

> de 10^9). En gros, le cas des insectes correspond à celui d'un nageur évoluant dans une huile extrêmement visqueuse...

Dans ce registre de valeurs, l'écoulement de l'air autour des ailes n'est pas turbulent, mais la relation entre la force aérodynamique et la vitesse n'est pas simple. Plus fondamentalement encore, les mouvements de l'aile sont si rapides qu'on est très loin de la situation d'un écoulement stationnaire où un objet se déplace à vitesse constante relativement au fluide. Il a fallu des années pour que les physiciens fassent l'inventaire des effets faisant varier la force aérodynamique pendant le cycle du battement de l'aile, notamment en travaillant sur des maquettes mises à l'échelle adéquate, avec le même nombre de Reynolds.

TOURBILLONS ET ASPIRATIONS

Pour faire simple, la plupart des effets proviennent de l'apparition de tourbillons transitoires dans les différentes phases. Cela se produit par exemple quand l'aile se retourne entre chaque demi-battement: la rotation entraîne le fluide visqueux environnant.

Plus étonnant, les insectes mettent à profit un phénomène bien connu des ingénieurs aéronautiques: le décrochage retardé. On constate en effet que l'inclinaison de leurs ailes (entre 20° et 40°) est notablement plus élevée que celle d'une aile d'avion; elle va même au-delà de l'angle de décrochage. Or quand on dépasse cet angle, un tourbillon se crée au-dessus et à l'arrière du bord d'attaque de l'aile. D'habitude, il est rapidement évacué derrière l'aile, mais ici il n'en a pas le temps.

Enfin, les chercheurs se sont rendu compte que l'aile interagit avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement. À chaque fois, comme dans une tornade, l'écoulement de l'air dans ces tourbillons est très rapide et la pression y est très faible. Cela provoque des effets de succion-aspiration sur l'aile, qui augmentent en moyenne la force de sustentation.

Dernière complication, pour les plus petits insectes, les effets des forces de viscosité augmentent. Or viscosité et tourbillons ne font pas bon ménage. Un tourbillon dans de l'huile se dissipe beaucoup plus rapidement que dans de l'eau. Conséquence: les tourbillons dont nous venons de parler produisent des forces moins intenses pour les petits insectes que pour les gros, et ne permettraient donc plus de compenser leur poids.

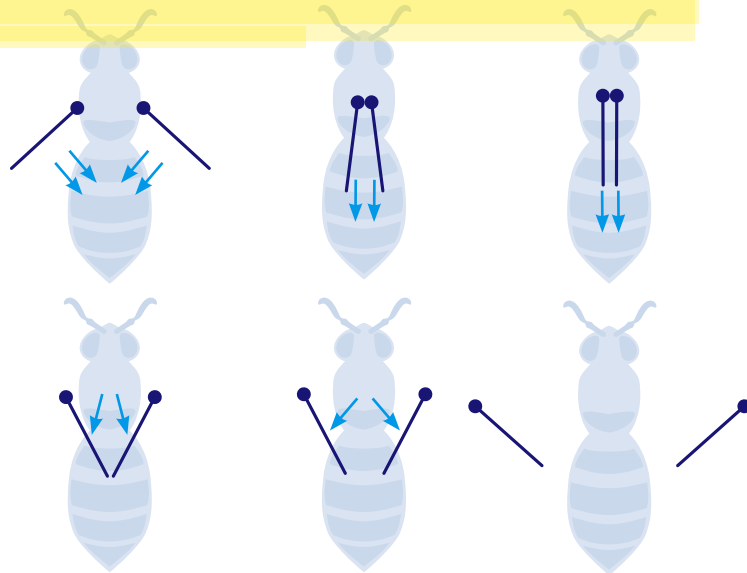
C'est pourquoi les petits insectes ont une autre façon de voler. Au lieu de

LE CLAP & FLING

Les très petits insectes claquent leurs ailes l'une contre l'autre dans une séquence où ils les ouvrent et ferment, le corps étant orienté verticalement. La propulsion de l'air vers le bas ou son aspiration depuis le haut (flèches bleues) ainsi produites contribuent à la sustentation.

«Clap»

«Fling»



conserver un mouvement alaire dans le plan horizontal, pendant la phase de retour, lorsque les ailes repartent vers l'arrière, ils les projettent fortement vers le bas, comme s'ils prenaient appui sur l'air. Durant cette phase, la traînée est alors presque verticale et contribue donc, contrairement au cas des gros insectes, à la sustentation.

CLAQUEMENTS D'AILES

À la limite, pour les insectes les plus petits, on obtient une nouvelle modalité de vol: le «clap & fling» (voir l'encadré ci-dessus). Dans ce cas, l'insecte claque les bords d'attaque de ses ailes l'un contre l'autre à la verticale à la fin de la phase de retour: c'est le «clap». Cela chasse brutalement de l'air vers le bas et engendre donc une poussée vers le haut. Aussitôt, l'insecte rouvre les ailes et les projette vers le bas en les pivotant autour de leurs bords de fuite: c'est le «fling». Cette ouverture aspire l'air vers le bas, créant une dépression au-dessus de l'aile qui accroît la force ascensionnelle.

Évidemment, claquer ses ailes comme dans un garde-à-vous à haute fréquence peut les endommager. C'est pourquoi certains insectes ne se livrent qu'à une séquence incomplète de telles manœuvres. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Z. Lyu et al., **Flapping-mode changes and aerodynamic mechanisms in miniature insects**, *Physical Review E*, vol. 99, 012419, 2019.

S. P. Sane, **The aerodynamics of insect flight**, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 206, pp. 4191-4208, 2003.

M. Dickinson, **Le vol des insectes**, *Pour la Science*, n° 286, août 2001.