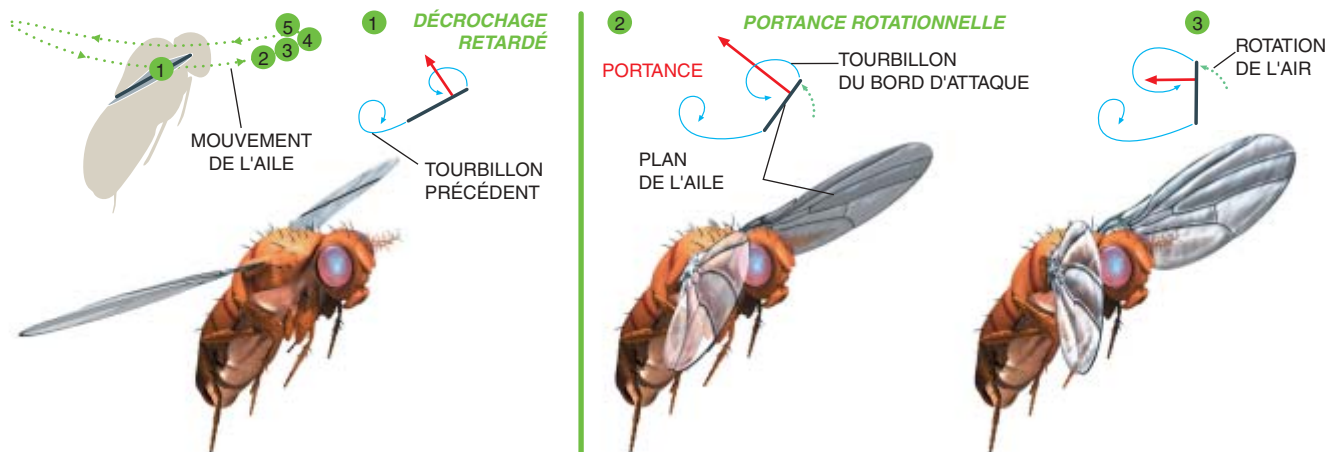




5. LA DROSOPHILE met à profit trois mécanismes aérodynamiques pour se maintenir immobile dans l'air (vol stationnaire). Pendant la majeure partie du battement d'aile (1), un tourbillon d'air qui se forme au voisinage du bord d'attaque augmente la portance de l'aile.

Ce mécanisme est le décrochage retardé, ainsi nommé, car le tourbillon n'a pas le temps de se décoller, à l'inverse de ce qui se passe pour un avion qui «décroche». À la fin du coup d'aile (2, 3 et 4), celle-ci se retourne et crée une portance rotationnelle ana-

L'écoulement d'air dans ce tourbillon est très rapide, donc la pression y est très faible, ce qui augmente notablement la portance. Cet effet a été découvert par des ingénieurs britanniques au début des années 1930, mais il est trop fugace pour être utilisé en aéronautique : le tourbillon se détache rapidement de l'aile et disparaît dans le sillage de l'avion. Cependant, les battements d'aile d'un insecte sont si brefs que l'aile se retourne et inverse la direction en créant un nouveau tourbillon dans la direction opposée, immédiatement après que le précédent a disparu.

Au milieu des années 1990, l'équipe de Charles Ellington a étendu ces résultats à trois dimensions. Ces ingénieurs ont étudié le grand sphingidé *Manduca sexta*, un papillon nocturne qui vit dans les plantations de tabac des Antilles, ainsi qu'un papillon robot.

L'insecte était suspendu à un fil dans un tunnel aérodynamique, où l'on observe le vol par les perturbations d'un écoulement de fumée. Les filets de fumée ont montré qu'un tourbillon se formait aux bords d'attaque des ailes quand celles-ci descendaient pendant le vol. Un autre écoulement d'air caractéristique, de la base à l'extrémité de l'aile, intensifie peut-être l'effet en réduisant la force du tourbillon, mais en augmentant sa stabilité, afin qu'il reste attaché à l'aile pendant toute la durée du coup d'aile. Un tel écoulement pourrait être particulièrement important pour les grands insectes comme les libellules, dont l'ampleur du coup d'aile est importante.

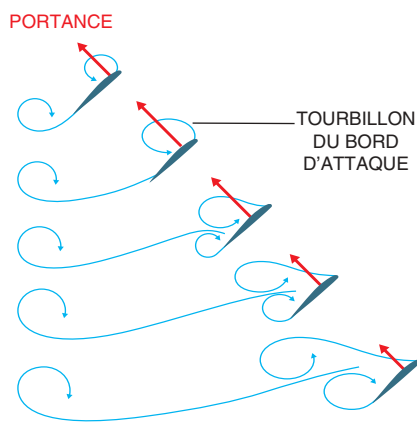
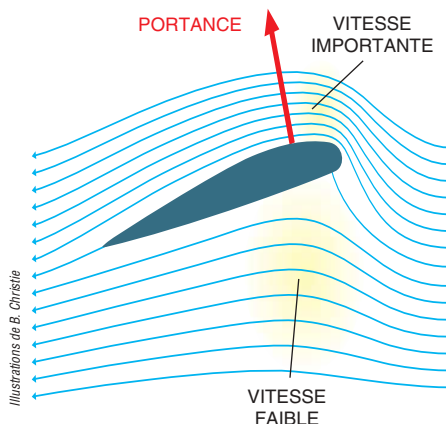
La découverte du décrochage retardé n'explique qu'une partie du vol des insectes : par exemple, il n'explique pas comment de nombreux

insectes produisent une portance égale à presque deux fois leur poids.

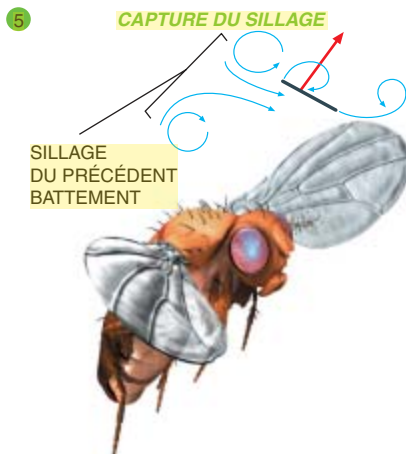
D'autres mécanismes du vol des insectes restaient donc à découvrir. En 1998, nous avons construit une maquette de drosophile dont les ailes avaient 25 centimètres de longueur. Dans l'huile, le robot bat des ailes toutes les cinq secondes : dans de telles conditions, ce rythme est équivalent aux battements d'ailes d'une drosophile de deux millimètres et demi de longueur, à une fréquence de 200 battements par seconde dans l'air. Nous avons mesuré deux propriétés : les forces aérodynamiques qui s'exercent sur les ailes et l'écoulement du fluide autour d'elles.

Rotation et autres effets

Au début et à la fin de chaque mouvement, les ailes créent des forces intenses que le décrochage retardé n'explique pas. Ces pics de forces apparaissent au moment où les ailes ralentissent et se retournent rapidement. La rotation d'objets dans l'air crée des écoulements similaires à ceux qui engendrent la portance d'une aile conventionnelle. Par exemple, une balle de tennis à laquelle on donne un effet coupé «aspire» l'air au-dessus d'elle à une vitesse supérieure et donc s'élève (voir la figure 7). Nous avons montré que la rotation d'une aile produit une portance par ce même mécanisme, en décalant le moment du cycle où l'aile se retourne. Lorsque l'aile se retourne à la fin d'un battement, les bords d'attaque se déplacent vers l'arrière et créent une force dirigée vers le haut, de la même manière qu'une balle de tennis qui tourne sur elle-même (effet



6. L'ÉCOULEMENT DE L'AIR AUTOUR D'UNE AILE D'AVION (à gauche) crée une portance (une force dirigée vers le haut) : la vitesse de l'air sur le dessus de l'aile est plus importante que la vitesse de l'écoulement sous l'aile. La zone de faible pression ainsi constituée attire l'aile vers le haut. Quand l'angle d'attaque est trop important (à droite), un tourbillon se forme près du bord d'attaque et crée d'abord une portance accrue, avant de s'éloigner rapidement de l'aile : l'avion décroche, car il n'y a plus de portance (la longueur des flèches rouges est proportionnelle à l'intensité de cette portance).



logue à celle d'une balle de tennis en rotation. Au début de la levée de l'aile, celle-ci retransverse le sillage créé par l'aile quand elle était abaissée. L'aile est orientée de façon que le surplus d'écoulement d'air produit crée davantage de portance : ce phénomène est dénommé la capture de sillage (5)

Magnus). Quand l'aile se retourne plus tard, au début du battement suivant, le bord d'attaque se déplace vers l'avant par rapport à la direction de déplacement : la force qui en résulte est dirigée vers le bas.

Toutefois, un autre pic de forces dirigées vers le haut a été décelé au début de chaque abaissement et de chaque levée d'aile. Plusieurs expériences ont montré que ce pic était dû au phénomène nommé capture de sillage, c'est-à-dire la collision de l'aile avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement.

Chaque coup d'aile laisse derrière lui un tourbillon composé des remous qu'il a produits lors de son déplacement et de son retournement pendant le cycle précédent. Lorsque l'aile inverse sa direction, elle retransverse cette turbulence et récupère ainsi une partie de

l'énergie « contenue » dans le sillage. Nous avons testé cette capture de sillage en arrêtant les ailes après un mouvement de l'aile vers l'avant, puis vers l'arrière. Les ailes immobiles continuaient de créer une force, car le fluide environnant était toujours en mouvement.

La capture de sillage a probablement lieu au début de chaque mouvement, de la même façon que la circulation rotationnelle. Cependant, la mouche modifie sans doute l'intensité et la direction de la force selon l'instant du retournement de l'aile. Quand l'aile se retourne tôt, elle a un angle d'attaque favorable à l'instant où elle entre en collision avec le sillage, et crée ainsi une force intense dirigée vers le haut. À l'inverse, lorsque l'aile se retourne plus tard, la force est dirigée vers le bas.

La capture de sillage et la circulation rotationnelle expliquent à parts égales l'aérodynamisme de la commande de vol, c'est-à-dire comment la mouche se dirige. Pendant certaines manœuvres, l'aile à l'extérieur du virage se retourne plus tôt et produit plus de portance, tandis que l'aile à l'intérieur se retourne plus tard et crée moins de portance : au total, la mouche s'incline et tourne. La mouche dispose de nombreux capteurs, tels les yeux, les ailes postérieures atrophiées, nommées haltères, qui jouent le rôle de gyroscopes et les récepteurs mécaniques des ailes, afin de régler précisément le moment du retournement et l'amplitude du battement...

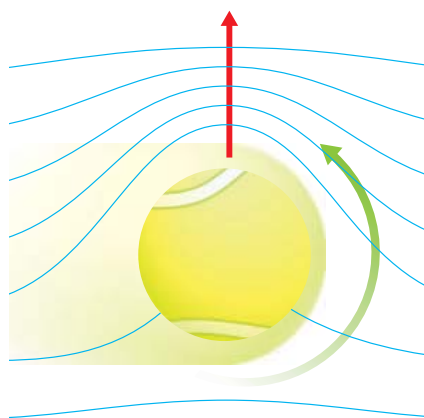
La plupart des études ont porté sur le vol stationnaire, car c'est le cas le plus difficile à expliquer du fait que l'insecte ne tire aucun avantage des

courants d'air. Leurs résultats forment un tout de plus en plus cohérent, mais ne résolvent pas tous les problèmes. Comment pouvons-nous appliquer les résultats obtenus sur la drosophile aux autres insectes ? La tâche est difficile : les morphologies, les tailles et les comportements des insectes sont très divers. Pour illustrer la diversité, citons les minuscules thrips, les grands sphingidés, les chrysopes (des petits insectes verts aux yeux dorés), qui ont deux paires d'ailes légèrement désynchronisées pendant le vol, les coléoptères dont les deux élytres, qui forment la carapace au sol, sont dressés et immobiles pendant le vol...

Grâce aux six moteurs du robot, nous recréerons le mouvement des ailes de plusieurs types d'insectes. Pour compléter ces résultats, nous construisons aujourd'hui un autre robot mouche qui évoluera dans une cuve suffisamment grande pour simuler, par exemple, comment les mouches prennent des virages particulièrement serrés en ajustant le décalage de leurs battements d'ailes.

Comprendre le vol des insectes résoudra une ancienne énigme scientifique, mais aura peut-être aussi des applications pratiques. Par exemple, des ingénieurs tentent de mettre au point des robots volants miniatures (voir la figure 1) pour la recherche et le sauvetage, la surveillance de l'environnement, la détection de mines et l'exploration des planètes. Bien que l'être humain construise des avions de la taille des oiseaux, personne n'a jamais construit d'avion de la taille d'une mouche. La viscosité de l'air a plus d'importance à ces échelles et prime sur le type d'écoulement qui maintient les avions en l'air.

Les insectes battent des ailes, non pas parce qu'ils n'ont jamais « inventé » les roues, les réacteurs et les gouvernails, mais parce que leurs dimensions imposent d'autres mécanismes aérodynamiques. N'oublions pas que l'évolution est, selon Francis Crick, plus intelligente que nous (et que son assistant, Orgel).



7. L'ÉCOULEMENT DE L'AIR autour d'une balle de tennis en rotation crée une portance. Sous la balle, la vitesse de l'air en rotation s'oppose à celle due à la translation de la balle : la pression de l'air est supérieure sur le dessus. Les insectes utilisent ce phénomène en tournant les ailes à la fin de chaque battement.

Michael DICKINSON est professeur de biologie à l'Université de Berkeley.

R. DUDLEY, *The biomechanics of insect flight : form, function, evolution*, Princeton University Press, 2000.

Le site Internet de l'auteur : <http://socrates.berkeley.edu/~flymanmd/>