseaux augmentent l’échange de chaleur en ne collant pas les pattes au corps et en les laissant trainer dans l’air. Quelle est la contribution spécifique des pattes au flux de chaleur ?

9. Entre le transfert radiatif et le transfert par convection quel est le mécanisme dominant ?

10. S. Ward et collaborateurs ont estimé par une méthode indépendante la puissance métabolique développée par les étourneaux en vol. Cette puissance varie linéairement avec la vitesse U , depuis 8 W à 6 m/s, jusqu’à 13 W à 14 m/s. Comment cette puissance se compare-t-elle à l’estimation du flux de chaleur dans le modèle simplifié développé ci-dessus ?

English version

The feathers of birds provide a remarkable thermal insulation in a cold environment, but this insulation could lead to hyperthermia during a long flight. During active flight, the metabolic activity increases by a factor 10 to 20 compared to the rest state. 10 to 20 % of the energy produced is used effectively for propulsion. The remaining 90 to 80 % are dissipated into heat. Birds should be able to evacuate this heat for sustained flight. This heat transfer has been studied systematically in starlings (*sturnus vulgaris*) a species which permits experiments in wind tunnels. In a paper published in Journal of Experimental Biology in 1999, S. Ward and colleagues computed heat fluxes on 15 birds trained to fly in a wind tunnel at velocities U varying between 6 and 14 m/s.

The surface temperature of birds is measured with an infrared camera operating in the wavelength range 6 to 12 μm . Two examples of infrared thermography are shown on fig. 1.

We are trying here to reproduce the calculations of the heat flux exchanged between the birds and the surrounding air.

The average geometric characteristics are the following : the total area of the body is 500 cm^2 , the wings contributing for 330 cm^2 . S. Ward et al. considered 14 different parts on the bird surface as shown on fig. 2, these parts having different surface temperatures T_s . We consider here a simplified model with only three parts : A legs, B brachial parts of wings, C the remainder of the body and wings. The two first parts have no or few feathers and their surface temperature is higher than the remainder of the body. The area and surface temperature of each part are listed in table 1. For the flow field, the brachial parts of wings and part C are considered to be flat plates with an aspect ratio W/L equal to 4, W being the width (perpendicular to the wind) and L the length in the direction of the wind. The legs are considered as cylinders with an average length $L_p = 4 \text{ cm}$ and an average diameter $D_p = 0,3 \text{ cm}$.

3 Radiative transfer

1. Justify the range of wavelengths used to measure the surface temperature of birds.
2. The infrared camera measures the electromagnetic flux emitted by a surface. Given the range of wavelengths in which the camera sensor operates, how should one modify Stefan's law to convert the measured flux into a temperature (the explicit calculation is not required, but only its analytical form) ? Is the temperature variation of the measured flux identical to the variation in Stefan's law ?
3. The temperature of the wind tunnel walls is equal to 20° C and we consider that air is at the same temperature. The emissivity ϵ of birds is estimated to be 0.95. Neglecting the radiation from ambient air and ignoring any view factors between the surface of birds and the tunnel walls, estimate the radiative heat flux for each of the parts A, B, C and the total flux exchanged on the bird.

4 Diffusive and convective transfer

4. Give an order of magnitude of the dimensionless parameters relevant for the air flow around birds and for the heat transfer. The velocity of the air flow is taken as $U = 10 \text{ m/s}$.
5. Is it necessary to take into account the transfer by pure diffusion ?
6. Using a dimensional analysis of the heat transport equation, give an expression for the local heat flux on the surface of the bird for the parts B and C, considered as flat plates and for the legs as well.
7. Give an expression in scaling law for the Nusselt number on parts B and C and for the legs.
8. Estimate the total heat flux due to the air flow around the bird. Physiologists have noted that birds increase their heat transfer by moving the legs away from the body and dragging them into air. What is the specific contribution of legs to the heat flux ?
9. What is the dominant mechanism of heat transfer : radiation or convection by the flow ?
10. S. Ward and colleagues estimated, by an independent method, the metabolic power of starlings in flight. This power increases linearly with flight speed U from 8 W at 6 m/s to 13 W at 14 m/s . How does this power compare with the heat flux estimated in the simple model developed above ?