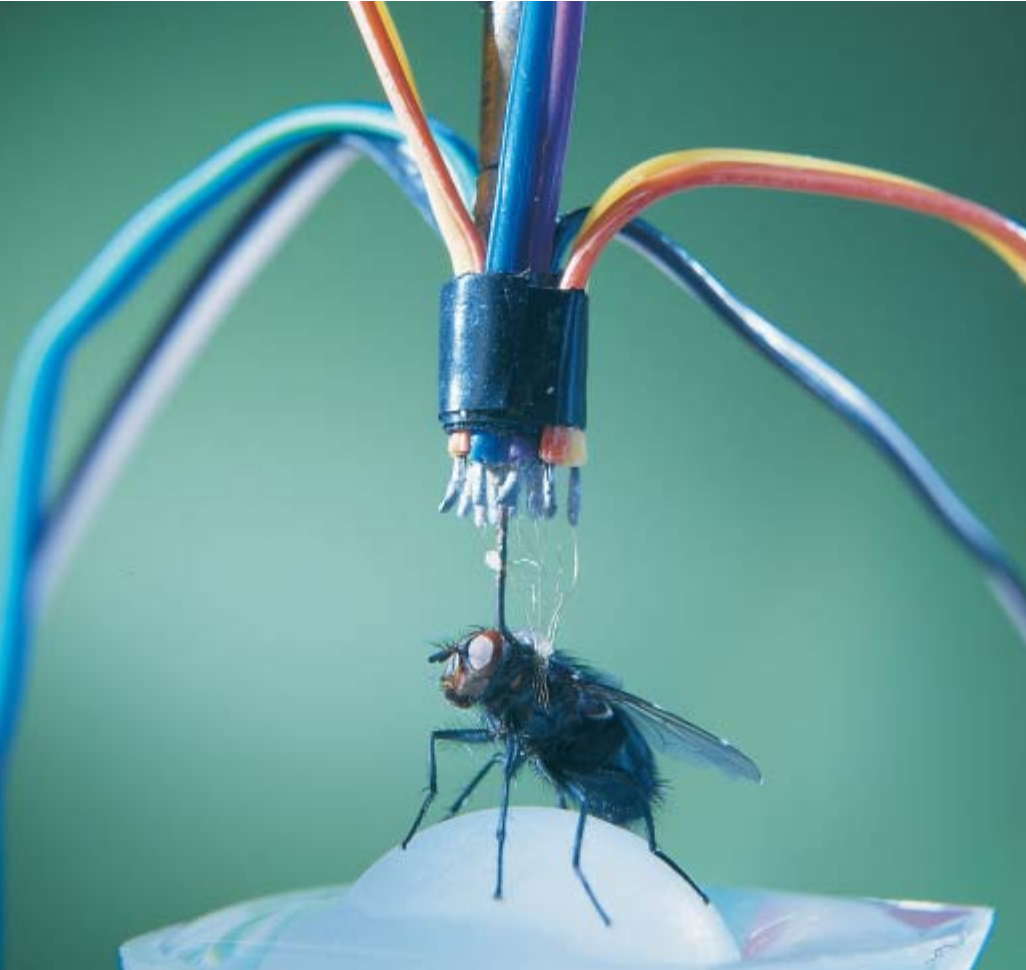
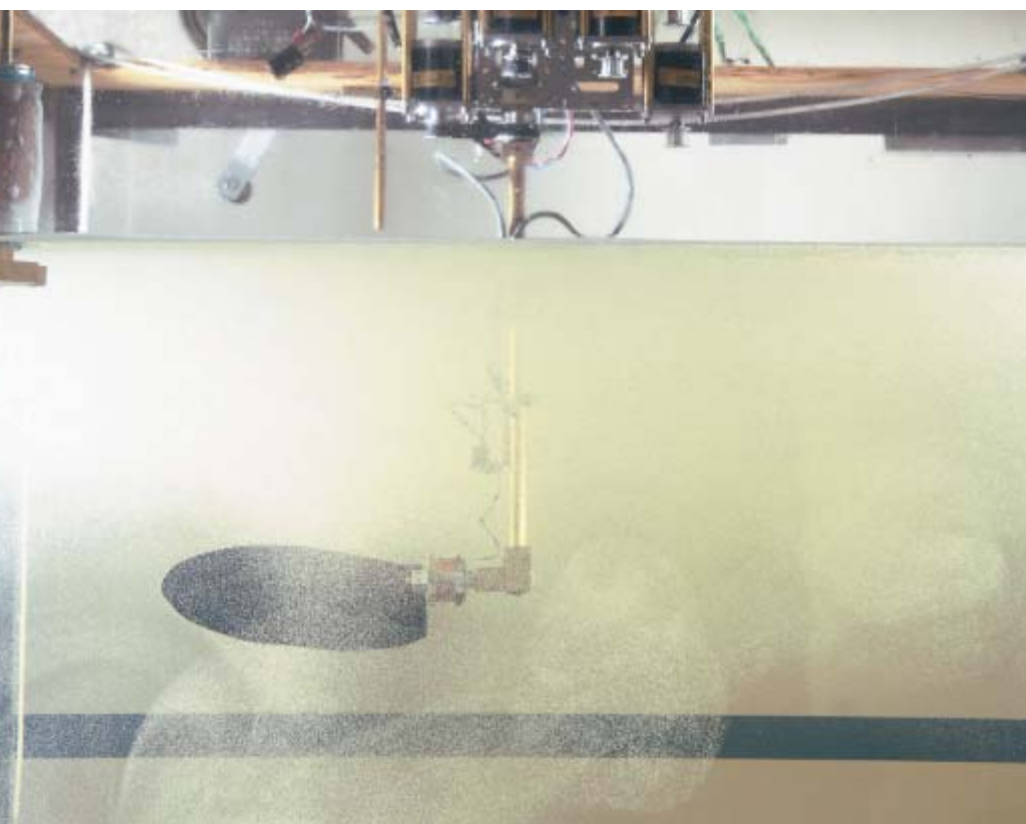




2. UNE MOUCHE BLEUE est reliée à un dispositif électronique qui mesure l'activité électrique des muscles du vol de la mouche pendant les mouvements des ailes.



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

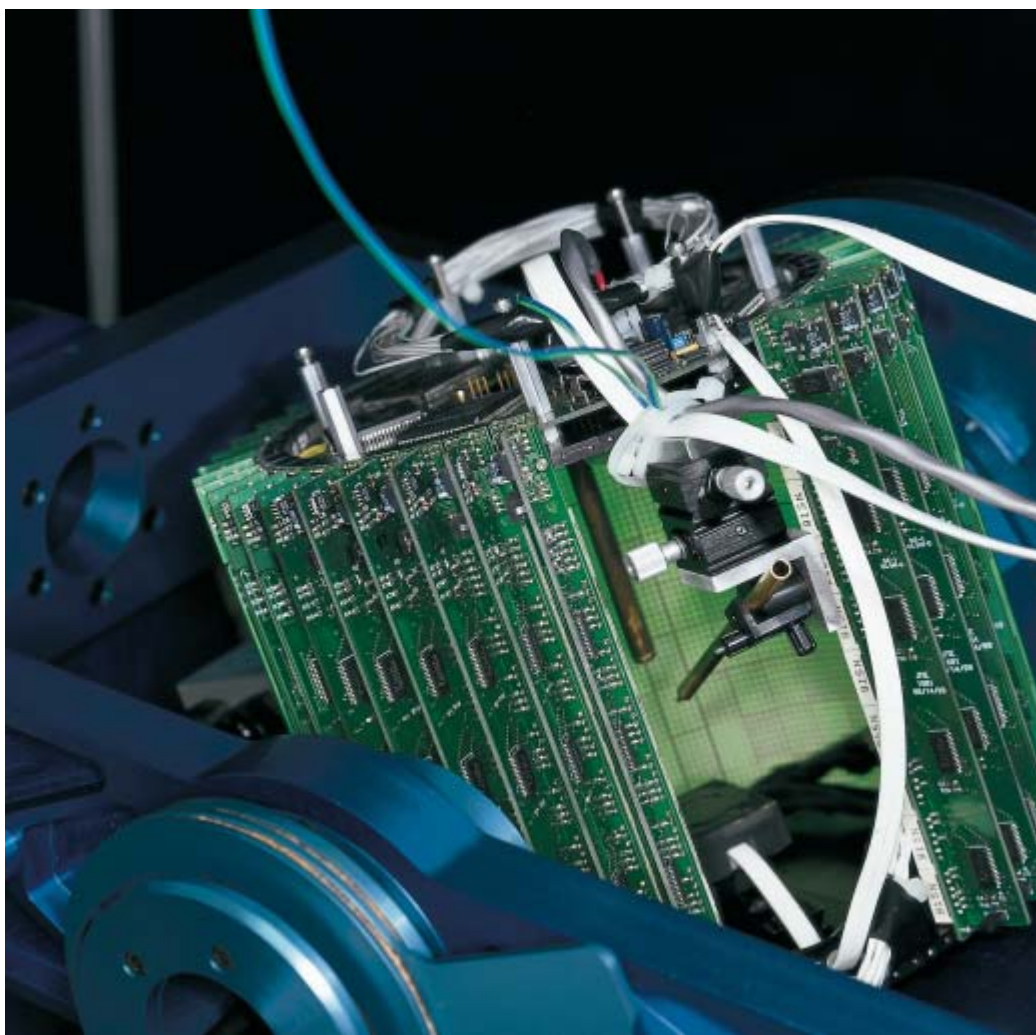
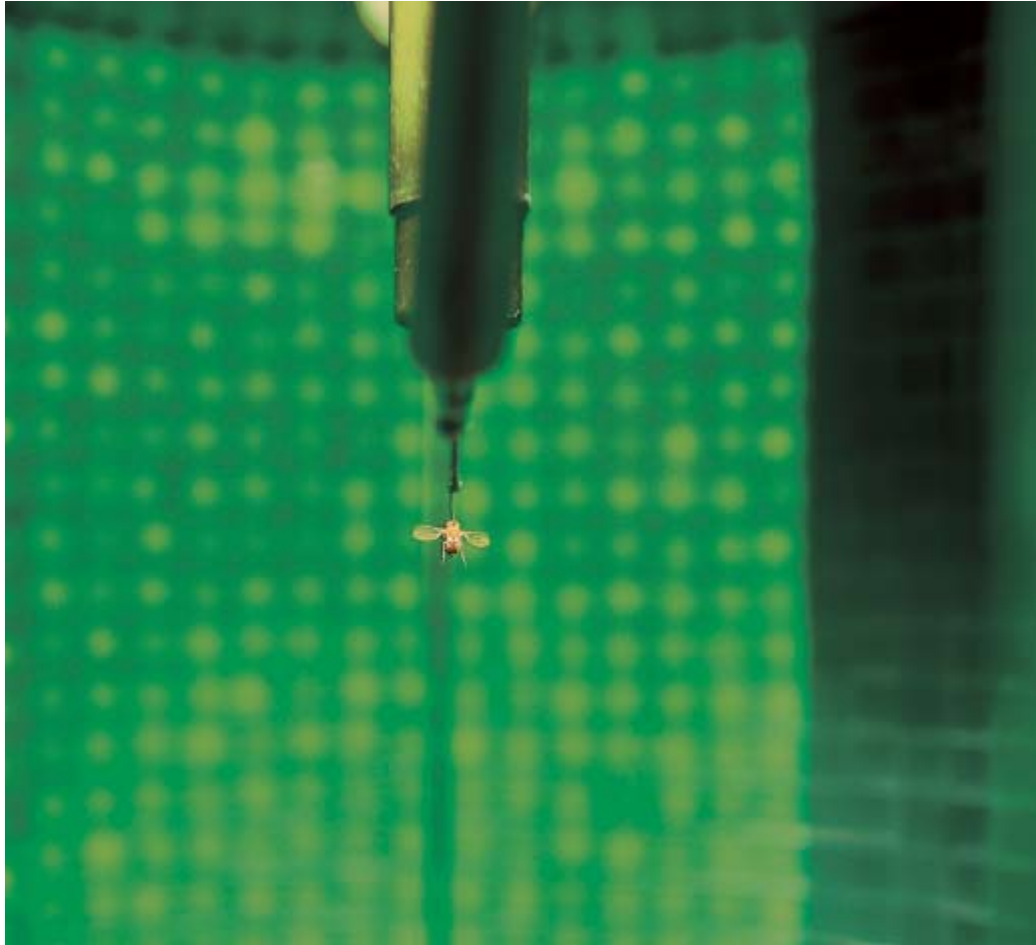
En 1992, avec Karl Götz, de l'Institut Max Planck, à Tübingen, nous avons construit une maquette d'aile composée d'une « pagaie », de cinq centimètres de largeur sur 20 centimètres de longueur, reliée à des moteurs et plongée dans une grande cuve de sirop de sucre. Cette augmentation de la taille et 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.

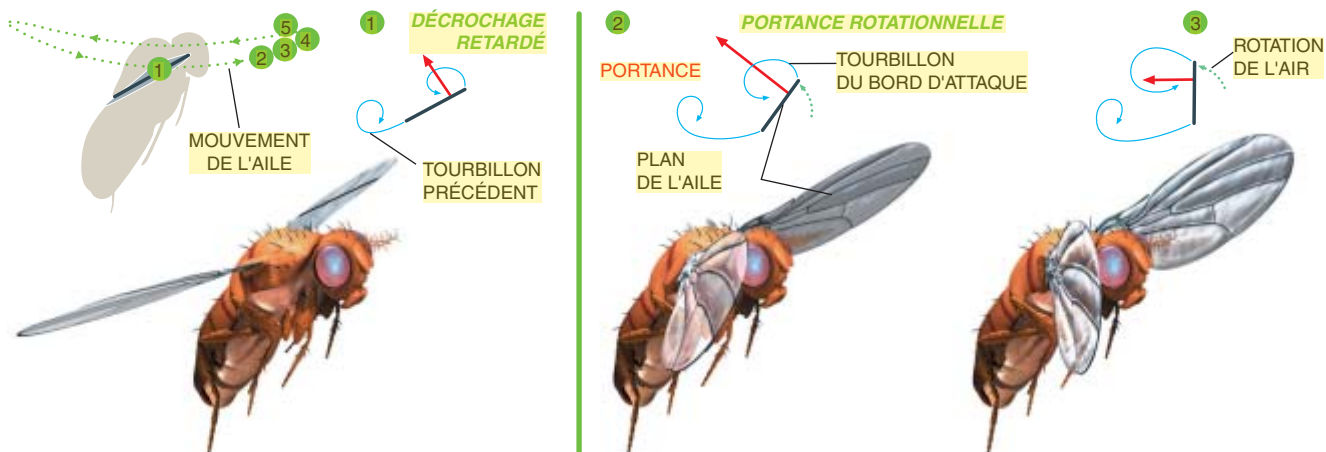
L'aile était équipée d'un capteur qui mesurait la portance et la traînée créées lors du déplacement dans le fluide visqueux. À l'extrémité de l'aile nous avons monté des écrans pour supprimer l'écoulement le long et autour de l'aile : ce stratagème ramène l'écoulement de trois à deux dimensions, et facilite 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 décrocher, 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 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.

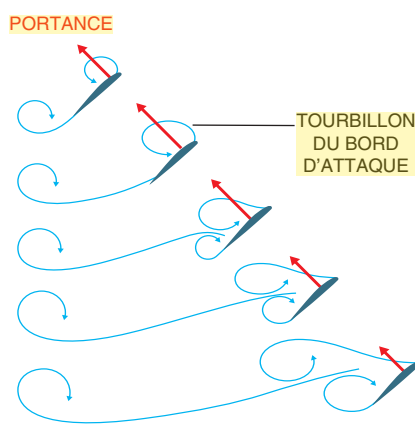
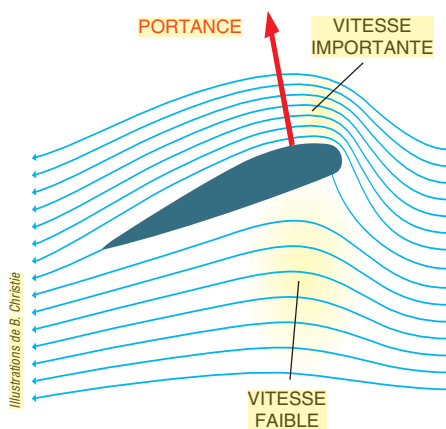
La découverte du décrochage retardé n'explique qu'une partie du vol des insectes : par exemple, il n'explique pas comment de nombreux

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).