



Jacarta

LE VOL DES INSECTES VU PAR LA MÉCANIQUE

Un entomologiste allemand a étudié en soufflerie les solutions techniques « inventées » par les insectes pour voler : on peut y trouver, sans doute, bien des brevets d'aviation !

● Les insectes étaient sur terre bien avant nous. Ils nous survivront sans doute. Si on retrouve chez eux l'ensemble des fonctions vitales qui caractérisent les animaux : nutrition, reproduction, respiration, etc., les

fins, ce qui les fait ressembler à des plumes les surfaces portantes des insectes sont faites



Aile de Thysanoptère



solutions « techniques » qu'ils emploient à ces fins ont de quoi étonner. Par beaucoup d'aspects un insecte volant se rapproche plus d'un avion ou d'un hélicoptère que d'un oiseau.

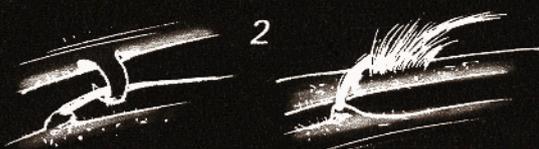
Si l'on excepte quelques espèces mineures ou naines, dont les ailes sont faites de poils très

d'une membrane mince, quelquefois transparente, renforcée par des nervures. Lorsque l'insecte naît, c'est-à-dire lorsqu'il achève son cycle de métamorphoses, ses ailes sont chiffonnées, informes.

Il injecte alors sous pression dans les nervures creuses une sorte de matière plastique qui va durcir au soleil en quelques minutes ou quelques dizaines de minutes. Le procédé est irréversible. Si une cause quelconque empêche les ailes de prendre librement leur forme, elles garderont irrémédiablement tout faux pli, toute déformation, au point de devenir impropre au vol.

Ces ailes ont des formes et des dimensions très variées. Les sauterelles, les libellules, les papillons en possèdent quatre, les mouches deux (mais chez ces diptères la deuxième paire d'ailes est présente au stade embryonnaire, s'atrophiant ensuite pour donner des petites masselotes d'équilibrage bien visibles).

Chez les papillons et les sauterelles, ces deux paires d'ailes battent ensemble et sont rendues solidaires par des crochets.



Mode de couplages des ailes chez les synchroptères.

Chez les libellules, les deux paires d'ailes peuvent se mouvoir indépendamment. Lorsqu'elles sont en mouvement, elles battent à contretemps, ce qui permet à l'insecte d'être



Vol plané. Battements des ailes de la libellule.

moins secoué (c'est fou ce qu'on doit être secoué à bord d'un papillon !). Par contre, en vol plané, les ailes reprennent une position « neutre », comme il est indiqué sur la figure ci-dessus.

La structure des ailes est très étudiée. Les nervures sont amincies par endroit, ce qui per-

met la flexion ou la torsion de la voilure, suivant une géométrie bien précise, dans les différentes phases du mouvement.

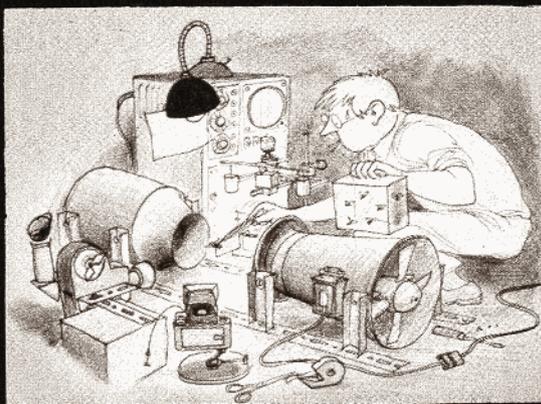
Ces ailes sont très plates, mais elles présentent toujours une légère cambrure comme les ailes d'un avion.



Cambrure de l'aile de l'insecte.

Tous les insectes pratiquent le vol plané. Les papillons peuvent planer très régulièrement sur une dizaine de mètres, à une vitesse de 2 mètres par seconde, et atterrir très élégamment sur la corolle d'une fleur. Chez la plupart des insectes la phase finale de l'approche, le contact avec le sol, s'effectuent en vol plané, avec plus ou moins de bonheur.

Le professeur Werner Nachtigall (nom prédestiné qui, en allemand, signifie rossignol) a mis deux années à construire une soufflerie



La mini-soufflerie à insectes du Pr. Nachtigall.

miniature, permettant d'étudier en détail le vol des insectes. Ceux-ci sont placés dans un courant d'air allant jusqu'à 10 m par seconde et sont fixés à l'aide de colle sur un bâti qui permet la mesure de tous les efforts aérodynamiques : portance, traînée, etc. exactement comme dans

une soufflerie destinée à l'étude de maquettes d'avions motorisées.

Grâce à cela il a pu établir que, chez le papillon de nuit, la portance maximale en vol plané était obtenue par une incidence de 30°, et la finesse maximum (configuration de vol permettant de franchir le maximum de distance, en partant d'une altitude donnée) pour une incidence de 5°.

Chose surprenante et assez mal expliquée : les écailles qui tapissent les ailes des papillons augmentent sensiblement la portance, bien qu'elles aient une autre fonction qui sera évoquée dans la dernière partie de l'article. Un bon papillon a une finesse de 5 (comme l'aile Rogallo). Ce chiffre peut sembler faible, mais est dû à la traînée importante des pattes, antennes et poils tapissant le corps. Une aile d'avion décroche lorsque l'incidence atteint 20°. Chez la mouche à fruit, cet angle critique peut atteindre 50°. Pourquoi cette propriété ?

Pour deux raisons : elle est intéressante dans le vol battu et elle garantit à l'insecte une meilleure stabilité dans le vol en rafales, toute légère turbulence de l'air prenant à son échelle l'aspect d'une véritable tornade. Les qualités de vol varient beaucoup suivant les espèces. La sauteuse est la meilleure planeuse. Comme nos véli-voles, elle sait spiraler dans les courants ascendants d'air chaud, et on en a vu ainsi, leurs ailes bloquées par un mécanisme qui permet un vol avec le minimum d'effort musculaire, naviguer à près de 9 000 mètres d'altitude.

La libellule est la reine de l'acrobatie. Sur place, marche arrière, marche en crabe, loopings, tout lui est possible. Ces qualités manœuvrières viennent du fait que ses 4 ailes sont parfaitement indépendantes, chacune étant mue par son propre système musculaire.

Parmi les « casseurs de bois », citons les coléoptères, ces chars d'assaut volants. Pour eux, un seul régime de vol : plein gaz. Surplace difficile, voire impossible. Je me souviens avoir longuement observé des bousiers sur une plage de Camargue. Recherchant leur aliment favori, ils semblaient plus se guider par l'odorat que par la vue. A proximité de son but, le bousier coupait les gaz. Pas d'approche en « S », pas d'arondi. L'animal percutait la planète sur sa lancée à 1 ou 2 mètres par seconde. Après un capotage brutal, suivi de plusieurs roulés boules, il se remettait sur ses pattes, repliait méthodiquement sa voilure et allait vers son déjeuner.

Deux cents fois par seconde

Les photographies en éclairage stroboscopique, prises par Nachtigall dans sa mini-soufflerie, lui ont permis d'analyser avec beaucoup de précision le mouvement complexe des ailes de l'insecte. Il diffère fondamentalement de celui des oiseaux. Chez ceux-ci on connaît deux types de vols : le vol battu et le vol ramé.

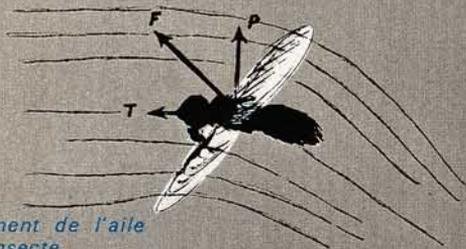
Dans le vol battu, la trajectoire de l'aile, par rapport à l'air, a une allure sinusoïdale, les ailes s'élevant et s'abaissant alternativement.



Vol battu chez l'oiseau.

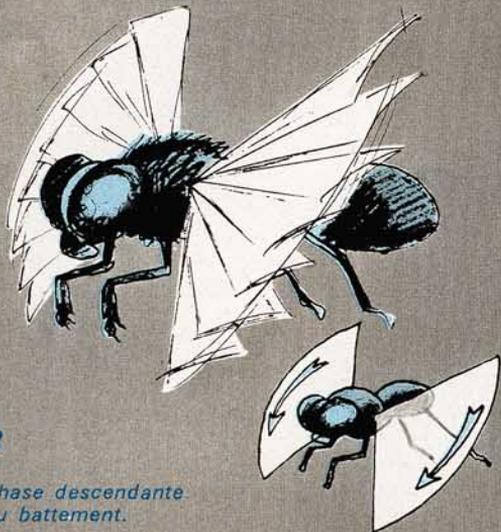
L'incidence de l'aile est toujours positive, ou à la rigueur nulle. Bien sûr, la portance et la traction, composantes verticales et longitudinales de la force aérodynamique, varient dans le temps et sont évidemment maximales lorsque l'aile a un mouvement d'abaissement. Dans le vol ramé se superpose un mouvement de l'aile d'avant en arrière.

Chez l'insecte l'aile se meut, schématiquement, dans un plan situé obliquement par rapport au corps. La composante de portance de la force aérodynamique, créée par la déflexion de

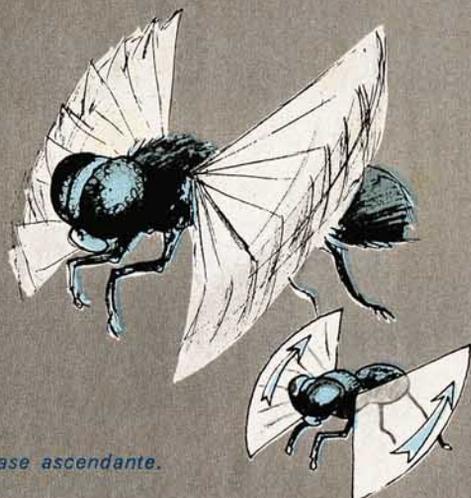


Battement de l'aile de l'insecte et écoulement induit.

l'air, s'oppose au poids. Tandis que la composante de traction s'oppose à la traînée due aux autres parties du corps : tête, thorax, abdomen, pattes, antennes. L'incidence de l'aile varie considérablement dans ce mouvement. Les schémas 8 et 9 tentent de faire comprendre ce changement de configuration. Dans la phase



Phase descendante du battement.

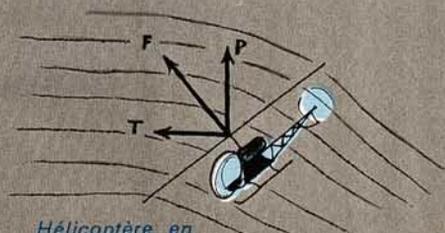


9

Phase ascendante.

d'abaissement (figure 8), l'aile de l'insecte se comporte comme celle de l'oiseau. Dans la phase d'élévation (figure 9), elle se tord de 90° vers le haut. Ainsi dans ces deux phases du mouvement, la force aérodynamique reste orientée grosso modo comme il est indiqué sur la figure 7, c'est-à-dire perpendiculairement au plan de battement. Nous voyons donc que l'aile de l'insecte se comporte en fait *comme une hélice* !

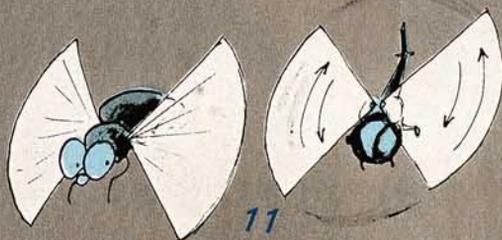
Hélice non plus rotative, mais alternative et comportant un renversement cyclique du pas en bout de course. Or de la manière dont cette hélice travaille, elle se rapproche du rotor d'un hélicoptère en translation rapide.



Hélicoptère en translation rapide.

10

L'écoulement induit étant en tous points semblable. Comparer avec la figure 7. Si nous voulions simuler mécaniquement la voilure de l'insecte, il nous faudrait doter un hélicoptère

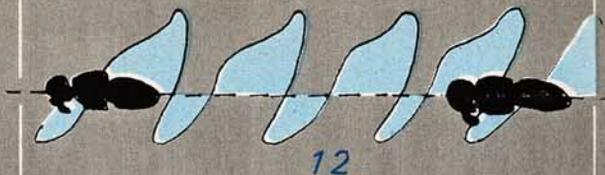


11

Analogie mécanique de l'insecte.

de deux demi-rotors, non plus rotatifs, mais oscillants. Un dispositif assurant une brusque variation du pas en bout de course.

Les ailes des insectes battent couramment à 100 et même 1 000 coups à la seconde. Pourquoi une fréquence si élevée ? Examinons la trajectoire de l'aile non plus en nous référant à l'insecte, mais à l'air ambiant.

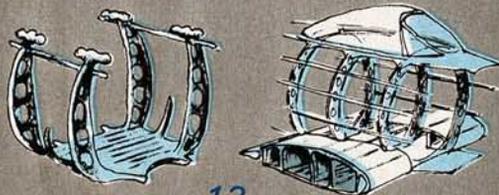


12

On est loin de la sinusoïde du vol battu des oiseaux. L'aile découpe ici l'air comme un hachoir, dans un mouvement de va et vient. Ceci nous rappelle le mouvement d'une hélice. Une mouche atteint une vitesse de 5 m/s. A chaque battement l'insecte parcourt 5 mm. On retrouve la fréquence de 100 cycles par seconde. Six mille tours/minute devrions-nous dire en fait...

La technologie de l'insecte

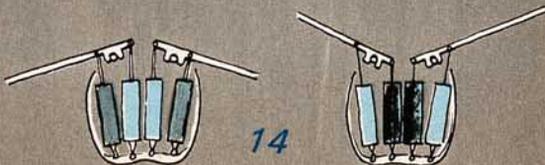
Les insectes n'ont pas de squelette. Ils possèdent comme les vertébrés une tête, des yeux, un corps, des pattes, des ailes. Mais tout, absolument *tout* est différent. Dans le thorax les muscles du vol occupent 85 % de la place disponible. Celui-ci est une boîte solidement renforcée aux points où s'exercent les efforts musculaires et aux attaches de voilure. Prenons pour exemple celui de la libellule.



13

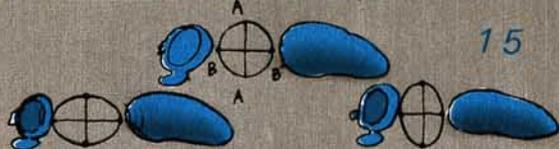
Thorax de libellule.

Il comporte quatre demi-couples en chitine, fixés sur une sorte de planche sur laquelle s'attachent les muscles du vol. A l'extrémité supérieure des couples on distingue les axes sur lesquels reposent les ailes. A y regarder de plus près, la structure allégée de ces demi-couples fait penser aux techniques de construction des avions de la Deuxième Guerre mondiale. Le mode de travail du muscle est ici assez simple. Sur la figure 14 on les a représentés comme de simples vérins.

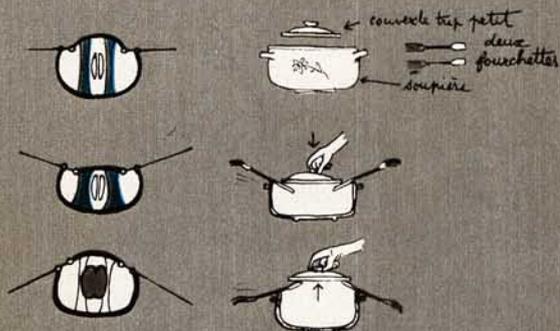


14

Chez la mouche il en va tout autrement. Celle-ci vole en faisant vibrer son thorax.



Les déformations du thorax de la mouche.



Le rapport « soupière »-« couvercle ».

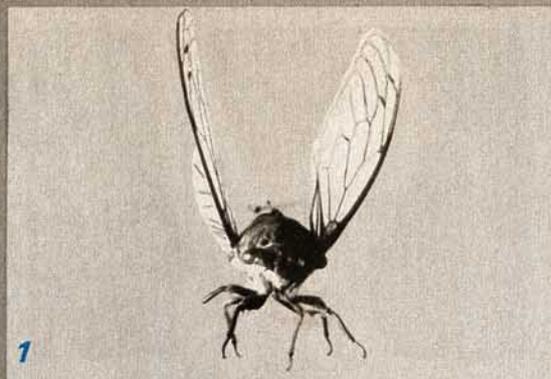
Des muscles verticaux (AA') et dorso-ventraux (BB') se contractant alternativement, provoquent une déformation oscillatoire du thorax. (Notons en passant que le cou de la mouche doit présenter une certaine élasticité pour ne pas transmettre à la tête ce mouvement de va et vient, qui provoquerait chez l'animal de terribles migraines.)

Le thorax est fait de deux pièces, dont l'ensemble ressemble à une soupière munie d'un couvercle trop petit. La déformation du thorax s'accompagne d'un mouvement relatif du « couvercle » par rapport à la « soupière » qui provoque l'élevation et l'abaissement des ailes.

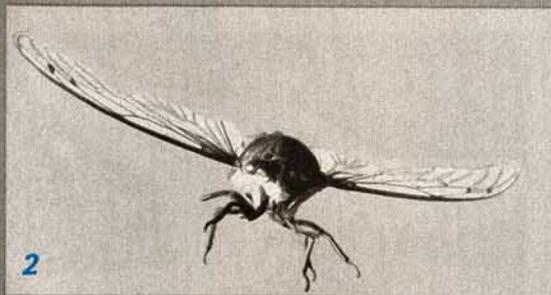
Deux autres phénomènes jouent également un rôle important dans le fonctionnement de cette merveilleuse machine volante.

Comprimez une boîte de cirage entre le pouce et l'index. Quelquefois celle-ci ne fléchira pas continuellement mais s'enfoncera brusquement avec un petit claquement sec. Ce faisant la membrane du couvercle passera brusquement d'une position d'équilibre à une autre position d'équilibre, la pression des doigts, ou son relâchement, n'ayant fait que déclencher le mouvement. Un système de ce genre est dit « bistable ». Le thorax de la mouche est fait ainsi. Ce phénomène que Nachtigall appelle le « click effect » permet un stockage élastique d'énergie. Il permet d'imprimer aux ailes, en bout de course, une plus forte accélération et ainsi d'accroître la fréquence et l'efficacité du battement.

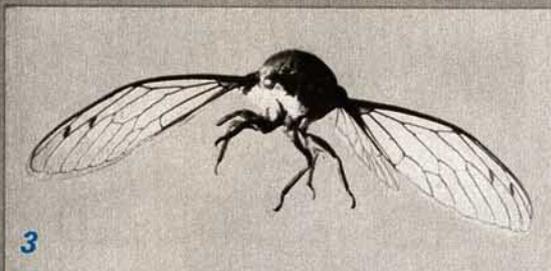
L'aile de l'insecte comporte aussi des butées faites d'un matériau aux propriétés élastiques exceptionnelles : la résiline. Si on lâchait une bille faite de cette substance d'une hauteur de 1 mètre sur une plaque d'acier, elle rebondirait à une hauteur de 98 cm. Aucun plastique conçu par l'homme n'atteint un tel résultat. Vue au microscope électronique, la résiline apparaît



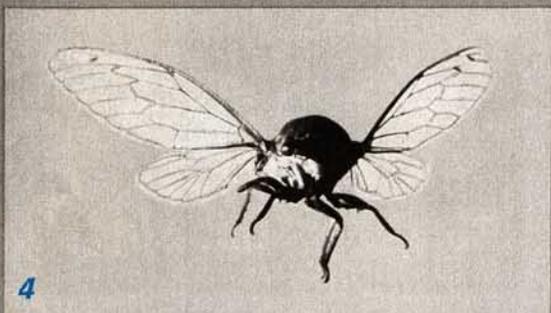
1



2

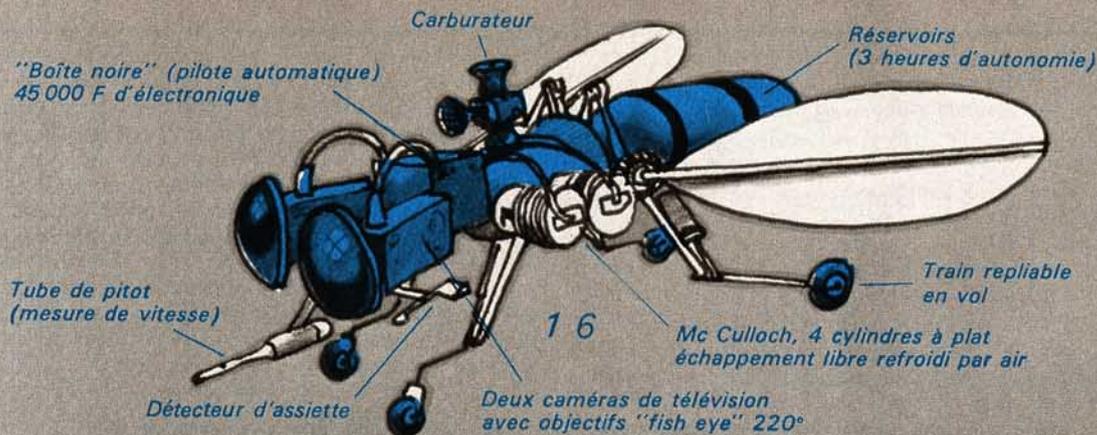


3



4

Ces quatre images du vol de la cigale d'Amérique du Nord, tirées de l'ouvrage de Nachtigall¹, ont parfaitement saisi les quatre temps principaux du vol de cet insecte. En (1), le bord d'attaque des ailes a commencé à s'abaisser, alors que le bord de fuite complète encore le mouvement précédent, causant ainsi un fort mouvement de torsion. En (2), les ailes sont planes, à l'horizontale. En (3), les ailes s'incurvent longitudinalement, selon l'axe transversal du corps, tandis que les ailes arrière battent en phase avec elles. En (4), c'est la fin du coup d'ailes, celles-ci se préparent à remonter. Pour prendre ces photos, au millionième de seconde, la cigale a été immobilisée par une aiguille plantée dans son abdomen et fixée à un support. (¹ « Insect in flight », Mac Graw-Hill Ed.)



comme un réseau de fibres formant un maillage très régulier. Si l'on maintient en extension un fragment de résiline pendant 3 mois, celui-ci, libéré, reprendra sa forme sans la moindre déformation résiduelle.

Dans son mouvement de va et vient, l'aile de l'insecte, en bout de course, vient rebondir sur ces butées, l'effet étant également d'accroître la fréquence et d'améliorer l'efficacité du battement.

Le merveilleux moteur de l'insecte. Nos cellules ont de constants besoins en oxygène. Nos muscles, lorsqu'ils travaillent, en font une grande consommation. Un homme qui court consomme 5 fois plus d'oxygène qu'un homme au repos. Dans ce cas, sa respiration s'accélère, augmente les échanges gazeux au niveau des poumons. Son rythme cardiaque s'élève et ainsi son sang, par le truchement des globules rouges, apporte plus d'oxygène aux muscles en travail.

Le cœur de l'insecte est placé sur la partie supérieure de l'abdomen. Il bat lentement et fait circuler le sang, non à travers un système d'artères et de veines, mais de façon diffuse, à travers tout le corps, passant d'une région à l'autre par des trous munis de valves.

Lorsque l'insecte vole, sa consommation d'oxygène est multipliée par 14, ou même par cent chez les coléoptères, qui développent de fortes puissances pendant la courte durée de leur vol. Dans ces moments, le rythme cardiaque ne change pas, ou peu. Et ceci parce que le sang de l'insecte dénué de globules rouges, n'est pas le véhicule de l'oxygène nécessaire aux muscles. Il n'intervient que pour nourrir les cellules et éliminer les déchets. L'oxygène est directement amené aux muscles par l'intermédiaire de tubes-trachées. De cette façon, il parvient aussi à l'ensemble des cellules du corps, le même système évacuant le CO₂. A l'entrée des conduits, des peignes faits de poils font office de filtres à air. Ce système d'alimentation est excessivement efficace et, à l'échelle de l'insecte, représente une véritable soufflerie. Si un coureur de cent mètres respirait comme un papillon, il consommerait 500 m³ d'air à l'heure, soit 140 fois plus que ce qu'il consommerait normalement. Je me

suis amusé à imaginer à quoi pourrait ressembler une mouche, construite avec nos moyens technologiques.

Les carburants

Ce sont essentiellement des sucres et des graisses. Les premiers offrent l'intérêt d'être immédiatement disponibles, car, en solution, ils peuvent baigner les muscles. Mais le solvant, en l'occurrence l'eau, constitue un poids mort faisant que le rapport énergie sur poids est huit fois moindre pour les sucres que pour les graisses. Les insectes migrateurs, qui doivent effectuer des vols de longue durée, marcheront donc aux graisses; tandis que des insectes sédentaires comme l'abeille, marcheront aux sucres. Un insecte migrateur consommera 0,8 % de son poids par heure de vol, cette fraction étant 10 à 20 fois supérieure pour l'abeille. Dans une activité de vol normale, l'abeille consomme d'ailleurs le nectar emmagasiné dans son gésier. Celui-ci assure une autonomie de vol de 15 minutes correspondant à une distance franchissable de 7 km. Au-delà, l'abeille cherchera à se poser pour refaire le plein.

Et la mouche? Nachtigall a poussé très loin la question. Une « bonne » mouche à fruits, marchant aux sucres, parvient à soutenir un vol de cinq heures, en soufflerie. Ensuite la fréquence des battements diminue et la mouche finit par s'arrêter, complètement épuisée. Nachtigall se demanda ce qui se passerait si on effectuait un ravitaillement « en vol », un refueling, en injectant directement du sucre dans le gésier de la mouche. A la première injection, celle-ci repartit au quart de tour. Il poursuivit inlassablement l'opération pendant... 6 jours, réapprovisionnant l'animal toutes les 4 ou 5 heures. L'expérience fut interrompue, non par une défaillance du « moteur » mais parce que les ailes de l'animal partaient en lambeaux.

Le refroidissement

Les protéines structurales de la mouche ne peuvent supporter une température excessive. Si les sauterelles refroidissent leur corps par sudation, la circulation de l'air dans et autour

(Suite page 144)

LE VOL DES INSECTES VU PAR LA MÉCANIQUE

(Suite de la page 53)

du thorax suffit en général à assurer cette fonction. Aux saisons fraîches, un gilet de fourrure enserrant le thorax gardera les muscles au chaud.

En vol, les muscles du papillon sont à 38°. Cette température atteint 40° chez le coléoptère, qui a un moteur plus poussé.

Chasse de nuit

Nous terminerons ce trop bref aperçu sur le monde passionnant des insectes volants, tiré de l'ouvrage de Nachtigall (« Insects in flight », paru chez Mac Graw Hill) avec les papillons de nuit. Ceux-ci sont la proie favorite des chauves-souris. Comme on le sait, ces dernières localisent les objets à l'aide d'un radar à ultrasons, le délai s'écoulant entre l'émission du signal et la réception de l'écho permettant à ces cheiroptères de localiser leur proie et d'apprécier sa vitesse. En fait, beaucoup pensent que la chauve-souris acquiert par ce procédé une véritable « vision sonore », une perception de son environnement qui peut être tout aussi bonne et tout aussi précise que la perception visuelle.

La notion de luminosité ou de couleur des objets est ici remplacée par le pouvoir de réfléchir et de diffuser les ultra-sons. (Pour qui a déjà vu un écran radar, l'écho aux contours nets d'un engin volant se distingue assez bien des échos flous dus à des phénomènes purement atmosphériques.)

Le papillon de nuit possède un équipement de bord très sophistiqué pour déjouer les attaques de la chauve-souris. Les écailles qui tapissent ses ailes et la fourrure garnissant son corps ne renvoient au chasseur qu'un écho flou et imprécis. Par ailleurs, le vol des papillons de nuit est ultra-silencieux. Si l'émission ultra-sonique permet à la chauve-souris de détecter le papillon, la réciproque est vraie. Celui-ci possède des cellules sensibles permettant une réception jusqu'à 200 kHz. Dès qu'il entend la sirène stridente de son ennemi le papillon a le choix entre plusieurs stratégies : soit il se laisse tomber, inerte, simulant une feuille morte, soit il tente de s'écarter du faisceau par des embardées, soit il a recours à un moyen des plus sophistiqués : le brouillage. Dès qu'il détecte les impulsions, émises par la chauve-souris sous quelques dizaines de kilohertz et par train d'une douzaine par seconde, il réémet aussitôt sur la même longueur d'onde des trains incohérents d'impulsions qui perturbent totalement les appréciations en distance et en vitesse.

Nous voyons donc que les insectes connaissent et utilisent depuis des dizaines de millions d'années des procédés dont certains ne nous sont connus que depuis la Deuxième Guerre mondiale.

MYLOS ■