

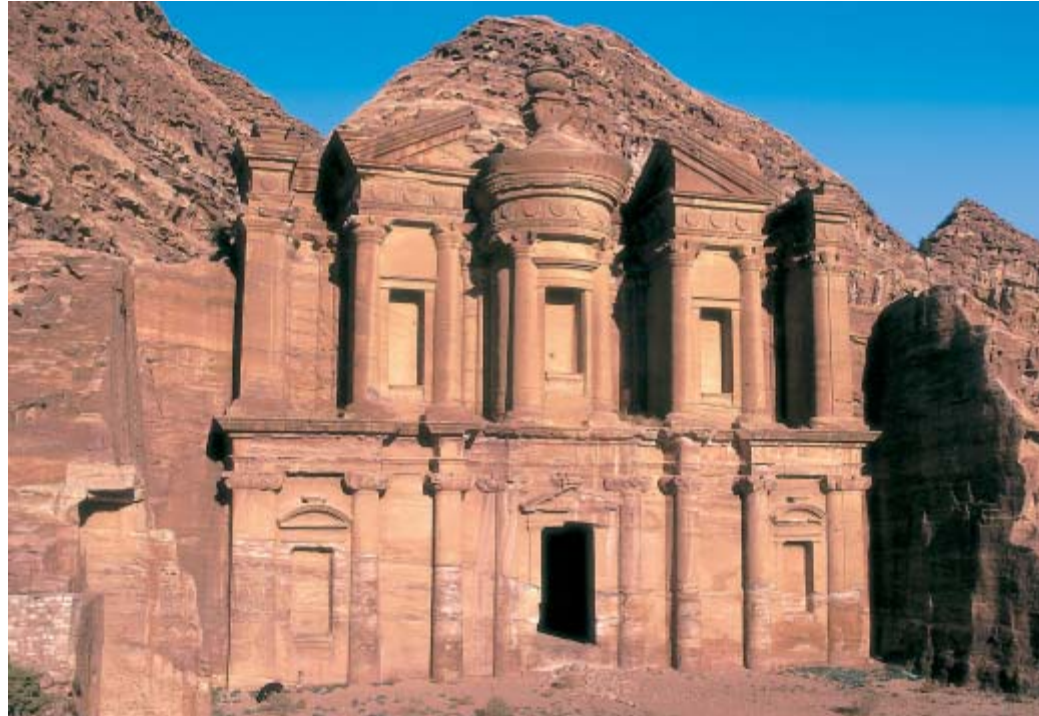
cipal de Pétra, le Qasr al-Bint (voir l'encadré de la page 39). Des bas-reliefs de divinités et de génies protecteurs en ornaient les pilastres.

Hormis ces monuments et un nymphée, les Romains ont laissé peu de traces à Pétra, ce qui est surprenant lorsqu'on considère l'importance de la ville comme centre administratif de la province. L'habitat lui-même resta traditionnel. Autre exemple de permanence des coutumes nabatéennes, le gouverneur romain de la province, Aninius Sextius Florentinus, se fit même inhumer en 127 dans un tombeau rupestre qui avait peut-être été occupé par une riche famille nabatéenne. Des dédicaces à des divinités romaines ainsi que des statues de dieux et d'empereurs romains témoignent de la domination des nouveaux maîtres. Sous leur autorité, Pétra demeura un centre économique important, mais une partie des bénéfices du commerce alimentait désormais soit d'autres villes, soit le fisc romain.

Au début du III^e siècle, lorsque les Sévères (lignée d'empereurs romains) se préoccupèrent de plusieurs villes des provinces orientales, Pétra fut peu gratifiée : elle n'obtint que la construction d'une fontaine et le statut fiscal avantageux de colonie romaine. La ville avait manifestement perdu son importance. Qui plus est, au déclin local s'ajoutèrent les effets de la crise économique générale qui touchait l'Empire romain. Lorsqu'un tremblement de terre ébranla la cité en 363, les moyens financiers furent insuffisants pour la reconstruire à l'identique.

Le déclin de Pétra

À la fin du III^e siècle, les réformes de Dioclétien eurent de graves conséquences pour Pétra, qui perdit son statut de capitale de province au profit de Bosra. Rien ne changea à partir de 330 avec l'effondrement de Rome et le passage de l'Arabie à la partie byzantine de l'Empire, dont la capitale était Constantinople. C'est en 358 seulement que Pétra retrouva un statut politique officiel avec la création de la province de *Palaestina Salutaris* (*Palaestina Tertia* à partir de 440), comprenant le Sud de la province d'Arabie et certaines parties du Néguev, dont elle devint la capitale. Élevé au rang de religion d'État dans l'Empire romain d'Orient par Constantin I^{er} (280-337), le christianisme fit son apparition à Pétra. Son statut de capitale, son appar-



4. EL DEIR, «le monastère», est situé sur un plateau. D'abord sanctuaire nabatéen, il fut ensuite utilisé par l'Église, ce qui explique son nom.

tenance à la «Terre Sainte» et surtout la présence de la tombe d'Aaron, le frère de Moïse, sur le jebel Haroun, justifiaient la conversion de la ville. On y envoya des évêques pour tenter d'en convertir les habitants, apparemment sans succès, puisque les dignitaires rapportèrent l'obstination avec laquelle ils restaient fidèles à leurs anciennes croyances. C'est vers le milieu du V^e siècle seulement que le christianisme commença à s'imposer. En 446, le tombeau d'un ancien roi nabatéen fut transformé en cathédrale par l'évêque Jason. Du milieu du V^e siècle datent également une basilique richement décorée de mosaïques et une église plus ordinaire, découvertes dans les années 1990 dans le centre urbain de Pétra, sur la rive Nord du wadi Mousa.

Dans la basilique furent mis au jour, en 1993, les restes calcinés d'un lot d'archives privées écrites en grec sur 152 rouleaux de papyrus. Ces documents, en cours d'étude, donnent des informations sur la situation économique de la cité et de ses environs au VI^e siècle. Contrairement à ce que l'on pensait, l'arrivée du christianisme s'est accompagnée d'un essor écono-

mique qui se serait poursuivi pendant tout le VI^e siècle. Cela n'empêche d'ailleurs pas Pétra d'être devenue, à l'époque, le lieu privilégié de déportation des criminels et des hérétiques. À la fin du VI^e siècle, la situation changea une fois de plus, comme en témoigne le fait que la nef Sud de la basilique servit provisoirement d'entrepôt. C'est au cours d'un incendie que les archives entreposées dans une chapelle latérale brûlèrent.

Même si elles n'ont pas laissé de traces tangibles de leur passage, on peut supposer que des populations bédouines se sont approprié les ruines antiques de Pétra, ont veillé sur elles pendant des siècles et en ont interdit l'accès aux étrangers. Leurs descendants ont quitté la ville antique il y a moins de 20 ans pour s'installer dans un village construit de toutes pièces à leur intention au sommet d'un col dominant le site. Devenus directeurs d'hôtels ou de cafés, artisans ou vendeurs de souvenirs, ils sont propriétaires des chevaux qui servent aujourd'hui de montures aux touristes. C'est l'héritage de l'une des premières grandes puissances arabes qui les fait vivre.

Robert WENNING est archéologue et mène ses recherches à l'Université catholique d'Eichstätt.

J. STARCKY, *Pétra et la Nabatène*, éditions H. Cazelle et A. Feuillet, *Dictionnaire de la Bible*, supplément 7, col. 886-1017, 1996.

L. NEHMÉ et F. VILLENEUVE, *Pétra, Métro-*

pole de l'Arabie antique, Le Seuil, 1999.

Chr. AUGÉ et J.-M. DENTZER, *Pétra, La cité des caravanes*, Découvertes Gallimard, 1999.

Pétra. Dernières nouvelles de la cité rose, in *Le monde de la Bible*, n° 127, mai-juin 2000.

J. HEALEY, *The Religion of the Nabataeans*, éditions Brill, Leiden, 2001.

Le vol des insectes

MICHAEL DICKINSON

Le vol stationnaire des insectes résulte d'une combinaison d'effets aérodynamiques élucidés par un modèle utilisant les lois de la similitude.

En 1934, dans l'introduction de son ouvrage *Le vol des Insectes*, l'entomologiste Antoine Magnan écrit : « Tout d'abord poussé par ce qui se fait en aviation, j'ai appliqué aux insectes les lois de la résistance de l'air, et je suis arrivé avec mon assistant André Sainte-Lagüe à cette conclusion que leur vol est impossible. » Cette conclusion hâtive était sans doute fondée sur le fait que la portance maximale théorique des ailes d'un bourdon est plus faible que son poids.

La portance est la force qui s'exerce sur un corps perpendiculairement à la direction de son mouvement ou de l'écoulement où il est plongé. Cette portance est généralement calculée pour une aile d'avion : la forme incurvée de l'aile impose que la vitesse de l'écoulement de l'air sur sa partie supérieure soit plus grande que le long de la partie inférieure. Selon le principe découvert par Daniel Bernoulli au XVIII^e siècle, l'augmentation de la vitesse du fluide s'accompagne d'une diminution de la pression : la pression étant plus forte sous l'aile qu'au-dessus, la poussée s'exerce vers le haut, la portance (voir la figure 6).

Depuis 1934, les ingénieurs et les mathématiciens ont fait des progrès et ont acquis suffisamment de connaissances pour mettre au point les ailes d'avions nécessaires au transport de centaines de passagers, telles celles de l'Airbus A380. La conception de ces avions repose sur le principe de stationnarité selon lequel l'écoulement de l'air autour des ailes et les forces qui en résultent sont stables dans le temps.

Tel n'est pas le cas des insectes dont le vol est longtemps resté une énigme, car ces animaux battent et tournent leurs ailes 20 à 600 fois par seconde. Les forces aérodynamiques et les écoulements d'air changent sans cesse et compliquent les analyses, mathématiques et expérimentales.

Pour comprendre la physique du vol stationnaire d'une mouche, nous avons mis au point un dispositif expérimental (voir la figure 3). Dans une cuve de deux tonnes d'huile bat doucement une paire d'ailes de 60 centimètres d'envergure. Mues par six moteurs commandés par un ordinateur, les ailes brassent le fluide et y créent un mouvement que révèlent des millions de bulles d'air injectées dans la cuve. L'ensemble est éclairé par des rayons de lumière laser et filmé par des caméras vidéo, tandis que des capteurs enregistrent en permanence les forces qui s'exercent sur les ailes.

Grâce à l'insecte mécanique, qui imite les mouvements des ailes à une vitesse 1 000 fois inférieure et à une échelle 100 fois plus grande, nous avons compris comment la mouche utilise les tourbillons, le décrochage retardé, la circulation de l'air autour des ailes et la capture de sillage. Détaillons ces phénomènes qui donnent aux insectes une telle aisance dans leur vol.

Un bruissement d'ailes

Les ailes d'insectes en mouvement apparaissent le plus souvent comme une image brouillée : le vol des insectes ne ressemble donc en rien à celui des avions. Les ailes de l'insecte ne sont pas animées d'une simple oscillation verticale : l'extrémité de chaque aile trace une courbe ovale fortement inclinée. De plus, les ailes changent d'orientation à chaque battement : la face supérieure d'une aile est orientée vers le haut lorsque l'aile est abaissée, et vers le bas lors de sa remontée.

Les premières tentatives d'analyse du vol des insectes appliquaient à ces mouvements complexes les lois de l'aérodynamique stationnaire, lois habituellement utilisées en aéronautique. Ces approches étaient toutefois moins naïves que celle qui avait conduit aux

premiers calculs du vol du bourdon, car elles tenaient compte de la variation de la vitesse des ailes au cours du temps.

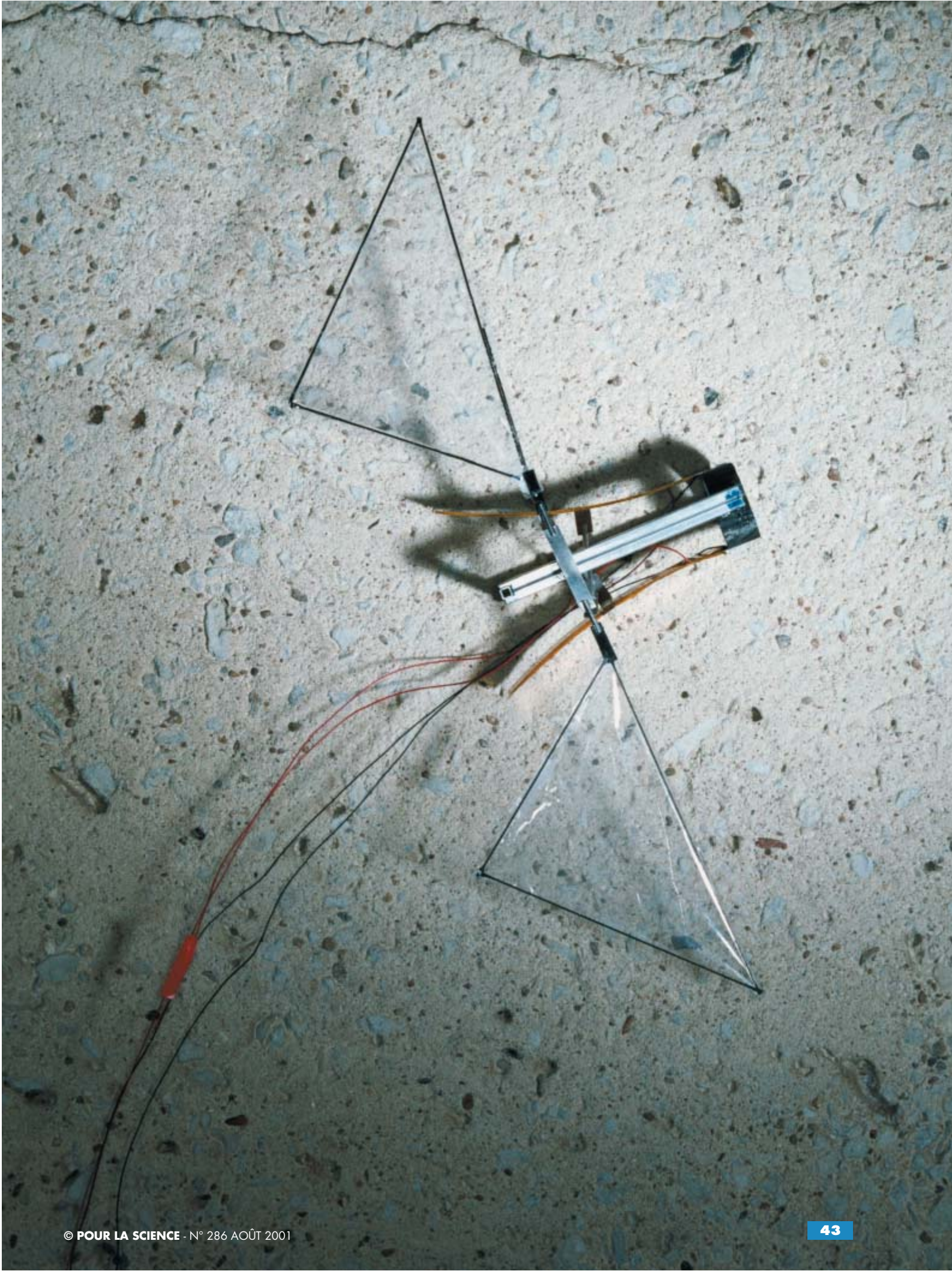
Imaginons que nous figions l'aile de l'insecte dans chacune des positions successives qu'elle prend pendant un battement, que nous reproduisions en soufflerie l'écoulement correspondant à chacune de ses positions et que nous mesurons la portance associée. Si la théorie stationnaire était correcte, la force moyenne calculée par addition des forces associées à toutes les positions serait dirigée vers le haut et égale au poids de l'insecte.

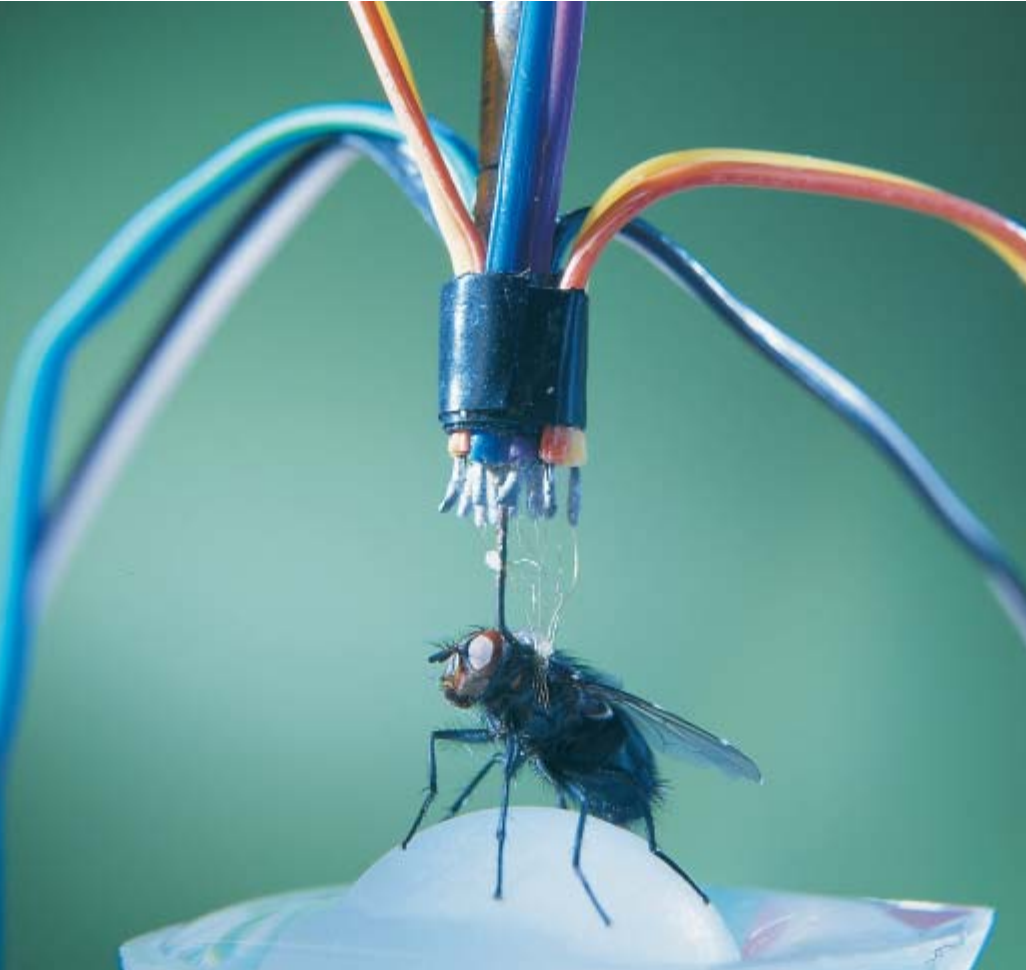
À la fin des années 1970, les aérodynamiciens doutaient de la pertinence de cette analyse et, au début des années 1980, à partir des données disponibles, le physicien américain Charles Ellington a conclu que l'approche stationnaire ne pouvait expliquer les forces mises en œuvre. Les mécanismes d'écoulement non stationnaires qui gouvernent les battements d'ailes restaient à découvrir.



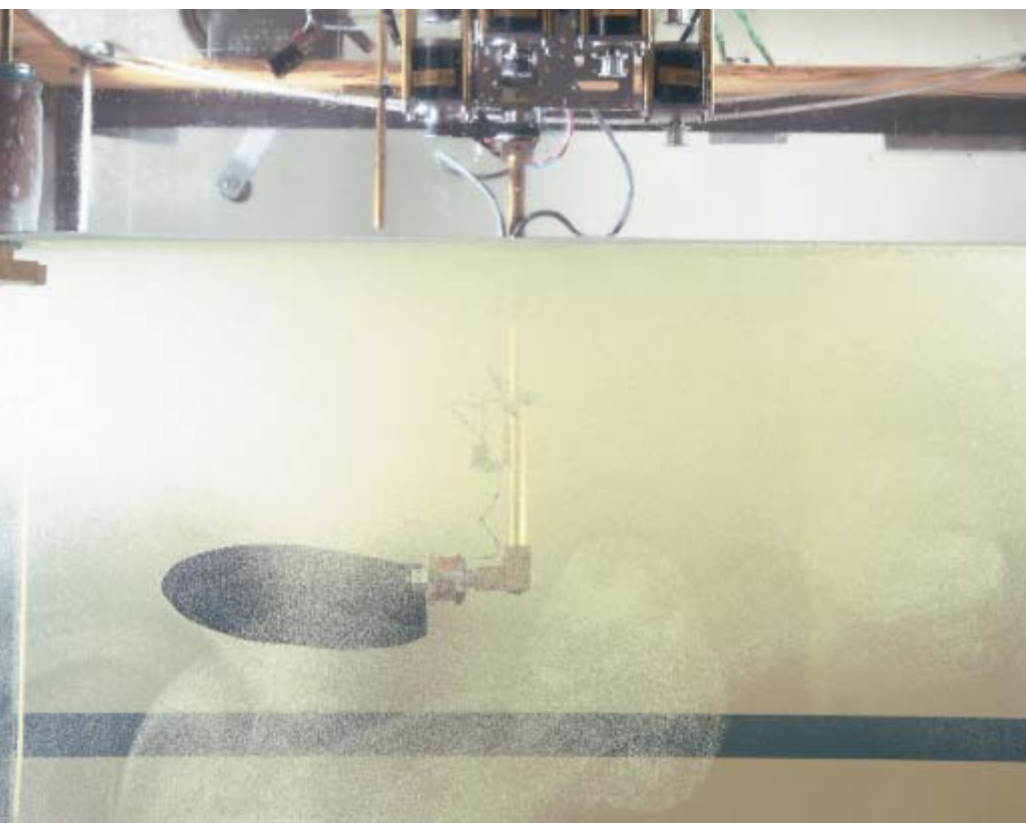
Photographies de T. Archibald

1. DES ROBOTS capables de voler imiteront la nature : ils devront plus aux insectes et aux effets aérodynamiques que ceux-ci exploitent, qu'aux techniques aéronautiques utilisées dans la construction des avions.





2. UNE MOUCHE BLEUE est reliée à un dispositif électronique qui mesure l'activité électrique des muscles du vol de la mouche pendant les mouvements des ailes.



3. UN ROBOT-MOUCHE bat lentement des ailes dans de l'huile. Ce dispositif simule l'aérodynamique des ailes d'une drosophile qui battent rapidement dans l'air. Des rayons laser illuminent des bulles d'air injectées et révèlent ainsi les écoulements complexes, tandis que des capteurs placés sur les ailes enregistrent les forces engendrées.

La répartition des vitesses et des pressions au sein d'un fluide est régie par les équations de Navier-Stokes, qui ont été formulées au début des années 1800. Dans un fluide de faible densité comme l'air, le mouvement complexe de l'aile rend la résolution de ces équations très difficile, même avec les ordinateurs les plus performants.

L'informatique et la théorie étant impuissantes, peut-on mesurer directement sur l'insecte les forces aérodynamiques dues aux battements? Plusieurs équipes se sont attelées à la tâche, mais la petite taille et la vitesse élevée des ailes compliquaient les mesures. Par ailleurs, les mesures de forces effectuées sur les insectes vivants doivent être regardées avec prudence, car le comportement d'animaux captifs diffère de celui d'animaux en liberté.

Les beautés de la similitude

Pour contourner ces difficultés, les ingénieurs utilisent les propriétés de similitude grâce auxquelles on relie l'écoulement autour d'un objet réel à celui autour d'une maquette, plus facile à manier et à étudier en soufflerie. C'est le monde à l'envers : alors que les ingénieurs aéronautiques construisent des modèles réduits, ceux qui étudient le vol des insectes ont besoin de modèles agrandis.

Les principes physiques qui gouvernent les objets (ou les animaux) réels et les maquettes sont identiques quand, dans les deux cas, le rapport de la force de pression due à l'inertie du fluide est égal à la force de cisaillement due à la viscosité du fluide. Ce rapport est nommé nombre de Reynolds. On dit alors que la maquette et l'objet (ou l'animal) réel respectent la similitude de Reynolds. La viscosité, équivalente à un frottement, apparaît quand des régions contiguës d'un fluide se déplacent à des vitesses différentes. Le nombre de Reynolds augmente proportionnellement à la longueur, à la vitesse de l'objet et à la densité du fluide. Il diminue avec la viscosité du fluide. Un avion, qui a une grande taille et se déplace à une vitesse élevée, a un nombre de Reynolds de l'ordre de un à 100 millions. Un insecte, petit et lent, a un nombre de Reynolds entre 100 et 1 000, voire même inférieur à 100 pour les plus petits insectes. Notons que pour respecter la similitude de Reynolds, on ajuste les dimensions de l'objet, la vitesse de l'écoulement ou encore la nature du

fluide, afin de modifier la masse volumique et la viscosité. Simuler un mouvement dans l'air par un mouvement dans un liquide paraît surprenant. C'est cependant réaliste, dès lors que le nombre de Reynolds est le même.

Le décrochage retardé

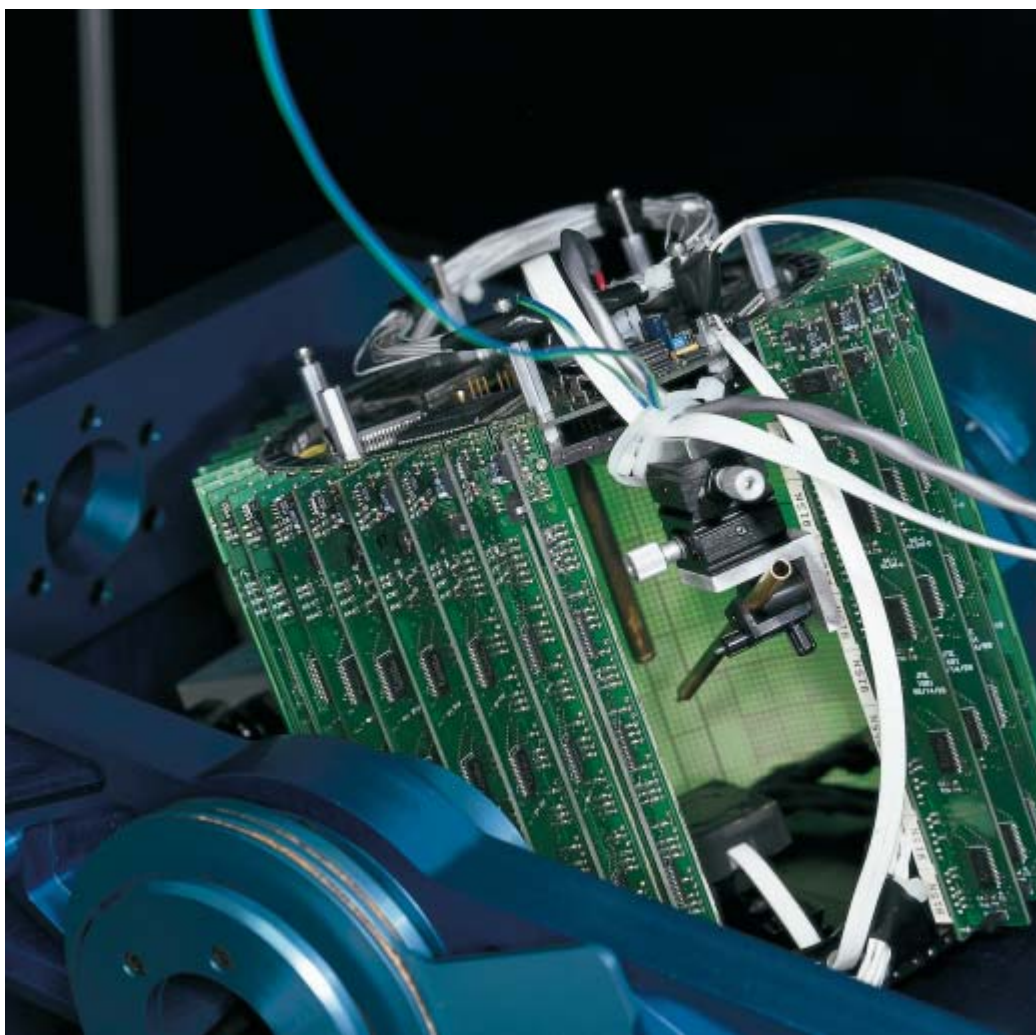
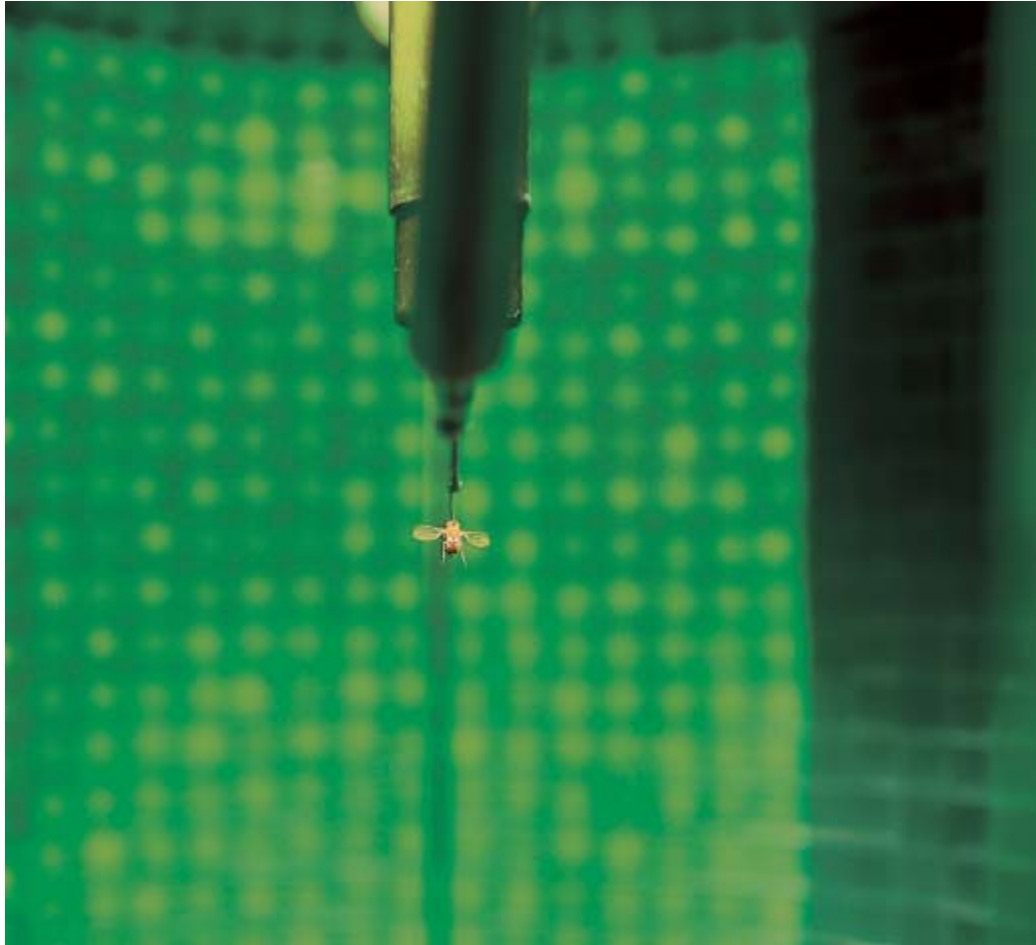
En 1992, avec Karl Götz, de l'Institut Max Planck, à Tübingen, nous avons construit une maquette d'aile composée d'une « pagaie », de cinq centimètres de largeur sur 20 centimètres de longueur, reliée à des moteurs et plongée dans une grande cuve de sirop de sucre. Cette augmentation de la taille et de la viscosité combinée avec une réduction de la vitesse de battement donnaient au montage le même nombre de Reynolds que celui d'une aile de mouche.

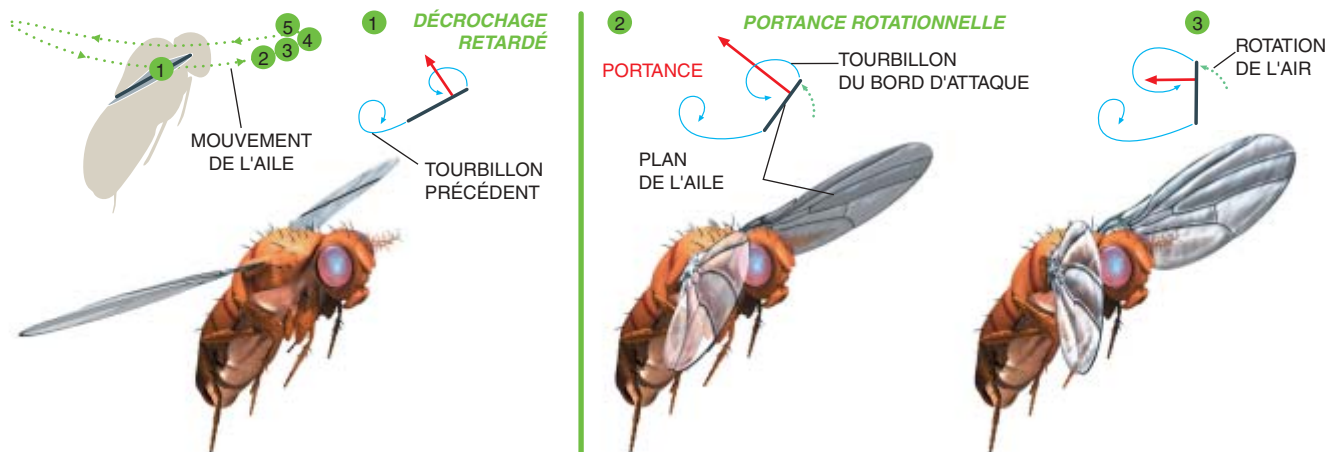
L'aile était équipée d'un capteur qui mesurait la portance et la traînée créées lors du déplacement dans le fluide visqueux. À l'extrémité de l'aile nous avons monté des écrans pour supprimer l'écoulement le long et autour de l'aile : ce stratagème ramène l'écoulement de trois à deux dimensions, et facilite ainsi l'analyse (au risque toutefois de passer à côté d'effets importants).

Nos expériences ont suggéré une solution à l'énigme du vol stationnaire des insectes : le décrochage retardé. Dans un avion, le décrochage survient lorsque l'angle d'attaque (l'angle que fait l'aile avec la direction de propagation) sous lequel l'aile pénètre dans l'air est trop important : le flux supérieur ne suit plus le contour de l'aile, décolle et supprime la portance.

Comment le décrochage, si désastreux pour un avion, peut-il avantager un insecte ? La réponse réside dans la vitesse de battement des ailes. Le flux d'air, cause de la portance, disparaît seulement quelques instants après l'augmentation de l'angle d'attaque. Plus encore, la première phase du décrochage accroît légèrement la portance, en raison d'un bref écoulement tourbillonnaire, nommé tourbillon du bord d'attaque. Ce dernier est un écoulement cylindrique du fluide en rotation qui se forme au-dessus et à l'arrière du bord d'attaque de l'aile.

4. UNE MOUCHE CAPTIVE EST OBSERVÉE par les expérimentateurs dans une enceinte (*en haut*) où des centaines de diodes vertes créent l'illusion (pour la mouche) de mouvements d'objets selon son mouvement. En bas, une photographie de l'ensemble du simulateur de vol.





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.

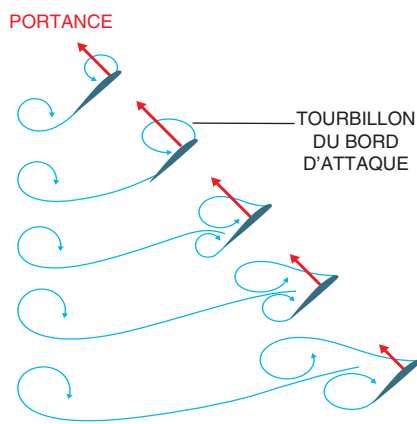
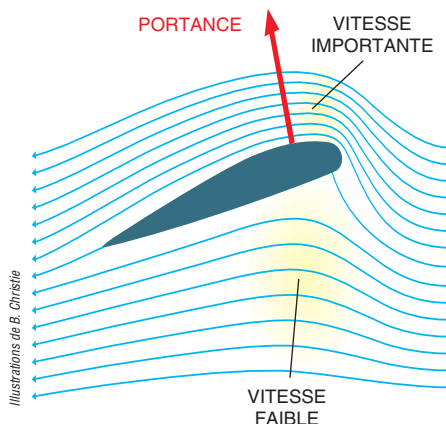
La découverte du décrochage retardé n'explique qu'une partie du vol des insectes : par exemple, il n'explique pas comment de nombreux

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

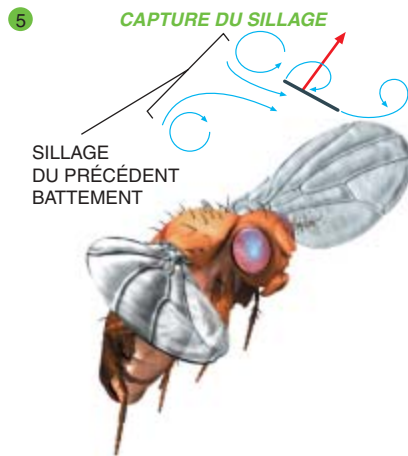
D'autres mécanismes du vol des insectes restaient donc à découvrir. En 1998, nous avons construit une maquette de drosophile dont les ailes avaient 25 centimètres de longueur. Dans l'huile, le robot bat des ailes toutes les cinq secondes : dans de telles conditions, ce rythme est équivalent aux battements 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 abaissée 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...

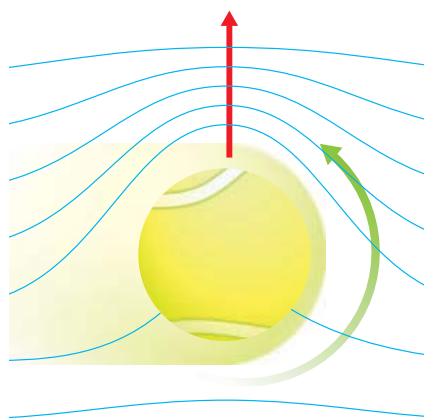
La plupart des études ont porté sur le vol stationnaire, car c'est le cas le plus difficile à expliquer du fait que l'insecte ne tire aucun avantage des

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 par 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/>

