

Étude bibliographique vol animal et biomimétisme

Le vol animal a de tous temps fasciné l'homme, qui y a vu naturellement une source d'inspiration pour l'accomplissement de son plus vieux rêve. Ainsi les premières « machines volantes » dessinées par Léonard de Vinci reproduisaient la structure des ailes des chauves-souris. Les échecs de ce type de concepts furent toutefois nombreux autant que décourageants et, sitôt mis en évidence les mécanismes de génération de portance sur une aile mise en incidence au sein d'un écoulement uniforme, on se tourna alors vers les voilures dites fixes pour s'arracher à la pesanteur. Cependant, pendant que l'aviation ne cessait de progresser avec les succès que l'on connaît, nombreux étaient ceux qui s'interrogeaient encore sur les mystères du vol animal, en tentant d'en percer les secrets à la lumière des nouvelles découvertes dans le domaine de la mécanique des fluides.

Depuis le vol plané des grands rapaces jusqu'au vol acrobatique des plus petits insectes, les études couvrant le sujet furent multiples et variées, et même si de nombreuses zones d'ombre subsistent encore aujourd'hui, des découvertes considérables ont jalonné le siècle dernier, résolvant des paradoxes sur lesquels achoppaient les chercheurs durant longtemps. Ces dernières années, les recherches actives menées dans le domaine des microdrones ont suscité un supplément d'intérêt pour l'étude du vol des insectes, vus comme autant de concepts prometteurs de par leur taille et leur maniabilité. Une des caractéristiques les plus utiles étant la capacité à faire du vol stationnaire (*hovering*), défini comme un vol durant lequel la position de l'animal en l'air reste constante. Une telle aptitude se révélerait indispensable pour des engins destinés à des missions d'observation, *a fortiori* si celles-ci se déroulent dans des espaces clos.

L'étude du vol animal dans son ensemble représente une somme considérable de travaux, envisagés sous des angles aussi variés que la simulation numérique de l'écoulement autour d'ailes battantes, ou encore le calcul de puissances par la mesure de la consommation d'oxygène d'oiseaux en vol. C'est pourquoi nous proposons ici un aperçu de ces travaux centré essentiellement sur le vol des insectes et le vol stationnaire.

1.1 Généralités sur le vol stationnaire

Tous les animaux volants n'ont pas la possibilité de faire du vol stationnaire. Une première approche séparerait grossièrement les insectes — qui en sont capables — des

oiseaux. Ce dernier ordre peut lui même être subdivisé suivant le type de vol : les plus gros oiseaux, tels les rapaces ou les grands oiseaux de mer, effectuent la majorité de leur vol en planant, c'est-à-dire que les ailes restent fixes et s'appuient sur les courants ascendants pour gagner de l'altitude. Certaines espèces sont d'ailleurs incapables, de par leur masse, de décoller du sol, et il leur est nécessaire de plonger depuis une falaise ou un arbre puis d'effectuer une ressource pour prendre leur envol [Ritchison 2003]. Les plus petits oiseaux, tels les passereaux, ont quant à eux un vol qui alterne très rapidement des phases de battement d'ailes et des phases « propulsées » durant lesquelles l'oiseau garde ses ailes rabattues le long du corps et utilise son inertie pour avancer tout en réduisant sa traînée aérodynamique. Entre ces deux extrêmes, on trouve la quasi-totalité de l'ordre, qui bat ses ailes régulièrement à fréquence moyenne dans un plan proche de la verticale.

Cette classification simpliste serait bien évidemment à nuancer : d'une part certains oiseaux sont capables de vol stationnaire : on voit ainsi des espèces de rapaces rester plusieurs secondes en vol stationnaire, que ce soit en vol contre le vent (il ne s'agit dans ce cas que d'un vol stationnaire relativement au sol) ou bien pour repérer une proie avant de fondre sur celle-ci, comme le balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) [Flemming et al. 1992]. Plus remarquable est la famille des trochilidés, comprenant le colibri ou oiseau-mouche : il s'agit en effet de la seule espèce d'oiseau capable d'effectuer un vol stationnaire stabilisé, par exemple pour se nourrir du nectar de fleur en fleur [Greenewalt 1960, Carpentier 2000]. D'autre part certains insectes n'accomplissent pas de vol stationnaire au sens strict du terme, mais oscillent très rapidement autour d'un point fixe. À l'échelle d'un observateur humain, ce type de vol pourra tout de même être considéré comme stationnaire. Enfin, des animaux autres que les oiseaux ou les insectes peuvent voler : ainsi la chauve-souris, qui est le seul mammifère ailé et qui est capable qui plus est de courtes phases de vol stationnaire. L'exocet (*Exocoetus volitans*) ou poisson volant est également capable de voler hors de l'eau sur de très courtes distances, bien que ce vol s'apparente en réalité plus à une trajectoire balistique.

Une distinction supplémentaire pourrait être réalisée au sein même des espèces capables de vol stationnaire, et ce en fonction de la cinématique de battement. La différence se base sur l'angle β entre le plan dans lequel battent les ailes et l'horizontale (voir fig. 1.1). Le type le plus couramment observé est le vol stationnaire où les ailes battent dans un plan horizontal, soit $\beta = 0^\circ$. Ce type de vol pourra être qualifié de vol stationnaire normal, en référence à l'appellation *normal hovering*, introduite par Weis-Fogh en 1972 [Weis-Fogh 1972]. Il se caractérise également par une symétrie entre les battements montant (*upstroke*) et descendant (*downstroke*), l'intérêt étant de générer de la portance à l'aller comme au retour de l'aile. On comprend mieux dès lors pourquoi ce type de cinématique est privilégié dans la nature pour le vol stationnaire, qui nécessite une portance quasi-constante tout en limitant les déplacements du corps de l'animal. Par ailleurs, ce mouvement symétrique nécessite que le profil de l'aile le soit également : l'aile se retourne en effet à la fin de chaque battement, et l'intrados¹ devient l'extrados du battement suivant. On rencontrera donc en pratique pour ce type de vol des espèces munies de profils d'ailes minces, comme par exemple la plupart des insectes.

Une autre contrainte découle de ce retournement de l'aile : l'animal doit en effet être morphologiquement capable d'un tel mouvement. Chez la plupart des oiseaux, des limitations articulaires restreignent l'amplitude des mouvements de supination (rotation augmentant l'incidence) et de pronation (rotation diminuant l'incidence) de l'aile. Seul le colibri [Greenewalt 1960] possède un squelette lui permettant des mouvements combinés

¹Intrados (resp. extrados) : face inférieure (resp. supérieure) d'une aile

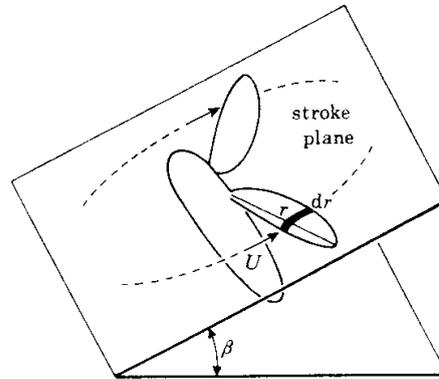


FIG. 1.1 – Angle β repérant la position du plan de battement (*stroke plane*) [Ellington 1984]

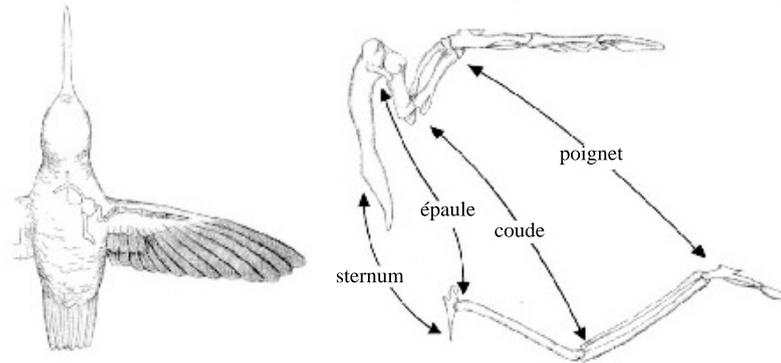


FIG. 1.2 – Comparaison entre une aile de pélican (à droite en bas) et une aile de colibri (à droite en haut), échelle non respectée [Greenewalt 1960]

de translation et de retournement de l'aile. En guise d'illustration, on a reproduit sur la figure 1.2, une comparaison entre les squelettes de l'aile d'un pélican et de celle d'un colibri. On remarque que chez le premier, les trois segments composant l'aile, à savoir le bras, l'avant-bras et la main (par analogie avec l'anatomie humaine), sont clairement visibles. De plus, les articulations joignant ces os donnent à l'aile toute sa flexibilité, mais la fine jointure de l'épaule l'empêche de faire des rotations d'amplitude importante. *A contrario* chez le colibri, les deux premiers segments sont quasi atrophiés en comparaison avec la main, qui constitue donc l'essentiel de l'aile et assure sa rigidité. Les articulations du coude et du poignet sont figées, mais l'épaule, dont la structure s'avère beaucoup plus complexe que dans le cas des autres oiseaux, permet à l'aile des rotations suivant les trois axes par rapport au corps, et autorise en particulier des retournements complets de l'aile en fin de battement. De par cette analyse morphologique et cinématique, il apparaît donc que le vol du colibri se rapproche bien plus de celui des insectes que des autres oiseaux, d'où bien évidemment son surnom d'oiseau-mouche en français.

La spécificité de ce genre au sein des animaux volants ne s'arrête pas là. En examinant d'un point de vue statistique les corrélations entre l'envergure et le poids (fig. 1.3), ainsi qu'entre l'envergure et la fréquence de battement (fig. 1.4), on s'aperçoit que les colibris sont véritablement à mi-chemin entre les insectes et les oiseaux, représentant ainsi à eux seuls une classe intermédiaire : il s'agit, suivant le point de vue que l'on choisit d'adopter,

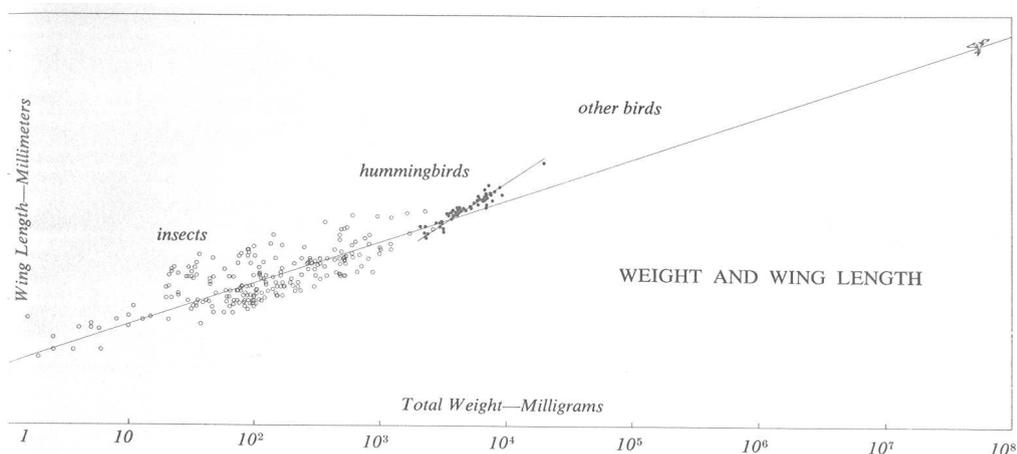


FIG. 1.3 – Rapport entre le poids (*weight*) et la demi-envergure (*wing length*) au sein des animaux volants [Greenewalt 1960]

des plus petits oiseaux ou bien des plus gros animaux capables de vol stationnaire, et ils représentent donc une source d’inspiration potentielle à ne pas négliger.

En réalité, le plan de battement n’est pas tout à fait horizontal dans la plupart des cas : chez la plupart des insectes ainsi que chez le colibri, β oscille de quelques degrés autour de 0, à une fréquence identique à celle du mouvement de battement des ailes. Le résultat de la composition de ces deux mouvements est une trajectoire « en huit » décrite par l’extrémité de l’aile, comme représenté sur la figure 1.5 page 16. Cependant, dans beaucoup d’études, cette oscillation est négligée dans un but de simplification.

On rencontre ensuite le vol stationnaire avec un plan de battement incliné, opéré notamment par quelques espèces de passereaux et de chauves-souris durant de courtes phases, ainsi que par certaines espèces d’insectes, les libellules (ordre des Odonates) en particulier. Dans ce cas, le plan de battement est incliné à environ 60° et les ailes pivotent lors de la remontée de façon à annuler leur incidence aérodynamique. L’intérêt est de minimiser à la fois la déportance associée, qui ferait chuter l’animal, mais également la traînée liée à l’apparition de cette déportance : ce type de vol est d’ordinaire employé lors des phases de sustentation ou de butinage, et nécessite donc d’annuler les mouvements horizontaux pour assurer une plus grande précision à l’animal. Les espèces d’oiseaux et de chauves-souris accomplissant ce type de vol mettent à profit les changements de forme et de surface que leur autorisent les articulations de leurs ailes pour diminuer la surface portante lors de la remontée de l’aile, toujours dans le but de réduire autant que faire se peut la déportance. La décomposition d’un cycle de battement de chauve-souris est représentée sur la figure 1.6.

Enfin le dernier type de battement se rencontre chez un petit nombre d’espèces seulement, qui battent leurs ailes dans un plan vertical. Il est représenté sur la figure 1.7 page 17 la piéride du chou (*Pieris brassicae*) au décollage, pour laquelle on voit que le mouvement des ailes est perpendiculaire à la corde, ce qui signifie que la sustentation est assurée par la traînée aérodynamique des ailes. D’autres mécanismes peuvent également favoriser la portance dans ce cas précis, en particulier le claquement des ailes au début de chaque battement ; ce point sera examiné plus en détail par la suite.

De manière générale, on pourra employer une terminologie différente pour distinguer les typologies rencontrées jusqu’ici. On appellera ainsi vol battu le vol généralement pratiqué

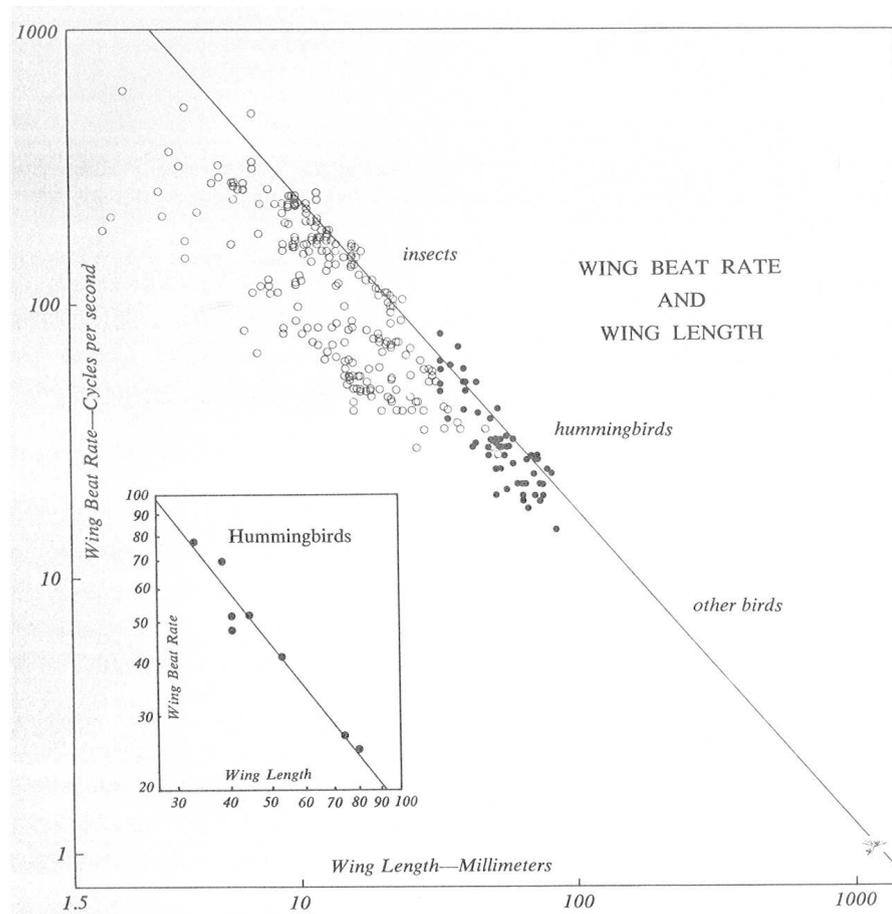


FIG. 1.4 – Rapport entre la demi-envergure (*wing length*) et la fréquence de battement (*beat rate*) au sein des animaux volants [Greenewalt 1960]

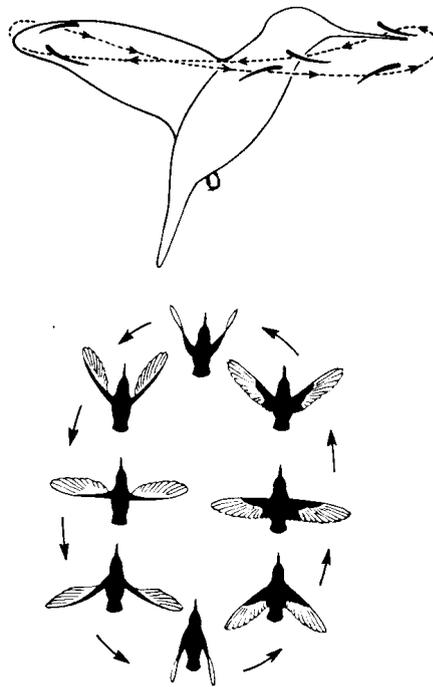


FIG. 1.5 – Mouvement en huit résultant de l'oscillation du plan de battement [Ellington 1984]

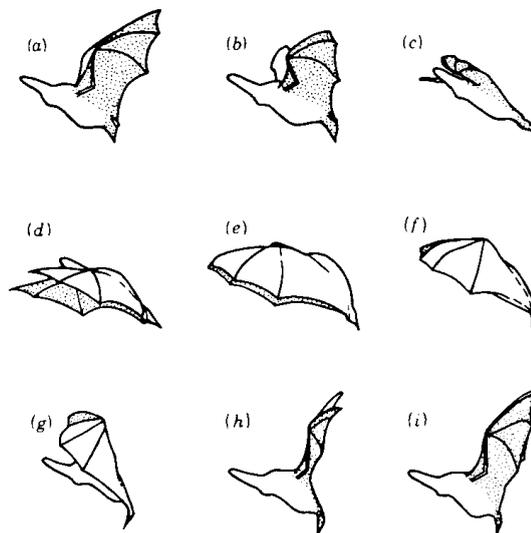


FIG. 1.6 – Battement dans un plan incliné chez la chauve-souris [Ellington 1984]

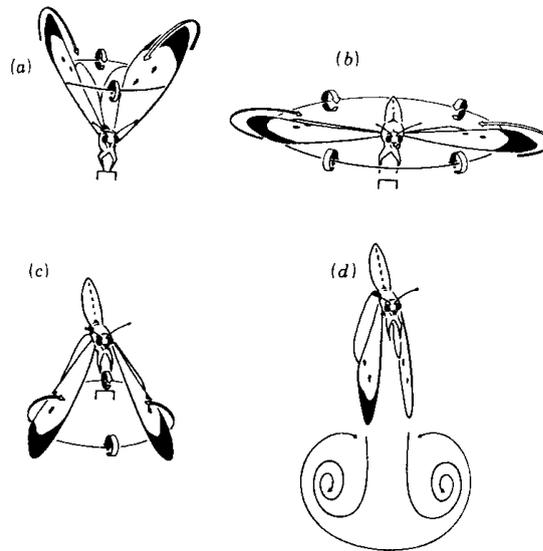


FIG. 1.7 – Battement dans un plan vertical chez la piéride du chou [Ellington 1984]

par les oiseaux, caractérisé par des ailes repliables, un battement dans un plan voisin de la verticale et une incapacité à faire du vol stationnaire maîtrisé. À l’opposé, on qualifiera de vol vibrant la cinématique du colibri et de la plupart des insectes en vol stationnaire, pour lequel le plan de battement est voisin de l’horizontale et où la portance est générée à l’aller et au retour de l’aile. Lorsqu’une telle distinction ne s’impose pas, on confondra par abus de langage ces deux dénominations sous le terme générique de vol battant (ou ailes battantes), en référence à l’appellation anglo-saxonne unique *flapping wings*.

1.2 Analyse et modélisation

Les premières études scientifiques du vol animal datent du début du XX^e siècle. Cependant elles ne consistaient pour la plupart qu’en des analyses purement cinématiques des mouvements de battement. Il faudra attendre quelques dizaines d’années pour qu’une passerelle soit établie entre les domaines de l’ornithologie et de l’aérodynamique, apportant ainsi un nouvel éclairage aux études antérieures. Les premiers obstacles et controverses apparurent lorsque certaines études démontrèrent que l’application immédiate des théories aérodynamiques classiques à une aile d’insecte en mouvement fournissait une portance bien inférieure à celle nécessaire à l’animal pour équilibrer son poids. Ce résultat donna naissance au fameux paradoxe "*Bumblebees can't fly*" (les bourdons ne peuvent pas voler), et l’une des principales préoccupations des entomologistes et des aérodynamiciens serait désormais de débusquer la faille dans cette démonstration.

1.2.1 Vol des oiseaux

Dans un article publié dans le *Journal of Experimental Biology* [Pennycuik 1968], Pennycuik a le premier l’idée d’appliquer les théories des hélices et rotors au vol animal. Il constate en effet que lors du vol battu, la surface balayée par les ailes lorsque le plan de battement est voisin de l’horizontale peut être assimilée à celle décrite par les pales d’un

rotor d'hélicoptère (voir fig. 1.8(a)), et suggère donc la possibilité d'appliquer la théorie du moment de Rankine-Froude [Rankine 1865], qui donne une relation entre la portance et la vitesse induite à la traversée du disque rotor. Considérons en effet un oiseau — en l'occurrence un pigeon biset (*Columba livia*, voisin du pigeon des villes) — en vol vertical, et assimilons-le entièrement à un rotor parfait de surface balayée² S_d (fig. 1.8(b)). La pression et la vitesse aérodynamique valent respectivement (p_0, V_0) à l'infini amont et (p_0, V_a) à l'infini aval, et soient respectivement p_1, p_2 les pressions immédiatement avant et après le disque rotor, et V_{iz} la vitesse à la traversée de celui-ci. Dans l'hypothèse d'un écoulement de fluide parfait incompressible, l'application du principe de Bernoulli aux régions amont et aval donne :

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_{iz}^2 \quad (1.1)$$

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho V_{iz}^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_a^2 \quad (1.2)$$

d'où, par combinaison :

$$\frac{1}{2}\rho(V_a^2 - V_0^2) = p_2 - p_1 \triangleq \Delta p \quad (1.3)$$

On peut écrire par ailleurs la portance du disque L sous deux formes différentes :

$$L = S_d \Delta p \quad (1.4a)$$

$$L = \frac{d}{dt}[m(V_a - V_0)] \quad (1.4b)$$

$$= \dot{m}(V_a - V_0) \quad (1.4c)$$

$$= \rho S_d V_{iz}(V_a - V_0) \quad (1.4d)$$

d'où, par combinaison avec éq. (1.3) :

$$V_{iz} = \frac{1}{2}(V_a + V_0) \quad (1.5)$$

En supposant enfin comme c'est le cas ici que la vitesse à l'infini amont est nulle, soit $V_0 = 0$, on obtient finalement l'expression de la vitesse induite à la traversée du disque rotor et de la portance fonction de celle-ci :

$$V_{iz} = \frac{1}{2}V_a \quad (1.6)$$

$$L = 2\rho S_d V_{iz}^2 \quad (1.7)$$

Pennycuick précise toutefois que cette assimilation de l'animal à un disque actuateur n'est qu'une approximation, remise en cause dès lors que le mouvement des ailes n'est plus symétrique : ainsi, durant la remontée de l'aile (*upstroke*), celle-ci se fléchit légèrement afin de ne pas générer trop de déportance, ce qui tend à éloigner le mouvement de battement d'un disque actuateur. Le modèle choisi permet néanmoins à Pennycuick d'estimer la puissance nécessaire au pigeon pour voler à des vitesses variées, et les résultats obtenus sont en accord avec des études antérieures basées cette fois-ci sur des mesures directes des consommations en oxygène et nourriture faites sur des spécimens volant en soufflerie.

²Note : dans ce chapitre, les différentes notations seront reprises des articles originaux afin que l'on puisse facilement s'y reporter.

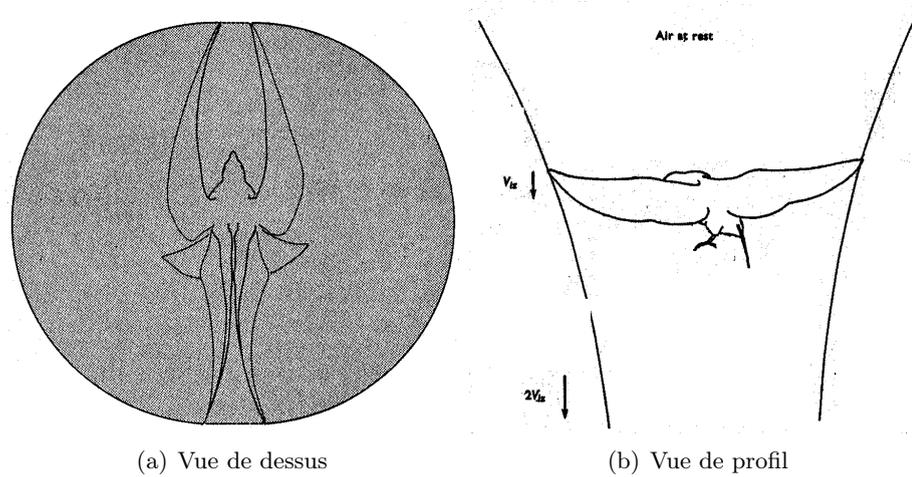


FIG. 1.8 – Application de la théorie du moment de Rankine-Froude à un oiseau en vol *Columba livia* [Pennycuick 1968]

1.2.2 Drosophile et colibri

Fort des résultats probants obtenus par Pennycuick, T. Weis-Fogh [Weis-Fogh 1972] s'est intéressé à travers une démarche similaire à la nature stationnaire ou non des mécanismes aérodynamiques mis en jeu lors du vol stationnaire de certains insectes et du colibri, couvrant ainsi une gamme de nombre de Reynolds³ (Re) allant de 10^2 à 10^4 . Il a en outre cherché à obtenir une première estimation du travail des efforts aérodynamiques mis en jeu et de la puissance correspondante, à partir notamment de données morphologiques relatives à une grande variété d'insectes. Une modélisation de la cinématique de battement des espèces étudiées a donc été entreprise en premier lieu, afin d'obtenir des expressions analytiques simples mais le plus représentatives possibles des différents effets mis en jeu. L'une des premières hypothèses a consisté à négliger les mouvements des ailes situés en-dehors du plan principal de battement. En effet, si l'on examine un insecte diptère⁴ ou un colibri en vol stationnaire, on constate que ses ailes battent dans un plan quasi-horizontale, avec toutefois de légères déviations verticales. On pourrait interpréter ces petits mouvements comme une oscillation régulière du plan de battement autour d'un axe transversal, de même période que le battement, et qui est responsable de l'allure « en huit » de la trajectoire décrite par le bout de l'aile (voir figure 1.9).

Weis-Fogh a donc décidé de négliger ces oscillations du plan de battement et de ne prendre en compte que la valeur moyenne β de l'orientation de celui-ci par rapport à l'horizontale. Le mouvement des ailes est donc uniquement décrit par sa trajectoire à l'intérieur de ce plan, modélisée sous la forme :

$$\gamma = \frac{1}{2}\pi + \frac{1}{2}\phi \sin(2\pi t/t_0) \quad (1.8)$$

γ étant l'angle repérant la position de l'axe longitudinal de l'aile dans le plan de battement, ϕ le débattement angulaire total de l'aile et t_0 la période du mouvement. La vitesse et

³Ce nombre est défini comme le rapport entre les forces de pression et les forces dues à la viscosité ; plus celui-ci est faible, plus les effets visqueux sont sensibles.

⁴Qui possède une seule paire d'ailes.

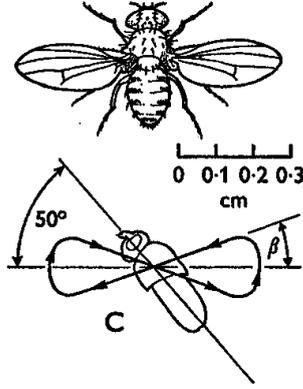


FIG. 1.9 – Allure de la cinématique de battement en vol stationnaire vue de profil (*Drosophila*) [Weis-Fogh 1972]

l'accélération angulaires s'obtiennent par simple dérivation :

$$\dot{\gamma} = \pi\phi n \cos(2\pi nt) \quad (1.9)$$

$$\ddot{\gamma} = -2\phi\pi^2 n^2 \sin(2\pi nt) \quad (1.10)$$

avec $n = 1/t_0$ la fréquence de battement. En appelant C le point d'attache de l'aile au corps, le moment créé en C du fait de l'accélération angulaire vaut :

$$Q_i = \ddot{\gamma} = -2I\phi\pi^2 n^2 \sin(2\pi nt) \quad (1.11)$$

où I est le moment d'inertie en C de l'aile.

Pour calculer la vitesse aérodynamique, Weis-Fogh choisit comme son prédécesseur d'établir une analogie entre les ailes battant à fréquence élevée et un disque actuateur, selon la théorie de Rankine-Froude. La vitesse aérodynamique en un point de l'aile se compose donc de la vitesse due au battement v_r , définie par :

$$v_r^2 = r^2\phi^2\pi^2 n^2 \cos^2(2\pi nt) \quad (1.12)$$

en un point situé à une distance r de l'emplanture, et de la vitesse induite par le disque actuateur, obtenue grâce à la relation :

$$w^2 = W/(2\rho R^2) \quad (1.13)$$

W étant le poids de l'animal, ρ la masse volumique de l'air et R le rayon du disque actuateur, égal dans ce cas à la demi-envergure. On pourrait remarquer que la surface balayée par les ailes ne couvre pas en toute rigueur un disque entier, étant donné d'une part la présence du corps de l'animal entre les ailes, et d'autre part le fait que l'amplitude totale du battement ϕ est bien souvent inférieure à 180° (par exemple 120° pour le colibri *Amazilia fimbriata fluviatilis* et 150° pour la mouche *Drosophila virilis*). Toutefois, l'auteur rappelle qu'il s'agit de calculs visant à obtenir des valeurs moyennes, et que les valeurs calculées de la sorte diffèrent peu de celles mesurées à l'aide de dispositifs expérimentaux (anémométrie par fil chaud).

On a reproduit sur la figure 1.10 l'orientation des différents efforts et vitesses mis en jeu. On obtient en particulier à l'aide de ce schéma l'expression de la vitesse aérodynamique V_r :

$$V_r^2 = v_r^2 + w^2 - 2wv_r \sin \beta \quad (1.14)$$

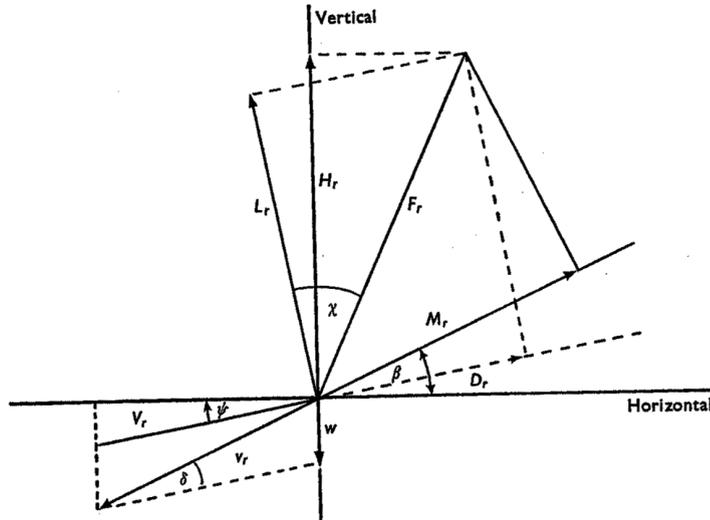


FIG. 1.10 – Angles utilisés pour les calculs [Weis-Fogh 1972]

La valeur de l'effort aérodynamique F_r à une distance r de l'emplanture est alors calculée de manière classique à partir des coefficients aérodynamiques de portance C_L et de traînée C_D :

$$F_r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r \sqrt{C_L^2 + C_D^2} \quad (1.15)$$

ou encore, en définissant $\tan \chi = C_D/C_L$:

$$F_r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r \frac{C_L}{\cos \chi} \quad (1.16)$$

On a alors accès à la composante verticale de cet effort, c'est-à-dire celle qui équilibre le poids en vol stationnaire :

$$H_r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r C_L \frac{\cos(\chi + \psi)}{\cos \chi} \quad (1.17)$$

avec

$$\psi = \delta - \beta \quad (1.18)$$

$$\sin \delta = \frac{w \cos \beta}{V_r} \quad (1.19)$$

De même, la composante des efforts dans le plan de battement à pour expression :

$$M_r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r C_L \frac{\sin(\chi + \psi + \beta)}{\cos \chi} \quad (1.20)$$

Et enfin le couple dû à l'effort s'exerçant à la distance r de l'emplanture :

$$Q_{a,r} = \frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r r C_L \frac{\sin(\chi + \psi + \beta)}{\cos \chi} \quad (1.21)$$

La démarche a alors consisté à calculer le terme $\frac{1}{2} \rho V_r^2 A_r \frac{\cos(\chi + \psi)}{\cos \chi}$, puis à en déduire le coefficient de portance C_L d'après (1.17), sachant que la composante verticale H_r équilibre

	<i>Amazilila fimbriata fluviatilis</i>	<i>Drosophila virilis</i>
Masse du corps (g)	5,1	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Demi-envergure (cm)	5,85	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Surface alaire totale A_r (cm ²)	17,0	$5,8 \cdot 10^{-2}$
Masse alaire totale (g)	0,309	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Moment d'inertie total I (g.cm.s ²)	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$10,0 \cdot 10^{-10}$
Amplitude de battement ϕ (°)	120	150
Fréquence de battement n	35	240
Angle du plan de battement β (°)	11	20
Rapport C_L/C_D	1,8/0,3	0,86/0,54
Vitesse de métabolisme (cal.g ⁻¹ .h ⁻¹)	200	120
Vitesse induite w (cm.s ⁻¹)	137	76
Charge alaire moyenne (kg.m ²)	3	0,35

TAB. 1.1 – Données morphologiques pour le vol stationnaire [Weis-Fogh 1972]

le poids de l'animal en vol stationnaire. La valeur obtenue est alors reportée dans (1.21) afin d'avoir l'expression du moment aérodynamique en fonction du temps. Ce dernier est alors intégré au cours d'un battement complet pour obtenir le travail et la puissance dus aux efforts aérodynamiques :

$$W_a = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} Q_a d\gamma + \int_{\gamma_{\max}}^{\gamma_{\min}} Q_a d\gamma \quad (1.22)$$

$$P_a = nW_a \quad (1.23)$$

La puissance totale s'obtient en rajoutant le moment inertiel calculé en (1.11) :

$$P = n \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} (Q_a + Q_i) d\gamma + \int_{\gamma_{\max}}^{\gamma_{\min}} (Q_a + Q_i) d\gamma \quad (1.24)$$

L'étude a été menée sur deux espèces : le colibri *Amazilila fimbriata fluviatilis* et la mouche *Drosophila virilis*. Les données morphologiques utilisées pour les calculs sont résumées dans le tableau 1.1. S'il est aisé de mesurer des grandeurs statiques comme la masse et les inerties sur les spécimens réels, la détermination de la cinématique de battement, c'est-à-dire la loi $\gamma(t)$, s'avère naturellement plus délicate. Weis-Fogh s'est pour cela appuyé sur des études antérieures, effectuées notamment par Stolpe et Zimmer [Stolpe et Zimmer 1939] ainsi que Hertel [Hertel 1966]. Ceux-ci ont réalisé des enregistrements vidéo de colibris en vol stationnaire, dont la visualisation au ralenti a pu à la fois confirmer l'hypothèse de la nature sinusoïdale du battement de l'animal, et renseigner quant à l'amplitude maximale du battement ainsi que l'incidence aérodynamique moyenne. Se basant d'une part sur les travaux antérieurs de Greenewalt [Greenewalt 1960], notamment sur la régression statistique que celui-ci a établie entre l'envergure et la fréquence de battement (fig. 1.4 p. 15) et l'observation détaillée des cinématiques de battements de certaines espèces (figs 1.11(a) et 1.11(b)), et d'autre part sur des visions stroboscopiques, Weis-Fogh a ainsi pu estimer que son spécimen volait à une fréquence d'environ 35 Hz. En ce qui concerne la drosophile, la plupart des données sont issues des travaux de Vogel [Vogel 1966] et de Nachtigall [Nachtigall 1966] sur le vol captif de cet insecte, après un recalage visant à estimer correctement les différentes grandeurs dans le cas du vol réel.

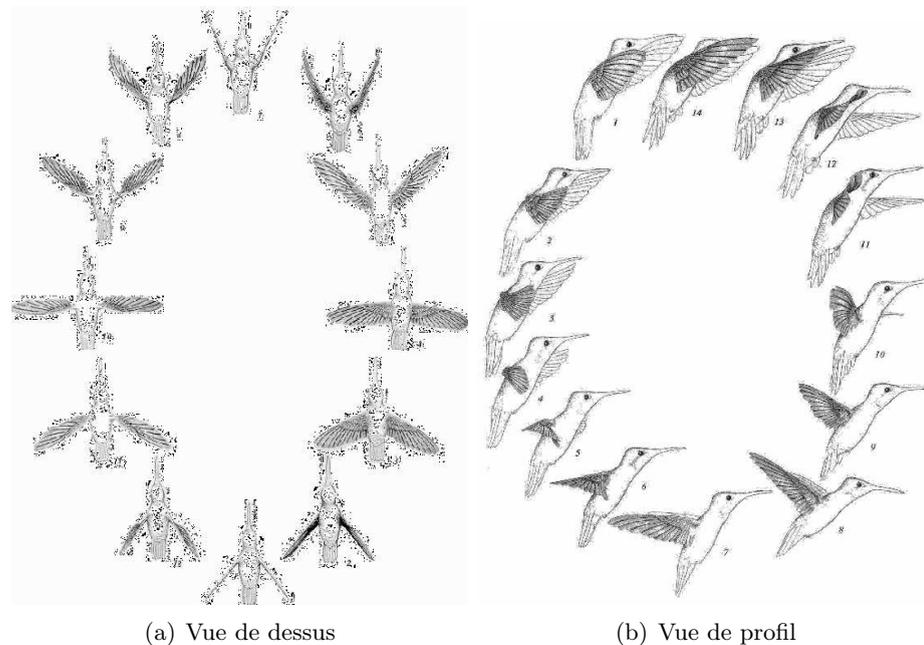


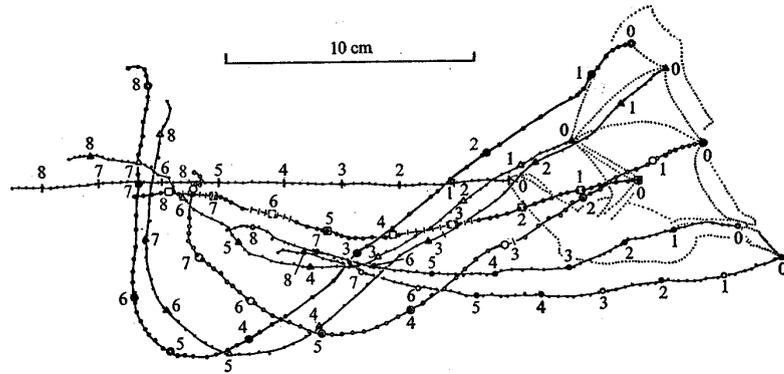
FIG. 1.11 – Allure de la cinématique du colibri en vol stationnaire [Greenewalt 1960]

En appliquant les formules présentées auparavant pour calculer les coefficients de portance, le travail des forces aérodynamiques ainsi que la puissance consommée lors du mouvement stationnaire, Weis-Fogh a alors montré que les mécanismes aérodynamiques stationnaires classiques suffiraient à expliquer la portance en vol stationnaire chez le colibri et la drosophile, ce qui signifie en d'autres termes que l'existence de phénomènes instationnaires spécifiques ne saurait être justifiée d'après cette étude par des efforts insuffisants pour soutenir le poids de l'animal.

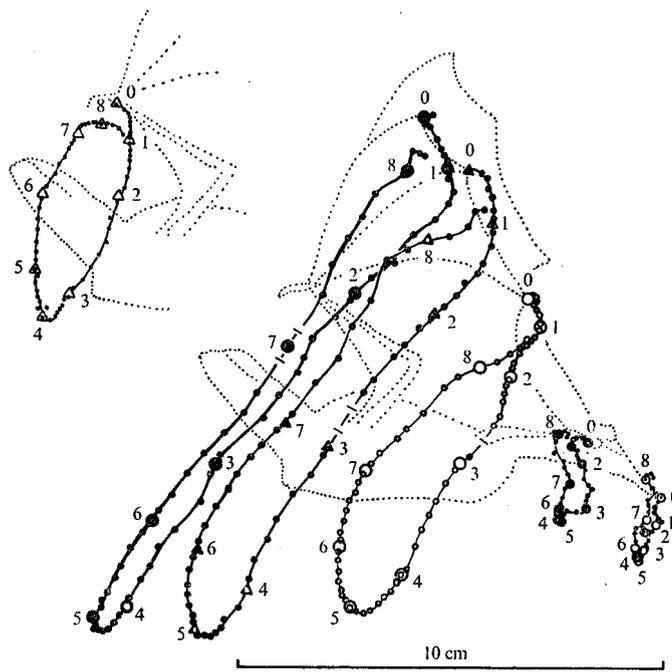
1.2.3 Chauve-souris

Norberg [Norberg 1976] a réalisé une étude similaire pour le vol horizontal de la chauve-souris *Plecotus auritus* (oreillard commun). La méthode globale est identique à celle employée par Weis-Fogh : à partir de photos et de visualisations au ralenti du vol de l'animal, Norberg a modélisé la cinématique des ailes puis a calculé les différents coefficients et efforts aérodynamiques afin de voir si ceux-ci sont ou non compatibles avec l'hypothèse d'une aérodynamique stationnaire.

Le contenu de l'étude présente toutefois quelques différences vis-à-vis des travaux de Weis-Fogh : d'une part, l'étude de Norberg porte non pas sur le vol stationnaire, mais sur le vol horizontal à faible vitesse ($2,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ce qui implique que la traînée aérodynamique devra être prise en compte. D'autre part, la morphologie d'une aile de chauve-souris est plus complexe que celle d'une aile d'insecte ou de colibri : alors que ces dernières peuvent être considérées globalement comme rigides ou du moins déformées par les seuls effets aéroélastiques, l'aile de la chauve-souris se compose d'une surface de peau (*patagium*) séparée en plusieurs sections par les doigts longs et fins de l'animal. Le mouvement global sera donc la combinaison des trajectoires des différents éléments de l'aile, comme on peut le voir sur les figures 1.12(a) et 1.12(b).



(a) Projection dans le repère de référence



(b) Projection dans le repère de l'animal

FIG. 1.12 – Traces de différents points de l'aile de l'oreillard commun en vol horizontal.
● : 3^e doigt, ▲ : 4^e doigt, ○ : 5^e doigt, △ : pouce, □ : coude, • : patte postérieure, ◦ : queue [Norberg 1976]

La traînée aérodynamique totale est quant à elle donnée par la formule suivante :

$$D_b = \frac{1}{2}\rho(A_b + A_e)V^2 \quad (1.25)$$

où A_e et A_{car} sont les surfaces de plaque plane équivalente respectivement pour le corps et les oreilles (surface de la plus grande section \times coefficient de traînée). A_e peut être estimé à l'aide de la formule empirique obtenue par Pennycuick [Pennycuick 1972] :

$$A_e = 6,2 \cdot 10^{-4} W^{2/3} \quad (1.26)$$

W étant le poids de l'animal. Norberg a par ailleurs considéré que les oreilles ont un coefficient de traînée de 1. Pour tenir compte de la géométrie variable de l'aile, celle-ci est divisée en N tranches en envergure, et on note $A'(r)$, $r \in \{1, 2, \dots, N\}$ l'aire de la section courante. La formulation complète du problème aboutit finalement au système d'équations suivant :

$$\int_{t=0}^{t=T} W dt = C_L \int_{t=0}^{t=T} \left[\sum_{r=1}^{r=N} \frac{1}{2} \rho V_R(r, t)^2 A'(r) \cos \psi (1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \beta)^{1/2} \right] dt \\ + C_D \int_{t=0}^{t=T} \left[\sum_{r=1}^{r=N} \frac{1}{2} \rho V_R(r, t)^2 A'(r) \sin \psi (1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \beta)^{1/2} \right] dt \quad (1.27)$$

$$\int_{t=0}^{t=T} D_b dt = C_L \int_{t=0}^{t=T} \left[\sum_{r=1}^{r=N} \frac{1}{2} \rho V_R(r, t)^2 A'(r) \sin \psi \left(\frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \beta} \right)^{1/2} \right] dt \\ + C_D \int_{t=0}^{t=T} \left[\sum_{r=1}^{r=N} \frac{1}{2} \rho V_R(r, t)^2 A'(r) \cos \psi \left(\frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 - \cos^2 \gamma \sin^2 \beta} \right)^{1/2} \right] dt \quad (1.28)$$

dans lesquelles les différents angles de calcul sont repris de l'étude de Weis-Fogh (cf. figure 1.10).

L'hypothèse stationnaire a alors été testée en résolvant le système ci-dessus pour obtenir les coefficients aérodynamiques. Le coefficient de portance est cohérent avec l'aérodynamique stationnaire, mais le coefficient de traînée atteint des valeurs très importantes, de l'ordre de 1,2. L'auteur a alors choisi de lever le doute en examinant le rendement mécanique à partir de calculs de puissance comme l'avait fait Weis-Fogh, (voir éq. (1.24)). La conclusion rejoint finalement celle de Weis-Fogh, à savoir que les mécanismes aérodynamiques stationnaires seuls peuvent expliquer le vol horizontal de la chauve-souris.

Une approche similaire a été employée par la suite pour estimer la dépense énergétique d'une autre espèce, la glossophage de Pallas (*Glossophaga soricina*), en vol stationnaire et d'avancement [Norberg 1993]. L'animal en vol est toujours assimilé à un disque sustentateur engendrant une vitesse induite w . À la puissance induite correspondante P_{ind} s'ajoutent les puissances parasite P_{par} et de profil P_{pro} , nécessaires pour compenser les traînées respectives des ailes et du corps, ainsi que la puissance inertielle P_{iner} pour accélérer les ailes à chaque battement. Les résultats de cette étude ont été mis en comparaison avec des études similaires effectuées par Pennycuick [Pennycuick 1972] et Rayner [Rayner 1979]. Les différences obtenues furent imputées au fait que celles-ci ne prenaient pas en compte la puissance inertielle, et considéraient donc que les ailes fonctionnaient comme un système mécanique résonnant parfait (sans dissipation), hypothèse peu applicable au cas des chauves-souris.

1.3 *Bumblebees can fly* : la fin d'un paradoxe

Ces premières considérations tendraient donc à prouver que les mécanismes aérodynamiques stationnaires classiques suffisent à expliquer le vol de certains animaux. Cependant, les auteurs n'affirment nullement que cela équivaudrait à considérer que l'aérodynamique instationnaire est totalement absente : il s'agit en effet d'une approche moyenne, qui ne reflète pas le caractère instantané de certains phénomènes. Par conséquent, les efforts de portance et de propulsion peuvent être dus à une combinaison d'effets stationnaires et instationnaires en proportion variable suivant les espèces, les phases de vol voire l'instant considéré au sein d'un battement. C'est pourquoi les investigations ont été poussées davantage pour examiner de manière détaillée les caractéristiques de l'écoulement aérodynamique du vol animal.

1.3.1 Observations et approche théorique

1.3.1.1 Le *clap and fling*

Weis-Fogh étendit ses travaux sur le vol stationnaire à d'autres animaux, parmi lesquels différentes espèces de chauves-souris, d'oiseaux, ainsi que des représentants des principaux ordres d'insectes : coléoptères (scarabées), lépidoptères (papillons), hyménoptères (guêpes, abeilles) et diptères (mouches, moustiques). L'objectif principal était de calculer les différentes grandeurs aérodynamiques (coefficients de portance, de traînée, nombre de Reynolds, . . .) ainsi qu'une estimation de la puissance consommée. La méthode appliquée est similaire aux études précédentes, à savoir une modélisation simplifiée du vol sous l'hypothèse aérodynamique stationnaire. Dans la plupart des cas, les résultats sont cohérents avec les mécanismes aérodynamiques stationnaires comme auparavant, sauf pour quelques espèces, notamment le papillon *Pieris napi* (piéride du navet), et la guêpe *Encarsia formosa*. Pour cette dernière, le coefficient de portance C_L atteint une valeur de 3, ce qui est très au-dessus des valeurs ordinaires dans le cadre stationnaire. Il s'agit d'un insecte possédant deux paires d'ailes, mais les ailes avant et arrière sont solidarisées par un crochet à la manière des lépidoptères, ce qui fait qu'elles bougent ensemble comme une seule surface.

L'auteur évoque alors l'éventualité que les données morphologiques soient incorrectes ou bien que le modèle choisi soit mal adapté à cette espèce. Cette dernière hypothèse est appuyée par l'observation d'un phénomène particulier : à la fin de la remontée des ailes (*upstroke*), celles-ci se rejoignent en une sorte de claquement, dénommé *clap* par Weis-Fogh, et l'allure globale du mouvement s'éloigne d'une sinusoïde idéale du fait de la durée non négligeable de cette étape. Toutefois, même en corrigeant le modèle de mouvement, il ne serait pas possible selon l'auteur de descendre en-dessous de $C_L = 2$, ce qui reste très élevé sous l'hypothèse d'effets aérodynamiques stationnaires.

Une observation plus détaillée de ce phénomène révèle qu'il est en réalité plus complexe qu'il n'y paraît. Après cette phase de claquement qui voit les extrémités des ailes se toucher complètement, le battement suivant débute par une « ouverture » de celles-ci à la manière d'un livre, l'axe longitudinal des ailes arrières représentant le dos du livre. La succession du *clap* et de ce mouvement dénommé *fling* est représenté sur la figure 1.13.

À l'aide d'une analyse image par image des mouvements de battement, corrélée à un enregistrement de l'évolution de la position verticale de l'insecte (montée ou descente), Weis-Fogh veut alors mettre en évidence un lien entre certaines phases du mouvement et la génération instantanée de portance. Il mesure alors la durée du *fling*, soit 0,1 ms (sur

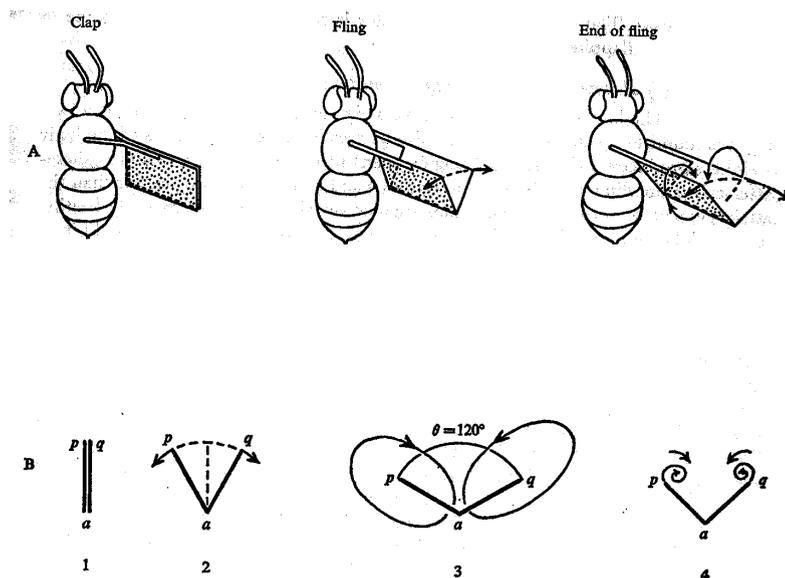


FIG. 1.13 – Mécanisme de *clap and fling* chez la guêpe *Encarsia formosa* [Weis-Fogh 1973]

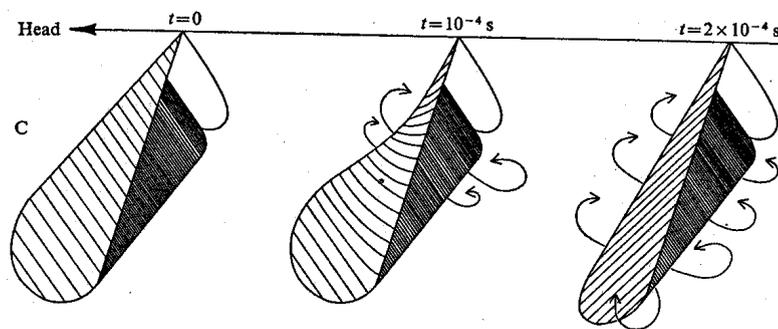


FIG. 1.14 – Mécanisme de *flip* chez la guêpe *Encarsia formosa* [Weis-Fogh 1973]

les 2,5 ms que dure une période complète de battement), et note que celui-ci s'accompagne d'une montée importante de l'insecte. Il en conclut donc que cet effet est en lui-même générateur d'une certaine portance, phénomène qui n'a jamais été rencontré jusqu'à présent, dans le cadre stationnaire en particulier. L'explication suivante est alors proposée : lors de la séparation des ailes, l'air s'engouffre dans l'espace ainsi créé, et la circulation aérodynamique peut alors s'établir immédiatement dès la séparation des ailes, sans avoir à attendre de parcourir une certaine distance (effet Wagner). Cela suppose toutefois que la couche limite soit suffisamment mince pour ne pas gêner cet effet. L'épaisseur de celle-ci en fonction du temps peut-être modélisée de la façon suivante :

$$\delta = \sqrt{\nu t} \quad (1.29)$$

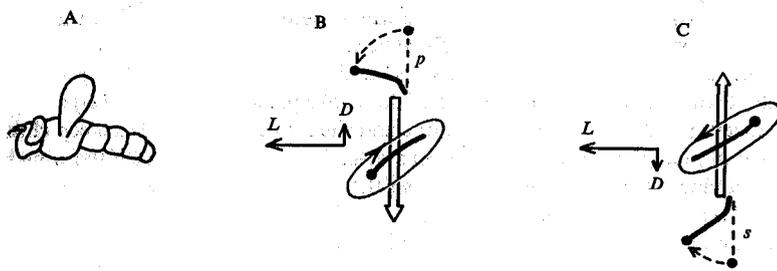
où ν est ici la viscosité cinématique de l'air. D'après les enregistrements, le *fling* dure au plus 3.10^{-4} s, ce qui correspond à une épaisseur maximale de $65 \mu\text{m}$, une quantité qui reste négligeable au vu des dimensions des ailes. Une estimation grossière du nombre de Reynolds montre que celui-ci est plus important au tout début de l'ouverture des ailes, ce qui dans ce cas favoriserait l'apparition des structures tourbillonnaires *ad hoc*. Une hypothèse supplémentaire est même avancée, selon laquelle les fins poils qui bordent l'aile serviraient entre autres à empêcher ou à retarder l'apparition de tourbillons au bord de fuite, qui dissiperaient une partie de la circulation. D'autres espèces sembleraient utiliser ce mécanisme de *fling* pour prendre leur envol, par exemple les papillons, dont les ailes sont souvent jointes lorsqu'ils sont au repos, et peut-être même les pigeons, idée avancée par l'auteur étant donné le claquement sonore de leurs ailes lorsqu'ils prennent leur envol précipitamment.

Avec plus de circonspection, Weis-Fogh évoque enfin l'éventualité d'un autre nouveau mécanisme dénommé *flip*, qui se manifeste notamment toujours chez la guêpe *Encarsia formosa* ainsi que chez la sous-famille de diptères *Syrphinae*. Il s'agit d'une rotation de l'aile autour de son axe longitudinal, intervenant vers le milieu du battement ($\gamma = \pi/2$). Cette rotation est initiée par un mouvement du bord d'attaque et, du fait de la flexibilité de l'aile chez de nombreuses espèces, le bord de fuite ne suit pas immédiatement ce mouvement, entraînant ainsi une déformation antéro-postérieure de l'aile comme représenté sur la figure 1.14. Chez les insectes présentant deux paires d'ailes rigides et rapprochées, comme c'est notamment le cas chez *Encarsia formosa*, un phénomène similaire peut avoir lieu, l'aile arrière jouant le rôle de partie flexible. Dans les deux cas, l'intérêt est de nouveau de générer une circulation instantanée et donc une portance supplémentaire. L'effet du *flip* est illustré sur la figure 1.15. L'analyse image par image des mouvements de ces diverses espèces confirme que celles-ci subissent comme au moment du *clap and fling* une légère accélération verticale à l'instant où l'aile accomplit cette rotation.

Weis-Fogh a donc franchi un pas dans l'étude du vol animal : auparavant, la tendance était de montrer que celui-ci pouvait être expliqué entièrement ou presque par des mécanismes aérodynamiques stationnaires, sans exclure la présence éventuelle d'effets instationnaires localisés. La nouvelle voie qu'il emprunte pose désormais ces effets instationnaires au centre des considérations : il prend exemple sur les plus petites espèces d'insectes, chez lesquelles une aile se résume uniquement à une tige souple bordée de minuscules poils, pour montrer que l'aérodynamique stationnaire classique trouve ici une de ses limites.

1.3.1.2 Les travaux d'Ellington

Ellington [Ellington 1984, Ellington 1995] poursuit dans ce sens, dans une série de six articles au long desquels il s'efforcera de poser de nouvelles bases pour la compréhension et


 FIG. 1.15 – Illustration du mécanisme de *flip* en vol d'avancement [Weis-Fogh 1973]

la modélisation du vol des insectes. Il constate en premier lieu que l'hypothèse stationnaire est généralement d'autant plus valide que la fréquence réduite — définie comme le quotient de la vitesse de battement des ailes sur la vitesse d'avancement du corps — est faible. À mesure que celle-ci augmente, on s'attend donc à ce que les effets instationnaires dus au mouvement des ailes prennent le pas sur l'aérodynamique classique correspondant au mouvement de translation global. Le cas extrême étant de fait le vol stationnaire, pour lequel la vitesse d'avancement est nulle, et la fréquence réduite infinie. Ellington choisit alors de concentrer son étude sur le vol stationnaire, afin de mettre davantage en évidence ces effets instationnaires. Un autre avantage est que, du fait de l'immobilité du corps en vol stationnaire, la portance et la traînée de celui-ci (qui sont souvent difficilement estimées à l'aide de formules empiriques) sont nulles et ne contribuent donc plus aux efforts aérodynamiques totaux.

Ses travaux portent sur un grand nombre d'espèces, et consistent en premier lieu en un relevé précis des différents paramètres géométriques et cinématiques pour celles-ci. Ellington approfondit les méthodes utilisées auparavant pour ce genre d'études en distinguant notamment les paramètres globaux des paramètres de forme, qui décrivent de manière plus précise la géométrie de l'animal. Ainsi, pour comparer la forme des ailes de différentes espèces, il peut être utile de faire intervenir, en sus des paramètres classiques tels que la corde ou l'envergure, le moment d'ordre k , défini par :

$$S_k = 2 \int_0^R cr^k dr \quad (1.30)$$

R étant la demi-envergure (longueur d'une aile), c la corde et r la distance à l'emplanture. En notant \hat{c} et \hat{r} les valeurs de ces deux dernières variables normalisées respectivement par la corde moyenne \bar{c} et la demi-envergure R , soit $\hat{c} = c/\bar{c}$ et $\hat{r} = r/R$, on obtient l'expression suivante :

$$S_k = SR^k \int_0^1 \hat{c}\hat{r}^k d\hat{r} \quad (1.31)$$

avec $S = 2\bar{c}R$. On remarque donc que ce moment dépend essentiellement du terme intégral. En normalisant par SR^k , on définit donc le rayon associé au moment d'ordre k :

$$\hat{r}_k^k = \frac{S_k}{SR^k} = \int_0^1 \hat{c}\hat{r}^k d\hat{r} \quad (1.32)$$

L'utilité de ces moments réside dans la recherche de fonctions permettant de décrire analytiquement la forme d'une aile, par exemple par interpolation du contour géométrique de

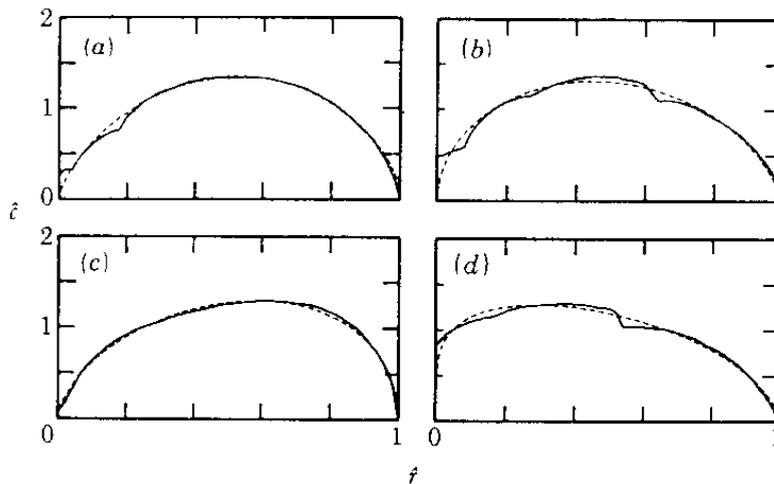


FIG. 1.16 – Comparaison entre la distribution réelle (trait plein) de \hat{c} en fonction de \hat{r} et la modélisation par une loi Beta (trait pointillé) - (a) *Episyrrhus balteatus*, (b) *Bombus hortorum*, (c) Aile avant de *Chrysopa carnea*, (d) *Manduca sexta* [Ellington 1984]

l'aile par une fonction de r . Ellington a ainsi montré que la relation entre \hat{c} et \hat{r} pouvait être approchée à l'aide d'une distribution Beta, largement utilisée en modélisation statistique :

$$\hat{c} = \frac{\hat{r}^{p-1}(1-\hat{r})^{q-1}}{B(p,q)} \quad (1.33)$$

$B(p, q)$ est la fonction Beta de paramètres p et q :

$$B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1}(1-x)^{q-1} dx \quad (1.34)$$

Les paramètres de cette fonction sont obtenus en égalant les moments d'ordre 1 et 2 de la distribution aux moments géométriques de l'aile :

$$p = \hat{r}_1 \left(\frac{\hat{r}_1(1-\hat{r}_1)}{\hat{r}_2^2 - \hat{r}_1^2} - 1 \right) \quad (1.35)$$

$$q = (1-\hat{r}_1) \left(\frac{\hat{r}_1(1-\hat{r}_1)}{\hat{r}_2^2 - \hat{r}_1^2} - 1 \right) \quad (1.36)$$

Comme on peut le voir sur la figure 1.16, la loi approchée représente extrêmement bien la distribution réelle, et ce pour la plupart des espèces observées.

Enfin, en référence aux études antérieures d'Osborne [Osborne 1951], Ellington introduit la notion de masse virtuelle appliquée au vol animal. Lorsqu'une aile est accélérée, son inertie est augmentée de celle de la masse d'air mise en mouvement, et donc sa masse apparente s'accroît d'une quantité appelée masse virtuelle. Celle-ci peut être approchée par la masse d'un cylindre d'air ayant pour diamètre la corde de l'aile et pour hauteur la longueur de celle-ci. La masse virtuelle v' par unité de longueur vaut donc :

$$v' = \frac{1}{4} \rho \pi c^2 \quad (1.37)$$

soit, pour une paire d'ailes :

$$v = 2 \int_0^R v' dr \quad (1.38a)$$

$$= \frac{1}{2} \rho \pi \bar{c}^2 R \int_0^1 \hat{c}^2 d\hat{r} \quad (1.38b)$$

$$= \frac{2\rho\pi R^3}{AR^2} \int_0^1 \hat{c}^2 d\hat{r} \quad (1.38c)$$

où l'allongement AR est défini par $AR = 4R^2/S = 2R/\bar{c}$.

L'observation et l'enregistrement du vol naturel de différentes espèces ont permis à Ellington d'obtenir quelques renseignements préliminaires. Tout d'abord, très peu d'individus accomplissent un vol stationnaire au sens littéral du terme (*hovering* en anglais), c'est-à-dire un vol dans lequel la position du corps de l'animal reste parfaitement constante au cours du temps. Dans la pratique, de très légers mouvements sont observés, et l'on pourra donc qualifier de vol stationnaire les phases de vol à très basse vitesse, par opposition aux phases de mouvement rapides et brusques qui constituent l'essentiel du vol des insectes. À partir de séquences de vol qu'il estime suffisamment représentatives d'un vol stationnaire, Ellington relève donc la trajectoire décrite par l'aile dans l'air, les angles β et ξ repérant les orientations respectives du plan de battement et du corps par rapport à l'horizontale, ainsi que l'évolution sur une période de l'angle ϕ repérant la position de l'axe longitudinal de l'aile dans le plan de battement. Les résultats pour quatre espèces différentes sont reproduits sur la figure 1.17.

L'auteur tire de ces observations quelques résultats intéressants. Il constate que les changements de direction ou de vitesse sont toujours précédés d'un changement d'inclinaison du plan de battement : β augmente et se rapproche de la verticale lorsque l'insecte accélère horizontalement, et inversement β tend vers 0° ou moins si celui-ci ralentit voire recule. De manière analogue, les déplacements latéraux sont assortis d'un mouvement de roulis du plan de battement, ce qui suggère une analogie entre le vol stationnaire ou quasi-stationnaire des insectes et celui des hélicoptères, pour lequel les déplacements longitudinaux sont liés à l'inclinaison du plan du rotor [Bramwell 1986]. De telles considérations sur la mécanique du vol global des insectes seront également développées dans d'autres études, notamment celle de Taylor [Taylor 2001], comme nous le verrons par la suite.

Les polaires représentant le coefficient de portance C_L en fonction du coefficient de traînée C_D ont été obtenues à partir de mesures en soufflerie sur différents profils d'ailes d'insectes, et sont représentées sur la figure 1.18. Le nombre de Reynolds vaut respectivement 2000 pour le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria*, 1500 pour la tipule *Tipula oleracea* et 200 pour la mouche *Drosophila virilis*. Il est intéressant de noter chez ces deux dernières l'absence du décrochage (perte de portance) abrupt communément observé dans le cas de profils standard à Re élevé. Au contraire, C_L décroît lentement après avoir atteint son maximum $C_{L_{\max}}$, vers 30° d'incidence. Ce décrochage progressif est caractéristique des profils minces pour un Re inférieur ou égal à 10^5 . Le contournement du bord d'attaque provoque le décollement de la couche limite laminaire de la surface de l'aile. Cette couche décollée se mélange alors à l'air ambiant au repos, et l'accroissement de l'énergie cinétique qui en découle provoque la transition vers le régime turbulent, puis le réattachement de la couche limite plus en aval. Dans la zone décollée se produit alors une recirculation du fluide, connue sous le nom de bulbe de séparation (fig. 1.19(a)). La création de ce bulbe se remarque habituellement par un saut de C_L , comme celui présent autour de $20 - 25^\circ$ pour

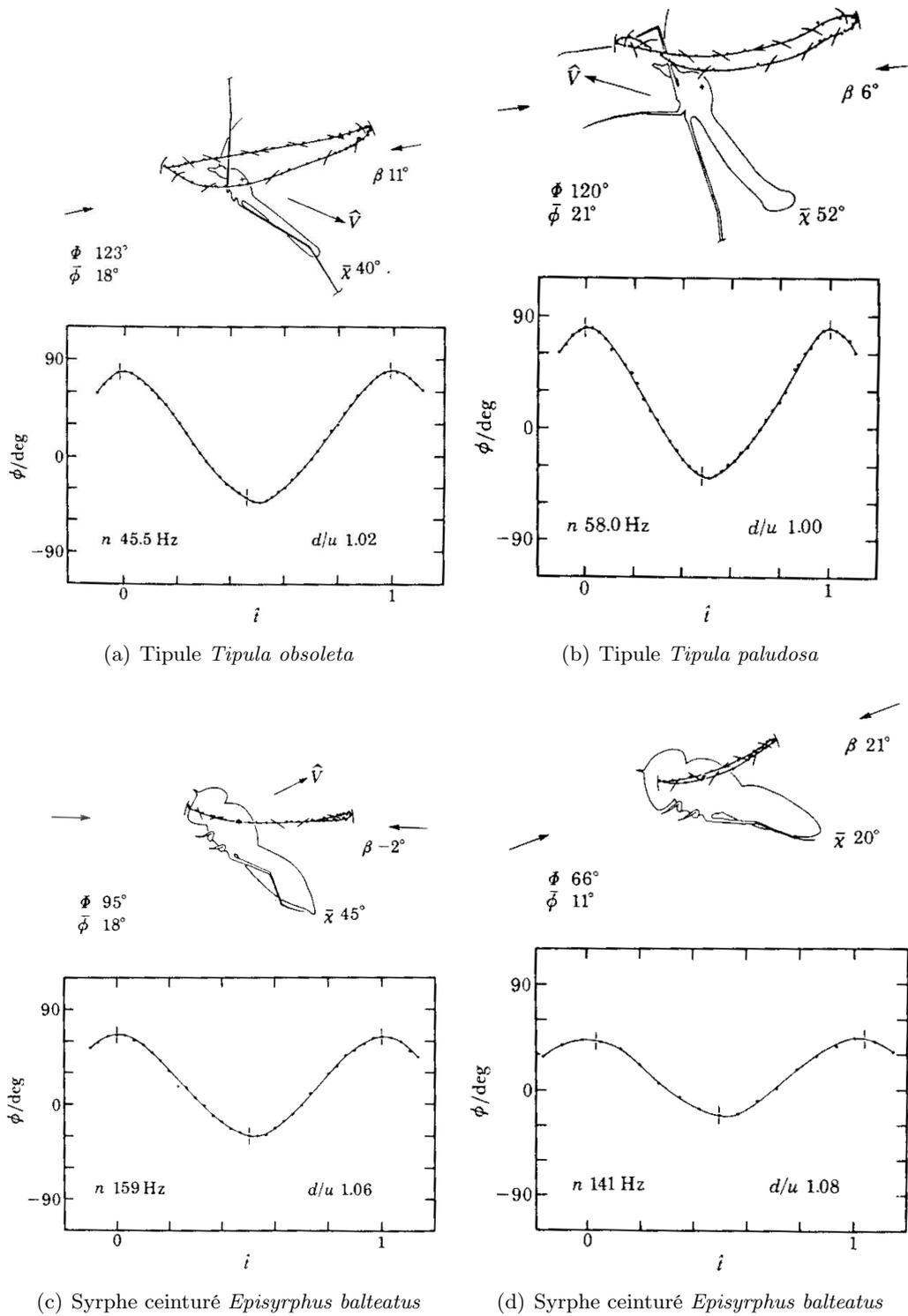


FIG. 1.17 – Relevé des cinématiques de battement de différentes espèces [Ellington 1984]

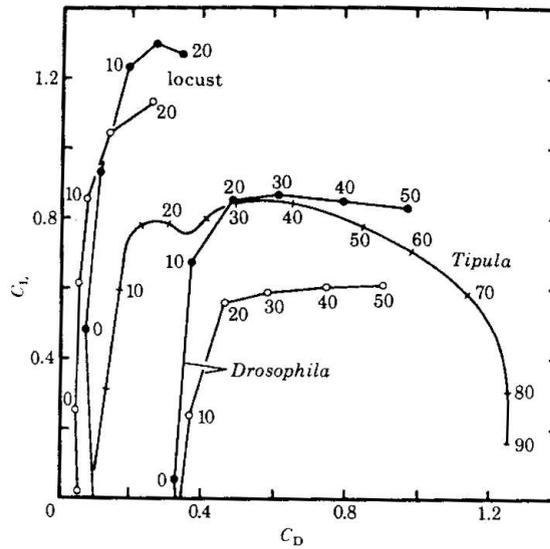


FIG. 1.18 – Polaires obtenues en soufflerie pour différentes ailes d'insectes [Ellington 1984]

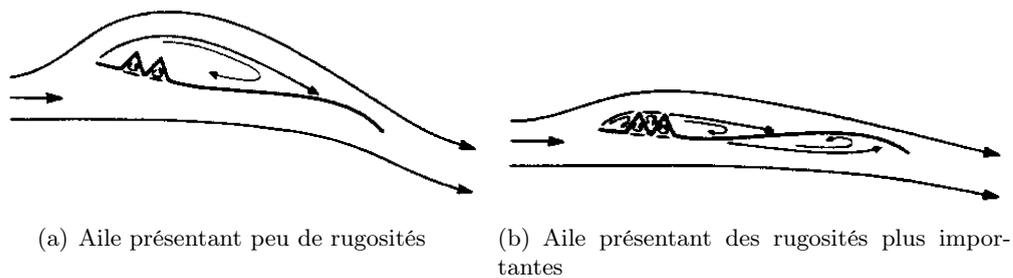


FIG. 1.19 – Création d'un bulbe de séparation par recirculation [Ellington 1984]

l'aile de *Tipula*. En présence de rugosités, comme par exemple des veines à la surface de l'aile, des bulbes plus petits peuvent se former, et les différentes recirculations contribuent à épaissir artificiellement le profil (fig. 1.19(b)). Ces considérations théoriques n'ont toutefois été validées que pour des Reynolds suffisamment élevés : il serait en toute rigueur difficile de parler de couche limite turbulente à des valeurs de Re de l'ordre de 10^3 , même si les observations réalisées par Ellington tendent à confirmer un comportement similaire.

Une analyse approfondie des différents effets aérodynamiques pouvant être mis en jeu est ensuite proposée. Ceux-ci sont classés en deux types par Ellington : stationnaires et instationnaires. Ces derniers sont définis comme les effets dépendant explicitement des variations instantanées ou des valeurs passées des différentes grandeurs caractéristiques de l'écoulement. Parmi les effets stationnaires, Ellington compte naturellement la génération de portance classique issue de la mise en incidence de l'aile, mais également la circulation créée par la rotation de l'aile autour de son grand axe. Comme nous l'avons vu, une des caractéristiques du vol stationnaire normal est le retournement de l'aile entre chaque demi-battement. Ce mouvement de rotation, dont l'amplitude ainsi que la vitesse ne sont pas négligeables, génère une circulation dépendant de la position relative de l'axe de rotation.

Ce phénomène avait été modélisé par Fung [Fung 1993] dans le cas des profils en rota-

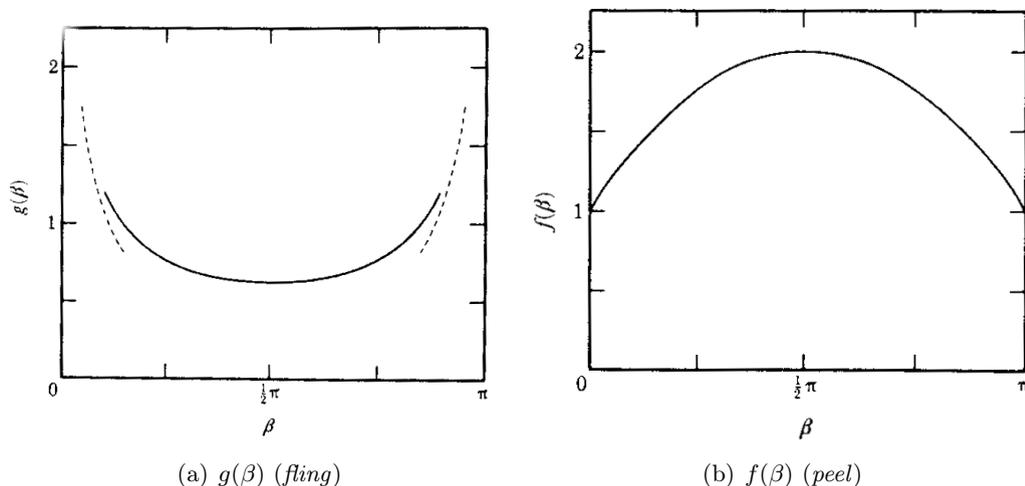


FIG. 1.20 – Allure des fonctions utilisées pour la modélisation du *fling* et du *peel* [Ellington 1984]

tion. Il a montré que cet effet contribuait à générer un supplément de circulation autour du profil égal à :

$$\Gamma_r = \pi\omega c^2 \left(\frac{3}{4} - \frac{l_x}{c} \right) \quad (1.39)$$

où ω est la vitesse de rotation de l'aile, c la corde et l_x la position de l'axe de rotation comptée à partir du bord d'attaque. La portance associée est supposée normale à la corde, et égale à :

$$L_r = \rho V \Gamma_r \quad (1.40)$$

par unité d'envergure, V étant la vitesse aérodynamique. Norberg [Norberg 1990] a également employé cette modélisation pour l'appliquer au vol animal.

Les effets instationnaires que cite Ellington sont plus nombreux. Il revient en premier lieu sur les phénomènes de *clap and fling* mis en évidence par Weis-Fogh. Lighthill [Lighthill 1973] avait déjà proposé en 1973 une modélisation du *fling*, en montrant que la circulation correspondante pouvait être exprimée en fonction notamment du demi-angle β_w entre les ailes :

$$\Gamma_f = \omega^2 c g(\beta_w) \quad (1.41)$$

ω étant la vitesse de rotation des ailes et g la fonction représentée sur la figure 1.20(a).

Ellington a en outre remarqué que certaines espèces accomplissaient une variante du *fling* : plutôt que de se séparer de manière rigide à la manière d'un livre que l'on ouvre, les ailes s'écartent en se déformant progressivement, en ramenant progressivement le point de séparation du bord d'attaque vers le bord de fuite. Ce *fling* graduel a été dénommé *peel* par Ellington et Williamson, qui ont montré que la circulation associée pouvait se mettre sous la forme :

$$\Gamma_p = u x f(\beta_w) \quad (1.42)$$

où u est la vitesse de séparation, x la longueur de corde déjà ouverte et f la fonction représentée sur la figure 1.20(b). Il est à noter que, contrairement au *fling*, le *peel* voit la circulation croître à mesure de l'ouverture des ailes. Il s'avérerait en outre plus intéressant que le *fling*, car il éviterait la formation d'un bulbe de bord d'attaque trop important,

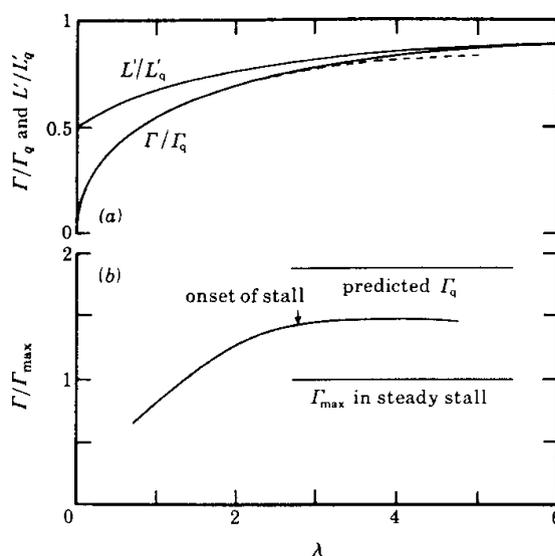


FIG. 1.21 – Effet Wagner : évolution de la portance et de la circulation en fonction de la distance parcourue - Trait plein : théorie - Pointillés : résultats expérimentaux de Walker [Ellington 1984]

susceptible de déstabiliser l'écoulement. Un modèle pour le *clap* est également proposé, pour lequel la force résultante par unité de largeur \bar{F}' est approchée par la variation de la quantité de mouvement p de l'air présent entre les deux ailes :

$$\bar{F}' = \frac{\delta p}{\delta t} \quad (1.43a)$$

$$= \frac{\rho \beta c^2 u}{c/u} \quad (1.43b)$$

$$= \rho \beta c u^2 \quad (1.43c)$$

Un autre effet rapporté par Ellington est l'effet Wagner [Wagner 1925], mis en évidence par ce dernier en 1925 et confirmé expérimentalement par Walker en 1931 [Walker 1931]. Sous cette appellation réside le retard dans l'établissement de la circulation autour d'un profil lorsque celui-ci est mis en mouvement au sein d'un fluide initialement au repos. Cet effet, dû à la dissipation de vorticité dans le sillage, influence également la croissance de la portance, comme illustré sur la figure 1.21. On peut y voir l'évolution de la portance et de la traînée normalisées par les valeurs en régime permanent, λ étant la distance parcourue. Il serait pertinent de croire que cet effet s'applique au cas des insectes ; le mouvement de battement peut en effet être vu comme une succession de phases au début desquelles l'aile démarre avec une vitesse nulle. Sous cette hypothèse, l'effet Wagner serait néfaste à l'établissement de portance : on voit en effet que celle-ci ne commence qu'à 50% seulement de la valeur en régime stationnaire

Ellington cite enfin les travaux de Francis et Cohen [Francis et Cohen 1933], qui ont mis en évidence un phénomène particulier lors de l'étude de l'effet Wagner. Ils ont en effet montré que lorsque le profil était mis en translation à grande incidence, le décrochage apparaissait plus tard que dans le cas d'un mouvement en régime permanent, et la circulation de même que la portance associée pouvaient alors atteindre des valeurs supérieures à

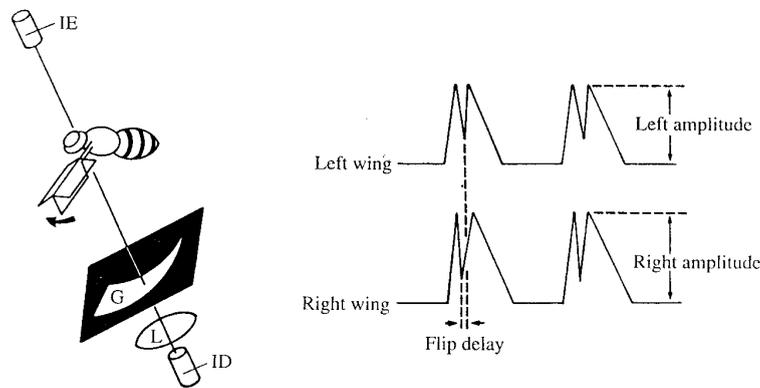


FIG. 1.22 – Enregistrement des mouvements des ailes de drosophile en vol simulé - Mise en évidence de retards entre les rotations des ailes [Dickinson *et al.* 1993]

celles prédites par les théories stationnaires. Cet effet appelé décrochage retardé ou décrochage dynamique sera étudié plus en détail par d'autres auteurs, comme nous le verrons ultérieurement.

En guise de synthèse à cette étude, Ellington prouve alors que, chez la plupart des espèces étudiées, le coefficient de portance moyen \bar{C}_L nécessaire à assurer la sustentation de l'animal, est supérieur à la valeur maximale du C_L instantané calculé *via* la théorie stationnaire. Cela prouve bien que, selon l'argumentaire développé précédemment par Weis-Fogh et Norberg, d'autres mécanismes nécessairement instationnaires sont mis en jeu lors du vol des insectes.

1.3.1.3 De l'aérodynamique à la mécanique du vol

À mesure que le voile se levait sur les origines des efforts de portance jusqu'alors inexplicables chez les insectes, il devenait de plus en plus tentant d'intégrer ces aspects purement aérodynamiques dans des modèles plus complets, visant à comprendre et plus tard à reproduire le plus exactement possible la mécanique du vol de ces animaux. Taylor [Taylor 2001] a publié une étude très intéressante à ce sujet, dans laquelle il s'attache aux différents moyens et stratégies de contrôle du vol chez les insectes.

Deux types d'approches sont tout d'abord évoquées : la première consiste à filmer les insectes en vol naturel ou simulé (c'est-à-dire que l'animal immobile est soumis à un stimulus visuel lui donnant l'illusion qu'il se déplace). Les déplacements dans l'espace sont alors corrélés aux mouvements des ailes, étant donné qu'il s'agit des seuls actionneurs dont ils disposent. Ainsi, Dickinson, Lehmann et Götz [Dickinson *et al.* 1993] ont étudié l'influence de la rotation ventrale (ou supination) de l'aile durant la transition entre les battements arrière et avant. Le dispositif expérimental pour l'observation est représenté sur la figure 1.22. La position et la largeur de l'ombre projetée des ailes d'une drosophile sont enregistrées, et les différences éventuelles entre chaque aile sont corrélées aux mouvements fictifs suggérés à l'animal par le déplacement d'un repère visuel.

Les auteurs ont observé en particulier que, lors d'un virage simulé, la supination de l'aile externe intervenait légèrement en avance par rapport à celle de l'aile interne, et le délai entre ces deux instants était fortement lié à des changements d'amplitude de battement.

La question reste toutefois posée de savoir si ces mouvements sont corrélés de manière active ou passive par l'insecte. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne donne pas de relation fonctionnelle entre les cinématiques de battement et les déplacements : cette méthode pourra donc seulement indiquer des tendances, qui devront être examinées plus en détail par d'autres voies. Ainsi, dans ce cas on peut subodorer le fait que la rotation retardée de l'aile interne génère plus de traînée, et facilite ainsi la manœuvre de virage.

L'autre méthode envisageable revient à mesurer directement les efforts et moments sur des insectes en vol captif, mais les résultats ainsi obtenus ne sont par définition pas représentatifs du vol naturel libre, étant donné que l'on rajoute une contrainte en immobilisant l'animal. De telles études ne pourraient pas non plus définir avec exactitude les points d'application des différents efforts, ni les directions exactes de ceux-ci. Taylor choisit alors plutôt de réaliser une synthèse de différentes études antérieures basées sur des observations, pour formuler à partir de celles-ci diverses hypothèses sur le contrôle du vol des insectes. En constatant l'extrême manœuvrabilité des insectes, il émet en premier lieu l'idée selon laquelle la stabilisation du vol se ferait davantage de manière active que passive. Cela signifie que, en réponse à des perturbations externes (rafales de vent, etc.), l'insecte conserverait son attitude en générant des forces et des moments tendant à le faire revenir à la position souhaitée, plutôt que de recourir à des effets inertiels, tels des couples de rappel dus à la pesanteur.

L'une des questions essentielles que se pose Taylor durant cette étude est de savoir si les insectes sont ou non des mobiles holonomes, c'est-à-dire si ils peuvent contrôler indépendamment les six degrés de liberté repérant leur position dans l'espace : trois translations suivant respectivement l'axe horizontal, l'axe latéral et l'axe vertical, et trois rotations, correspondant aux mouvements en roulis, tangage et lacet couramment employés en mécanique du vol (voir fig. 1.23). Un avion conventionnel à voilure fixe constitue par exemple un système non-holonyme, car il ne peut pas se déplacer suivant l'axe latéral uniquement. Si les insectes sont holonomes, alors ils doivent disposer d'autant d'actionneurs indépendants que de degrés de liberté. La réponse à cette question est en réalité plus complexe, et dépend fortement des espèces considérées. Une synthèse des résultats obtenus est reproduite dans les tableaux 1.2 page 38 et 1.3 page 39. Les paramètres étudiés sont la trajectoire de battement (ou en d'autres termes la position et l'orientation du plan de battement), l'amplitude du battement, la fréquence, le *clap and peel* ou *clap and fling*, la supination (resp. pronation), qui est un mouvement de rotation de l'aile dans le sens d'une augmentation (resp. diminution) de l'incidence géométrique, et enfin le déphasage éventuel entre les ailes avant et arrière pour les espèces possédant deux paires d'ailes. Parmi les conclusions tirées de cette étude, on notera en particulier la redondance apparente de certains paramètres, probablement dans le but d'offrir un contrôle plus fin suivant les différents degrés de liberté. Taylor constate également que, bien que la plupart des insectes soient capables de générer des moments suivant les trois axes de roulis, tangage et lacet, seuls quelques espèces de mouches et de libellules maîtrisent leurs déplacements indépendamment autour de ces trois axes.

De tels résultats s'avéreront fort précieux pour les tentatives ultérieures de réalisation et de contrôle d'« insectes artificiels », comme nous le verrons par la suite. Mais à côté de ces méthodes essentiellement basées sur l'observation, d'autres techniques furent développées, visant cette fois-ci la reconstitution, que ce soit de manière expérimentale ou numérique, de l'aérodynamique d'un insecte.

	Trajectoire de battement	Amplitude de battement	du	Fréquence de battement	Clap and peel ou clap and fling	Supination : vitesse et instant de rotation	Pronation	Déphasage ailes avant/arrière
Diptera : calyptrée	Paramètres indépendants, pourraient être utilisés pour le contrôle longitudinal	Amplitude réduite en réponse à un couple perturbateur cabrer	en	Pourrait être utilisé pour le contrôle longitudinal, mais vraisemblablement lié à l'amplitude	?	Paramètre indépendant, pourrait être utilisé pour le contrôle longitudinal	Paramètre indépendant, pourrait être utilisé pour le contrôle longitudinal	Non applicable
Diptera : drosophile	Position longitudinale du plan de battement variant indépendamment de l'amplitude, inclinaison du plan de battement apparemment liée à l'amplitude	Amplitude réduite en réponse à un couple perturbateur à cabrer, augmentée lors de l'accroissement des efforts	en	Fréquence augmentée lors de l'accroissement des efforts, mais décroît lorsque ceux-ci atteignent des pics, probablement du fait de contraintes physiologiques	Les ailes se rapprochent en réponse à un couple perturbateur, peut-être directement lié à l'amplitude ?	Paramètre indépendant, pourrait être utilisé pour le contrôle longitudinal	Pronation apparemment constante	Non applicable
Orthoptères : criquet	Paramètres de contrôle probablement importants	Amplitude augmentée lors de l'accroissement des efforts	lors	Fréquence normalement augmentée lors de l'accroissement des efforts	Généralement non applicable	Paramètre de contrôle probablement important	Pronation augmentée en réponse à un couple perturbateur à cabrer	Semble important, effets en core inconnus

TAB. 1.2 – Paramètres indépendants (**en gras**) contrôlant le vol longitudinal pour différentes espèces [Taylor 2001]

	Trajectoire de battement	Amplitude du battement	<i>Clap and peel</i> ou <i>clap and fling</i>	Supination : vitesse et instant de rotation	Pronation	Déphasage avant/arrière	ailer
Diptera : calyptérée	Paramètres indépendants, pourraient être utilisés pour le contrôle latéral	Amplitude réduite pour l'aile interne	?	Supination retardée pour l'aile interne	Pronation augmentée pour l'aile interne	Non applicable	
Diptera : drosophile	Paramètre indépendant, pourrait être utilisé pour le contrôle latéral, inclinaison du plan de battement apparemment liée à l'amplitude	Amplitude réduite pour l'aile interne	Les ailes se rejoignent dans le plan sagittal durant les virages	Supination retardée pour l'aile interne, vitesse de supination augmentée pour l'aile externe	Paramètre de contrôle probablement peu important	Non applicable	
Orthoptères : criquet	Paramètres de contrôle probablement peu importants	Paramètre de contrôle probablement peu important	Généralement applicable	Paramètre de contrôle probablement peu important	Pronation augmentée pour l'aile interne	Semble important, effets encore connus	
Odonates : libellules	?	Amplitude réduite durant les virages inclinés	Non applicable	?	Pronation augmentée pour l'aile interne, en particulier durant les virages à plat	Semble important, effets encore connus	

TAB. 1.3 – Paramètres indépendants (**en gras**) contrôlant le vol latéral pour différentes espèces [Taylor 2001]

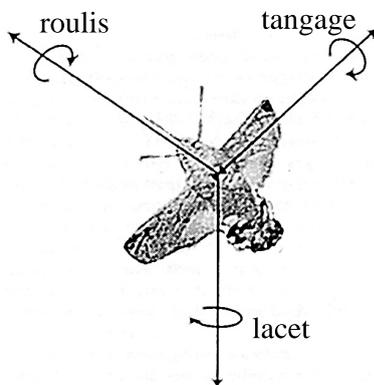


FIG. 1.23 – Degrés de liberté en rotation d'un insecte, par analogie avec la mécanique du vol classique [Taylor 2001]

1.3.2 Méthode expérimentale

1.3.2.1 *Robofly*

Au sein du projet MFI (*Micromechanical Flying Insect*) mené à l'université de Berkeley et visant à développer un insecte artificiel, Dickinson, Lehmann, Götz et Sane ont eu l'idée d'examiner les phénomènes aérodynamiques mis en jeu au cours du vol de insectes en reproduisant artificiellement celui-ci à l'aide de différents dispositifs expérimentaux. Ainsi, ils ont étudié les efforts instationnaires sur une aile initialement au repos et mise en translation dans une solution à 54% de sucrose [Dickinson et Götz 1993, Dickinson 1994]. L'intérêt d'opérer dans un tel milieu est d'augmenter la viscosité et conjointement de diminuer le nombre de Reynolds, afin de se rapprocher des valeurs caractéristiques du vol des insectes (de $Re = 10^2$ à 10^4). Le fluide utilisé a ainsi une viscosité cinématique de 0,23 stokes environ, contre 1.10^{-2} stokes pour l'eau. Le schéma du dispositif expérimental est reproduit sur la figure 1.24. On voit également sur celle-ci la présence de deux parois immergées de part et d'autre de l'aile, et destinées à limiter les effets transversaux.

Les coefficients de portance et de traînée sont calculés à partir des mesures des efforts instantanés $L(t)$ et $D(t)$ suivant les deux axes :

$$C_L(t) = \frac{2L(t)}{\rho S U^2} \quad (1.44)$$

$$C_D(t) = \frac{2D(t)}{\rho S U^2} \quad (1.45)$$

S étant la surface de l'aile et U la vitesse de translation. Il a ainsi été mis en évidence que pour des incidences supérieures à $13,5^\circ$, le caractère instationnaire de l'écoulement au départ de l'aile augmentait fortement la portance, comme on peut le voir sur la figure 1.26. L'explication proposée est la création d'un tourbillon de bord d'attaque décollé, comme on peut en rencontrer sur les voilures delta. En régime stationnaire, le contournement du bord d'attaque produit un effort d'aspiration, noté F_s sur la figure 1.25(a), et qui s'ajoute à l'effort normal F_n dû à la circulation autour du profil pour donner la portance globale L . Lorsqu'un tourbillon décollé se forme (fig. 1.25(b)), l'effort d'aspiration est dirigé vers le haut pour maintenir l'attachement de la structure tourbillonnaire, et la portance totale se voit ainsi augmentée. Comme on peut le voir sur les mesures reproduites fig. 1.26, cet effet

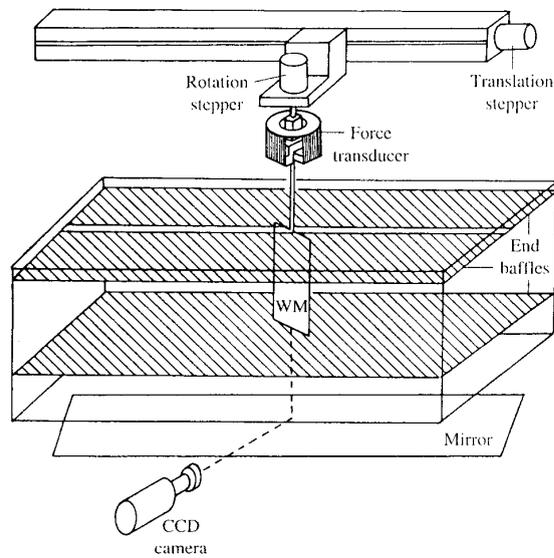


FIG. 1.24 – Dispositif expérimental employé par Dickinson *et al.* pour la mesure d'efforts sur une aile en translation [Dickinson et Götz 1993]

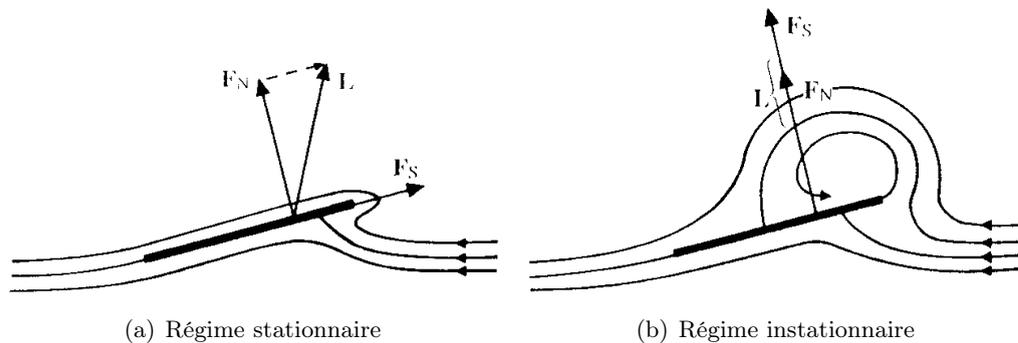


FIG. 1.25 – Génération d'un tourbillon de bord d'attaque décollé [Dickinson et Götz 1993]

diminue avec la longueur parcourue, étant donné que le tourbillon de bord d'attaque se détache par la suite dans ce qui devient une allée de von Karman. Cet effet peut néanmoins être profitable aux insectes, étant donné que les ailes ne parcourent qu'un court trajet durant chaque battement, typiquement de l'ordre de 4 à 6 longueurs de corde.

Suite à ces résultats probants, les investigations furent approfondies et le montage complexifié [Dickinson *et al.* 1999, Sane et Dickinson 2001, Sane et Dickinson 2002]. De façon à reproduire de la manière la plus précise possible la cinématique de battement des insectes, deux ailes furent employées, chacune ayant la possibilité de se mouvoir indépendamment selon les trois degrés de liberté en rotation par rapport au repère de référence. Les ailes en plexiglas reproduisent à l'échelle 100 celles de la mouche drosophile *Drosophila melanogaster*. Celles-ci sont immergées dans une cuve d'huile minérale de viscosité cinématique 115 cSt, toujours dans le but d'abaisser le nombre de Reynolds et de se rapprocher des conditions de vol d'un insecte. Afin de ne pas entraver le débattement des ailes, les actionneurs sont déportés à l'extérieur de la cuve, et la transmission est assurée par des arbres

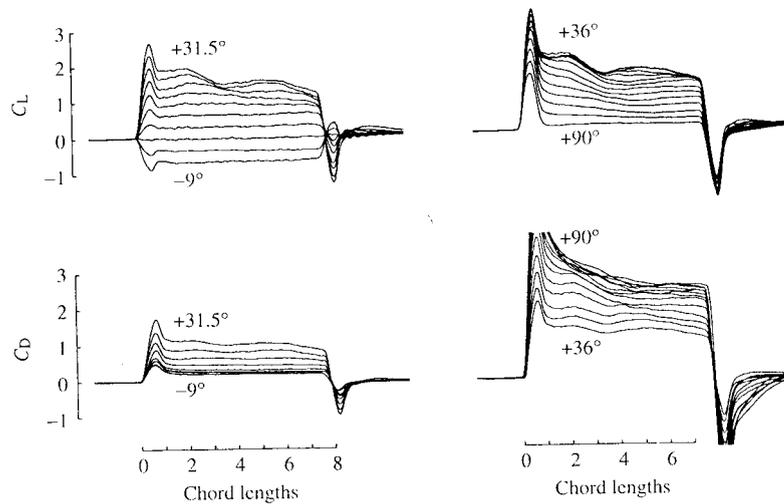


FIG. 1.26 – Mesures des coefficients aérodynamiques sur une aile en translation [Dickinson et Götz 1993]

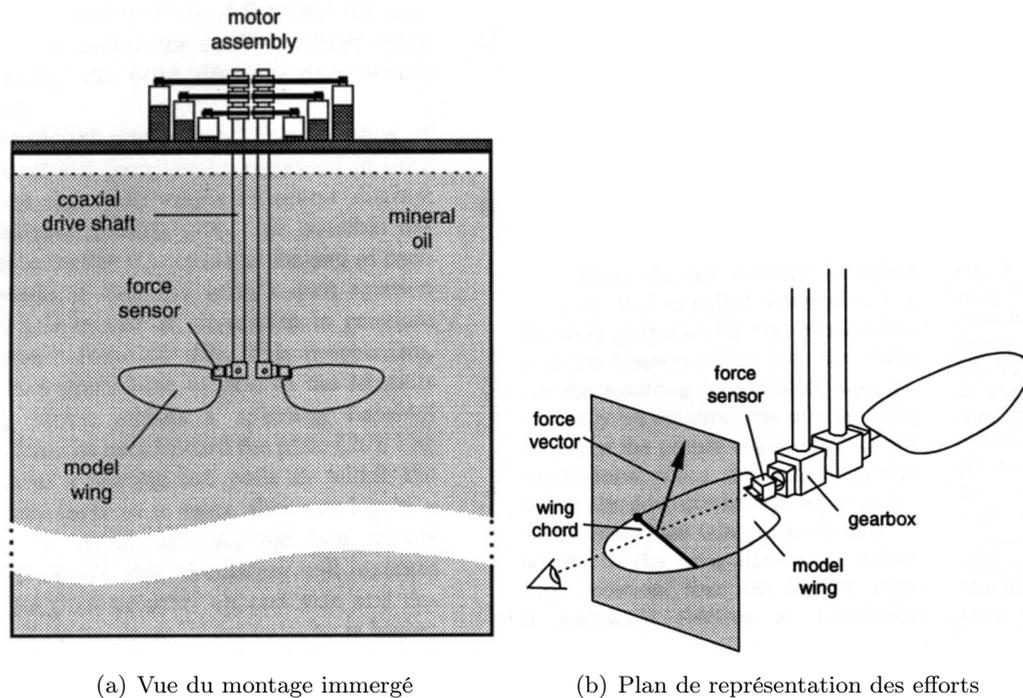
coaxiaux. Une vue d'ensemble du dispositif est reproduite sur la figure 1.27(a). Des capteurs situés à l'emplanture permettent de mesurer les efforts instantanés et de visualiser ensuite l'évolution du vecteur d'efforts, tel que représenté sur la fig. 1.27(b), en fonction du temps.

Les résultats de cette étude ont permis de distinguer clairement trois effets aérodynamiques instationnaires mis en jeu lors du vol de la drosophile :

- Le décrochage dynamique (*delayed stall*), dû à l'accélération de l'aile durant les phases de translation ;
- La circulation rotationnelle (*rotational circulation*) produite par le retournement rapide de l'aile autour de son grand axe entre chaque battement ;
- La capture de sillage (*wake capture*), lorsque l'aile repasse dans le sillage qu'elle a elle-même perturbé lors du battement précédent.

Si les deux premiers phénomènes ont déjà été étudiés par le passé ([Francis et Cohen 1933, Dickinson et Götz 1993] et [Ellington 1984] par exemple), le troisième semble relativement nouveau et surtout propre au vol battu ou vibrant. Il est montré que l'aile peut ainsi, sous certaines conditions, gagner un supplément de portance si elle repasse dans son sillage au bon moment, un effet qui pourrait encore une fois contribuer à expliquer l'origine de la « portance manquante » des insectes.

Enfin, Dickinson, Lehmann et Sane ont étudié l'influence du déphasage de la rotation de l'aile par rapport au battement. On a vu en effet que lors d'un vol stationnaire où la portance était générée à l'aller et au retour des ailes, celles-ci devaient se retourner entre chaque battement de manière à ce que le bord d'attaque aérodynamique soit conservé. L'angle repérant la position de l'aile autour de son grand axe est donc une fonction périodique du temps, de fréquence identique à celle du battement. Il a alors été montré que si la rotation était en avance de phase par rapport au battement, c'est-à-dire si l'aile effectue son retournement peu avant la fin du battement, il se produisait un pic instantané de portance sous l'effet des phénomènes instationnaires. Si ce déphasage est nul, ce qui correspond à une rotation ayant lieu exactement à la fin d'un battement et juste avant le suivant, alors ce pic de portance est moins prononcé. Enfin, on observe un effet inverse, c'est-à-dire une

FIG. 1.27 – Montage expérimental *RoboBee* [Dickinson *et al.* 1999]

déportance, si la rotation intervient après que l'aile a entamé son mouvement de retour. Les tracés expérimentaux correspondants sont reproduits sur la figure 1.28. Ces résultats s'avèrent extrêmement intéressants en matière de commande du vol d'un microdrone inspiré par le vol des insectes, car ils montrent qu'un seul paramètre, en l'occurrence le déphasage entre la rotation et le battement, est susceptible de modifier la portance globale.

1.3.2.2 LE PRF *REMANTA*

Dans le but de développer de nouvelles techniques et méthodes nécessaires à la réalisation d'un futur engin volant basé sur le vol animal, l'ONERA a entamé en 2002 un PRF (pour *Projet de Recherches Fédérateur*) intitulé *REMANTA* : *REsearch program on Microvehicles And New Technologies Applications* [Boyer 2002, Luc-Bouhali *et al.* 2005]. Ce projet ne vise pas la réalisation d'un prototype complet, mais plutôt de démonstrateurs partiels, visant à démontrer la pertinence d'un tel concept et regroupés selon trois axes :

- un axe mécanique du vol et contrôle, en parallèle duquel ce travail de thèse s'est déroulé ;
- un axe aérodynamique instationnaire à bas Reynolds ;
- un axe matériaux, structures et actionneurs.

Concernant le deuxième axe en particulier, un dispositif expérimental a été développé dans le but d'une part d'approfondir la compréhension des phénomènes aérodynamiques mis en jeu sur une aile battant à faible Reynolds, et d'autre part d'obtenir des modèles précis de coefficients d'efforts qui puissent être utilisés par la suite pour simuler la dynamique du vol d'un tel engin [Paquet 2004]. Ce dispositif se compose d'une aile battant dans de l'eau afin de reproduire l'écoulement de faible Reynolds caractéristique du vol des insectes, comme dans le cas de *RoboBee*. À la différence de ce dernier, l'aile est toutefois capable

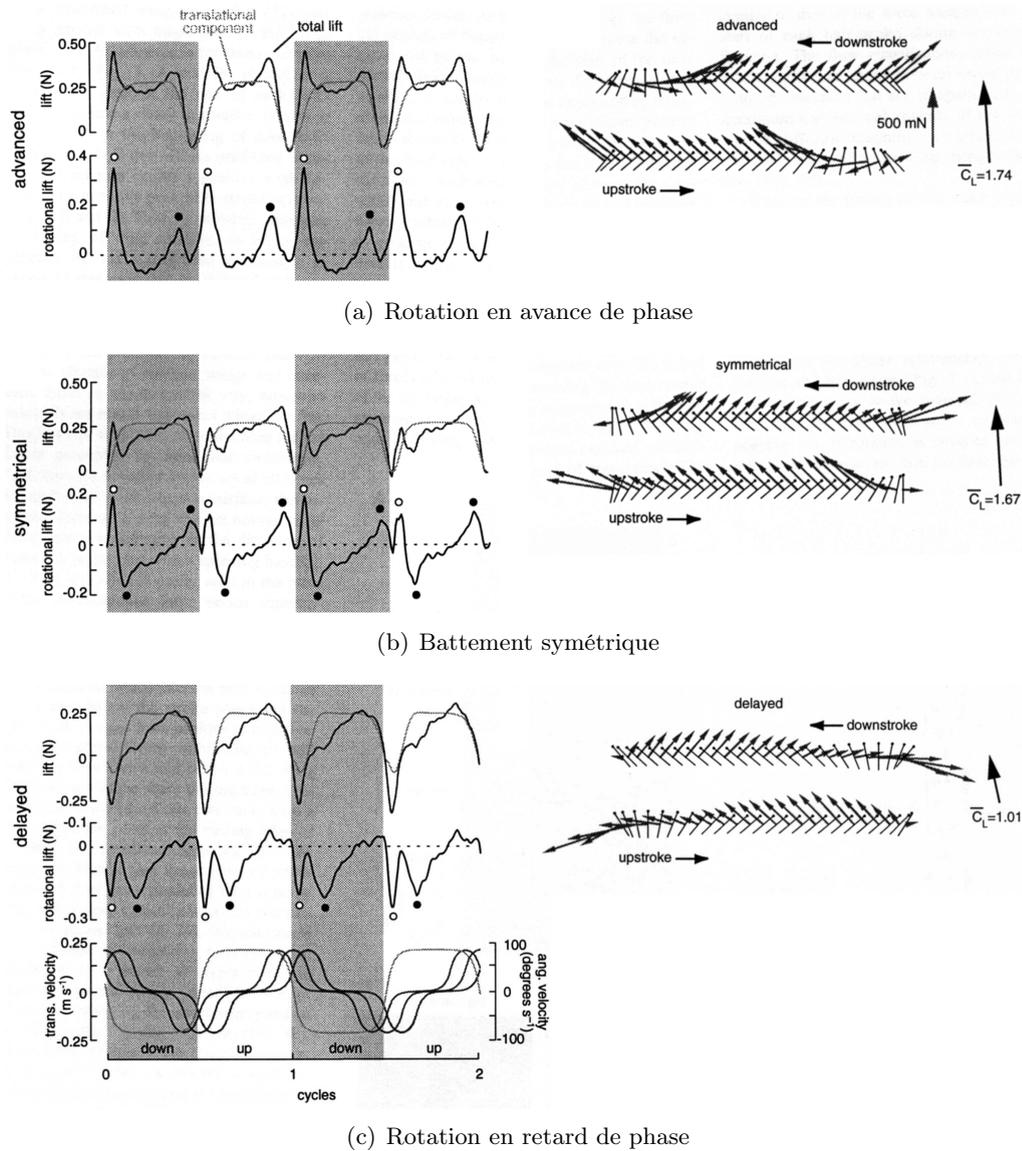


FIG. 1.28 – Effet du déphasage de la rotation sur la portance (à gauche : mesures expérimentales, à droite : visualisation de l'effort instantané) [Dickinson *et al.* 1999]

d'effectuer un mouvement de translation au sein d'un tunnel hydrodynamique, ce qui rend possible aussi bien l'étude du vol vibrant que celle du vol battu d'avancement. Une vue d'ensemble du dispositif est donnée sur la figure 1.29. Le dépouillement et l'analyse complète de ces essais sont actuellement en cours, et l'application de ceux-ci à la recherche de modèles aérodynamiques fait l'objet des travaux de thèse d'Antonin Peray [Peray *et al.* 2005].



FIG. 1.29 – Vue d'ensemble du tunnel hydrodynamique utilisé dans le cadre du projet *REMANTA*

1.3.3 Méthodes numériques

En parallèle aux études expérimentales qui viennent d'être décrites, d'autres équipes ont approché le vol des insectes à l'aide de codes d'aérodynamique numérique, calculant ainsi le champ de vitesse ou de pression autour d'une aile battant à faible Reynolds. On pourra notamment évoquer les résultats de Sun et Tang [Sun et Tang 2002], qui ont résolu les équations de Navier-Stokes dans le cas tridimensionnel afin d'étudier l'influence du mouvement de rotation de l'aile entre les battements avant et arrière. À cet effet, la vitesse de translation u_t de l'aile a été écrite sous la forme :

$$u_t/U = 0,5[1 + \cos \pi(\tau - \tau_1)/\Delta\tau_1] \quad (1.46)$$

pour $\tau \in [\tau_1; \tau_1 + \Delta\tau_1]$. U est la vitesse de l'aile durant les phases de translation uniforme, $\tau = tU/c$ est le temps adimensionné par U et la corde moyenne c , τ_1 est l'instant de début de décélération à la fin d'un battement, et $\tau_1 + \Delta\tau_1$ est l'instant de fin d'accélération au début du battement suivant. De manière similaire, la vitesse de rotation de l'aile définie ici comme la dérivée de l'incidence géométrique est donnée par :

$$\dot{\alpha}c/U = 0,5\dot{\alpha}_0[1 - \cos 2\pi(\tau - \tau_r)/\Delta\tau_r] \quad (1.47)$$

pour $\tau \in [\tau_r; \tau_r + \Delta\tau_r]$. τ_r est l'instant de début de la rotation et $\Delta\tau_r$ la durée de celle-ci. Les équations de Navier-Stokes en écoulement instationnaire incompressible s'écrivent quant à elles :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1.48)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} \quad (1.49)$$

avant le passage en coordonnées curvilignes, \mathbf{u} étant le vecteur vitesse aérodynamique et p la pression.

Les résultats confirment les études expérimentales menées par Dickinson *et al.* : on retrouve le fait qu'une rotation de l'aile en avance sur la fin du battement augmente fortement la portance, C_L pouvant même atteindre des valeurs plus de 2 fois supérieures au cas stationnaire.

Jane Wang, Birch et Dickinson [Jane Wang 2000, Jane Wang *et al.* 2004] ont réalisé quant à eux une étude comparative intéressante entre les mesures expérimentales en trois dimensions (3D) du montage *Robofly* et des calculs numériques bidimensionnels (2D) autour d'une aile de profil elliptique accomplissant un mouvement identique. Les équations de Navier-Stokes ont été écrites en coordonnées elliptiques (μ, θ) , afin de pouvoir utiliser un maillage resserré au voisinage de la surface de l'aile :

$$\frac{\partial(S\omega)}{\partial t} + (\sqrt{S}\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega = \nu\Delta\omega \quad (1.50)$$

$$\nabla \cdot (\sqrt{S}\mathbf{u}) = 0 \quad (1.51)$$

où ω est la vorticité, ν la viscosité cinématique et S un facteur d'échelle : $S(\mu, \theta) = \cosh^2 \mu - \cos^2 \theta$. Les résultats montrent que, en régime permanent, les coefficients aérodynamique (C_L notamment) diff rent sensiblement entre les calculs 2D et les mesures 3D. L'explication avancée réside dans la création et la séparation de deux tourbillons en bidimensionnel : comme on peut le voir sur les calculs du champ de vorticité fig. 1.30, le mouvement de translation de l'aile génère une paire de tourbillons, respectivement au bord d'attaque et au bord de fuite (a,b). Ceux-ci sont ensuite combinés en un dipôle lors de la rotation (c), puis détachés de l'aile au début du battement suivant (d).   l'opposé, il a été montré plusieurs reprises que le tourbillon de bord d'attaque en 3D était stabilisé par l'écoulement axial qui évacuait une partie de la vorticité, et contribuait ainsi à augmenter la portance instantanée en retardant le décrochage.

Cependant, les résultats 2D se rapprochent davantage des mesures 3D sous certaines conditions, notamment lorsque l'aile ne parcourt qu'un trajet réduit à chaque battement. L'explication avancée est que le dipôle tourbillonnaire n'aurait alors pas le temps de se détacher, ce qui rejoindrait l'hypothèse proposée par Dickinson [Dudley 1999].

Rayner [Rayner 1979, Rayner 1995] a proposé quant à lui un modèle numérique de l'évolution du sillage d'un animal en vol stationnaire. Ce sillage est représenté par un empilement de n vortex en anneaux concentriques, chacun de ces vortex étant généré par un cycle de battement (fig. 1.31). Le rayon d'un vortex est calculé en fonction de la distribution de la circulation sur l'aile, la circulation étant elle-même fonction du poids et de la durée d'un battement.

En un point de coordonnées \mathbf{x} situé suffisamment loin d'un vortex d'intensité κ , la vitesse \mathbf{u} induite par celui-ci peut s'exprimer grâce à la formule de Biot et Savart :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = -\frac{\kappa}{4\pi} \oint \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{X}(s)) \wedge \mathbf{t}(s)}{|\mathbf{x} - \mathbf{X}(s)|^3} ds \quad (1.52)$$

\mathbf{X} étant la position du point courant sur le vortex de rayon R : $\mathbf{X} = R(\cos \theta \ \sin \theta \ 0)$ en coordonnées cylindriques, avec $\theta = s/R$. De plus \mathbf{x} est supposé appartenir à l'axe du vortex : $\mathbf{x} = (r \ 0 \ h)$, et $\mathbf{t} = d\mathbf{X}/ds$ (voir schéma 1.32).

En repérant chaque anneau par le vecteur $\bar{\mathbf{p}} = (\bar{R}, \bar{Z})$, où \bar{R} et \bar{Z} sont respectivement le rayon et l'ordonnée en coordonnées réduites, Rayner montre alors que la vitesse générée

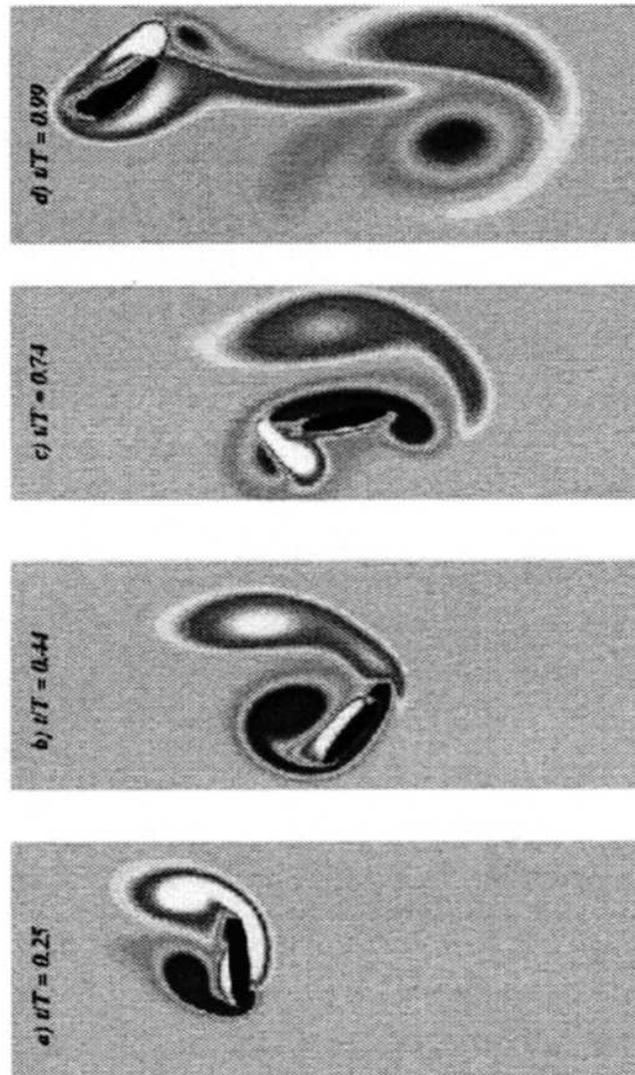
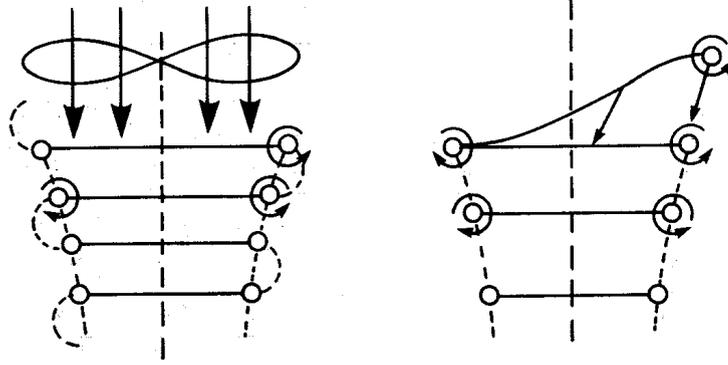


FIG. 1.30 – Création d'un dipôle tourbillonnaire en simulation numérique [Jane Wang 2000]



(a) Plan de battement horizontal (vol stationnaire normal) (b) Plan de battement incliné

FIG. 1.31 – Représentation du sillage sous forme d'une succession d'anneaux tourbillonnaires [Rayner 1979]

en un point $\bar{\mathbf{x}}$ par l'empilement tourbillonnaire est égale à :

$$\mathbf{u}(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{\kappa}{4\pi b R'} \sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{U}}(\bar{\mathbf{x}}; \bar{\mathbf{p}}_i) \quad (1.53)$$

avec

$$\bar{\mathbf{U}} \cdot \hat{\mathbf{x}} = \frac{4\bar{R}(\bar{z} - \bar{Z})H(e)}{[(\bar{r} + \bar{R})^2 + (\bar{z} - \bar{Z})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1.54)$$

$$\bar{\mathbf{U}} \cdot \hat{\mathbf{z}} = \frac{4\bar{R}(\bar{R}G(e) - \bar{r}H(e))}{[(\bar{r} + \bar{R})^2 + (\bar{z} - \bar{Z})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1.55)$$

$$e^2 = 4\bar{r}\bar{R}[(\bar{r} + \bar{R})^2 + (\bar{z} - \bar{Z})^2]^{-1} \quad (1.56)$$

H et G sont des fonctions obtenues à partir d'intégrales elliptiques. Quant à la formation de l'empilement, une construction itérative est proposée, en divisant la durée T_w d'un battement en L pas de calcul, l étant le pas courant ($0 < l < L$). L'évolution de l'anneau $\bar{\mathbf{p}}_j$ est alors donnée par :

$$\bar{\mathbf{p}}_j^l = \bar{\mathbf{p}}_j^{l-1} + \frac{\pi f'}{2L} \left\{ \bar{\mathbf{U}}_s(\bar{\mathbf{p}}_j^{l-1}) \mathbf{z} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \bar{\mathbf{U}}(\bar{\mathbf{p}}_j^{l-1}; \bar{\mathbf{p}}_i^{l-1}) + f_v \left(\frac{(l-1)T_w}{L} \right) \bar{\mathbf{U}}(\bar{\mathbf{p}}_j^{l-1}; \bar{\mathbf{p}}_{n+1}) \right\} \quad (1.57)$$

où $\bar{\mathbf{U}}_s$ désigne la vitesse induite par un anneau sur lui-même, f' un paramètre lié à la cinématique et la morphologie de l'animal, et où f_v représente l'effet de la vorticité du disque sustentateur modélisant les ailes sur les anneaux du sillage.

Les résultats de la simulation pour un insecte et un oiseau sont reproduits respectivement fig. 1.33(a) et fig. 1.33(b). Il est intéressant de noter que pour un insecte, caractérisé en particulier par une valeur du paramètre f' comprise entre $5 \cdot 10^{-3}$ et $15 \cdot 10^{-3}$, le sillage est plutôt resserré au voisinage de l'animal, alors que les anneaux sont plus espacés dans le cas d'un oiseau. Cela porte indirectement Rayner à conclure que la théorie du disque

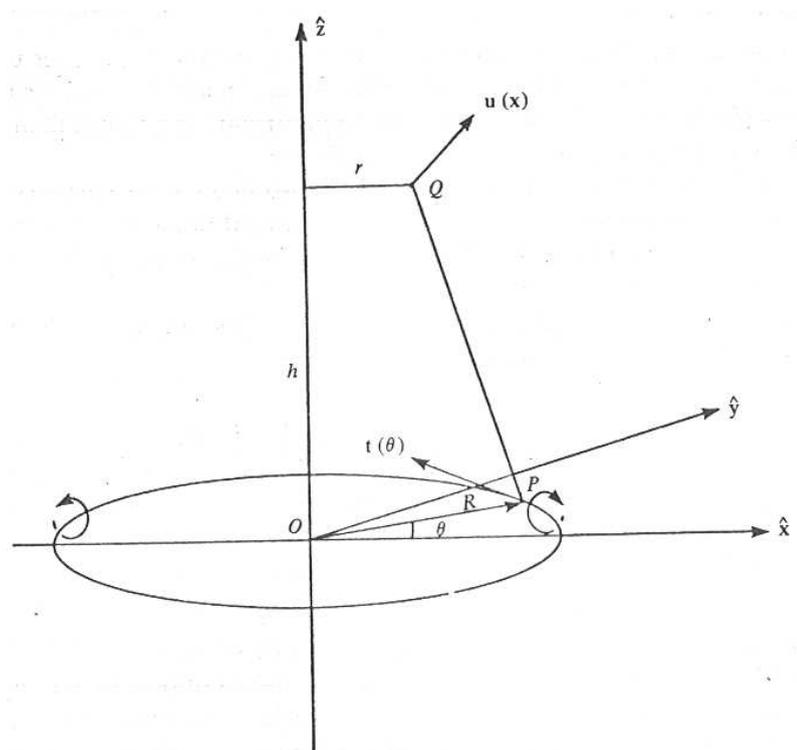


FIG. 1.32 – Notations pour le calcul de la vitesse induite par un anneau tourbillonnaire [Rayner 1979]

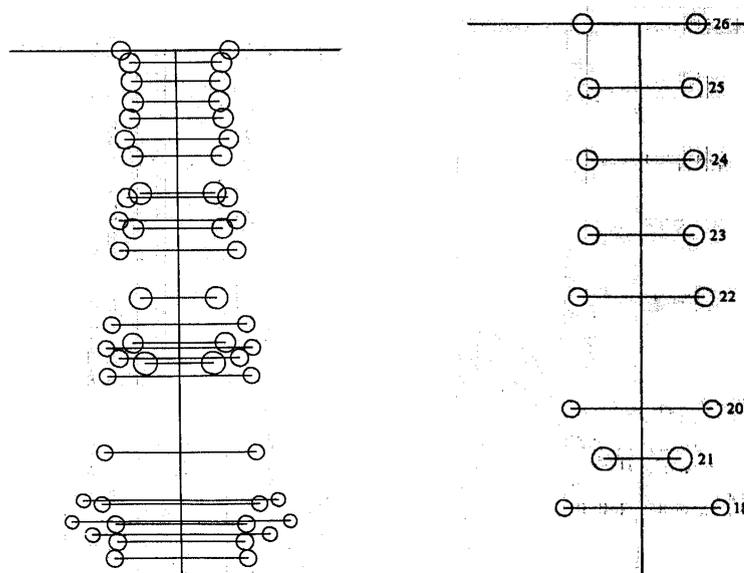
sustentateur, modélisant l'écoulement aval comme un tube de courant continu (cf. fig. 1.8 p. 19) est une bonne approximation dans le cas du vol des insectes seulement. On note en outre que dans le cas d'un oiseau, la dynamique lente de certains anneaux font que ceux-ci peuvent se retrouver dépassés par d'autres, ce qui modifie en permanence la structure du sillage : on voit en particulier que l'anneau 19 est sorti du champ de la figure avant le 18. Enfin, on remarque une interruption en aval dans le sillage de l'insecte, et Rayner y voit une explication possible pour les légères oscillations verticales de la position d'un insecte en vol stationnaire.

1.4 Vers des drones à ailes battantes

Toutes ces études ont grandement contribué à dévoiler un peu du mystère entourant la physique du vol animal. Cependant, alors que la plupart des entomologistes et ornithologues n'y voyaient qu'un pas de plus vers l'approfondissement des connaissances dans leurs domaines, d'autres envisageaient déjà l'application de ces résultats pour concevoir des engins volants d'un nouveau type : les microdrones.

1.4.1 Intérêts et concepts à l'étude

Un drone ou UAV (*Unmanned Air Vehicle*) est un engin volant autonome, utilisé principalement à des fins d'observation. Les modèles Global Hawk et Predator, d'envergures



(a) Cas d'un insecte standard, $f' = 0,015$ (b) Cas d'un oiseau standard, $f' = 0,15$

FIG. 1.33 – Résultats de simulation représentant la structure du sillage [Rayner 1979]

respectives de 30 et 15 m, ont ainsi été employés avec profit par l'armée américaine durant les derniers conflits armés pour des missions de renseignement, voire d'élimination de cibles. L'intérêt est en premier lieu de ne pas risquer la vie d'un pilote humain ; de plus ces engins s'avèrent beaucoup plus économiques en termes de maintenance sur le long terme que des appareils classiques. Durant les dernières années, la recherche dans le secteur des drones s'est toutefois concentrée vers une nouvelle dimension : celle de la miniaturisation. Le but est de concevoir des engins autonomes de taille suffisamment réduite pour pouvoir être emportés et opérés par un seul fantassin, ce qui reste impossible avec les drones actuels. Le but est d'offrir à celui-ci des « jumelles volantes » qui lui permettent de voir au-delà des obstacles immédiats constitués par le relief, la végétation ou les constructions [Davis *et al.* 1996]. On passerait alors d'une reconnaissance globale pour les drones actuels HALE (Haute Altitude Longue Endurance) et MALE (Moyenne Altitude Longue Endurance) à une reconnaissance locale immédiate, le drone miniature étant équipé de divers capteurs et caméras visible, infrarouge, etc. De tels engins trouveraient également leur utilité dans des applications civiles, par exemple pour la surveillance du trafic routier, des risques d'incendies, pour l'inspection d'ouvrages d'art ou plus généralement pour des interventions dans des milieux risqués ou difficiles d'accès. Les notions de minidrone et de microdrone, désignant des appareils d'envergures respectivement inférieures à 50 et 15 cm, firent alors leur apparition, et les recherches furent initiées et supportées par exemple par la DGA (Délégation Générale pour l'Armement) en France ou la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) aux États-Unis.

Plusieurs concepts furent alors envisagés. Le premier, et le plus simple à mettre en œuvre, est celui des microdrones à voilure fixe. Ils ne se résument toutefois pas à une simple miniaturisation de leurs homologues de grande taille, et optent la plupart du temps pour une conception de type aile volante : c'est l'ensemble de l'engin qui fait office de surface portante, la propulsion étant assurée par une ou plusieurs hélices. Parmi les projets actuels, mentionnons Carolo, de la Technische Universität Braunschweig [Kordes *et al.* 2003],



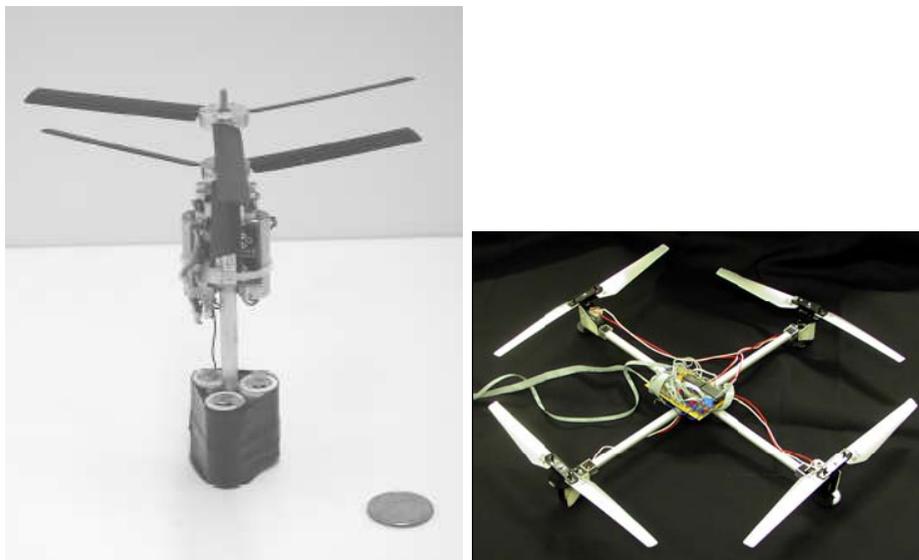
FIG. 1.34 – Quelques exemples de microdrones à voilure fixe

Black Widow d'AeroVironment [Grasmeyer et Keennon 2000] ou encore MIRADOR, collaboration entre l'ONERA et l'École Royale Militaire de Bruxelles [Keuter *et al.* 2002], représentés chacun sur la figure 1.34.

L'inconvénient principal de ce concept est qu'il n'autorise pas le vol stationnaire, au contraire des microdrones basés sur des voilures tournantes. Dans ce cas, un ou plusieurs rotors assurent la portance, et les déplacements latéraux sont générés par des dispositifs annexes (volets ou autres) ou bien en imposant des vitesses de rotation différentes aux rotors. Parmi les études en cours, citons le MICOR [Bohorquez *et al.* 2003] de l'université du Maryland basé sur deux rotors coaxiaux contrarotatifs, ou bien les nombreux projets basés sur une configuration à 4 rotors dénommée X4-Flyer [Eich *et al.* 2004] (voir fig. 1.35).

À côté de ces microdrones classiques en regard de leurs équivalents de grande taille, un troisième type a vu le jour il y a quelques années : celui des microdrones à ailes battantes, qui s'efforcent pour beaucoup d'imiter le vol animal, en particulier celui des insectes. De façon générale, la science visant à analyser les phénomènes vivants afin de concevoir des procédés qui s'en inspirent ouvertement a connu un essor certain ces derniers temps, à tel point qu'on lui a donné un nom : le biomimétisme ou bionique [Nachtigall 2005, Coineau et Kresling 1987].

Le concept de microdrone basé sur le vol des insectes n'a pas été envisagé par hasard : il offre en premier lieu l'avantage de pouvoir faire du vol stationnaire, ce qui est intéressant pour des missions en intérieur ou dans des espaces réduits [Szmelter et Żbikowski 2000]. Les microdrones à voilure tournante présentent aussi cette capacité, mais leur spectre acoustique est fortement marqué par la fréquence de rotation du rotor, ce qui en fait des



(a) MICOR (Univ. Maryland)

(b) IMAV, de type X4-Flyer (Univ. Oldenburg)

FIG. 1.35 – Microdrones basés sur des voilures tournantes

engins très reconnaissables de par leur signature sonore. De par la variété des phénomènes aérodynamiques mis en jeu, le spectre acoustique d'un microdrone à ailes battantes serait quant à lui beaucoup plus étalé et diffus, ce qui lui assurerait une supériorité certaine sur les concepts à voilure tournante pour les missions de reconnaissance où la discrétion est de mise. Ajoutons enfin qu'un drone à ailes battantes serait capable, à l'instar des insectes et oiseaux dont il s'inspire, d'une agilité appréciable aux basses vitesses, contrairement aux deux autres types de microdrones. De nombreux concepts ont ainsi vu le jour à travers le monde, aucun d'entre eux n'est réellement finalisé et opérationnel à l'heure actuelle, mais tous sont les vecteurs d'une activité de recherche intense. Nous avons déjà mentionné le projet MFI, citons par ailleurs l'entomoptère de GeorgiaTech [Michelson 1998] qui est un concept hybride volant/rampant, Microbat de Caltech [Pornsir-Sirirak *et al.* 2001], basé davantage sur le vol battu des oiseaux et des chauves-souris, ou encore BITE-Wing (pour *Biplane Insectoid Travel Engine*) [Jones et Platzer 2000], un projet mené au Naval Research Laboratory et basé sur deux paires d'ailes battant l'une sur l'autre, un mécanisme encore inédit dans la nature. Ces exemples sont illustrés sur la figure 1.36. En France, outre le PRF *REMANTA*, on peut mentionner les projets de développement de drones à ailes battantes ROBUR de l'équipe AnimatLab du LIP6 [Doncieux *et al.* 2004], ou bien les activités menées au LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble).

1.4.2 Difficultés technologiques et solutions proposées

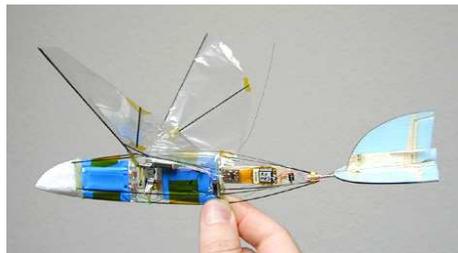
Outre les difficultés inhérentes à la compréhension du vol battu que l'on a résumées auparavant, le concept de microdrone à ailes battantes est aujourd'hui celui qui propose le plus de défis technologiques à relever : il demande de proposer un moyen inédit dans l'aviation pour générer simultanément les efforts de portance et de traînée, tout en concentrant les constituants du système tels les actionneurs, les capteurs, les batteries, etc. dans un volume le plus réduit possible. Sans prétendre couvrir de manière exhaustive l'ensemble



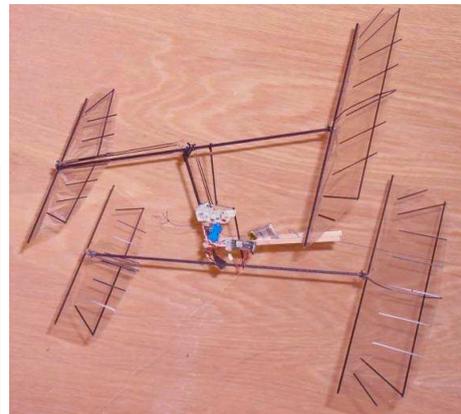
(a) MFI (Univ. Berkeley)



(b) Entomopter (GeorgiaTech)



(c) Microbat (Caltech)



(d) BITE-Wing (Naval Research Lab.)

FIG. 1.36 – Quelques projets en cours de microdrones à voilure battante

des problèmes technologiques posés, nous allons examiner quelques-unes des solutions envisagées dans le domaine des actionneurs, des matériaux, des capteurs ainsi que du contrôle du vol.

1.4.2.1 Actionneurs

L'un des principaux problèmes est la réalisation de dispositifs d'entraînement pour les ailes, capables de faire battre celles-ci à des fréquences suffisantes tout en conservant des dimensions réduites. Ici encore, les idées sont venues naturellement de l'observation de la source d'inspiration originale. On envisage en effet difficilement la construction de micro-moteurs suffisamment précis et rapides pour faire battre correctement les ailes, étant donné que les spécifications requises semblent hors de portée des technologies disponibles à l'heure actuelle. Dickinson, Lighton et McNeill Alexander [Dickinson et Lighton 1995, McNeill Alexander 1995] ont alors étudié avec attention le rendement musculaire η d'une drosophile *Drosophila hydei* en calculant celui-ci de deux manières différentes. Dans un premier temps, il a été supposé que les ailes étaient mues par des muscles exclusivement : ces derniers auraient alors la charge à chaque battement de s'opposer à la traînée mais également à l'inertie des ailes, en les accélérant en début de battement et en les freinant à la fin. En désignant respectivement par W_a et W_i les travaux des efforts aérodynamiques et inertiels, et par E la consommation énergétique métabolique, le rendement s'exprime alors sous la forme :

$$\eta = \frac{W_a + W_i}{E} \quad (1.58)$$

Toutefois plusieurs études antérieures [Luo 2002] ont montré que de nombreuses espèces d'insectes possédaient également des structures semi-rigides et élastiques, susceptibles de contribuer aux mouvements des ailes. Chez la drosophile, c'est le thorax qui peut ainsi emmagasiner en fin de battement une partie de l'énergie cinétique des ailes sous forme d'énergie potentielle élastique avant de la restituer pour le battement suivant, comme un système masse-ressort classique. Dans l'hypothèse où les ailes sont actionnées uniquement par un tel système résonnant, et en supposant de plus que celui-ci est parfait (c'est-à-dire sans amortissement), les travaux inertiels ne sont plus pris en compte dans le calcul du rendement :

$$\eta = \frac{W_a}{E} \quad (1.59)$$

Dickinson, Lighton et McNeill Alexander ont alors calculé le rendement sous ces deux hypothèses, en mesurant le métabolisme à partir de la consommation en oxygène de l'insecte. Dans le premier cas, le rendement trouvé est de 54%, soit une valeur physiologiquement impossible. Sous l'hypothèse d'actionneurs élastiques parfaits, on trouve 9%, ce qui représente une valeur beaucoup plus plausible. Les auteurs en ont alors conclu qu'environ 90% de l'énergie nécessaire au battement était fournie par des structures élastiques, contre 10% seulement par les muscles de l'insecte. Ces résultats ont été mis à profit pour la réalisation du dispositif d'entraînement des ailes du projet MFI de l'université de Berkeley [Yan *et al.* 2001] : chaque aile est mise en mouvement par l'action conjuguée de deux mécanismes de type 4 barres (fig. 1.37(a)) afin d'assurer à la fois le battement et la rotation. La déformation d'un de ces mécanismes 4 barres $CDEF$ (voir fig. 1.37(b)) est assurée par la tension d'un câble C_1C_2 , elle-même provoquée par les mouvements de translation d'un actionneur piézo-électrique P_1P_2 , de type PZN-PT. Le tout fait ainsi office de structure résonante au voisinage de la fréquence propre de l'actionneur [Rakotomamonjy 2002]. Deux difficultés majeures subsistent toutefois : d'une part, l'amplitude de translation des actionneurs piézo-électriques actuellement disponibles reste trop limitée pour pouvoir envisager

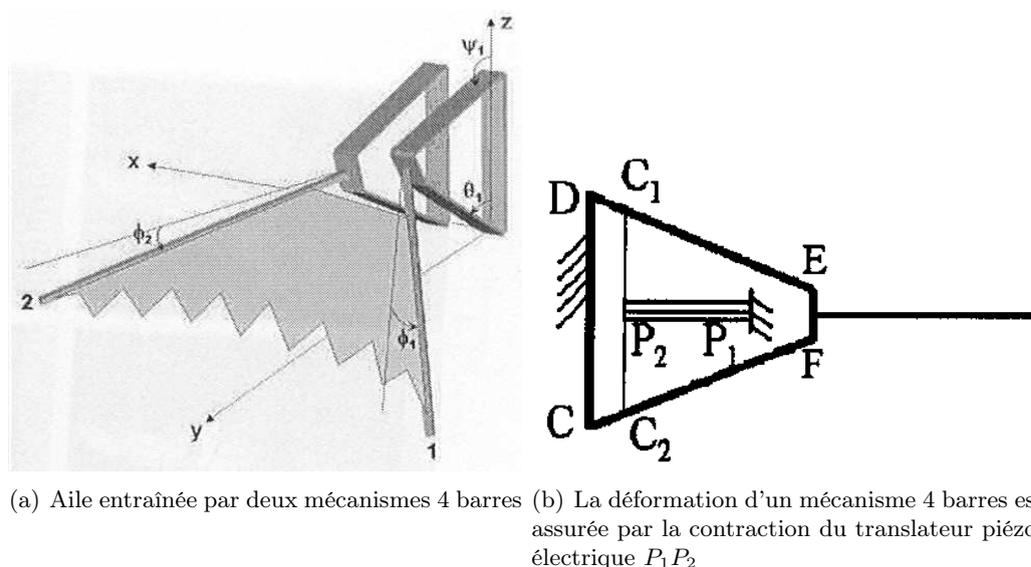


FIG. 1.37 – Actionneurs choisis pour le MFI (Berkeley) [Fearing *et al.* 2000, Yan *et al.* 2001]

des déplacements angulaires suffisants, même à l'aide de dispositifs mécaniques d'amplification. D'autre part, même si de tels actionneurs sont en principe capables d'entraîner les ailes en battement, il demeurerait délicat de contrôler en temps réel la forme des mouvements accomplis, dans le but de moduler les efforts aérodynamique et donc de permettre le contrôle du vol.

Mentionnons également dans un genre similaire l'utilisation de polymères diélectriques [Kornbluh *et al.* 1998], particulièrement performants vis-à-vis des déformations obtenues et des contraintes générées : ceux-ci offrent notamment des amplitudes de mouvement jusqu'à 100 fois supérieures à celles des translateurs piézo-électriques. On peut voir sur la figure 1.38 le fonctionnement de ce type de matériau, utilisé en tant que « muscle artificiel » (EPAM, pour *Electrostrictive Polymer Artificial Muscle*) dans plusieurs projets de robotique.

D'autres concepts de muscles artificiels ont été étudiés, parmi lesquels le RCM ou *Reciprocating Chemical Muscle* [Michelson 1998]. Celui-ci se base sur des réactions non plus électriques mais chimiques, ce qui présente un avantage certain étant donné que celles-ci fournissant une quantité d'énergie par unité de masse très supérieure, et que la masse admissible est justement un facteur critique dans la conception des microdrones. De telles réactions se déroulent sans combustion (d'où le terme de muscle et non de moteur), ce qui rendrait le fonctionnement du RCM possible sous l'eau, et elles pourraient également fournir l'électricité nécessaire à l'avionique embarquée. Les dernières évolutions en date de RCM (4^e génération) offrent une bande passante allant de 15 à 68 Hz.

1.4.2.2 Matériaux

Plusieurs études, dont celle menée par Okamoto, Yasuda et Azuma [Okamoto *et al.* 1996], ont porté sur la structure des ailes des insectes et la relation entre celle-ci et les performances aérodynamiques. Étant donné la portance très supérieure aux prédictions stationnaires, on

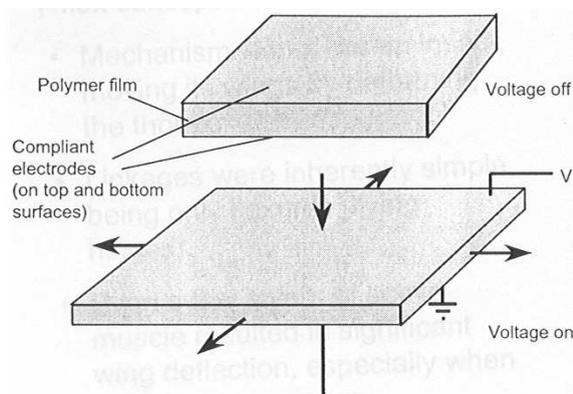


FIG. 1.38 – Déformation d’un polymère diélectrique soumis à une différence de potentiel [Kornbluh *et al.* 1998]

peut en effet légitimement supposer que les micro-rugosités à la surface de l’aile contribuent elles aussi d’une certaine manière à accroître cet effort, en modifiant de manière favorable les caractéristiques de l’écoulement aérodynamique. Okamoto et son équipe ont alors comparé les performances d’ailes de libellule *Anax parthenope julius* avec celle de profils standards, et ont conclu que le relief caractéristique en « zig-zag » du profil de l’aile de libellule, reproduit sur la figure 1.39, contribue à augmenter le coefficient de portance maximum ainsi que la finesse.

Il reste difficile à l’heure actuelle de reproduire avec précision un profil aussi complexe pour en équiper un microdrone. Certaines équipes ont toutefois tourné davantage leurs recherches vers les matériaux et techniques de construction les plus adaptées. Au sein du projet Microbat, Pornsin-Sirirak, Tai, Nassef et Ho [Pornsin-Sirirak *et al.* 2000] ont ainsi réussi à concevoir des ailes en alliage à 88% de titane en utilisant les technologies MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*). L’avantage de celles-ci sur les méthodes plus traditionnelles est qu’elles autorisent une précision et surtout une répétabilité beaucoup plus importante lors de la réalisation. Il devient dès lors très facile de fabriquer une série d’ailes en ne faisant varier qu’un seul paramètre, comme par exemple l’épaisseur du bord d’attaque. De plus, les caractéristiques aérodynamiques semblent suffisamment intéressantes pour que ces technologies ne soient pas perdues de vue.

1.4.2.3 Capteurs

Le biomimétisme a également influencé la conception de différents types de capteurs destinés à fournir aux microdrones des informations sur leur environnement extérieur. On n’évoquera pas ici les capteurs propres à la mission de l’engin, tels que des caméras infrarouges ou divers dispositifs de reconnaissance radar, mais plutôt les senseurs permettant au microdrone de s’orienter et d’assurer ainsi sa navigation de manière autonome.

Les insectes utilisent naturellement leur vision pour se repérer, et ce de deux manières différentes. En premier lieu, il a été montré qu’un insecte en mouvement de translation uniforme maintient sa trajectoire en s’assurant que le flux optique reçu reste constant. En considérant un insecte en vol dont le regard maintient une direction fixe vers le sol, ce flux optique peut être défini par [Ruffier *et al.* 2003] :

$$\Omega = \frac{v}{D} \sin \phi \quad (1.60)$$

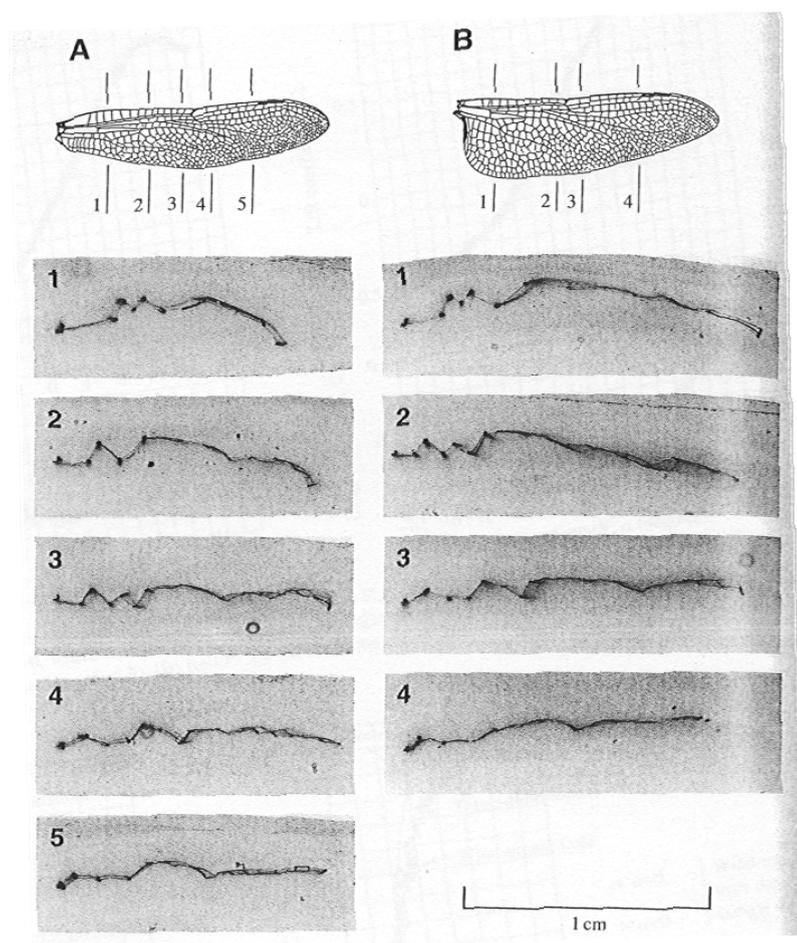


FIG. 1.39 – Profil d'aile de libellule suivant différentes sections - **A** aile avant - **B** aile arrière [Kesel 2000]

v étant la vitesse de translation par rapport au sol, D la distance entre l'insecte et le point visé au sol et ϕ l'angle entre la direction du regard et la vitesse. Des capteurs de flux basés sur cette modélisation ont été utilisés avec succès pour le contrôle de microdrones de type hélicoptère.

Outre les organes assurant leur vision principale, les insectes disposent également d'yeux simplifiés nommés ocelles, généralement au nombre de trois, et sensibles aux variations de luminosité. On pense à l'heure actuelle que ces ocelles sont utilisés par l'animal pour déterminer son attitude en repérant la luminosité du ciel. Enfin, à côté de ces capteurs visuels, les insectes disposent également de senseurs inertiels. En effet, chez certaines espèces, les ailes arrière ont progressivement dégénéré au cours de l'évolution de l'espèce pour donner naissance à des organes sensoriels appelés haltères. Celles-ci battent en opposition de phase avec les ailes, et la conséquence de la combinaison de ce mouvement relatif avec les changements d'attitude de l'insecte est la génération d'une force de Coriolis. Des études [Chan *et al.* 1998] ont alors montré que le système nerveux de l'insecte était capable de mesurer cette force et d'en extraire les vitesses de rotation par rapport au repère terrestre : l'animal disposerait ainsi d'un gyroscope naturel et précis. Tous ces différents types de capteurs ont été reproduits artificiellement par les chercheurs du projet MFI [Wu *et al.* 2003], afin d'en comparer les efficacités respectives dans le cadre du contrôle du vol de microdrones.

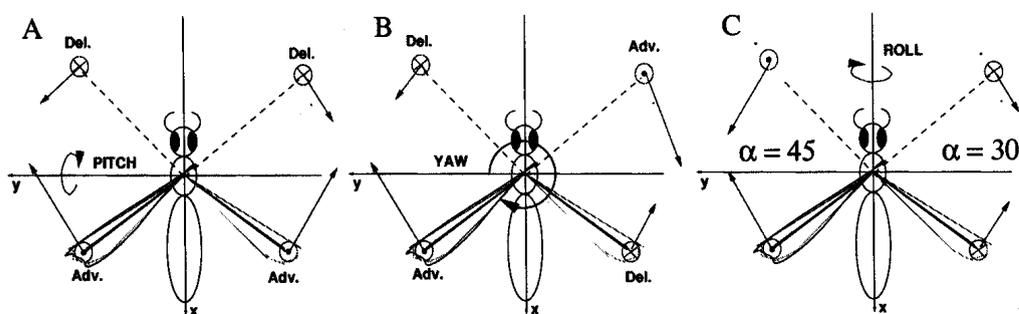
1.4.2.4 Contrôle du vol

Dans le cadre du projet MFI (*Micromechanical Flying Insect*) de l'université de Berkeley, Schenato et Sastry se sont également intéressés au vol des insectes du point de vue de la mécanique du vol. La stratégie de contrôle qu'ils proposent est toutefois plus simple que les précédentes, puisqu'ils évoquent la possibilité de contrôler l'attitude *via* des couples appliqués sur les trois axes par dissymétrisation du battement. Ainsi, pour obtenir un moment de tangage, il est nécessaire d'accroître la portance sur la partie arrière du battement. D'après Dickinson [Sane et Dickinson 2001], il suffit pour cela que la rotation ait lieu en avance par rapport à la fin du battement lors du battement arrière, et en retard lors du battement avant. En procédant ainsi, un supplément de portance (resp. une déportance) sera produit à la fin du battement arrière (resp. avant), ce qui aura pour effet de produire un moment de tangage négatif, c'est-à-dire à piquer.

Une démarche similaire peut être appliquée pour la génération de moments en roulis et en lacet. Pour le roulis, la portance doit être supérieure sur une aile donnée, par exemple sur l'aile gauche pour un roulis positif. Il suffit donc pour cela d'avancer le déphasage de la rotation de l'aile gauche par rapport à celle de l'aile droite durant tout le mouvement. Enfin pour le lacet on mettra à profit les efforts de traînée en créant des déphasages symétriques par rapport au centre du microdrone. Toutes ces stratégies de commande en boucle ouverte sont illustrées sur la figure 1.40.

Pour finir, la commande en boucle fermée d'un modèle du MFI [Schenato *et al.* 2002], dénommé VIFS (*Virtual Insect Flight Simulator*), a été entreprise. La démarche choisie consiste à exprimer dans un premier temps la relation entre les dérivées des variables de position du modèle et les efforts extérieurs appliqués à l'aide des théorèmes de la mécanique newtonienne. Ainsi, le principe fondamental de la dynamique permet d'écrire la relation suivante entre le vecteur $\Theta = {}^t[\phi \ \theta \ \psi]$ des angles d'Euler repérant l'attitude du corps et les couples exercés τ^b :

$$\ddot{\Theta} = (IW)^{-1}[\tau^b - W\dot{\Theta} \times IW\dot{\Theta} - I\dot{W}\dot{\Theta}] \quad (1.61)$$

FIG. 1.40 – Contrôle d'attitude *via* les déphasages des rotations [Deng *et al.* 2001]

dans laquelle W est le tenseur associé au pseudo-vecteur rotation et I est le tenseur d'inertie. Puis les mouvements des ailes sont paramétrés afin de définir les entrées du système, et celles-ci sont reliées aux couples exercés par des relations obtenues de manière empirique à l'aide de simulations. La fonction reliant les couples moyens aux paramètres de commande α_r , α_l et γ est de la forme :

$$\Psi : \begin{cases} \bar{\tau}_\psi &= a_{11}\alpha_r + a_{12}\alpha_l + \delta_\psi \\ \bar{\tau}_\theta &= a_{21}\alpha_r + a_{22}\alpha_l + \delta_\theta \\ \bar{\tau}_\eta &= c\gamma^3 + \delta_\eta \end{cases} \quad (1.62)$$

où les différents coefficients sont constants. Connaissant l'attitude à atteindre, on en déduit alors les couples à exercer *via* la relation (1.61), puis la commande à appliquer est calculée à l'aide de la paramétrisation inverse $\Psi^{-1}(\cdot)$. La linéarisation de ces équations permet l'utilisation des méthodes classiques de commande, allant du retour d'état à la commande robuste.