

> masse volumique de l'air ambiant, au carré de la vitesse de l'animal par rapport à cet air et à la surface de ses ailes. La composante verticale de cette force, la portance, permet de voler tandis que sa composante horizontale, la «traînée», s'oppose à la vitesse. Voler à altitude constante impose au volatile de se déplacer assez vite par rapport à l'air pour que la portance compense le poids. Pour un animal volant de taille L , la surface des ailes est proportionnelle au carré de L alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de L . Ainsi, la vitesse à laquelle la portance compense le poids est proportionnelle à la racine carrée de la taille de l'animal: plus il est grand, plus il doit voler vite pour se maintenir en l'air.

Mais voler à altitude constante nécessite aussi de fournir une puissance suffisante pour compenser l'effet de la traînée, faute de quoi la vitesse diminuera et le volatile tombera. Les ailes remplissent donc à la fois le rôle de sustentateur et celui de propulseur. Comme la portance, la force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse par rapport à l'air. La puissance à dépenser pour se maintenir en l'air, égale au produit de la traînée par la vitesse relativement à l'air, varie donc comme le cube de cette vitesse.

Comme il est très coûteux en énergie de voler vite, une espèce volante a nécessairement un métabolisme actif. On montre que la puissance à fournir pour compenser la puissance dissipée par la traînée varie comme la masse de l'animal à la puissance $7/6$. La puissance est fournie par les muscles et, selon une loi empirique, varie comme la puissance $3/4$ de sa masse, plus lentement que la puissance à dépenser. Il existe donc une limite supérieure à la masse d'un volatile, fixée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol. L'outarde, avec ses 20 kilogrammes en moyenne, est l'oiseau volant actuel le plus massif.

Afin d'économiser leur énergie, les grands oiseaux, tels le condor des Andes (3,2 mètres d'envergure pour une masse variant entre 11 et 15 kilogrammes) et l'albatros (3,4 mètres d'envergure pour une masse comprise entre 6 et 12 kilogrammes), préfèrent planer avec leurs grandes ailes alors que les pigeons et les moineaux pratiquent plus volontiers le vol battu. Plus grand, plus lourd, *Pelagornis sandersi* évoluait dans le ciel il y a 25 à 28 millions d'années avec une envergure estimée à plus de 6 mètres pour une masse comprise entre 22 et 40 kilogrammes! En 2014, grâce à des simulations numériques, Daniel Ksepka, conservateur au Bruce Museum, dans le Connecticut, a montré que cet oiseau était capable de planer à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans avoir besoin de battre des ailes.

Cette envergure record pour un oiseau n'a teint cependant pas celle des plus grands

ptérosaures: *Quetzalcoatlus* et *Hatzegopteryx*, avec leurs 10 mètres de large et leurs 100 kilogrammes estimés, restent les plus grands animaux volants connus. Qu'en est-il des dragons? Leurs mensurations démesurées imposent *a priori* des contraintes physiques qui rendent très difficile le vol battu. Mais certaines «trouvailles» de la nature pourraient aider. Ainsi, pour rendre plausibles ces géants ailés, nous pourrions les imaginer, comme les oiseaux ou les ptérosaures,



UN VRAI CRACHEUR DE «FEU»

Le coléoptère bombardier *Stenaptinus insignis* a un mécanisme de défense original et élaboré: il projette sur le prédateur un liquide corrosif à presque 100 °C.

dotés de diverses structures d'allègement: des sacs aériens multiples, des poumons démesurés, des crânes très fenêtrés ou encore des os complètement creux, et ainsi de suite. L'évolution a sélectionné une large gamme de structures possibles permettant de se mouvoir dans les airs!

ALLUMEEEEER LE FEU!

Le trait caractéristique du dragon, celui qui en fait un être à la fois puissant et effrayant, est sa capacité à cracher du feu. Or une réaction de combustion ne peut se produire que si trois éléments sont réunis: un combustible, un comburant et une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi les pompiers parlent de «triangle du feu». Si la question du comburant est facilement évacuée (il s'agit généralement du dioxygène, O_2 , contenu dans l'air), examinons quel serait le combustible et d'où viendrait l'énergie déclenchant la combustion.

Dans les feux courants, le combustible est un solide (charbon, bois, papier, carton, tissu,

PVC, etc.), un liquide (essence, gazole, fioul, huile, etc.) ou un gaz (gaz naturel, butane, propane, méthane, dihydrogène, etc.). Avec les contraintes que représente le vol pour un dragon, utiliser un gaz moins dense que l'air et inflammable, comme le dihydrogène (H_2), semble être une solution idéale. Le dihydrogène remplissait d'ailleurs les fameux zeppelins, ces dirigeables rigides qui connurent leur âge d'or dans les années 1930. Le spectaculaire embrasement du *Hindenburg*, le 6 mai 1937, sonna le glas de ce mode de déplacement aérien.

Le méthane pourrait aussi être un bon choix, car les bactéries méthanogènes sont omniprésentes dans la biosphère (marécages, mangroves, sous-sol sibérien) et on les trouve aussi chez les termites et dans le tube digestif des vaches. Avec un microbiote adapté, le dragon serait capable de produire du méthane durant sa digestion avant de le stocker dans une poche dédiée. Le problème est qu'à pression et température ambiantes, un gaz occupe un volume considérable, environ 1000 fois supérieur à celui d'un liquide de même masse ! C'est pourquoi le gaz naturel, qui contient essentiellement du méthane, est liquéfié à très basse température (environ $-162^\circ C$ à la pression atmosphérique) pour être transporté dans des bateaux spécialisés, les méthaniers. Dans les véhicules fonctionnant au gaz naturel, il est stocké dans des réservoirs spécifiques à une pression 200 fois supérieure à la pression atmosphérique.

Mais l'utilisation d'un gaz pour créer son souffle pose un autre problème au dragon : peu dense, le jet serait difficile à diriger et se disperserait rapidement dans l'air ambiant. Le dragon émettrait une boule enflammée plutôt qu'un jet de feu.

La solution serait peut-être de s'inspirer des cracheurs de feu humains. Pour réaliser leur performance, ces artistes prennent en bouche un peu de liquide inflammable (pétrole désaromatisé ou paraffine liquide) et le pulvérisent en minuscules gouttelettes en direction d'une torche. La spectaculaire flamme qui en résulte donne l'impression de sortir directement de la bouche du cracheur. Cela évoque aussi le lance-flammes, une arme portative conçue pour projeter un liquide enflammé. Il existe également des lance-flammes destinés aux spectacles pyrotechniques qui émettent des flammes contrôlées à l'aide d'un brûleur. Bref, notre dragon pourrait disposer d'un organe spécialisé produisant un biocarburant liquide, stocké dans une poche dédiée et projetable à volonté sur ses ennemis.

Reste la question de la source d'énergie déclenchant la combustion. Dans les situations réelles, cette source est généralement de la chaleur (échauffement par frottement pour

une allumette ou par passage d'un courant électrique), une étincelle (allume-gaz, pierre à briquet) ou une flamme. Plusieurs solutions sont imaginables. Le dragon serait capable, par exemple, de créer des étincelles en crissant des « dents » spécialisées. Si son combustible est gazeux, il pourrait aussi utiliser un catalyseur comme la mousse de platine (néanmoins pas

Les plus grands animaux volants connus sont des ptérosaures de 10 mètres d'envergure

facile à produire par un processus biologique !). À température ambiante, la mousse de platine fixe sur sa grande surface massique (qui peut atteindre des dizaines de mètres carrés par gramme !) de l'ordre de 100 fois sa masse de dihydrogène et jusqu'à 20 fois sa masse de dioxygène. Cette accumulation déclenche spontanément la réaction exothermique de combustion du dihydrogène.

Dans le cas des liquides, on trouve même des réactions autocatalytiques : il suffit de mélanger combustible et comburant pour que le mélange s'enflamme spontanément. Ce type de combustion est employé dans la propulsion spatiale car il dispense du dispositif d'allumage et permet de concevoir des propulseurs déclenchés ou arrêtés par simple ouverture ou fermeture de l'alimentation de la chambre de combustion. Malheureusement, ils font souvent appel à des comburants toxiques tels que l'hydrazine. Mauvais pour notre dragon.

La solution est peut-être à trouver chez les insectes. À partir des années 1980, Thomas Eisner, de l'université Cornell, a étudié les coléoptères bombardiers (appartenant au grand groupe des carabes). Ces insectes projettent par l'anus sur leurs prédateurs un liquide très chaud ($100^\circ C$) résultant du mélange exothermique d'hydroquinone (composé organique aromatique apparenté au phénol) et de peroxyde d'hydrogène (appelé eau oxygénée en solution aqueuse). Sans être aussi spectaculaire qu'une flamme de feu, le jet de ces insectes est tout aussi dissuasif. Mais alors, que resterait-il de la magie du dragon ? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Meurger, Histoire naturelle des dragons : un animal problématique sous l'œil de la science, Terre de Brume, 2006.

L. Grasset, Les dragons pourraient-ils cracher du feu ?, sur la chaîne YouTube DirtyBiology, http://bit.ly/PLS488_Dragons1

V. Amoureux, Le Musée des Dragons, documentaire-fiction sur une histoire naturelle des dragons, 2005, http://bit.ly/PLS488_Dragons2 http://bit.ly/PLS488_Dragons3

E. Buffetaut, Des fossiles et des hommes, Robert Laffont, 1991.