



L'homme-oiseau

ROLAND LEHOUCQ

L'homme est trop lourd pour voler facilement : seuls les sportifs de haut niveau équipés d'appareils ultralégers y parviennent.

Dédale et son fils Icare ont voulu voler, sans grand succès. Dédale voulait s'échapper du labyrinthe du roi Minos en se fabriquant des ailes avec des plumes collées à la cire. Le vol d'Icare finit tragiquement : Icare s'étant trop approché du Soleil, la cire fondit, Icare s'abîma en mer et se noya. Léonard de Vinci imagina également de fabuleuses, mais inefficaces, machines à voler. Il est bien difficile de voler : le rêve d'Icare et de Léonard de Vinci est-il réalisable ?

Le vol comporte deux étapes : le décollage et la sustentation en vol. Pour décoller, il faut que la force ascensionnelle soit supérieure au poids ; pour le maintien en l'air, il faut, en plus, vaincre les frottements qui diminuent la vitesse, donc la force de sustentation. Nous verrons comment ces contraintes imposent une masse limite aux oiseaux, puis à quelles conditions un être humain peut voler, mû par sa seule force musculaire.

VAINCRE LE POIDS

Chacun a déjà fait l'expérience de tendre une main par la fenêtre d'une voiture roulant à vive allure. La main est repoussée par une force d'autant plus grande que la main est redressée : horizontale, elle n'est presque pas repoussée, tandis que, verticale, la main subit le vent de plein fouet, et la force vers l'arrière est considérable. Plus la voiture roule rapidement, plus le vent relatif, et la force sur la main, sont importants.

Sur une aile, la force, proportionnelle à la surface, est encore supérieure. Cette

force est aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Pourquoi ? Parce que la force exercée par les molécules qui rebondissent sur l'aile est proportionnelle à leur vitesse et au nombre de molécules frappant la surface. Ce nombre est, lui aussi, proportionnel à la vitesse ; donc, au total, la force «de portance» dépend du carré de la vitesse relative de l'air.

Dernier point, la force dépend du coefficient de portance, déterminé par la forme de l'aile et par l'angle d'attaque : sa valeur typique est de l'ordre de 0,3.

Il est ainsi plus facile de décoller face au vent : à la vitesse de l'avion s'ajoute la vitesse du vent, et la force résultant du vent relatif sur les ailes est plus forte. Pour le vol à altitude constante, il suffit que le déplacement soit suffisamment rapide par rapport à l'air pour que la portance compense le poids.

Nous avons tous vu, sur les films des premiers essais de vol, les sauts de puce des hommes-oiseaux qui battaient des ailes. Ils n'avaient pas saisi que, si le mouvement descendant des ailes les soulevait, le mouvement ascendant des ailes les plaquait au sol. Les oiseaux volent parce qu'ils donnent aux ailes un mouvement de vrille : l'angle, lors de la montée de l'aile, n'est pas équivalent à celui de la descente. Subtil.

La surface des ailes d'un oiseau est approximativement proportionnelle au carré de sa taille, alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de sa taille. Tous calculs (simples) faits, la vitesse pour laquelle la portance est égale au poids est proportionnelle à la

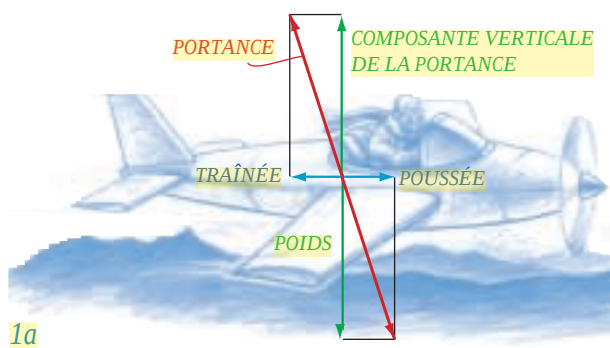
racine carrée de la taille. Les grands oiseaux doivent voler plus vite que les petits pour se maintenir en l'air et doivent aussi courir plus vite pour décoller. De très grands oiseaux, tel l'albatros, dont l'envergure est de 2,5 mètres pour une masse de dix kilogrammes, ne peuvent décoller du sol et doivent se lancer d'une hauteur.

Finalement, un avion n'est rien d'autre qu'une voiture rapide à laquelle on a adjoint de grandes ailes légèrement inclinées ; encore faut-il penser à la propulsion après le décollage...

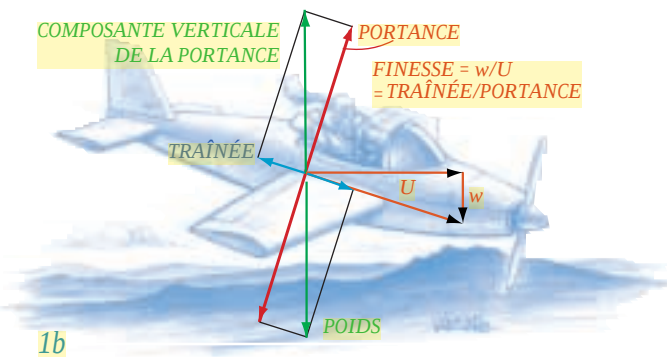
LE VOL HORIZONTAL

Après avoir vaincu le poids, l'objet volant s'élève, mais peut-il pour autant se maintenir en vol ? En ajustant l'angle de son aile par rapport au vent relatif, il peut monter ou descendre, à condition que sa vitesse ne diminue pas trop. Le vol horizontal nécessite de vaincre les frottements aérodynamiques, ou traînée, de manière à conserver la vitesse, donc la portance (voir la figure 1a). Comme la force de portance, la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse relative de l'air. La puissance nécessaire à la sustentation, égale au produit de la traînée par la vitesse, varie donc comme le cube de cette vitesse. Le vol rapide est donc énergétiquement coûteux.

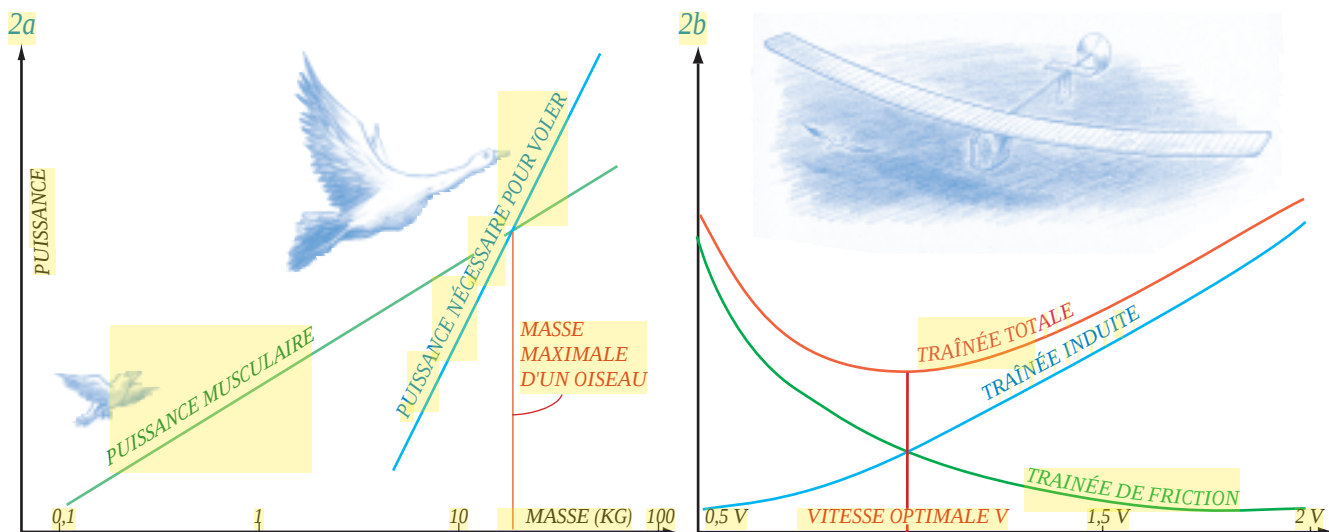
Revenons à l'oiseau. La surface de ses ailes variant comme le carré de sa taille, sa vitesse comme la racine carrée de la taille et la masse comme le cube de la taille, la puissance à dépenser pour contrebalancer l'effet des frottements



1a



1b



varie comme la masse à la puissance 7/6. Cette puissance doit être fournie par les muscles de l'oiseau ; or cette puissance musculaire varie comme la masse à la puissance 3/4, plus lentement que la puissance à dépenser.

Un oiseau aura donc une taille maximale, déterminée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol (voir la figure 2a). Les oiseaux ont effectivement une masse limite (environ 15 kilogrammes), et les gros oiseaux, tels le condor et l'albatros, sont contraints d'économiser leur énergie et préfèrent planer, alors que pigeons et moineaux n'hésitent pas à battre des ailes.

La traînée totale, qui freine la progression, est la somme de deux termes : d'une part, les frottements aérodynamiques, dus au contact de l'air visqueux sur la surface de l'aile, et, d'autre part, la traînée induite par le mouvement, qui résulte de la modification de la quantité de mouvement de l'air qui rencontre l'aile. La traînée induite est la composante horizontale de la portance, alors que sa composante verticale doit compenser le poids (la portance est toujours perpendiculaire à l'aile).

Lorsque l'on augmente la vitesse de l'avion, la portance totale augmente. Sans action sur l'inclinaison ou la forme de l'aile, qui modifie le coefficient de portance, l'avion monterait. Afin de se maintenir en vol horizontal, le pilote agit sur les ailes, de manière que la portance totale diminue. Comme la composante verticale de la portance doit être constante (sinon l'avion monterait ou descendrait), la portance totale se rapproche de la verticale et sa composante horizontale, donc la traînée induite, diminue. Proportionnelle à l'inverse du carré de la vitesse par rapport à l'air, la traînée induite croît démesurément à basse vitesse, rendant prohibitif le coût énergétique du vol lent. Ainsi, tout oiseau et toute machine volante ont

une vitesse de vol énergétiquement optimale (voir la figure 2b). La traînée induite peut être diminuée en utilisant des ailes très effilées, c'est-à-dire dont le rapport d'aspect, le quotient de la longueur de l'aile sur sa largeur, est grand.

VOLER EN PLANANT

Si l'énergie nécessaire à la propulsion n'est pas fournie, elle sera prélevée à l'énergie potentielle gravitationnelle et, comme pour un cycliste en roue libre dans une descente, l'altitude diminuera : un avion dont le moteur s'arrête descend inéluctablement. Pour planer longtemps, les grands oiseaux doivent tirer parti des mouvements atmosphériques ascendants qui prennent naissance près des crêtes des montagnes ou qui résultent des montées d'air chaud dues à la poussée d'Archimède.

Le rapport de la portance et de la traînée est la finesse, qui détermine la qualité d'un planeur : les ailes de grande finesse sont les plus économes énergétiquement. Une finesse de dix, typique de celle d'un oiseau de taille moyenne, signifie qu'il peut parcourir dix kilomètres en planant en partant d'un kilomètre d'altitude. Cela signifie aussi que la traînée est égale au 1/10 de la force de portance. La finesse d'une aile est donc une caractéristique aérodynamique (voir la figure 1b). Quel est son lien avec les autres caractéristiques des ailes ? En pratique, il faut des ailes lisses, pour minimiser les frottements, et très effilées, pour minimiser la traînée induite.

LE VOL HUMAIN

Le bilan n'est pas favorable au vol humain autonome. L'homme pèserait trop lourd (sans même compter le poids des ailes et du dispositif de propulsion) au regard de la puissance qu'il est capable de fournir pour se maintenir en l'air. Essayons pourtant de jouer avec les chiffres. Une

masse totale homme-machine de 100 kilogrammes (un pilote de 65 kilogrammes, 25 kilogrammes d'ailes et de cockpit, et 10 kilogrammes de mécanisme de propulsion) avec une finesse de 20, celle d'un albatros, donne une force de traînée équivalente à cinq kilogrammes. Un cycliste entraîné peut fournir une puissance de 250 watts pendant plusieurs minutes. Cette puissance dépasse la résistance de la force de traînée si la vitesse de l'engin est inférieure à cinq mètres par seconde.

Faire voler une masse de 100 kilogrammes à cette vitesse requiert des ailes très grandes, de plus de 100 mètres carrés chacune ! Pour minimiser la traînée induite, il faut aussi qu'elles soient très effilées et très lisses. Un rapport d'aspect de 12 (donc des ailes 12 fois plus longues que larges), analogue à celui de l'albatros, impose une longueur d'environ 33 mètres. Toute la difficulté de l'entreprise est là : construire des ailes suffisamment résistantes, pesant 25 kilogrammes et faisant 66 mètres d'envergure. En 1977 décolla pour la première fois une machine volante propulsée par un être humain, toute en mylar, kevlar et fibres de carbone. Le rêve d'Icare et de Dédale fut enfin réalisé en 1988, quand un avion propulsé par la seule force musculaire humaine parvint à franchir en quatre heures les 120 kilomètres qui séparent le Nord de la Crète et l'île de Santorin.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

H. LIN, *Fundamentals of zoological scaling*, in *American Journal of Physics*, vol. 50, p. 72, 1982.

S. VOGEL, *Life in Moving Fluids*, Princeton University Press, 1994.

H. TENNEKES, *The Simple Science of Flight*, MIT Press, 1997.

M. DRELA et J. LANGFORD, *Le vol humain propulsé*, in *Pour la Science*, janv. 1986.