

RETOUR SUR « DÉCOLLAGES À CHAUD »

Notre article «*Décollages à chaud*», paru dans le numéro d'octobre (*Pour la Science* n° 480), a suscité plusieurs courriers de lecteurs portant d'une part sur le pilotage des avions et d'autre part sur les effets physiques évoqués. Nous remercions ces lecteurs pour leurs commentaires et les précisions qu'ils nous ont fournies. Nous avons repris certains passages de leurs courriers dans la suite de ce texte afin de clarifier certains points.

Commençons par quelques précisions données par des professionnels sur la phase de décollage.

Lors de l'accélération sur la piste, le pilote ne fait pas décoller l'avion dès que la portance est suffisante, ce qui correspondrait à la vitesse de décrochage. «Au contraire, le pilote empêche l'avion de décoller, lui fait dépasser la vitesse de décrochage pour avoir de la sécurité et tire sur le manche quand est atteinte la "vitesse rotation", déterminée avant le décollage en fonction de la masse, de la température et de la pression.» L'avion commence à s'incliner pour prendre l'assiette de montée, continue à accélérer, puis, lorsque la vitesse décidée pour décoller est atteinte, il quitte le sol. Lors du décollage proprement dit, en tirant sur le manche, «le pilote agit plutôt sur la gouverne de profondeur située sur l'empennage arrière, et non sur les ailerons des ailes, destinés à contrôler le mouvement de roulis [inclinaison sur le côté].»

Un troisième point de pilotage concerne le contrôle de la vitesse de l'avion, en référence à l'encadré de la page 90. Levons l'ambiguïté du texte: lorsque l'avion est en vol, ce que contrôle effectivement le pilote, c'est la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Comme l'indiquent les flèches représentant les vitesses dans la figure, la vitesse au sol de l'avion est alors la somme vectorielle de cette vitesse et de la vitesse du vent. Donc, pour une même vitesse par rapport à l'air, la vitesse par rapport au sol sera plus faible si le vent est de face, et plus importante si le vent est de dos, comme écrit dans le texte.

Venons-en à présent aux effets physiques discutés. Un lecteur nous signale que l'un des effets majeurs de l'augmentation de température (ou de la diminution de la densité) de l'air est la réduction de la poussée des moteurs. Nous avons

mentionné cet effet dans notre article, mais nous ne l'avions ni expliqué ni quantifié. L'origine de cet effet est le suivant: «Si l'on augmente le débit de carburant brûlé, la poussée augmente, la température devant la turbine et le régime de rotation augmentent. Lorsque la température devant la turbine ou le régime de rotation atteignent une valeur limite imposée par la résistance des matériaux, on ne peut plus augmenter le débit de carburant, ce qui limite la poussée à une valeur maximale. Or la température devant la turbine ou le régime de rotation augmentent si la densité de l'air alimentant le moteur diminue, puisque le débit massique d'air à chauffer et à brasser par le compresseur diminue. Ainsi, le débit de carburant maximal autorisé, donc la poussée, diminue si la densité diminue.»

Cela signifie que l'accélération de l'avion sera moindre et que le temps et la distance requis pour atteindre la vitesse nécessaire au décollage seront augmentés. Cet effet est dominant par rapport à

par exemple que pour un 737-100, un jour standard, pour les aéroports situés à plus de 6000 pieds d'altitude, le poids maximum au décollage est limité par la vitesse que peuvent supporter les pneus. Dans cette situation, lorsque la température est plus élevée, comme la portance diminue, cette vitesse est atteinte pour une masse plus faible et l'avion doit être moins chargé.

Ces courriers nous donnent l'occasion de rappeler notre démarche: présenter et expliquer ce que peuvent apporter le regard et les outils du physicien dans des situations diverses. Bien souvent, nous choisissons des sujets où nous pouvons expliquer qualitativement et quantitativement le phénomène abordé (par exemple les tubes hurleurs, *Pour la Science* n° 479). Mais nous ne nous interdisons pas d'aborder des sujets qui ne sont pas encore totalement compris (comme l'effet Mpemba, *Pour la Science* n° 342) ou des situations technologiques complexes, comme dans le cas présent. Après un travail bibliographique substantiel, nous



la diminution de la portance évoquée dans le texte qui, comme nous l'avions écrit, ne permet pas de retrouver les valeurs de longueurs de piste données par les constructeurs.

Ajoutons d'ailleurs que l'une des limites non évoquées pour la vitesse de décollage est la vitesse limite d'utilisation des pneus. Les abaques de vitesse donnés dans la brochure de Boeing sur les caractéristiques des différents modèles de 737 pour la conception des aéroports indique

tentons d'explicitier les phénomènes physiques qui interviennent, d'évaluer quantitativement leur effet et veillons à donner les limites de ces explications. C'est une démarche qui demeure généraliste et nous ne saurions, malgré nos efforts, atteindre la précision du vocabulaire et la richesse de l'analyse que peuvent offrir des années d'expériences dans le domaine concerné. ■

J.-M. COURTY ET É. KIERLIK

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

THE WALKING HEAD

Mignons et fascinants, les tardigrades restaient une énigme pour les zoologistes. L'étude de leur génome a révélé une facette inattendue de leur anatomie et pour le moins glaçante...

Antoni Van Leeuwenhoek, scrutateur inlassable de l'infiniment petit, en observa-t-il sous son microscope ? Il n'en parle pas, et c'est l'entomologiste allemand Johann Goeze qui, un siècle plus tard, en 1773, est le premier à décrire ces étranges animaux. Frappé par leur curieuse démarche sous le microscope, il les appelle « oursons d'eau ». Trois ans plus tard, le naturaliste italien Lazzaro Spallanzani les baptise du nom de « marcheurs lents », en latin *tardus gradus* – au pluriel *tardigrada*, les tardigrades. Il ne croyait pas si bien dire.

Ces petits animaux, qui mesurent 0,1 à 1,7 millimètre, semblent avoir conquis tous les milieux. On les trouve des glaces polaires à l'équateur, à des altitudes supérieures à 6000 mètres dans l'Himalaya ou inférieures à 4000 mètres dans les océans. Lentement, ils colonisent les mousses et

les lichens, les sables des déserts et les sédiments marins, s'installant dans le moindre interstice. Certains sont parasites et vivent sur les branchies de lamellibranches (des mollusques marins) ou les pattes de crustacés. Leur trompe munie de stylets perforateurs leur permet de se nourrir, par exemple, de cellules de mousses ou de lichens, mais aussi de nématodes... ou d'autres tardigrades.

Ces animaux doivent leur résistance exceptionnelle à leur aptitude à passer en « cryptobiose », un état physiologique où le métabolisme est totalement arrêté, l'organisme devenant indestructible. Cette propriété les autorise à survivre dans des conditions environnementales hors norme, *a priori* interdites à tout organisme vivant. Mais ce n'est pas tout. Leur anatomie, qui commence à être bien décryptée, se révèle tout aussi étrange...

Les oursons d'eau se déplacent lentement sur leurs quatre paires de pattes

Leur très petite taille autorise la déshydratation rapide de la cavité corporelle. Ils entrent alors dans un état latent indestructible, la cryptobiose.

Les tardigrades sont ovipares. En conditions défavorables, les œufs sont résistants, à paroi épaisse. En saison favorable, ils ont une paroi mince et se développent immédiatement.



Grâce à la cryptobiose et suivant les espèces, les tardigrades survivent à une dessiccation complète, au froid, au manque d'oxygène, à une teneur élevée en solutés. Ils résistent aussi à un milieu très acide, à des doses importantes de rayons ionisants (ultraviolets, X ou gamma) et même au vide intersidéral. Ces propriétés étonnantes – observées aussi chez d'autres animaux tels que des rotifères, des nématodes ou des arthropodes – découlent de caractéristiques génétiques particulières, telles que la synthèse de tréhalose, un sucre cryoprotecteur.

EN CHIFFRES

1 238

espèces de tardigrades sont connues dans le monde.

2 millions

d'individus par mètre carré, c'est la densité de tardigrades que l'on observe parfois sur des mousses.

- 273 °C

Les tardigrades supportent cette température pendant 20 heures, et - 200 °C pendant 20 mois. Des tardigrades ont ainsi survécu à 2000 ans d'emprisonnement dans des calottes glaciaires. La chaleur ne les perturbe pas plus : ils supportent une température de 150 °C pendant quelques instants...

Le système nerveux est constitué d'un « cerveau » (protocérébron) à deux lobes qui innervent les yeux, connecté à un anneau qui entoure le pharynx et relié à quatre ganglions, un pour chaque paire de pattes. Chez les autres panarthropodes, le cerveau est moins connecté au reste du système nerveux.

Le tube digestif est constitué d'une bouche munie de stylets perforateurs (qui seraient des griffes transformées), d'un pharynx fonctionnant comme une pompe, d'un œsophage, d'un estomac large, d'un rectum court et d'un anus.

L'animal n'a que des muscles longitudinaux lisses, d'où son déplacement lent.

Pas d'organe respiratoire. Les gaz s'échangent à travers la surface humide de l'animal et diffusent jusqu'aux tissus.

zoologistes pour leur trouver une place logique dans la classification animale. La segmentation les rapprocherait des annélides (l'ensemble des vers annelés) ou des arthropodes, mais l'absence de tout système interne circulatoire, respiratoire et excréteur pose question.

COUSIN DES ARTHROPODES ?

Les phylogénies moléculaires les plus récentes placent les tardigrades dans l'embranchement des panarthropodes, avec les onychophores et les euarthropodes (les arthropodes actuels). Les onychophores – « porteurs de griffes » – sont de longs animaux segmentés, chaque segment étant pourvu d'une paire d'appendices marcheurs. Ils vivent dans des aires fragmentées, toutes au sud du tropique du Cancer, provenant de la fracturation du continent de Gondwana. Les euarthropodes regroupent des taxons bien connus – crustacés, arachnides, mille-pattes, insectes. Ils présentent eux aussi de nombreux segments.

Le regroupement de ces trois taxons – tardigrades, onychophores et euarthropodes – au sein du superphylum des panarthropodes implique que l'organisation de chacun soit héritée d'un ancêtre hypothétique commun, dont on devrait pouvoir reconstruire la structure. De nombreuses questions se posent alors. Notamment, l'ancêtre avait-il de nombreux segments ou seulement quatre, comme les tardigrades ? Répondre à une telle question revient à trouver l'homologie entre les différentes parties du corps ➤

munies de griffes, mues par de seuls muscles longitudinaux (ils n'ont pas de muscles transverses). Ils portent une cuticule complexe, constituée de chitine (le principal composant de l'enveloppe externe des insectes), de protéines et de mucopolysaccharides (des groupements de glucides), avec des mues périodiques. Chez certaines espèces de tardigrades, elle forme des plaques qui soulignent les différents segments de l'animal.

On distingue ainsi, chez tous les tardigrades, un plan d'organisation homologue : une tête suivie de quatre segments portant chacun une paire de pattes. Pourtant, cette anatomie présente des énigmes, ce qui explique la difficulté des



Tardigrade
Hypsibius dujardini
Taille : 0,5 mm